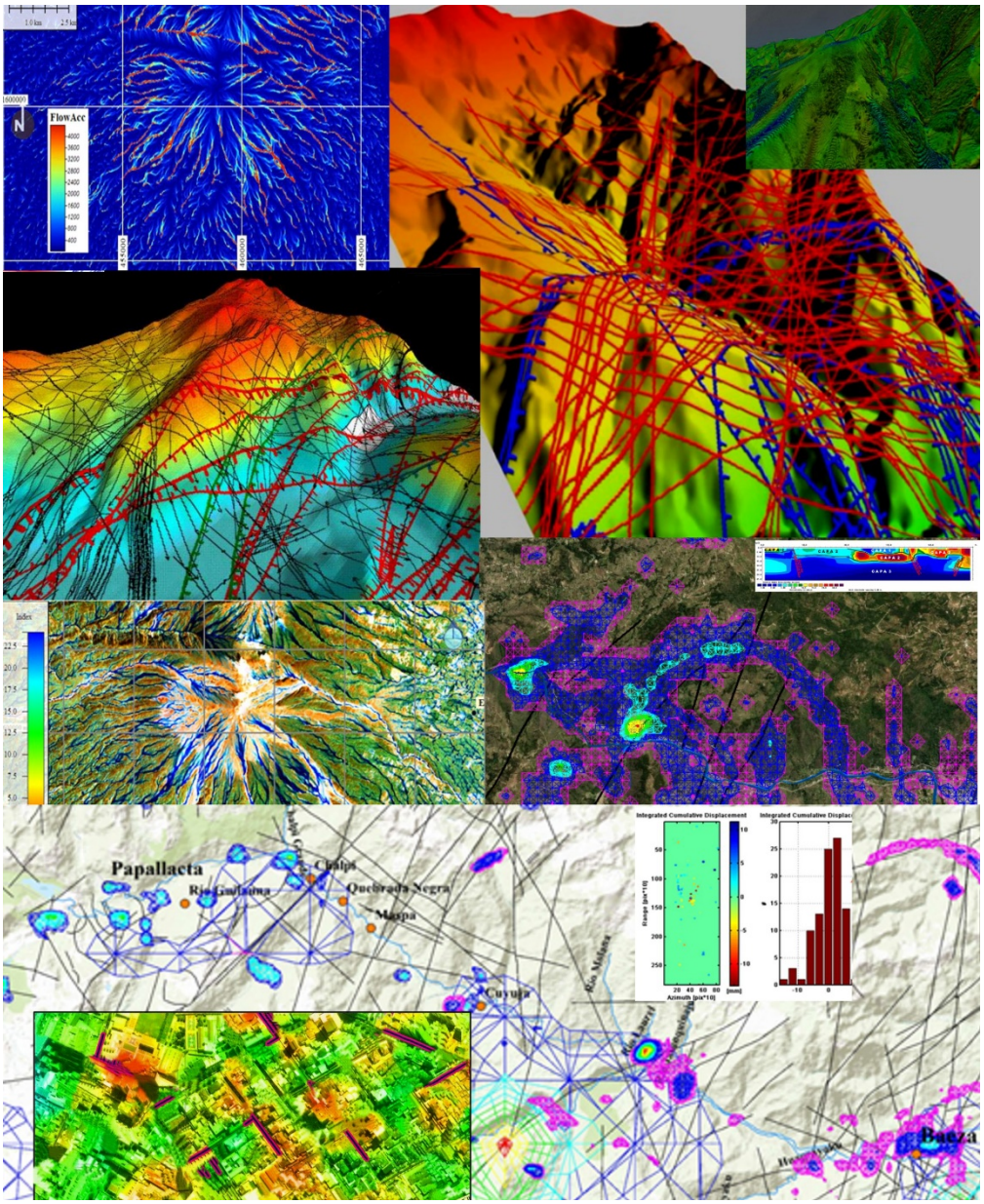
VNiVERSiDAD D SALAMANCA
CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

800 AÑOS
VNiVERSiDAD D SALAMANCA

Tesis Doctoral:

GEOMÁTICA APLICADA AL ANÁLISIS DE RIESGOS GEOLÓGICOS



Marcelo Cando Jácome

Salamanca, 2020

GEOMÁTICA APLICADA AL ANÁLISIS DE RIESGOS GEOLÓGICOS

Memoria presentada en el Departamento de Geología (Aréa Geodinámica Externa) por D. **Marcelo Cando Jácome** para optar al grado de **Doctor en Geología** por la **Universidad de Salamanca**.

DIRECTOR:

Dr. Antonio M. Martínez Graña.

Salamanca, Mayo 2020

El Doctor D. Antonio M. Martínez Graña

CERTIFICA QUE:

Marcelo Cando Jácome ha realizado en el programa de Doctorado del Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca y bajo mi supervisión, la Tesis Doctoral titulada:

"Geomática Aplicada al Análisis de Riesgos Geológicos"

Y para que conste, firmo el presente documento en Salamanca, en mayo de 2020

El Director:

Fdo.: Antonio M. Martínez Graña

El doctorando:

Fdo.: Marcelo Cando Jácome

El doctor D. Antonio Martínez Graña, Profesor Titular del Área de Geodinámica Externa en el Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias (Universidad de Salamanca),

AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada **"Geomática Aplicada al Análisis de Riesgos Geológicos"** mediante el formato de compendio de artículos/publicaciones según la normativa aprobada por la comisión de Doctorado y Posgrado de la Universidad de Salamanca el 25 de febrero de 2013.

La presente Tesis Doctoral está constituida por un compendio de cinco artículos científicos publicados en revistas internacionales de alto impacto y su aplicación metodológica ha permitido otros dos artículos que se encuentran en revisión anónima por pares:

1. Cando Jácome, M.; Martínez-Graña A. (2018). Numerical modeling of flow patterns applied to the analysis of the susceptibility to movements of the ground. Geosciences, 8, 340 pp. ISSN 2076-3263. Special Issue Tectonics and Morphodynamics. Categories: Geosciences Multidisciplinary (32/182-Q1). Impact Factor Scopus: 1.97.
   https://doi.org/10.3390/geosciences8090340

2. Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A. (2019). Determination of primary and secondary lahar flow paths of the Fuego Volcano (Guatemala) using morphometric parameters. Special Issue Remote Sensing of Volcanic Processes and Risk. Remote Sensing, 11 (6), 727. Ed.: MDPI. ISSN 2070-4292. Impact Factor JCR_2018: 4.118. Categories: Remote Sensing (7/30-Q1).
   https://doi.org/10.3390/rs11060727

3. Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A. (2019). Differential interferometry, structural lineaments and terrain deformation analysis applied in Zero Zone 2016 Earthquake (Manta, Ecuador). Environmental Earth Sciences, 78:499. Ed.: Springer Nature. ISSN 1866-6280. Impact Factor JCR_2018: 1.871. Categories: Water Resources (51/91- Q3), Geosciences Multidisciplinary (108/196-Q3).
   https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-019-8517-4

4. Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A.; Valdés, V. (2020). Prevention of Disasters Related to Extreme Natural Ground Deformation Events by Applying Spatial Modeling in Urban Areas (Quito, Ecuador). *Int. J. Environ. Res. Public Health*, *17*, 753. https://doi.org/10.3390/ijerph17030753

5. Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A.; Valdés, V. (2020). Detection of terrain deformations by InSAR techniques and geophysical methods (Zaruma City, Ecuador). Remote Sensing, 12 (10), 1598. Ed.: MDPI. ISSN 2070-4292. Impact Factor JCR_2018: 4.118. Categories: Remote Sensing (7/30-Q1). https://doi.org/10.3390/rs12101598

Agradecimientos

Este documento es un documento histórico que comenzó en 1995 con la simulación primaria que realizamos en Pascal y Fortran de los flujos de la escorrentía superficial del agua de precipitación basada en los métodos y modelos hidrológicos como el D8, desarrollados por Ángel M. Felicísimo, Emilio Chuvieco, David Tarboton y otros pioneros en los inicios reales de la Geomática. A ellos en primer lugar mi agradecimiento por publicar sus estudios y poner de manera gratuita esta información a disposición de la comunidad científica internacional. Mi segundo agradecimiento es para quién me ayudó a conseguir la suficiencia en la investigación dentro del conocimiento de la Geodinámica Externa, Jerónimo López Martínez, insigne español, eminencia mundial en esta Ciencia.

Culmina con esta tesis un objetivo fijado hace ya quince años, cuando pisé por primera ocasión la bella España y la hermosa ciudad de Madrid, y culmina con un agradecimiento infinito a mi director de tesis Dr. Antonio Martínez Graña, quien con mucha paciencia depositó su confianza en mí para alcanzar los objetivos fijados en esta línea de investigación, con su apoyo continuo y soporte técnico.

Agradecer también a quienes me ayudaron en los procesos académicos para regularizar mis estudios en especial a la Dra. Mercedes Suarez Barrios quien me ha tendido la mano a la distancia.

Finalmente, agradecer a mi Familia, Silvanita, Fabrizio, Raúl y Violeta que, con amor y cariño, ayudaron a llevar este proceso con paciencia y dándome el ánimo necesario para culminarlo.

ÍNDICE:

RESUMEN…….…. 13

ABSTRACT ……. 16

1. INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS …….. 19

1.1. Introducción ……. 21
1.2. Antecedentes ……... 24
1.2.1. Métodos Previos: Modelo Hidrológico Básico D8. ……..…… 28
1.2.1.1. Submodelo A: Modelado Numérico de Patrones de Flujo…….... 39
1.2.1.2. Submodelo B: Modelado de Deformaciones del Terreno ……... 49
1.2.1.3. Submodelo C: Modelado Mixto A+B…….…….... 59
1.2.2. Otros Métodos propuestos de Geomática Aplicada…… 68
1.3. Objetivos……...……... 73

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA.……..…….. 77

2.1. Modelo hidrológico básico D8…….…….. 78
2.2. Modelo aplicado a lahares volcánicos……..……... 85
2.3. Modelo aplicado a la deformación del terreno…….. 105
2.4. Modelo aplicado a la subsidencia del terreno……...122
2.5. Modelo de sintaxis del espacio…….…….……. 137

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 156

3.1. Resultados aplicación método modelado numérico de patrones de flujos aplicados al análisis del peligro por movimientos del suelo ….....158
3.1.1. Discusión del método del modelado numérico de patrones de flujos ……..……...168
3.1.2. Conclusiones del método del modelado numérico de patrones de flujos ……....169
3.2. Resultados determinación de las rutas de flujo de lahares primarios y secundarios de un volcán utilizando parámetros morfométricos ……....170
3.2.1. Discusión del trazado de rutas de flujo de lahares primarios y secundarios ……..……..…177
3.2.2. Conclusiones del trazado de rutas de flujo de lahares primarios y secundarios …….……..……178
3.3. Resultados del análisis de la deformación del terreno por interferometría diferencial y concentración de lineamientos geológicos-estructurales apoyados por investigación geofísica-geotécnica ……..……....180

3.3.1. Discusión del análisis de la deformación del terreno por Interferometría diferencial y concentración de lineamientos geológicos -estructurales……194
3.3.2. Conclusiones del análisis de la deformación del terreno por Interferometría diferencial y concentración de lineamientos geológicos -estructurales ……196
3.4. Resultados detección de deformaciones del terreno utilizando técnicas dinsar en relación con los resul-tados del hundimiento del terreno ..…...198
3.4.1. Discusión de la detección de deformaciones del terreno utilizando técnicas DINSAR ……201
3.4.2. Conclusiones de la detección de deformaciones del terreno utilizando técnicas DINSAR…….203
3.5. Resultados de la prevención de desastres relacionados con eventos extremos de deformación natural del suelo mediante la aplicación de métodos espaciales en áreas urbanas ……...205
3.5.1. Discusión de la prevención de desastres relacionados con eventos extremos de deformación natural del suelo ……212
3.5.2. Conclusiones de la prevención de desastres relacionados con eventos extremos de deformación natural del suelo ……213

4. CONCLUSIONES GENERALES ….. 215
4.1. Conclusiones Generales. …… 217
4.2. General Conclussion…… 219

5. REFERENCIAS …… 221

6. ARTÍCULOS …… 234

6.1. ARTÍCULO 1: Numerical Modeling of Flow Patterns Applied to Analysis of Susceptibility to Movements of the Ground……..…236
6.2. ARTÍCULO 2: Determination of Primary and Secondary Lahar Flow Paths of the Fuego Volcano (Guatemala) Using Morphometric Parameters……252
6.3. ARTÍCULO 3: Differential interferometry, structural lineaments and Terrain deformation analysis applied in Zero Zone 2016 Earthquake (Manta, Ecuador)……..272
6.4. ARTÍCULO 4: Prevention of Disasters Related to Extreme Natural Ground Deformation Events by Applying Spatial Modeling in Urban Areas (Quito, Ecuador)……287
6.5. ARTÍCULO 5: Detection of Terrain Deformations Using InSAR Techniques in Relation to Results on Terrain Subsidence (Ciudad de Zaruma, Ecuador)……308

RESUMEN

Esta Tesis Doctoral se ha realizado mediante el formato de compendio de artículos, con objetivos claramente diferenciados y concatenados entre sí con el fin de ampliar el conocimiento sobre la implementación de nuevas metodologías en Geomática Aplicada utilizando información de uso público para la gestión de la peligrosidad natural en la reducción del Riesgo Geológico. Se ha puesto énfasis en hacer conocer a la comunidad los beneficios de analizar los riesgos geológicos con anticipación para identificarlos espacialmente y establecer correcciones estructurales como criterio de prevención, lo que implica elaborar previamente mapas de zonas susceptibles a movimientos en masa, inundaciones, erosión hídrica, mapas sismo-tectónicos-volcánicos y de problemas geotécnicos, a partir de la Geomática Aplicada (Teledetección, Sistemas de Información Geográfica y Modelación Numérica) e información espacial georeferenciada. Se desarrollan en esta Tesis cinco métodos geomáticos aplicados a la reducción del riesgo geológico, validados mediante su aplicación en diferentes riesgos geológicos de varias regiones de Ecuador.

El primer Método de partida, es el Modelo Hidrológico Básico D8, que se ha dividido en tres submodelos: (a) El Modelo Numérico de Patrones de Flujo de escorrentía superficial como generador de movimientos en masa, (b) El Modelo de Deformaciones del Terreno, utilizando Líneas de Rotura Morfológica, y (c) un modelo mixto en el que interactúan los dos anteriores.

Desde la década de los 80 en el Ecuador, hasta la actualidad, teniendo en cuenta la frecuencia con que los movimientos en masa ocurren en el territorio de Ecuador, se aplicaron métodos cartográficos heurísticos con ponderación de variables en un intervalo de 30 años, con el objetivo de mejorar los mapas de susceptibilidad ante estos eventos. Aunque aumentaron estos eventos catastróficos en más de 650 regiones del país, el desarrollo de modelos hidrológicos-morfológicos y de estabilidad de taludes permitieron determinar movimientos superficiales de ladera generando resultados eficientes que fueron comprobados con datos de campo. Como primer insumo dentro de esta metodología, se utilizó el concepto teórico del Modelo Hidrológico D8 para determinar los patrones de flujo de la escorrentía superficial del agua de precipitación que tienen influencia en la producción-transporte y deposición de sedimentos relacionados con los tipos de movimientos en masa que ocurren en el país.

Para determinar estos patrones de flujo por medio del Modelo Hidrológico D8, se extrajeron varios índices y parámetros morfométricos a partir de un modelo digital de elevaciones de alta resolución espacial de los que se derivaron: las pendientes, orientación de la pendiente, curvaturas, dirección-acumulación de flujo, longitud-magnitud de la pendiente y el índice de humedad topográfica. Estos parámetros se encuentran implementados en diferentes programas gratuitos como ArcView, SAGA, Flow-R, QGis, Tardem, Taude, Terrain Analyst

System. Estos patrones de flujo de la escorrentía superficial del agua de precipitación, sirvieron para determinar lineamientos geológicos estructurales y su concentración que generalmente coincide con deformaciones superficiales del relieve que posiblemente son el origen de procesos de meteorización, erosión, deslizamientos superficiales, propagación lateral del complejo roca-suelo, flujos de masa y deformaciones gravitacionales profundas.

El segundo método es la determinación de las rutas de flujo de lahares primarios y secundarios en edificios volcánicos utilizando análisis de radar de apertura sintética interferométrica (InSAR), Modelo Numérico de lahares con LaharZ, índice de Estabilidad con SHALSTAB y parámetros morfométricos con SAGA. A partir del prime método que determina los patrones de flujo de la escorrentía superficial se desarrolla este segundo método para determinar las rutas que siguieron y pueden seguir lahares secundarios destructivos por lluvias intensas, integrando el análisis de sensores remotos por Interferometría Diferencial, INSAR, en base a imágenes Sentinel 1A y 2A, para ubicar las áreas de mayor deformación y subsidencia del relieve en los flancos del volcán de Fuego en la República de Guatemala. Estas áreas son el origen de lahares secundarios. Para mejorar espacialmente la precisión de las trayectorias o rutas de este tipo de flujos, se utilizaron parámetros e índices morfológicos como la dirección-acumulación de flujo, longitud-magnitud de la pendiente y el índice de humedad topográfica implementados en software SAGA -System for Automated Geoscientific Analysis. Como complemento para determinar la trayectoria o ruta de este tipo de lahares, a las técnicas anteriores, se combinó el análisis de estabilidad de taludes utilizando el software SHALSTAB -Shallow Landslide Susceptibility- basado en la teoría de Mohr-Coulomb y sus parámetros: grado de saturación interna del suelo y precipitación efectiva. Éstos parámetros determinan la desestabilización de una ladera por este tipo de lahares que las erosionan e inundan. Esta metodología se aplicó en la República de Guatemala, posteriormente a la erupción del volcán de Fuego del 3 de junio de 2018. La aplicación de esta metodología complementaria de gran ayuda preventiva ya que proporcionó una respuesta más precisa de las áreas destruidas por lahares secundarios en las cercanías del volcán que fueron comprobadas por funcionarios del PROJECT CONCERN INTERNATIONAL en el sector.

El tercer método se corresponde con el análisis de la deformación del terreno por Interferometría diferencial y concentración de lineamientos geológicos-estructurales (Método 1) apoyados por investigación geofísica-geotécnica (tomografía eléctrica, georadar, sísmica pasiva y sondeos con análisis de laboratorio de testigos). Este tercer método se desarrolló para detectar y delimitar las áreas afectadas por deformación del terreno y procesos geodinámicos generados por el terremoto del 16 de abril de 2016 en la Zona Cero de la ciudad de Manta, Ecuador, utilizando análisis de Interferometría Diferencial (INSAR) con el apoyo de técnicas geofísicas como tomografías eléctricas del subsuelo y georadar. Esta técnica combinó el análisis de

deformación tectónica, datos de sismicidad, perforaciones, velocidad de onda de corte Vs30 y simulaciones de procesos geodinámicos externos de superficie para delimitar áreas de alto riesgo sísmico que permitieron coordinar y gestionar los procesos de reconstrucción de la ciudad de Manta y especialmente la Zona Cero de máxima destrucción.

El cuarto método El cuarto método consistió en la aplicación de Interferometría Diferencial (DInSAR) para evaluar hundimientos ocurridos en el año 2016 en la ciudad de Zaruma, provincia de El Oro, en la Escuela La Inmaculada-Fe y Alegría, el mismo que se reactivó en el año 2019 y uno nuevo en el sector de la Calle en ese mismo año. Estos hundimientos que posiblemente son causados por las galerías mineras subterráneas sobre las que se encuentran asentados los edificios, han puesto en peligro a estos y otros sectores cercanos. Para reducir este tipo de Riesgo Geológico, esta técnica DINSAR, para la detección temprana de zonas de subsidencia causadas por estas labores mineras subterráneas con alta precisión, utilizando datos del Radar de Apertura Sintética-SAR. La aplicación de esta Metodología también permitió detectar deformaciones en el relieve para ubicar trazas. Rastros o “huellas” de galerías subterráneas en la parte Occidental del la Zona de Exclusión Minera, galerías mineras que no fueron inventariadas y que no constan en el catastro minero oficial del sector.

Por último, el quinto método se basa en la prevención de desastres relacionados con eventos extremos de deformación natural del suelo utilizando DINSAR y la Sintaxis del Espacio. Teniendo en cuenta la relación deformación superficial del terreno/concentración poblacional en centros urbanos, se combina la distribución del espacio urbano y su relación con las deformaciones superficiales del terreno. Esta metodología modelizó la dinámica de las estructuras urbanas en función de la concentración o densidad poblacional en relación con un escenario de deformación del terreno condicionado por un evento sísmico mayor a 6Mw que podría causar un desastre en el barrio La Mariscal al norte de la ciudad de Quito, capital de Ecuador. Este método aplicado es pionero en este tipo de “interacción relacional” ya que, hasta la fecha, no se ha realizado ningún estudio que relacione la deformación del terreno con la Sintaxis del Espacio en la ciudad, por lo que es una nueva herramienta para la prevención en la ordenación urbana considerando la vulnerabilidad sísmica y la relación deformación superficial y densidad de población.

La combinación de todas las técnicas expuestas anteriormente, permitieron determinar zonas de susceptibilidad y peligrosidad natural de forma rápida, a bajo costo y utilizando software y datos geográficos gratuitos, permitiendo tomar en fase de anteproyecto medidas preventivas no estructurales o bien, medidas estructurales correctoras para reducir y mitigar los efectos de los riesgos geológicos de una región.

ABSTRACT

This Doctoral Thesis has been carried out through the compendium format of articles, with clearly differentiated and concatenated objectives in order to expand knowledge on the implementation of new methodologies in Applied Geomatics using information of public use for the management of natural hazard in the reduction of Geological Risk. Emphasis has been placed on making the community aware of the benefits of analyzing geological risks in advance to spatially identify them and establish structural corrections as a prevention criterion, which implies preparing previously maps of areas susceptible to mass movements, floods, water erosion, Earthquake-tectonic-volcanic maps and geotechnical problems, from Applied Geomatics (Remote Sensing, Geographic Information Systems and Numerical Modeling) and georeferenced spatial information.

Five geomatic methods applied to the reduction of geological risk are developed in this thesis, validated by their application to different geological risks in various regions of Ecuador.

The first starting method is the D8 Basic Hydrological Model, which has been divided into three submodels: (a) The Numerical Model of Surface Runoff Flow Patterns as a generator of mass movements, (b) The Terrain Deformations Model, using Morphological Break Lines, and (c) a mixed model in which the previous two interact.

From the 1980s in Ecuador to the present day, taking into account the frequency with which mass movements occur in the territory of Ecuador, heuristic cartographic methods with variable weights were applied in an interval of 30 years, with the objective of improving the susceptibility maps to these events; which allowed to help reduce geological risk. Although these catastrophic events increased in more than 650 regions of the country, the development of hydrological-morphological and slope stability models allowed determining surface movements of the slope, generating efficient results that were verified with field investigations. As the first input within this methodology, the theoretical concept of the Hydrological Model D8 was used to determine the flow patterns of the surface runoff of the precipitation water that have influence on the production-transport and deposition of sediments that are related to the types of mass movements that occur frequently in the country.

To determine these flow patterns by means of the D8 Hydrological Model, various indices and morphometric parameters were extracted from a digital model of high spatial resolution elevations from which they were derived: slopes, slope orientation, curvatures, direction- accumulation of flow, length-magnitude of the slope and topographic humidity index. These parameters are implemented in different free programs such as ArcView, SAGA, Flow-R, QGis, Tardem, Taude, Terrain Analyst System. These flow patterns of the surface runoff of the

precipitation water served to determine structural geological guidelines and their concentration, which generally coincides with surface deformations of the relief that are possibly the origin of weathering processes, erosion, superficial landslides, lateral propagation of the rock complex -soil, mass flows and deep gravitational deformations.

The second method is the determination of the flow paths of primary and secondary lahars in volcanic buildings using interferometric synthetic aperture radar analysis (InSAR), LaharZ Numerical Model of lahars, Stability index with SHALSTAB and morphometric parameters with SAGA. From the first method that determines the flow patterns of surface runoff, this second method is developed to determine the routes that were followed and can be followed by destructive secondary lahars due to heavy rains, integrating the analysis of remote sensors by Differential Interferometry, INSAR, based on Sentinel 1A and 2A images, to locate the areas of greatest deformation and subsidence of the relief on the flanks of the Fuego volcano in the Republic of Guatemala. These areas are the origin of secondary lahars. To spatially improve the precision of the trajectories or routes of this type of flows, morphological parameters and indices were used such as the direction-accumulation of flow, length-magnitude of the slope and the topographic humidity index implemented in SAGA -System for Automated software. Geoscientific Analysis. As a complement to determine the trajectory or route of this type of lahars, to the previous techniques, the stability analysis of slopes was combined using the SHALSTAB -Shallow Landslide Susceptibility- software based on the Mohr-Coulomb theory and its parameters: degree of internal soil saturation and effective precipitation. These parameters determine the destabilization of a slope by this type of lahars that erode and flood them. This methodology was applied in the Republic of Guatemala, after the eruption of the Fuego volcano on June 3, 2018. The application of this complementary methodology of great preventive help as it provided a more accurate response to the areas destroyed by secondary lahars in the vicinity of the volcano that was verified by officials of PROJECT CONCERN INTERNATIONAL in the sector.

The third method corresponds to the analysis of the deformation of the terrain by differential interferometry and concentration of geological-structural guidelines (Method 1) supported by geophysical-geotechnical research (electrical tomography, georadar, passive seismic and probes with control laboratory analysis) . This third method was developed to detect and delimit the areas affected by terrain deformation and geodynamic processes generated by the earthquake of April 16, 2016 in Ground Zero of the city of Manta, Ecuador, using Differential Interferometry (INSAR) analysis with the support of geophysical techniques such as underground electrical tomography and georadar. This technique combined tectonic deformation analysis, seismicity data, perforations, Vs30 cut-off wave velocity and simulations of external surface geodynamic processes to delimit areas of high seismic risk that allowed coordinating and

managing the reconstruction processes of the city of Manta. and especially the Ground Zero of maximum destruction.

The fourth method consisted in the application of Differential Interferometry (DInSAR) to evaluate sinkings that occurred in 2016 in the city of Zaruma, province of El Oro, at the La Inmaculada-Fe y Alegría School, which was reactivated in the year 2019 and a new one in the street sector in that same year. These subsidence, possibly caused by the underground mining galleries on which the buildings are located, have endangered these and other nearby sectors. To reduce this type of Geological Risk, this DINSAR technique for the early detection of subsidence areas caused by these underground mining tasks with high precision, using data from the Synthetic Opening Radar-SAR. The application of this Methodology also allowed detecting deformations in the relief to locate traces. Traces or "tracks" of underground galleries in the western part of the Mining Exclusion Zone, mining galleries that were not inventoried and that do not appear in the official mining cadastre of the sector.

Finally, the fifth method is based on the prevention of disasters related to extreme events of natural deformation of the soil using DINSAR and Space Syntax. Taking into account the relationship between the surface deformation of the terrain / population concentration in urban centers, the distribution of urban space and its relationship with the surface deformations of the terrain are combined. This methodology modeled the dynamics of urban structures based on population concentration or density in relation to a terrain deformation scenario conditioned by a seismic event greater than 6Mw that could cause a disaster in the La Mariscal neighborhood to the north of the city of Quito, capital of Ecuador. This applied method is a pioneer in this type of "relational interaction" since, to date, no study has been carried out that relates the deformation of the terrain with the Syntax of Space in the city, making it a new tool for the prevention in urban planning considering seismic vulnerability and the relationship between surface deformation and population density.

The combination of all the techniques previously exposed, allowed to determine areas susceptible to natural susceptibility and danger quickly, at low cost and using free software and geographic data, allowing to take in the preliminary draft non-structural preventive measures or structural corrective measures. to reduce and mitigate the effects of the geological risks of a region.

1. INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Ecuador, por su ubicación geográfica en el Cinturón de Fuego del Pacífico y por sus características geológicas, hidrológicas y meteorológicas que contribuyen a la evolución de paisajes diversos ricos en fauna y flora, es proclive por agentes climáticos y sismotectónicos, a la ocurrencia de procesos activos en su territorio y consecuentemente a la alteración de los componentes ambientales, lo cual da lugar a una mayor susceptibilidad ante riesgos naturales tales como: movimientos en masa, inundaciones, erupciones volcánicas y terremotos. Por otro lado, la intensa degradación de los sistemas ambientales debido al aumento de las fronteras agrícolas-urbanas antrópicas, ha generado una destrucción de los recursos naturales no renovables y ha intensificado el Riesgo Geológico de gran parte de los entornos naturales.

Eventos naturales como El Niño y La Niña, ocurridos en los años 1982-1983, 1997-1998, han constituido etapas de crisis en el desarrollo económico del país causando ingentes pérdidas humanas y económicas, incluyendo la pérdida medioambiental de grandes regiones. Las pérdidas económicas bordearon los siete mil millones de dólares e incluyeron numerosas pérdidas de vidas humanas.

Estos procesos de degradación de los ambientes naturales han deshecho toda la planificación estatal, por el incremento de la amenaza, vulnerabilidad y del riesgo geológico, obligando a los investigadores a buscar metodologías desarrolladas dentro del campo de la Geomática Aplicada más directas y aplicables cuya finalidad es la determinación espacial eficiente de zonas de susceptibilidad ante las amenazas causadas por estos fenómenos naturales. Se investigaron, metodologías de aplicación rápida, precisas y de bajo costo, en comparación con las metodologías tradicionales que utilizan el método cartográfico de ponderación de variables y criterios heurísticos, que requieren una gran cantidad de tiempo y coste económico para su adquisición, recopilación, elaboración y aplicación, lo cual ha ayudado muy poco en la reducción del Riesgo Geológico por presentar mapas a escalas no aptas para aplicar mecanismos de reducción eficientes de desastres naturales, que en Ecuador generalmente, son de media a gran magnitud.

En esta Tesis, se han desarrollado cinco metodologías a diversas escalas grandes de detalle (1:25.000) y muy grandes de detalle (1:5.000-1.1000) para su implementación en mapas de susceptibilidad ante las amenazas naturales como movimientos en masa, inundaciones y hundimientos-subsidencias, aplicándose desde la ubicación espacial de áreas deformadas tectónicamente, amenazas que son activadas por factores climáticos y sísmicos que son uno de los peligros naturales más destructivos y recurrentes en el país. Un ejemplo de esto, se produce durante períodos de lluvias intensas por el fenómeno de El Niño o por la ocurrencia de terremotos mayores a 6 Megawatios -Mw-, como el ocurrido el

16 de abril de 2016 en la costa ecuatoriana, cuyas pérdidas económicas superaron los tres mil millones de dólares.

Como se ha mencionado, la ubicación de las zonas de estudio en el Cinturón de Fuego del Pacífico, hace que las amenazas volcánicas sean otro tipo de riesgos que afectan el desarrollo socioeconómico de las regiones cercanas a volcanes activos como ha sucedido en décadas pasadas y en la actualidad. Productos de caída como piroclastos, cenizas, flujos de lahares primarios y secundarios destructivos han afectado la infraestructura estratégica de algunas regiones del país como viviendas, oleoductos, sistemas productivos incluyendo pérdida de vidas humanas.

Un factor que potencia el riesgo a infraestructuras estratégicas en diferentes regiones y poblaciones es la falta de control en la aplicación de las normas de construcción sismo resistentes vigentes en el país, lo que ha dado lugar a construcciones con fallos estructurales y falta de calidad en los materiales de construcción y la inexistencia de informes que analicen con detalle en la investigación geológica-geodinámica y geotécnica-geofísica regional y local. En este mismo sentido, otro factor que ha aumentado la susceptibilidad de las infraestructuras lineales y urbanas ante estas amenazas, son los permisos de las Autoridades Municipales para que las ciudades se desarrollen en las llamadas “zonas de invasión” o cinturones periféricos de pobreza, ubicadas en llanuras de inundación y en laderas susceptibles a deslizamientos con pendientes superiores a 25 grados. Esta falta de control ha permitido que sismos mayores a 6Mw, destruyan edificaciones e infraestructuras ingenieriles en donde la población se concentra a diario por sus actividades cotidianas en ciudades con alto riesgo sísmico, lo que ha causado un gran número de fallecidos, y la destrucción de bienes materiales (infraestructuras, construcciones…).

También hay que tener en cuenta que uno de los factores desencadenantes de riesgo en algunos sectores territoriales puede ser el factor antrópico, ya que en algunos sectores de Ecuador produce procesos de subsidencia inducida, debido a la sobreexplotación minera subterránea. Existen poblaciones en todo el territorio ecuatoriano con una explotación minera intensa legal e ilegal, que ha provocado deformación del terreno, subsidencias y hundimientos por colapso de obra civil en edificaciones e infraestructuras como viene ocurriendo en la ciudad de Zaruma desde 1995 en donde la explotación minera histórica viene desarrollándose desde la prehistoria (1400 años DC), y actualmente sigue de forma ilegal aprovechando galerías antiguas.

En este análisis de riesgos se parte de los análisis de susceptibilidad al riesgo definidos por los factores del territorio condicionantes o pasivos y se complementan con la probabilidad de que interactúen los factores desencadenantes o activos analizando la peligrosidad (o amenaza), en un escenario espacial de vulnerabilidad y exposición al daño, medido en víctimas humanas o bienes materiales.

En este contexto, esta tesis presenta cinco metodologías para analizar el riesgo natural desde el punto de vista de la prevención, lo que implica la generación de cartografías de susceptibilidad y peligrosidad como herramientas de mitigación no estructurales, teniendo en cuenta la vulnerabilidad y la exposición; antes de que estos riesgos se activen.

Los resultados de estas metodologías se presentan en esta Tesis Doctoral, la misma que se ha elaborado según el formato de compendio de artículos y está constituida por un conjunto de cinco artículos científicos de investigación publicados en revistas internacionales de alto impacto. A continuación, se enumeran estas publicaciones:

1. Cando Jácome, M.; Martínez-Graña A. (2018). Numerical modeling of flow patterns applied to the analysis of the susceptibility to movements of the ground. Geosciences, 8, 340 pp. ISSN 2076-3263. Special Issue Tectonics and Morphodynamics. Categories: Geosciences Multidisciplinary (32/182-Q1). Impact Factor Scopus: 1.97. https://doi.org/10.3390/geosciences8090340

2. Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A. (2019). Determination of primary and secondary lahar flow paths of the Fuego Volcano (Guatemala) using morphometric parameters. Special Issue Remote Sensing of Volcanic Processes and Risk. Remote Sensing, 11 (6), 727. Ed.: MDPI. ISSN 2070-4292. Impact Factor JCR_2018: 4.118. Categories: Remote Sensing (7/30-Q1). https://doi.org/10.3390/rs11060727

3. Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A. (2019). Differential interferometry, structural lineaments and terrain deformation analysis applied in Zero Zone 2016 Earthquake (Manta, Ecuador). Environmental Earth Sciences, 78:499. Ed.: Springer Nature. ISSN 1866-6280. Impact Factor JCR_2018: 1.871. Categories: Water Resources (51/91- Q3), Geosciences Multidisciplinary (108/196-Q3). https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-019-8517-4

4. Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A.; Valdés, V. (2020). Prevention of Disasters Related to Extreme Natural Ground Deformation Events by Applying Spatial Modeling in Urban Areas (Quito, Ecuador). *Int. J. Environ. Res. Public Health*, *17*, 753. Ed.: MDPI. ISSN 1660-4601. Impact Factor JCR_2018: 2.468. Categories: Environmental Sciences (112/251-Q2). https://doi.org/10.3390/ijerph17030753

5. Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A.; Valdés, V. (2020). Detection of terrain deformations by InSAR techniques and geophysical methods (Zaruma City, Ecuador). Remote Sensing, 12 (10), 1598. Ed.: MDPI. ISSN 2070-4292. Impact Factor JCR_2018: 4.118. Categories: Remote Sensing (7/30-Q1).
DOI: https://doi.org/10.3390/rs12101598

Dichas investigaciones se elaboraron secuencialmente desde la temática más elemental desarrollada en el artículo 1, hasta las más complejas desarrolladas en los artículos 4 y 5. Los criterios teóricos utilizados en cada metodología, permitieron mejorar el conocimiento para la determinación espacial de las amenazas naturales en la reducción del Riesgo Geológico en Ecuador.

1.2. ANTECEDENTES

La elaboración de cartografía de susceptibilidad por peligrosidad natural como herramienta de prevención, constituye un instrumento y estrategia primordial para favorecer la integración de proyectos de ingeniería en la planificación ambiental del territorio, teniendo en cuenta el análisis estratégico y de impactos ambientales en fase de anteproyecto y la identificación, delimitación, protección y explotación de los recursos naturales de forma racional y sostenible.

La incesante actividad humana, influye en la evolución y dinámica de nuestro planeta; ya sea por la propia ocupación o por los efectos que genera esta actividad. La multidisciplinariedad de la Geología en la sociedad actual, apoyada por la Geomática Aplicada al análisis y evaluación de los riesgos geológicos en la ordenación del territorio, en la recomendación y limitación del uso del suelo, permite valorar la calidad del entorno natural, establecer su capacidad de resiliencia, analizar los impactos ambientales por las actividades humanas: emplazamiento de vertederos de residuos urbanos e industriales, actividades extractivas de recurso mineros no renovables, contaminación de aguas y suelos, problemas geotécnicos; todo lo cual hace que la Geología sea una ciencia necesaria en la gestión medioambiental del territorio. Lamentablemente la Geología como ciencia de apoyo a la Ordenación Territorial, no ha sido tomada en cuenta en la implementación de los Planes de Ordenación Territorial de los Gobiernos Municipales y/o Nacionales, y por la sociedad en general; bien por desconocimiento de su aplicabilidad o por ausencia de normas reguladoras sectoriales y medioambientales.

Como consecuencia de esto, no existe información basada en mecanismos de prevención para conocer con anticipación las amenazas naturales que pueden poner en riesgo a una región o a determinadas unidades territoriales homogéneas (territorios con similares condicionantes del medio

físico y natural) denominadas en Ecuador unidades o sistemas ambientales; como por ejemplo mapas de susceptibilidad a escalas 1:25.000, 1: 10.000 y 1: 5.000 que sirvan de apoyo para el desarrollo seguro y sostenible de las comunidades humanas.

Históricamente, dentro de los riesgos naturales en Ecuador, los movimientos en masa en áreas topográficamente elevadas y tectónicamente deformadas, son uno de los peligros naturales más destructivos y recurrentes, especialmente durante los períodos de lluvia intensa, el fenómeno de El Niño con más de ocho mil millones de dólares en pérdidas socioeconómicas y terremotos mayores a 6Mw como el ocurrido el 16 de abril de 2016 en la costa ecuatoriana (7.8 Mw) con daños materiales con valor económico superior a los tres mil millones de dólares y víctimas mortales superiores a 600 personas.

La pregunta cada vez que estos fenómenos causan desastres fue: ¿existe algún mecanismo de prevención que pueda alertar a la comunidad a partir del análisis o monitoreo de algún indicador morfológico o geológico, de la activación de estos fenómenos?

Para responder a esta pregunta, desde la década de los 80 en el Ecuador, comenzó el uso de la Geomática Aplicada mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica, Modelación Numérica y Teledetección, principalmente en las instituciones del Estado como el Instituto Geográfico Militar -IGM-, el Ministerio de Agricultura Pesca y Ganadería, con su Sistema de Información Geográfica -MAGAP-SIGTIERRAS, el Instituto Espacial Ecuatoriano -IEE-, el Instituto de Investigación Geológica Minera Metalúrgica –INIGEMM-, la Secretaría de Gestión de Riesgos -SGR- e instituciones universitarias. Con esto comenzó la sistematización cartográfica de las amenazas naturales. Estas instituciones, cada una en su especialidad, elaboraron mapas base de susceptibilidad ante amenazas naturales a escalas pequeñas entre 1:1000.000, 1:500.000, 1:250.000, 1:100.000 y 1:50.000. Escalas de trabajo que fueron solo una referencia para ubicar grandes zonas regionales susceptibles a eventos, pero no fueron herramientas cartográficas objetivas para el apoyo a la Ordenación del Territorial a nivel local. Posteriormente y, con el objetivo de mejorar el detalle de las zonas susceptibles ante movimientos en masa e inundaciones, las metodologías fueron estandarizadas en consenso entre las instituciones relacionadas con la Gestión de Riesgos en Ecuador.

Las cartografías de estas amenazas se obtuvieron mejorando el Método Heurístico y Ponderado de variables a partir de la metodología original presentada por la Secretaría de Gestión de Riesgos -SGR- (Cando et al., 2010). Metodología basada en la experiencia de expertos y en documentos base como por ejemplo el informe “Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a nivel nacional” componente 3: “Geopedología y Amenazas Geológicas”, o el informe “Metodología inicial para la Elaboración de Mapas Preliminares de susceptibilidad ante amenaza por Movimientos en Masa a

escala 1:50.000" (Cando et al., 2010). Otros documentos que sirvieron para elaborar y ajustar esta metodología fueron los del Proyecto Multinacional Andino -PMA-(Cuéllar-Cárdenas et al., 2007), que se basó en el modelo cartográfico de Mora- Vahrson (Mora & Vahrson, 1991) que permitieron determinar la ubicación de áreas susceptibles a deslizamientos por precipitaciones intensas, sismos de alta magnitud o por combinación de ambos. Posteriormente, en todo el territorio nacional, la Secretaría de Gestión de Riesgos, entidad rectora en este tema a nivel nacional en esa época, aprobó y estandarizó el uso de esta metodología en todas las entidades del Estado y como metodología normalizada este método cartográfico se utiliza en la actualidad. El procedimiento (Fig. 1) se basa en la creación de unidades cartográficas tanto en formato ráster como vectorial que mejoraron la capacidad en la velocidad de cálculo y proceso mediante álgebra de mapas con software comercial como ArcGis y de uso público como Arcview, GVSig, QGis.

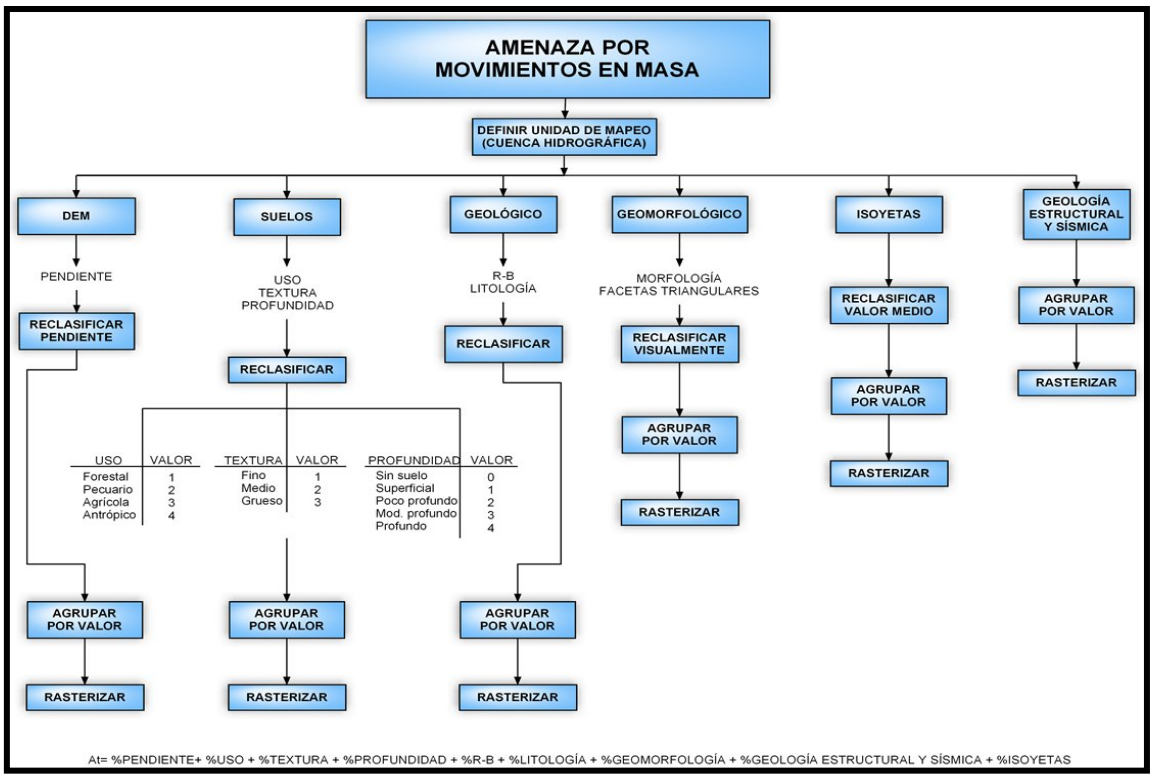


Figura 1. Diagrama de flujo de procesos para la elaboración de mapas de susceptibilidad ante movimientos en masa utilizando la metodología del método cartográfico, variables ponderadas y heurístico (Cando et al., 2010).

Este método cartográfico fue mejorado con la integración de índices morfométricos como el índice Topográfico de Humedad y densidad de lineamientos geológico-estructurales permitiendo elaborar una cartografía de susceptibilidad a escalas 1:50.000 y 1:25.000. Aun así, a estas escalas de trabajo, la cartografía no tuvo aplicación dentro de la reducción del riesgo geológico, sino nuevamente como base de referencia, porque no establecía la magnitud espacial, alcance, influencia y tipología de las amenazas con la

realidad del territorio, presentando manchas de colores según la intensidad de susceptibilidad de la amenaza, pero sin discretizar con mayor detalle las zonas estables e inestables dentro de estas manchas. En la Figura 2, se pueden ver tres imágenes capturadas de la presentación de esta metodología en la ciudad de Cuenca en el año 2011, que presentó el avance de la metodología por el método cartográfico con ponderación de variables y heurístico, en un mapa de susceptibilidad ante movimientos en masa a escalas 1:250.000, 1:50.000 y 1:25.000, en el mismo sector de alta montaña. Se observa la diferencia del detalle en cada escala desde la 1:250.000 en (Fig. 2A), en donde las intensidades de susceptibilidad se representan con grandes manchas de colores desde la susceptibilidad muy alta en color rojo intenso, alta en color naranja intenso, media en color naranja claro y baja muy baja en colores verdes y amarillos respectivamente. A escala 1:50.000 (Fig. 2B) la susceptibilidad se muestra con los mismos colores, pero sin relación con las fallas geológicas regionales; y a escala 1:25.000 (Fig. 2C) donde se pueden relacionar las zonas susceptibles con las principales fallas geológicas regionales. Esta relación fue un avance muy importante para entender el origen de esas zonas susceptibles ante movimientos en masa relacionadas con zonas geológicamente tectonizadas y falladas.

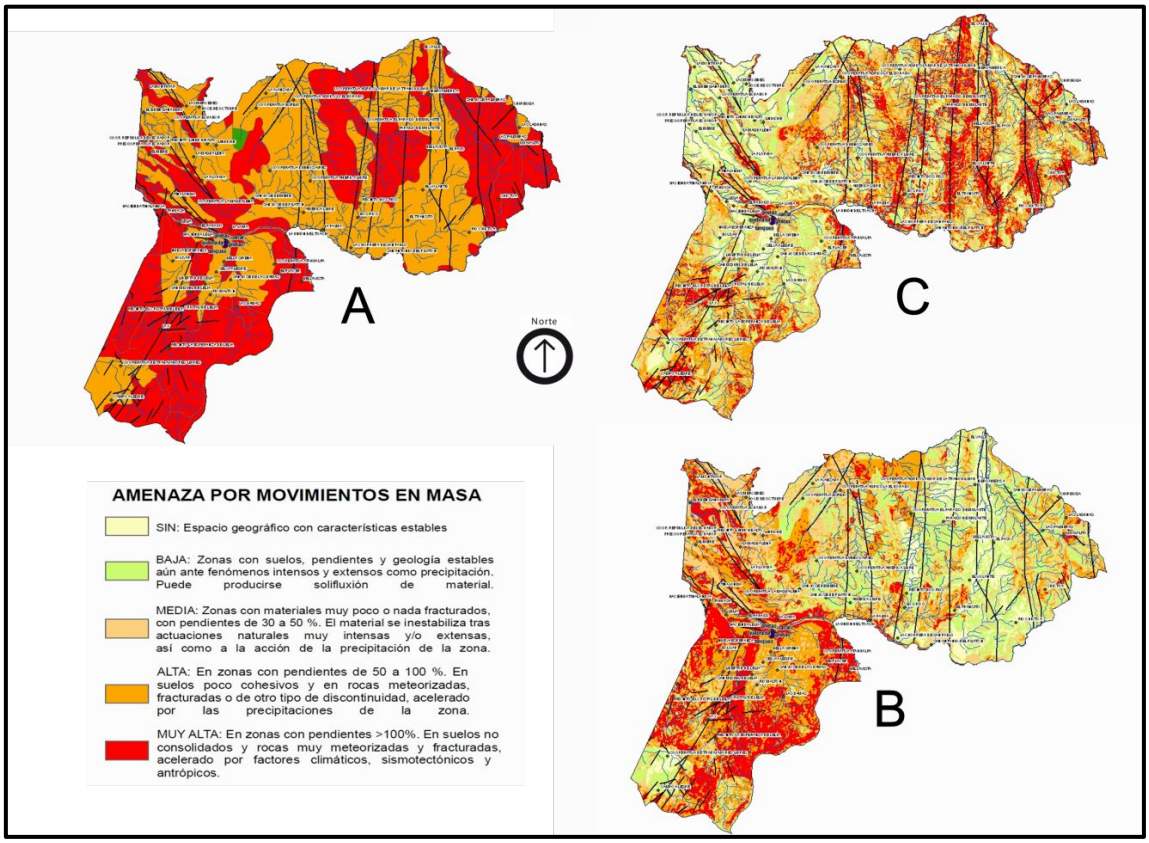


Figura 2. Captura de imágenes sobre la diferenciación cartográfica de detalle de respuesta ante la susceptibilidad por movimientos en masa a escalas 1:250000, 1:50000 y 1: 25000 por el método cartográfico mejorado con ponderación de variables y heurístico aplicado en un mismo sector. Modelización realizada por el autor en la ciudad de Cuenca, Ecuador en 2011.

A continuación, se explica de forma sintética esta metodología, teniendo en cuenta que el termino movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de suelos por efectos de la gravedad (Cruden & Varnes, 1994). El método cartográfico, utilizando variables ponderadas y heurísticas, según el diagrama de flujo de la Figura 1 y aplicando la ecuación 1.

"At" = [pendiente] * % + [usos del suelo y cobertura vegetal] * % + [textura] * % + [profundidad] * % + [litología] * % + [geomorfología] * % + [fracturas] * % + [precipitación] * %

(ec. 1)

Los mapas de factores temáticos se rasterizaron y se sumaron mediante el análisis espacial mediante la calculadora ráster en un Sistema de Información Geográfica -SIG-. La metodología consideró 8 factores en formato ráster. Cada factor de análisis se ponderó en la mayoría de los casos entre 1 a 5. El peso total de cada parámetro se repartió de acuerdo a su incidencia dentro del proceso de movimiento del complejo suelo-roca y finalmente, para obtener el valor de la susceptibilidad ante movimientos en masa At, se sumaron los mapas y sus pesos de acuerdo a la ecuación 1. Para la correcta determinación de los valores de ponderación se tuvo en cuenta el escenario de estudio y su posición espacial dentro del paisaje natural ecuatoriano (Winckell et al., 1997) ajustando los valores de acuerdo a la experiencia y conocimiento de campo del técnico.

Por las razones mencionadas anteriormente y principalmente ante la falta de discretización tipológica de detalle de los movimientos en masa e inundaciones obtenidas con la metodología mencionada, se vio la necesidad de mejorar el detalle del cartografiado de estas amenazas naturales recurrentes principalmente provocados por terremotos y lluvias intensas. Esta necesidad fue cubierta mediante la investigación, adaptación y aplicación de cinco métodos o modelos secuenciales que han sido aplicadas en esta Tesis, para establecer las diferentes cartografías temáticas de susceptibilidad del territorio en varias zonas de estudio para el análisis de amenazas naturales: movimientos en masa, flujos de inundación, erosivas, geotécnicas y análisis de subsidencias y hundimientos por actividades antrópicas en el medio natural.

1.2.1. Método 1: Modelo Hidrológico Básico D8.

Desde la década de los 80 en el Ecuador, hasta la actualidad, teniendo en cuenta la frecuencia con que los movimientos en masa ocurren en el territorio de Ecuador, se aplicaron métodos cartográficos heurísticos con ponderación de variables en un intervalo de 30 años, con el objetivo de mejorar los mapas de susceptibilidad ante estos eventos. Aunque aumentaron estos eventos catastróficos en más de 650 regiones del país, el desarrollo de modelos hidrológicos-morfológicos y de estabilidad de taludes permitieron determinar movimientos superficiales de ladera generando resultados eficientes que fueron

comprobados con datos de campo. Como primer insumo dentro de esta metodología, se utilizó el concepto teórico del Modelo Hidrológico D8 para determinar los patrones de flujo de la escorrentía superficial del agua de precipitación que tienen influencia en la producción-transporte y deposición de sedimentos relacionados con los tipos de movimientos en masa que ocurren en el país.

El primer Método de partida, es el Modelo Hidrológico Básico D8, que se ha dividido en tres submodelos: (a) El Modelo Numérico de Patrones de Flujo de escorrentía superficial como generador de movimientos en masa, (b) El Modelo de Deformaciones del Terreno, utilizando Líneas de Rotura Morfológica, y (c) un modelo mixto en el que interactúan los dos anteriores.

Para determinar estos patrones de flujo por medio del Modelo Hidrológico D8, se extrajeron varios índices y parámetros morfométricos a partir de un modelo digital de elevaciones de alta resolución espacial de los que se derivaron: las pendientes, orientación de la pendiente, curvaturas, dirección-acumulación de flujo, longitud-magnitud de la pendiente y el índice de humedad topográfica. Estos parámetros se encuentran implementados en diferentes programas gratuitos como ArcView, SAGA, Flow-R, QGis, Tardem, Taude, Terrain Analyst System. Estos patrones de flujo de la escorrentía superficial del agua de precipitación, sirvieron para determinar lineamientos geológicos estructurales y su concentración que generalmente coincide con deformaciones superficiales del relieve que posiblemente son el origen de procesos de meteorización, erosión, deslizamientos superficiales, propagación lateral del complejo roca-suelo, flujos de masa y deformaciones gravitacionales profundas.

Esta metodología inicial y más estudiada, entre 1996 y 2016, fue el análisis de la distribución espacial de movimientos en masa desde su origen en zonas de intensa deformación del relieve que fácilmente se meteorizan, erosionan, transportan y depositan en las partes bajas de las geoformas y microcuencas utilizando el mecanismo del Modelo Hidrológico D8 desarrollado por Callaghan-Mark, 1984; Quinn et al., 1991; Felicísimo, 1994 y Tarboton, 1997. Esta metodología, para encontrar las deformaciones del terreno y movimientos en masa, fue aplicada antes de que los satélites SAR y sus imágenes Sentinel 1 aparecieran en el año 2014 en base a curvas de nivel restituidas y modelos de elevación ráster de un sector concreto y en diferentes épocas, a escalas de trabajo 1:50.000 y 1: 25.000. Esos modelos digitales de elevación del terreno fueron elaborados por el autor de esta Tesis, utilizando MicroStation, Arcview y por el Instituto Geográfico Militar -IGM- bajo el programa Savanne de Marc Souris y el Institut de Recherche pour le Développement IRD (http://www.savgis.org/ecuador.htm).

La Línea de Flujo de la escorrentía superficial del agua de precipitación, es el trayecto que, a partir de un punto inicial, sigue la escorrentía superficial sobre el terreno pendiente abajo. Las líneas de flujo dentro del Modelo de

Elevación Digital -MDE- siguen la línea de máxima pendiente y sólo finalizan en los supuestos de desembocar en el mar o llegar al borde del modelo y, optativamente, de alcanzar una concavidad topográfica (Felicísimo, 1994).

El Modelo Hidrológico D8, fue escogido, de entre varios existentes, debido a su robustez para mantener la estructura del modelo digital de elevaciones estable y los acumuladores de flujo derivados sin desviaciones y con control morfológico-estructural sin dispersión de los flujos calculados. También es preciso para encontrar y trazar las divisorias de microcuencas y rutas de los flujos internos que tienen relación directa con líneas de rotura morfológica, líneas de erosión, flujos de masa y estabilidad de los taludes. Este algoritmo D8 es el método más utilizado para aproximar las direcciones de las líneas de flujo en una superficie topográfica, y determina el flujo de cada píxel a uno de sus ocho píxeles vecinos. El método es eficiente y potente, y puede asignar direcciones de flujo razonables incluso en situaciones muy complejas y ambiguas sin intervención del usuario. El método D8 se adapta bien a la identificación de canales individuales de flujo, redes de canales, límites de cuenca, y líneas de rotura de geoformas. Se basa en varias suposiciones que simplifican el procesamiento del modelo y no capturan la geometría del flujo divergente sobre las laderas. Estas simplificaciones son las siguientes:

- el uso de ocho ángulos de flujo discretos, y cada píxel tiene una sola dirección de flujo (SFD)

- el flujo del agua en un punto del terreno sigue la dirección del gradiente local de energía potencial, gradiente que es igual a la pendiente del terreno.

Estas simplificaciones, como se verá más adelante, sirvieron también para el trazado de lineamientos geológicos estructurales y concentración de deformaciones del relieve. Corroborando lo mencionado por Ramírez, 2002, sobre la aplicabilidad del Modelo D8, después de realizar una gran cantidad de modelos de flujo en diferentes regiones de Ecuador para determinar deformaciones del relieve y rutas de flujo de masa-erosión, se ha comprobado su eficiencia por las siguientes razones:

- Satisface las condiciones de coherencia en la asignación de direcciones de flujo calculadas, evitando la formación de “loops” o trayectorias cerradas.
- Evita o minimiza la dispersión de flujo (control topográfico estructural).
- Simplifica los cálculos y economía de almacenamiento de datos y uso de memoria RAM.

La asignación única de la dirección de drenaje según la dirección de máxima pendiente, junto con una estrategia coherente para manejar las bifurcaciones, garantiza que el modelo D8 no genere trayectorias cerradas de flujo. Esta unicidad de la asignación de la dirección de flujo, también garantiza

que el flujo que parte de una celda no se “desvanezca” a medida que avanza sobre su trayectoria, sino que su señal permanece constante, esto significa que el modelo D8 tiene cero dispersiones.

La diferencia entre el algoritmo de flujo D8 y los algoritmos más avanzados como “D∞”, radica principalmente en su incapacidad para representar la dispersión del flujo terrestre en las laderas. Los métodos D8, Rho8 y D8-LTD, entre otros, son algoritmos no dispersivos, es decir, cada celda de la cuadrícula en el DEM distribuirá el flujo a un solo vecino de la pendiente descendente. Visto de otra manera, es como decir que solo se emite una ruta de flujo única desde cada celda de la cuadrícula, Este tipo de algoritmos de flujo no dispersivo son particularmente adecuados para la delineación de cuencas hidrográficas, líneas de cresta (convexas), líneas de trayectoria de flujo (cóncavas) y lineamientos geológicos-estructurales y sus concentraciones como requiere el uso del modelo en esta primera metodología.

Para el trazado del Método Hidrológico D8, se partió de un Autómata Celular -AC- (Felicísimo, 1994). Gráficamente el trazado de las líneas de flujo de la escorrentía superficial (Modelo D8) y rotura morfológica (Modelo D8) se obtienen por medio de operaciones vectoriales en base de la teoría de formación de un Autómata Celular binario “a^t”, donde las celdas pueden, en un tiempo “t”, tomar solo dos valores: 0 o 1 (ecuación 2):

“a^t” $\in \{0,1\} \Rightarrow$

$$a^t \begin{cases} \mathbf{a} = 0 \Rightarrow a \notin L \\ \mathbf{a} = 1 \Rightarrow a \in L \end{cases}$$

(ec. 2)

Siendo “L” la línea de flujo. El entorno los 8 vecinos más próximos y la propia celda. Las variables auxiliares: z, altitud y las reglas de propagación serían:

- El inicio es una única celda donde $a_{i,j}^0 = 1$
- La propagación se realiza a la celda que cumpla la condición de pendiente máxima negativa desde la celda anterior.
- Tiempo de funcionamiento del Autómata: el AC funciona hasta que la celda a la que se propaga ya pertenece a la línea de flujo o no existe candidata con

pendiente negativa, lo que implica una concavidad o una zona plana sin trayectoria definida.

La pendiente se define como pendiente ladera arriba: positiva y ladera abajo: negativa. La línea se enciende o se apaga en un punto, dependiendo del estado de su entorno en relación a sus 8 vecinos próximos y de la propia celda con referencia a la pendiente máxima derivada del mapa de pendientes, siguiendo el mecanismo del algoritmo D8. Entonces, el proceso de construcción de una línea de flujo y de rotura morfológica, a partir de un punto inicial, es interactivo y consta de cuatro fases elementales:

Fase 1. En la Tabla 1, de posición inicial de las celdas dentro del Modelo Digital de Elevaciones para el desarrollo del Modelo Hidrológico D8, se fija el punto inicial de la línea en el tiempo t = 0, con el estado: $a_{i,j} = 1$.

i-2, j+2	i-1, j+2	j+2	i+1, j+2	i+2, j+2
i-2, j+1	i-1, j+1	j+1	i+1, j+1	i+2, j+1
i-2	i-1	i, j	i+1	i+2
i-2, j-1	i-1, j-1	j-1	i+1, j-1	i+2, j-1
i-2, j-2	i-1, j-2	j-2	i+1, j-2	i+2, j-2

Tabla 1. Matriz del flujo del modelo hidrológico D8. Posición de las celdas de análisis a partir de una matriz central para el trazado del flujo de acumulación.

La variable: altura es función de los valores de sus vecinos el autómata funciona según indica la Fase 2.

Fase 2. En la Tabla 2, se muestra la matriz donde se calculan las pendientes hacia sus 8 vecinos más próximos en base a la pendiente local obtenida del mapa de pendientes: siendo “d” la distancia horizontal entre píxeles (de centro a centro) (ecuación 3).

P1= Atan ((Abs(-z0)-Abs(z1))/d); P2= Atan ((Abs(-z0)-Abs(-z2))/((√2)d)); P3= Atan ((Abs(-z0)-Abs(-z3))/((√2)d); P4= Atan ((Abs(-z0)-Abs(-z4))/((√2)d)); P5= Atan ((Abs(-z0)-Abs(-z5))/((√2)d)); P6= Atan ((Abs(-z0)-Abs(-z6))/((√2)d)); P7= Atan ((Abs(-z0)-Abs(-z7))/((√2)d)); P8= Atan ((Abs(-z0)-Abs(-z8))/((√2)d)).

(ec. 3)

En este caso se han tomado datos hipotéticos, tomando como el punto más bajo de la matriz central D8, el valor 5º, celda C5, que posiblemente es sifón de la zona de estudio. Suponiendo el píxel inicial en la celda central B2 = 18º (Tabla 2)

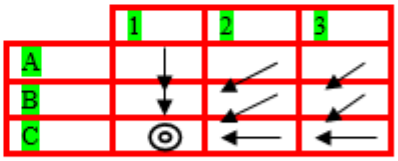
(A)

	1	2	3
A	Z8	Z1	Z2
B	Z7	Z0	Z3
C	Z6	Z5	Z4

(B)

	1	2	3
A	20	40	48
B	15	18	20
C	5	10	11

(C)



(D)

	1	2	3
A	1	1	1
B	3	2	1
C	9	3	1

Tabla 2. Se observa en la siguiente tabla: (A) pendientes calculadas. (B) Valores de las pendientes en grados. (C) Dirección de flujo en cada celda. (D) Número de celdas que drenan a cada celda de la red del Modelo Digital de Elevaciones.

La regla de propagación es que “la celda que tenga la pendiente máxima negativa” va a definir la celda que cambiara de estado trazando la flecha de la dirección de flujo. En la Tabla 2 (A y B) por ejemplo, para la celda central B2, el valor más bajo de la pendiente en grados de sus 8 celdas vecinas, es C1, por lo que se trazará una flecha de la dirección del flujo es hacia el suroeste (abajo a la izquierda). Para la celda A2, el valor más bajo tiene la celda B1, por lo tanto, se dibujará una fecha con dirección suroeste, Para A3, el flujo es también hacia el suroeste, Para la celda B3 tendrá una dirección hacia la celda C2 (suroeste). Para la celda C3, la dirección será trazada con una flecha hacia el oeste. Para la celda C2, tendrá una dirección hacia el oeste, La celda C1 es el sifón de la zona. Para la celda B1, la dirección será hacia el sur y para la celda A1, la dirección de flujo se trazará con una flecha hacia el sur. En la Tabla 2 (C y D), después de determinar la dirección del flujo, el autómata celular cuenta cuántas celdas fluyen hacia cada celda según la dirección del flujo calculada anteriormente, y determina el área contribuyente de una celda, que se define como el número de celdas que fluyen hacia esa celda.

La célula propia cuenta como contribuyente también, por lo que hay que sumarla al número de celdas contribuyentes. Por ejemplo, para la celda central B2, tiene solamente una celda contribuyente A3, por lo que su área contribuyente es a = 1 + 1= 2. Las celdas A1, A2 y A3 tendrán el valor de 1 como contribución propia a no ser que se cumpla que cualquier otra celda sea mayor y no tenga una celda de menor valor a su alrededor. Para B1, tiene A1 y A2 fluyendo hacia ella, más ella misma, por lo que su área contribuyente es a= 1 + 1 + 1 = 3. Para la celda C2, tiene B3 y C3 fluyendo hacia ella, por lo que el área contribuyente de la celda C2 es igual a la suma de las áreas contribuyentes de B3 (1) y C3 (1) más el de sí mismo (1), a = 1 + 1 + 1 = 3. La celda sifón C1, tiene B1 (3), B2 (2) y C2 (3) fluyendo hacia ella, por lo que su área contribuyente es a= 3 + 2 + 3 + 1= 9. En caso de existir otro sifón o sumidero se deberán sumar el número total de celdas de cada sumidero de la cuadrícula del modelo digital de elevaciones.

Como respuesta del trazado de las líneas de acumulación de flujo, pueden darse 3 casos sobre su ubicación espacial dentro de la malla del MED:

- Caso 1. Todas las pendientes son negativas, se trata de una línea de flujo lateral negativa (Fig. 3).

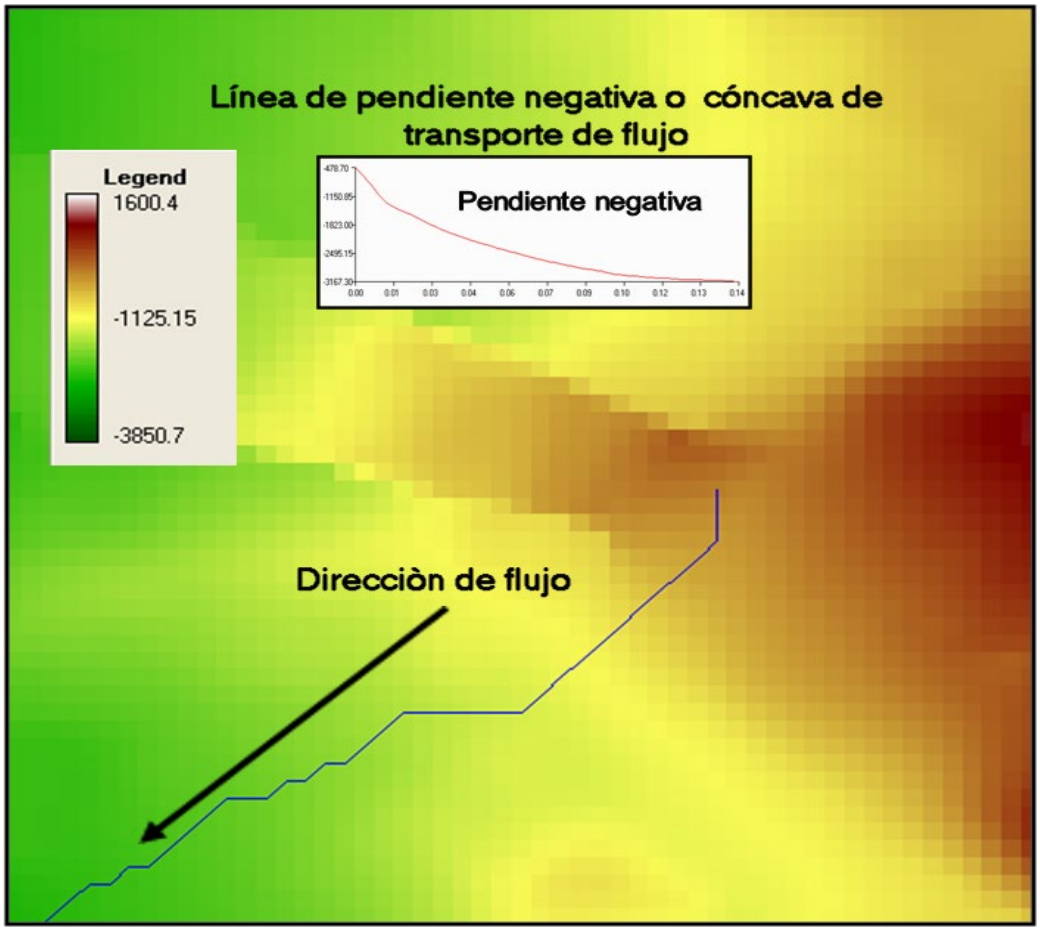


Figura 3. Esquema del trazado de la línea de flujo de acumulación en pendientes negativas, a partir de la captura del software Terrain Analyst System-TAS.

- Caso 2. Todas las pendientes son negativas y el punto está en el borde del MDE. En este caso, la línea de flujo termina ya que la cuenca continúa probablemente fuera de los límites del MDE(Fig. 4).

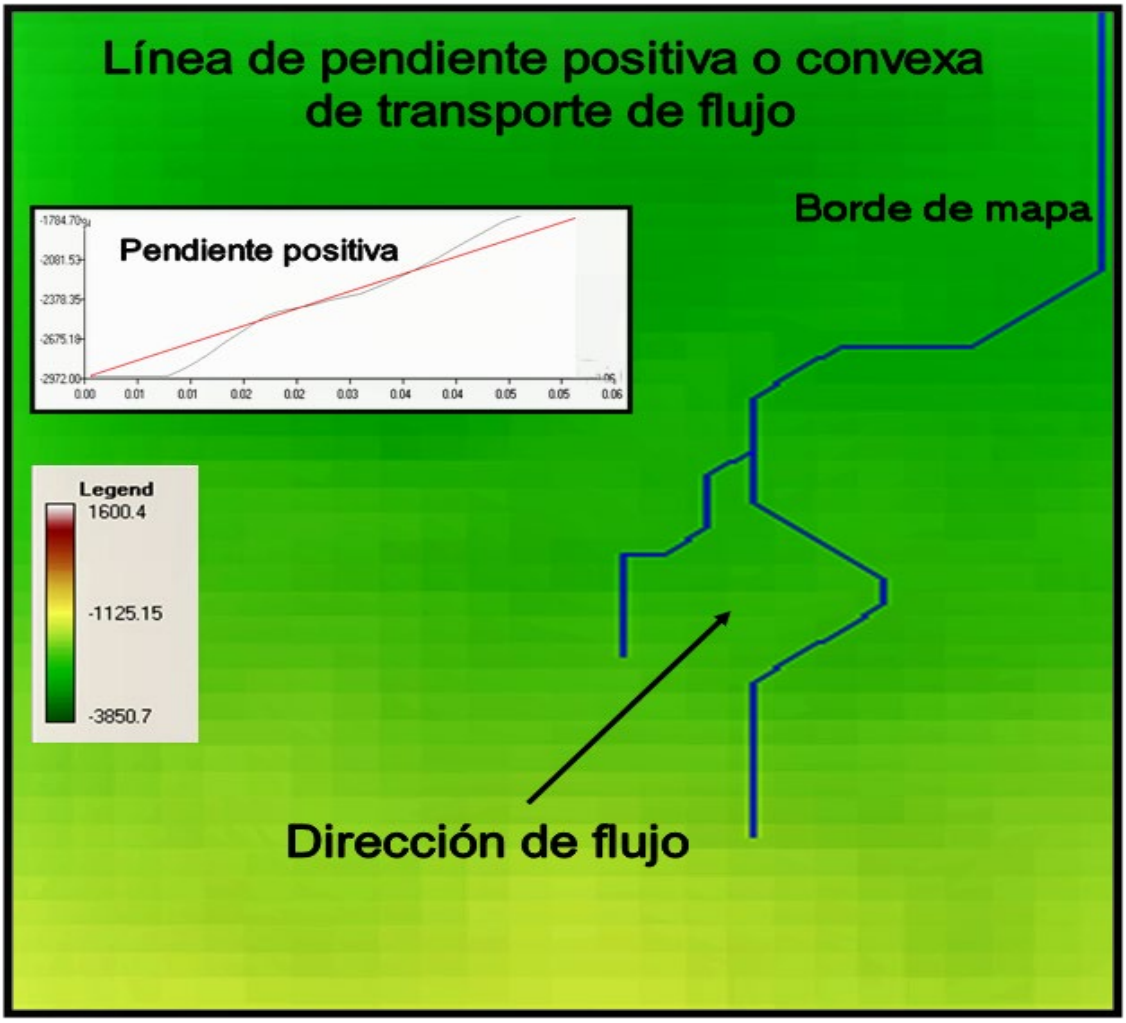


Figura 4. Trazado de la línea de flujo de acumulación en pendientes negativas y borde de mapa.

- Caso 3. Todas las pendientes son positivas (+) o la pendiente es cero (0), se trata de una línea de flujo lateral positiva y zona plana. Se repite el proceso hasta buscar un punto con pendiente máxima negativa (Fig. 5).

  Fase 3. El punto elegido (pendiente máxima) se incorpora a la línea de flujo y se toma como base para volver a la Fase 2, en donde se definen las zonas de transporte de flujo lateral negativas (-) positivas (+), zonas de acumulación de flujo y las zonas planas (0), (Fig. 5).

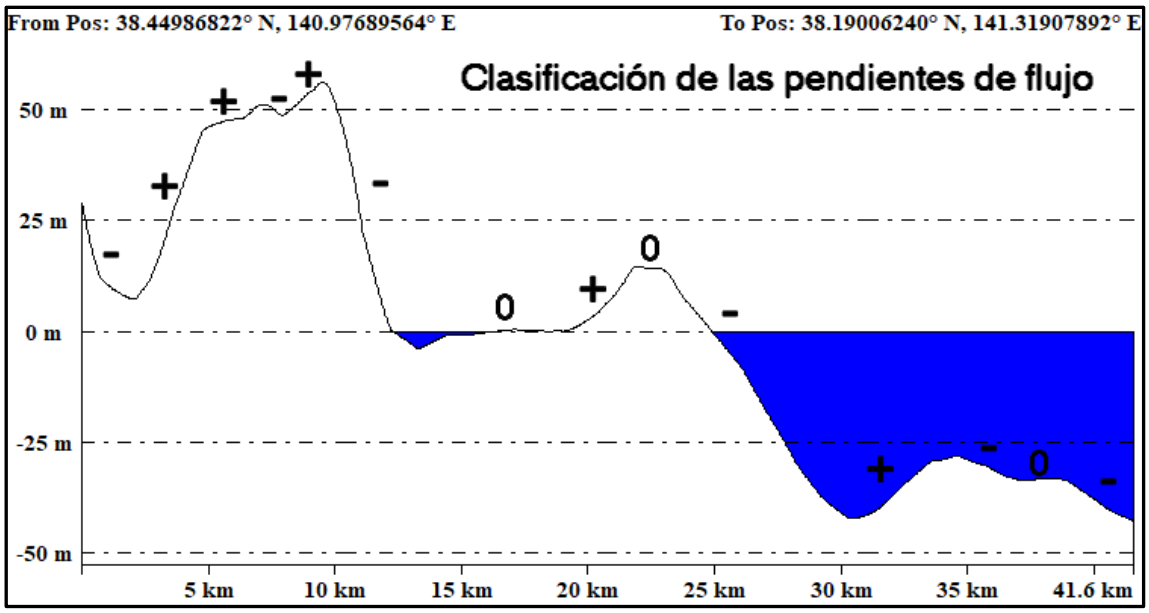


Figura 5. Trazado de la línea de flujo de acumulación en pendientes positivas, negativas y cero.

Fase 4. En esta fase se calculan los valores de la orientación de la pendiente y curvatura lateral o de sección en todas las celdas del DEM, para trazar los segmentos de líneas de flujo de nodos altos a bajos. El criterio es el mismo utilizado en la fase 2 con los valores de la pendiente a partir de la matriz de análisis y de una celda central de partida $a_{i,j} = 1$. En la Figura 6, se puede ver los resultados del trazado de las líneas de acumulación de flujo-lineación estructural (líneas de color rojo) y de rotura morfológica (líneas de color azul) y sus intersecciones.

El control del trazado de las líneas analizadas: flujos de acumulación, líneas de rotura morfológica, fallas geológicas y lineamientos estructurales, en cualquier algoritmo implementado en Rockworks, Saga, Qgis, SAGA, TAUDEM, WhiteBox u otro software, debe permitir ajustar los parámetros de configuración de rutas de flujo -Flow Paths- del modelo D8, y determinar la densidad de concentración de flujos de las líneas estudiadas, utilizando todas las fases de la metodología pero promediando los cambios de dirección de las líneas en ángulos máximos de barrido de 15, 30, 45 y 60 grados. También debe permitir el control del ángulo mínimo de pendiente, ya que donde las pendientes son menores que el ángulo de pendiente mínima colocada por el usuario, permita conseguir determinar zonas planas que pueden detener el cálculo del trazado de líneas de flujo con pendientes ascendente que frecuentemente resultan de la interpolación en la malla del MED. Este control elimina tales depresiones, llenando las depresiones hasta la elevación más baja de los valores de las celdas vecinas más cercanas, dando áreas planas más reales, donde la mayoría de los algoritmos de enrutamiento de flujo se detendrán. Generalmente este valor de pendiente mínima se encuentra en 0.001 grados.

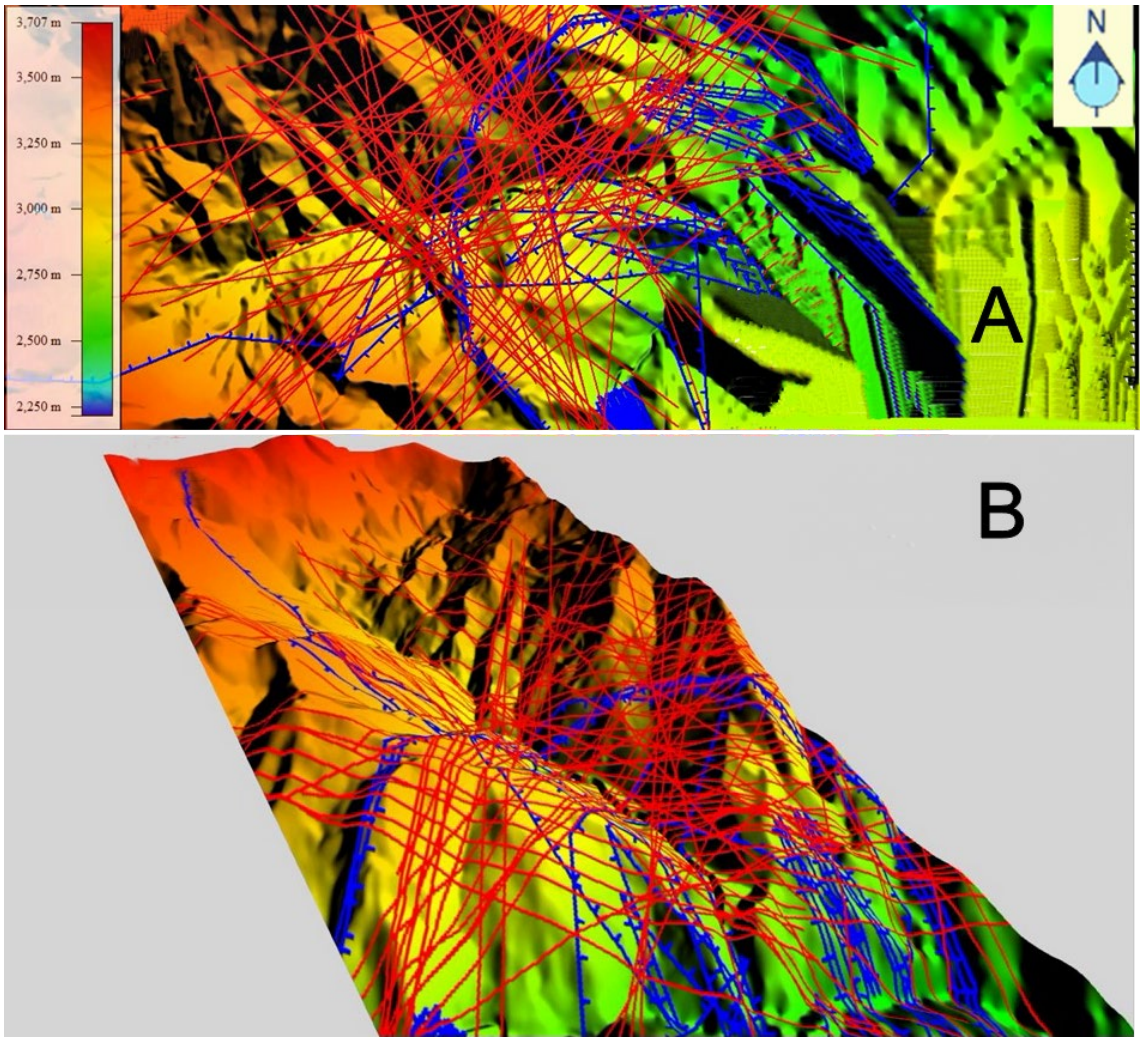


Figura 6. (A) Concentración de líneas de flujo de acumulación-lineación estructural en color rojo y de rotura morfológica en color azul a partir del Modelo Hidrológico Básico D8. (B) Modelo 3D.

Otro control que deben tener los algoritmos, es el manejo de la longitud de cada segmento de línea dentro del flujo, en función de porcentaje del ancho del mapa para evitar caminos cruzados y líneas de flujo interpretadas como ruido por su tamaño pequeño. Este control permite también eliminar rutas de flujo cortas "sin salida".

Para tener un mapa completo del trazado de las rutas o líneas de flujo, nodo a nodo dentro de la malla del MED, se inició el trazado de las rutas de flujo con el valor de 1, lo que implicó el inicio del trazado de las rutas de flujo en cada nodo para tener la concentración máxima de las líneas estudiadas y determinar las áreas o zonas de deformación máxima y una simulación de hiperflujos hiperconcentrados que fueron la base para la modelación de flujos de masa de cualquier origen, incluyendo flujos de lahares primarios y secundarios. Posteriormente se verá que incrementando este valor a 2 a valores más altos, pudiendo simular rutas de flujo como ejes de flujo y lineamientos estructurales bien definidos relacionadas a fallas geológicas regionales y locales.

El estado de deformación activa para cualquier sector de estudio, obtenido de la aplicación de las 4 fases de esta metodología, se define por la cantidad de líneas de flujo de acumulación y de rotura morfológica que se intersecan generando puntos y regiones críticos de susceptibilidad al desplazamiento (Fig. 7). De esta manera, las celdas de mayor concentración y similar orientación, forman zonas o Placas Morfológicas de Deformación generalmente asociados a movimientos en masa y a estructuras tectónicas-erosivas con la presencia de escarpes de falla, facetas triangulares de erosión, lomas de cierre, lomas de presión, deformación de conos aluviales, inversiones de causes de los ríos y otras asociaciones morfotectónicas. Las zonas de borde de deformación máxima se delimitaron con líneas de color rojo y encierran el máximo conflicto morfológico entre las pendientes, rumbos y curvaturas obtenida de las fases anteriores.

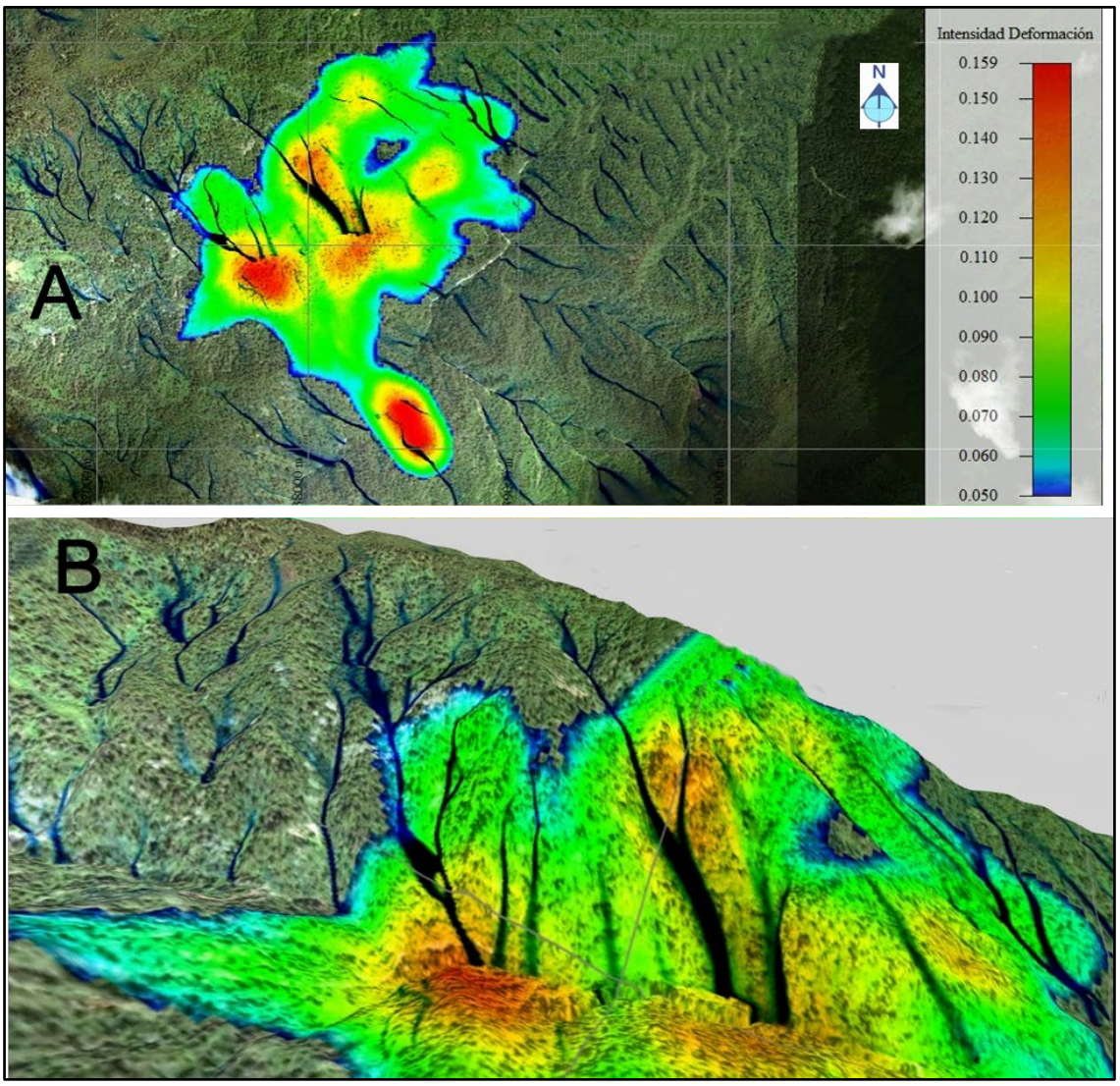


Figura 7. Delimitación de los Mantos o Placas de susceptibilidad crítica por deslizamiento derivados de la concentración de líneas de flujo de la escorrentía y de rotura morfológica.

En esta fase también se trazan líneas de crestas y pie de taludes definidos como líneas de escarpes y de rotura de base de talud (Fig. 8).

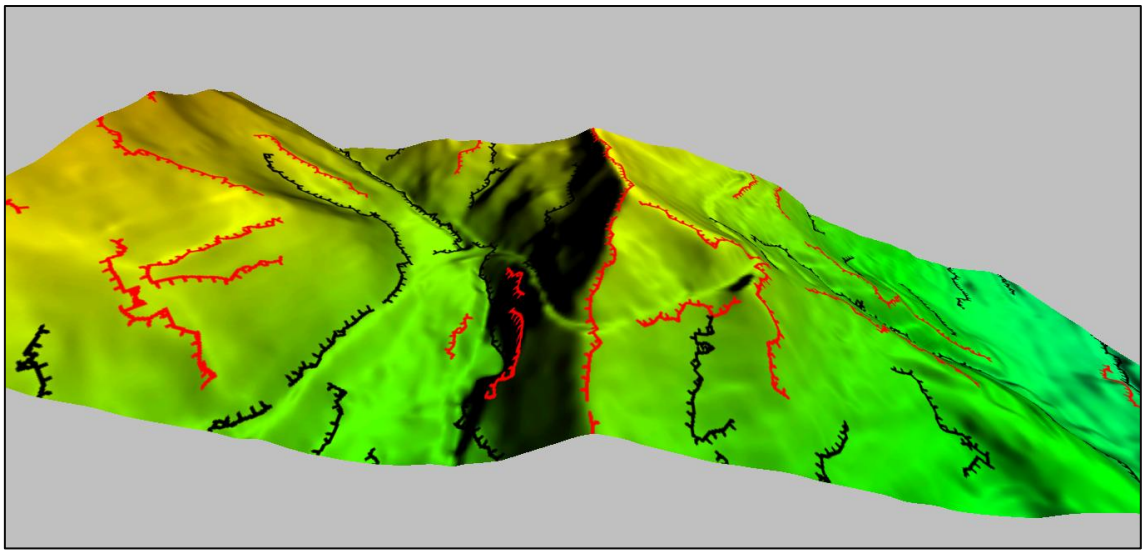


Figura 8. Líneas de escarpes (líneas de color rojo) y de rotura de base de talud (líneas de color negro), obtenidas del Modelo Hidrológico D8. Modelo de respuesta de proceso sin georeferenciar.

Esta metodología preliminar resumida en el Artículo 1 publicado, se aplicó a sectores naturales con movimientos masa recurrentes y los resultados fueron comprobados mediante trabajos de campo. A continuación, se presentan de manera sintética, algunos casos de la aplicación de esta metodología:

1.2.1.1. Submodelo A: Modelado Numérico de Patrones de Flujo de la escorrentía superficial, como generadores de movimientos en masa.

- Caso 1: Desastre de “La Josefina”, determinación de deformaciones sismo-tectónicas en función de patrones de flujo.

El desastre de “La Josefina” es considerado hasta la fecha, el segundo desastre en magnitud en Suramérica después de la catástrofe ocurrida en el pueblo de Armero, en Colombia. En la Figura 9 se ubica la zona de estudio. El deslizamiento se produjo en el flanco izquierdo del cerro Tamuga influenciado por fallas geológicas regionales (líneas de color negro) y en donde se ubicaba una cantera de extracción de áridos para la construcción. El 29 de marzo de 1993, se produjo la reactivación de un macro deslizamiento antiguo en el sector de la Josefina que produjo el cierre de los ríos Paute y Jadán. Este deslizamiento tuvo unas dimensiones de 1.700 metros de largo por 800 metros de ancho, un escape principal de 325 metros y una profundidad aproximada de 125 metros. Su pendiente varía de 38° en el escarpe a 8° en la zona de acumulación y 41° en el pie. En la Figura 10A se puede ver el deslizamiento y su escarpe. En la Figura 10B se aprecia el embalse de La Josefina.

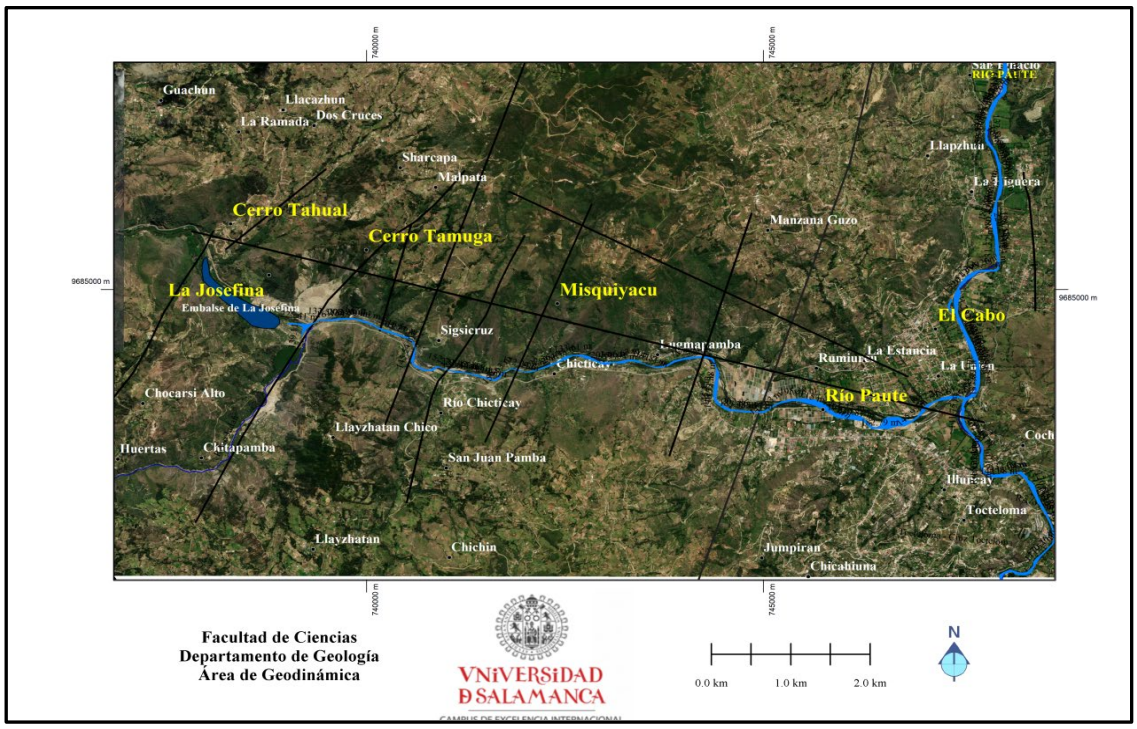


Figura 9. Ubicación de la zona de estudio entre el cerro Tahual hasta el sector de El Cabo, cuyo rio principal es el Paute (color azul).

En el embalse de La Josefina del río Paute, debido a la rotura de la presa y la consecuente agua liberada del embalse, quedaron destruidos algunos sectores de la periferia de las ciudades de Cuenca y Azogues, alcanzando la lámina de agua 140 Km aguas abajo, teniendo en cuenta el enorme impacto socio-ambiental y económico que produjo este deslizamiento y sus funestas consecuencias (150 muertos, 10.000 damnificados y 150 millones de dólares en pérdidas económicas). Este evento puso de manifiesto la importancia que se debe dar a los fenómenos naturales y la necesidad de realizar estudios de prevención de desastres naturales en las cuencas alta y media del río Paute. Esta zona tiene características bioclimáticas pertenecientes a la región subhúmeda templado y con formaciones de Bosque seco montano bajo. Las temperaturas máximas se encuentran entre 12 y 22 ºC.; la pluviosidad media anual entre 500 -1000 mm. La estación lluviosa es de tipo equinoccial, con una estación seca muy heterogénea en los meses de julio, agosto y septiembre.

En la zona se han desarrollado actividades de extracción de áridos desde la década de los 70 y posteriormente a la catástrofe se han tratado de culpar a la actividad minera desarrollada en la zona como causantes de estos fenómenos naturales. Hoy sabemos que estos eventos naturales (movimientos en masa) se pueden producir en combinación con procesos geodinámicos internos y/o externos (fallas geológicas, sobresaturación de agua en los taludes, sismicidad…).

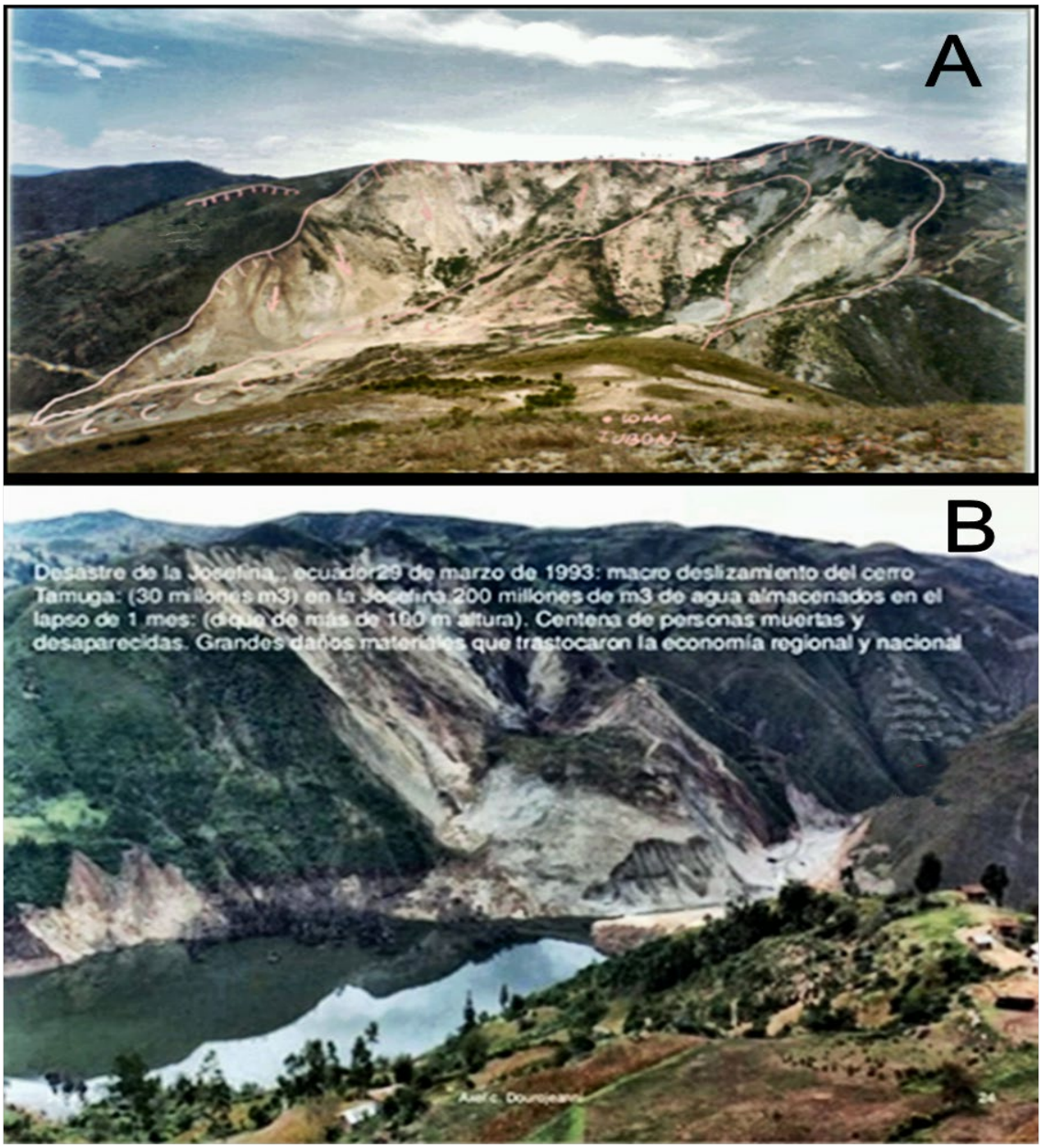


Figura 10. Fotografías de prensa tomadas en 1993 del deslizamiento en La Josefina deslizamiento y escarpe (A). Vista del embalse con el deslizamiento (B).

El relieve en el área de estudio varía desde los 2.100 a 3.260 msnm. Los procesos de erosión glaciar, fluvial y geotectónicos han modelado el relieve con rango de pendientes naturales con taludes entre los 6º y 45º. La principal cuenca hidrográfica dentro del área de estudio constituye el río Paute alineado al sistema regional de fallas NE-SW. Con esta orientación se encuentran modelando el terreno los ríos Burgay y Gualaceo y otros drenajes con dirección NW-SE como el río San Francisco que modelan las formas en rocas metamórficas.

El deslizamiento generado y sus funestas consecuencias, pusieron de manifiesto la importancia que se debe dar al estudio de las amenazas naturales y la falta de estudios de prevención en las cuencas alta y media del río Paute, las cuales presentan una alta vulnerabilidad por terrenos inestables localizados

en toda la cuenca del río Paute. De acuerdo a los estudios realizados por la Misión Geológica Británica en la Cordillera Real, localmente se pueden diferenciar formaciones geológicas que van desde el Paleozoico hasta el Cuaternario. Se puede distinguir un basamento metamórfico de edades Paleozoico y Mesozoico correspondientes al cinturón metamórfico de la Cordillera Real, rocas intrusivas y volcánicas del Triásico, Jurásico, sedimentos Cretácicos, Paleógenos y Neógenos parcialmente cubiertos por rocas volcánicas y depósitos sedimentarios y volcanosedimentarios de edad Cuaternaria. La falla geológica Cauca-Patía posiblemente es la generadora de los eventos de geodinámica externa en el área de estudio. Se presenta como el extremo occidental y la más grande del sistema de fallas de la Cordillera Real, y la falla Romeral se presenta como su extremo Oriental.

El análisis morfológico del río Paute revela la situación de inestabilidad persistente en el tramo más vulnerable comprendido entre la Josefina y la confluencia con el río Gualaceo. Los estudios geomorfológicos, geológicos e hidromorfologicos orientados hacia la determinación del perfil de equilibrio fluvial del cauce han ayudado a establecer el importante potencial erosivo del río, lo que se confirmó con un control batimétrico en esa época. Una alternativa viable de solución para aliviar el riesgo hidrogeológico de la zona consistió en la ejecución del Plan Maestro Hidráulico -PMH- para la estabilización fluviomorfológica del cauce, que consistió en un sistema de obras transversales en el cauce, denominados umbrales, emplazados en lugares estratégicos. El objetivo del PMH fue permitir que el cauce adquiera su condición de equilibrio, evitando un descenso generalizado del lecho por erosión y por extracción minera y principalmente evitar un desastre similar al ocurrido en 1993 (Cando, 2001).

El proyecto Prevención Ecuador Cuenca Paute -PRECUPA-, ha estudiado, mediante una red sísmica, las fallas regionales más importantes en la región como son las fallas Cañar-Carnegie, Jambelí-Cañar, Cahucha, Girón-Santa Isabel (Cauca-Patía), Gualaceo-Paute, Yacumbi-Méndez, Jubones. Este estudio indica que históricamente han ocurrido 1.649 sismos superiores a magnitud 4 Mw y 11 mayores a magnitud 6 Mw. Estas magnitudes asociadas a precipitaciones máximas, fueron los factores disparadores de los movimientos en masa y destrucción de las geoformas principalmente en rocas metamórficas de baja calidad geomecánica, como las que se encuentran en el área de estudio.

La Figura 11A muestra el modelo de flujo de la escorrentía superficial, líneas de rotura morfológica y deformación del terreno realizado con un modelo digital de elevaciones de 1992. En la Figura 11B se presenta el cerro posterior a la ocurrencia del deslizamiento y en la Figura 11C el punto de disparo del área de susceptibilidad crítica ante deslizamientos en el cerro Tamuga y otros sectores elaborado con un año de anticipación. En este caso el deslizamiento, iniciado en esta área crítica, fue provocado principalmente por precipitaciones intensas y acumulación de sismos de 4 a 5 Mw.

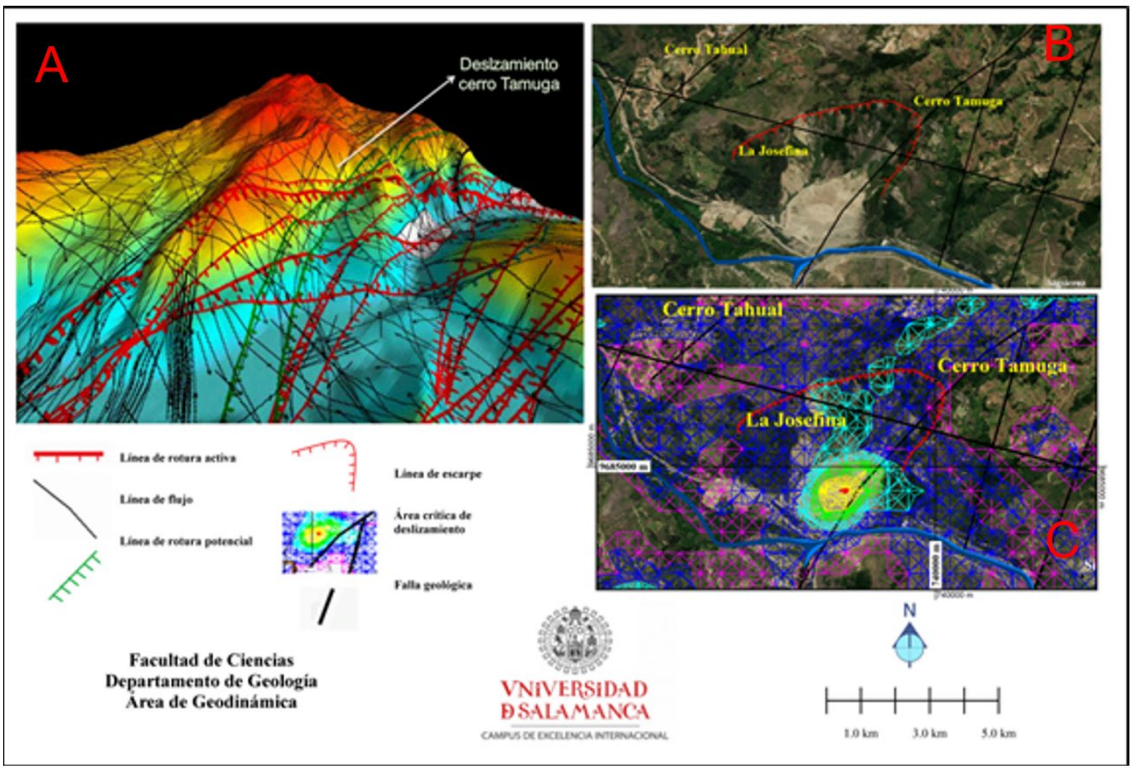


Figura 11. Capturas de la modelización de los procesos de deformación del relieve en el cerro Tamuga: (A) Líneas de flujo de la escorrentía superficial y líneas de rotura morfológica, (B) el sitio después del deslizamiento y (C) punto y área crítica de susceptibilidad a deslizamientos.

En la Figura 12, podemos observar el análisis de deformación del relieve que determinó un área critica o placa de deformación-deslizamiento al pie del cerro Tamuga, que incluye a este cerro y otros sectores en esta región, con orientaciones principales NE-SW, N-S y en un arco continuo (malla de color azul-cian), con coordenadas centrales de punto de disparo de orden mayor:

P1= 740075.68, 9685711.69 en el cerro Tamuga;

P2= 738288.940, 9685882.617 en el cerro Tahual;

P3= 738772.76, 9685193.15 en las laderas del embalse de La Josefina;

P4= 742243.71, 9685505.49 en el cerro Mizhquiyacu y

P5= 746579.59, 9685089.45 en el sector de El Cabo.

Esta zona presenta varias regiones críticas que se encuentran relacionadas con fallas activas, en donde los procesos sedimentarios actuales identificados como vectores de desplazamiento, se ven traducidas en el campo como arcos de deslizamiento que encierran movimientos gravitacionales en un área que conecta el cerro Tahual, los taludes de La Josefina, el cerro Tamuga, San Cristóbal, el cerro Mizhquiyacu que presenta un deslizamiento antiguo, hasta el sector de El Cabo.

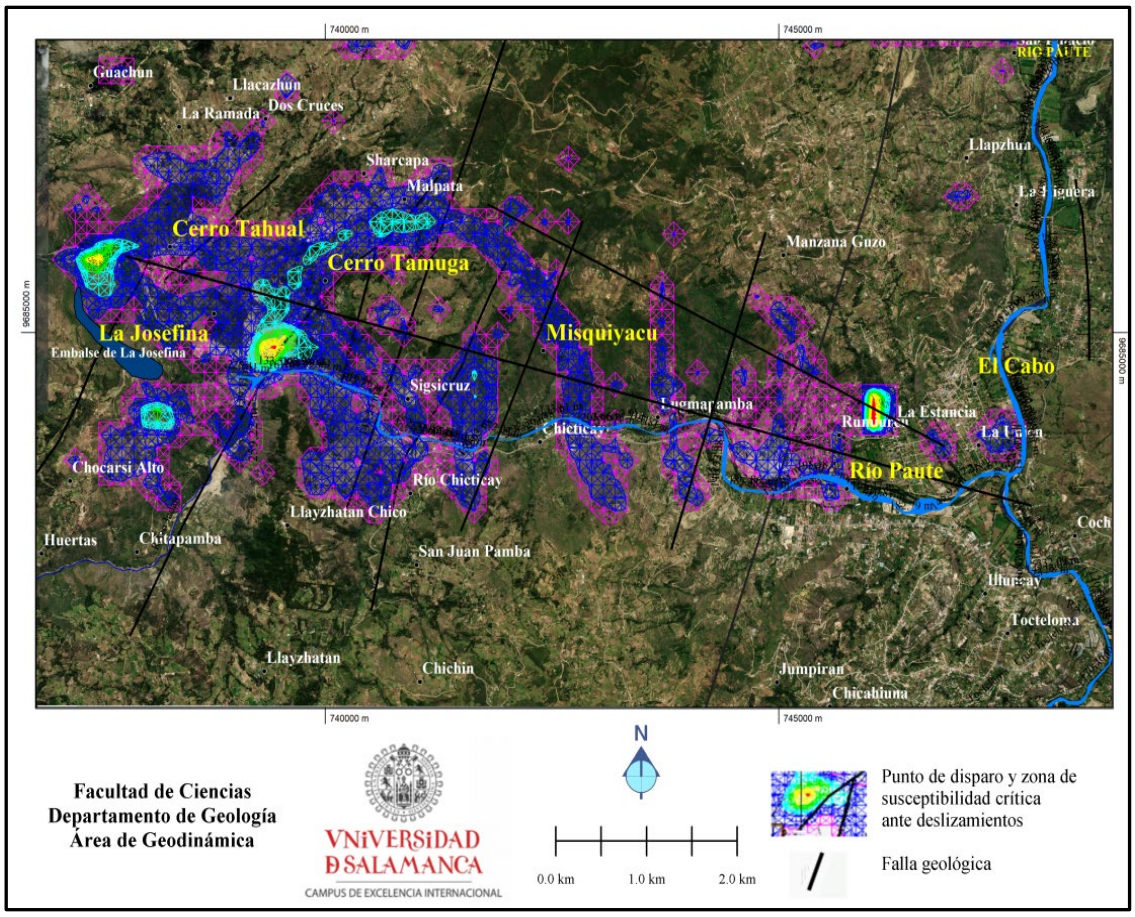


Figura 12. Procesos de deformación del relieve en el cerro Tamuga. Punto disparo, área crítica de deslizamiento y deslizamientos potenciales.

- Caso 2: Carretera Papallacta-Baeza. Análisis de deformaciones del relieve, terrenos inestables y flujos de masa apoyado por caracterización geotécnica.

La aplicación del método 1, en la carretera Papallacta-Baeza, donde ocurren frecuentes deslizamientos. El sector se ubica en la región Nororiental Ecuatoriana, a lo largo de la carretera Quito-Tena en el tramo Papallacta-Baeza del cantón Quijos en la provincia de Napo (Fig. 13).

El análisis de movimientos en masa realizado, comprendió una extensión aproximada de 33 km a lo largo del eje vial desde Papallacta. Esta infraestructura viaria es una de las de mayor grado de peligro en el territorio ecuatoriano, principalmente en este tramo, donde se producen constantes deslizamientos tanto en épocas de invierno como de verano, causando la obstrucción de la vía y por consiguiente pérdidas económicas a los habitantes de la región y al Estado Ecuatoriano (Cando et al., 2001).

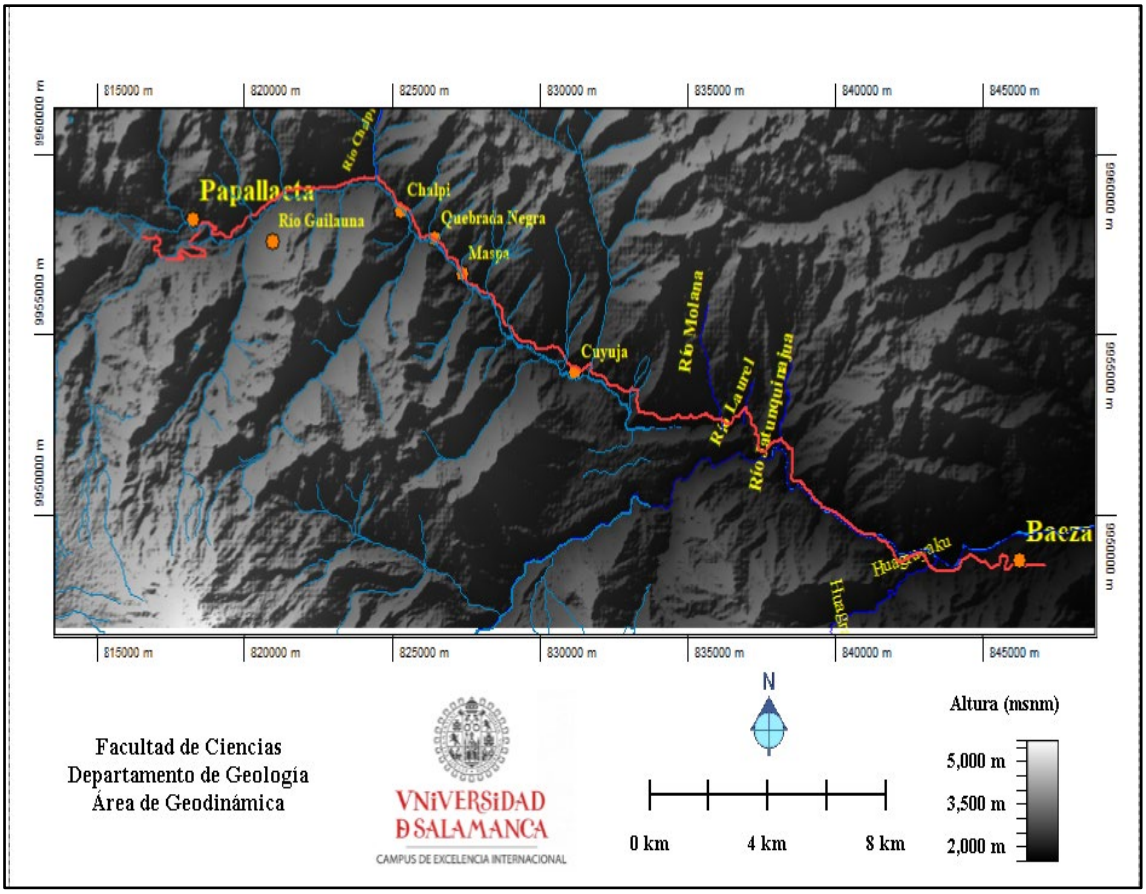


Figura 13. Ubicación del tramo de carretera Papallacta-Baeza, tramo de aplicación del método 1 para determinar deformaciones del terreno y movimientos en masa.

Uno de los fenómenos más devastadores fue el producido el 11 de junio del año 2001 en el sector conocido como El Huango a 7 Km al Este de Papallacta. El flujo en movimiento de aproximadamente 300.000 m^3 de sedimentos causaron la rotura del oleoducto transecuatoriano SOTE y el gaseoducto que transportaba gas a Quito, derramándose aproximadamente 10.000 barriles de petróleo. Este flujo de sedimentos cruzó el río Papallacta chocando contra la montaña de enfrente destruyendo la vivienda de la familia Ango, quedando 5 de los 6 ocupantes sepultados. Horas más tarde a 2 Km de distancia a la altura de El Huango en la quebrada Negra se produjo otro fenómeno similar quedando sepultadas unas 25 personas en una casa que sirvió de albergue para algunos viajeros que se quedaron a dormir. La Cruz Roja confirmó que hasta las 16:00h del día 12 de junio se produjeron 36 muertos, 250 personas afectadas y 4 desaparecidos. Un camión fue arrastrado por el deslizamiento que se llevó la infraestructura completa de la vía y unos 40 Km de carretera fueron destruidos (El Comercio, 2001). Es importante mencionar que el modelo de deslizamiento utilizando esta primera metodología, determinó con dos años de anticipación este deslizamiento.

La zona de estudio se halla enmarcada dentro de un ambiente geológico que comprende rocas cuyas edades que varían desde el Paleozoico hasta el Holoceno. Se puede distinguir un basamento metamórfico de edades Paleozoico y Mesozoico correspondientes al cinturón metamórfico de la Cordillera Real, rocas intrusivas y volcánicas del Jurásico, sedimentos Cretácicos, Paleógenos y Neógenos parcialmente cubiertos por rocas volcánicas y depósitos sedimentarios y volcanosedimentarios de edad Cuaternaria. La topografía irregular, la pendiente del talud natural a favor del movimiento de las capas de roca firme y depósitos superficiales, el tipo de roca y el régimen de lluvias intensas de la zona de precordillera en clima subtropical húmedo, han favorecido a que los flujos de acumulación de la escorrentía, sea el factor más importante responsable de la mayoría de los fenómenos erosivos y movimientos en masa en el trayecto de la carretera desde Papallacta a Baeza. En base a la interpretación de fotografías aéreas en conjunto con la determinación de las deformaciones superficiales del terreno y el trabajo geológico-geotécnico de campo se determinaron áreas inestables en donde hay evidencias de antiguos y recientes deslizamientos ocurridos a lo largo de la carretera, así como también en los flancos de las quebradas que afectan directamente las vías de comunicación como el oleoducto de Sistema del Oleoducto TransEcuatoriano –SOTE- y su infraestructura, las viviendas presentes dentro de la zona y con posible afectación del Oleoducto de Crudos Pesados -OCP-.

La aplicación de la primera metodología en este sector determinó por primera vez flujos acumulados relacionados a flujos de lodo y escombros con bloques métricos en matriz limo-arcillosa. Esto se consiguió ajustando los parámetros de configuración de las rutas de flujo (Flow Paths) como se indicó en el ejemplo anterior. El mapa de deformación regional del relieve y de movimientos en masa, con flujos de lodo y escombros en ese tramo y zonas cercanas, se puede ver en la Figura 14.

Un caso especial fue el deslizamiento en la quebrada Huangu en donde ocurrieron los deslizamientos más devastadores, y también fueron afectadas las quebradas Yahuana, y los sectores conocidos como San Víctor y San Fermín con flujos de lodo y escombros, deslizamientos rotacionales y translación en depósitos superficiales y en forma de cuña en las partes medias y altas de estas quebradas, incluyendo caída de bloques. En la quebrada El Huangu, el modelo realizado en el año 1999 dos años antes del evento destructivo, obtuvo dos puntos de disparo lo más cercano posible a la realidad, el primero aguas arriba (P1) de inicio de un flujo de lodo y escombros, y el segundo más abajo (P2). Este deslizamiento combinado, causó destrucción en varias viviendas, fallecidos y rotura del oleoducto. Estos puntos iniciales modelados y una fotografía de la zona se pueden ver en la Figura 15.

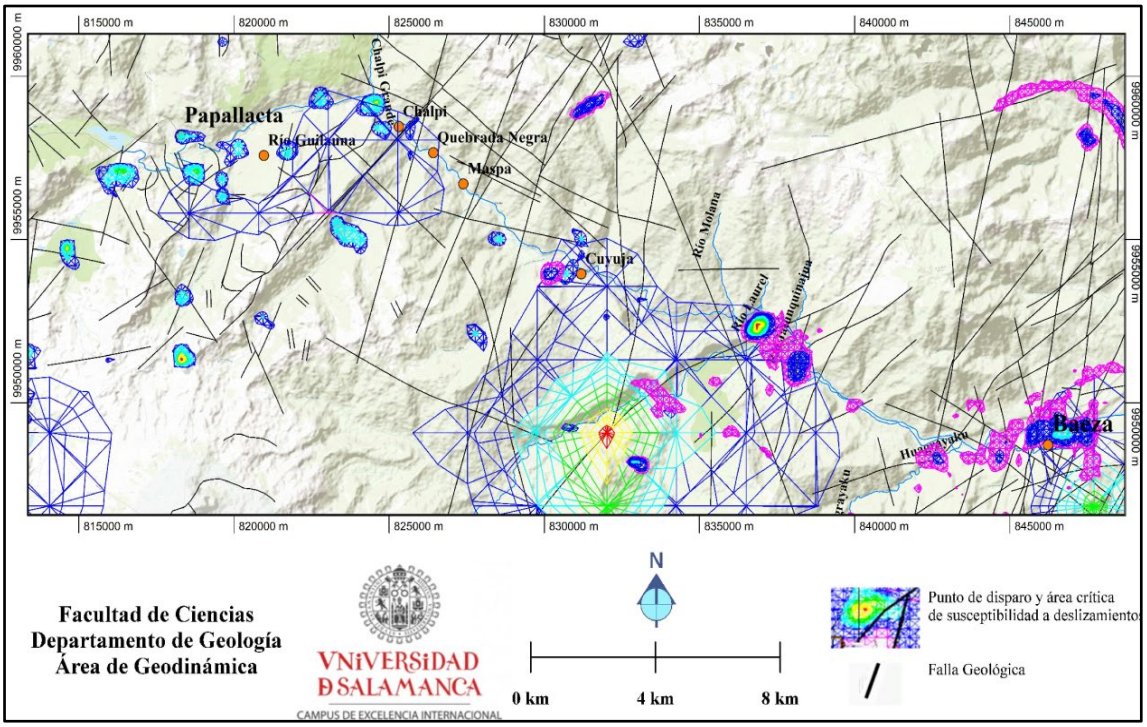


Figura 14. Tramo de vía Papallacta-Baeza, Deformaciones del terreno, flujos de lodo y escombros y puntos de control de campo (cruces de color rojo).

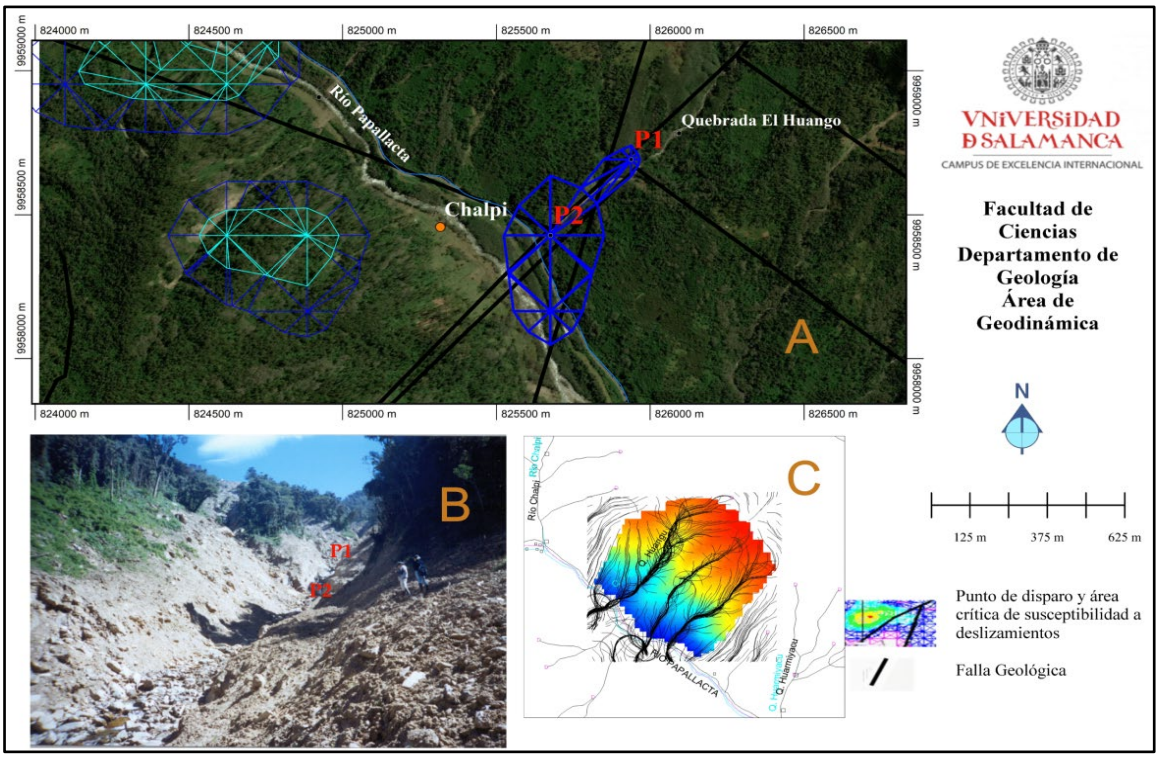


Figura 15. Captura de imágenes del deslizamiento ocurrido en el año 2001 en la quebrada El Huango. Puntos de disparo P1 y P2 (A). En (B) el evento real y en (C) otros eventos de flujo de masa cercanos en color azul.

Este deslizamiento permitió comprobar la acción conjunta de procesos tectónicos activos que cambiaron de manera rápida la morfología del relieve por flujos superficiales erosivos de lodos y escombros, acompañados por remoción y desplazamiento de formaciones superficiales localizados a lo largo de la vía, además de hundimientos, rotura de geoformas y procesos combinados de hundimientos y caída de bloque. El control de campo con GPS, verificó estos resultados. En el mapa regional a escala 1:50.000 de la Figura 16A se muestran las zonas de deformación activas regionales desde la población de Cuyuja hasta Baeza. En San Víctor, en el mismo periodo temporal, ocurrió un deslizamiento de gran magnitud, identificado con esta metodología, con una longitud de 5 km aguas arriba y 2 km en la parte baja que recubrió los cauces de los ríos El Laurel, La Molana y Jatunquinajua. Recalcar que en la quebrada El Huango y en este tramo de la infraestructura, en San Fermín, fueron identificados con esta metodología, y por primera vez, zonas de lujos de lodo-escombros, sin aplicar todavía modelos hidromorfológicos más completos, utilizando índices morfométricos como el Índice Topográfico de Humedad, el factor Longitud y magnitud de la Pendiente y el criterio de Mhor-Coulomb. En las Figura 16B y Figura 16C, se pueden ver el sector del río Jatunquinajua antes y después del deslizamiento.

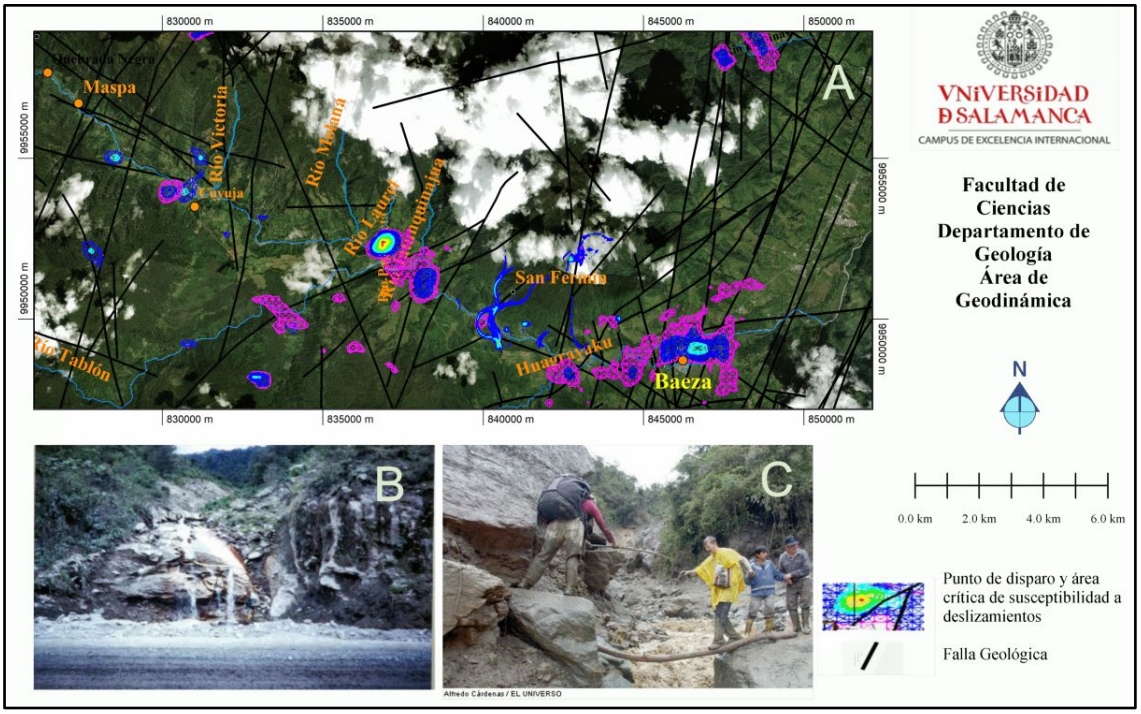


Figura 16. Deslizamiento año 2001 en los ríos La Molana, El Laurel, Jatunquinajua y San Fermín (A). El río Jatunquinajua antes del deslizamiento (B) y después del deslizamiento (C).

1.2.1.1. Submodelo B: Modelo de Deformaciones del Terreno, utilizando las Líneas de Rotura Morfológica.

- Caso 3: Aplicación del Modelo de Rotura Morfológica en la evaluación de la dispersión de metales pesados en suelos mineros evaluada mediante el método de Especiación Secuencial Química, en el año 1997.

Para este caso, la submodelo A que evolucionó al Modelo de Rotura Morfológica, registrado como metodología desarrollada y presentada por el autor de esta tesis en el Primer Simposio Internacional de Movimientos en Masa realizado en la ciudad de Cuenca (Ecuador) durante el año 2001, en el GeoSpatial World de Intergraph realizado en Hunsville, Alabama USA en el año 2002, y en el Simposio Internacional de Geología para la Planificación del Uso del Territorio en Puerto Varas, Chile en el año 2003. Esta metodología, fortaleció el criterio de dispersión del método de Especialización Secuencial Química de metales pesados utilizando el análisis de flujo superficial de la escorrentía superficial del agua de precipitación desde una escombrera metálica abandonada, ubicada al sur de la Garganta de los Montes y al norte del monte el Reajo, provincia de Madrid, Figura 17A y Figura 17B. En la Figura 17C se puede ver la dirección de flujo desde la escombrera dirigida hacia la población.

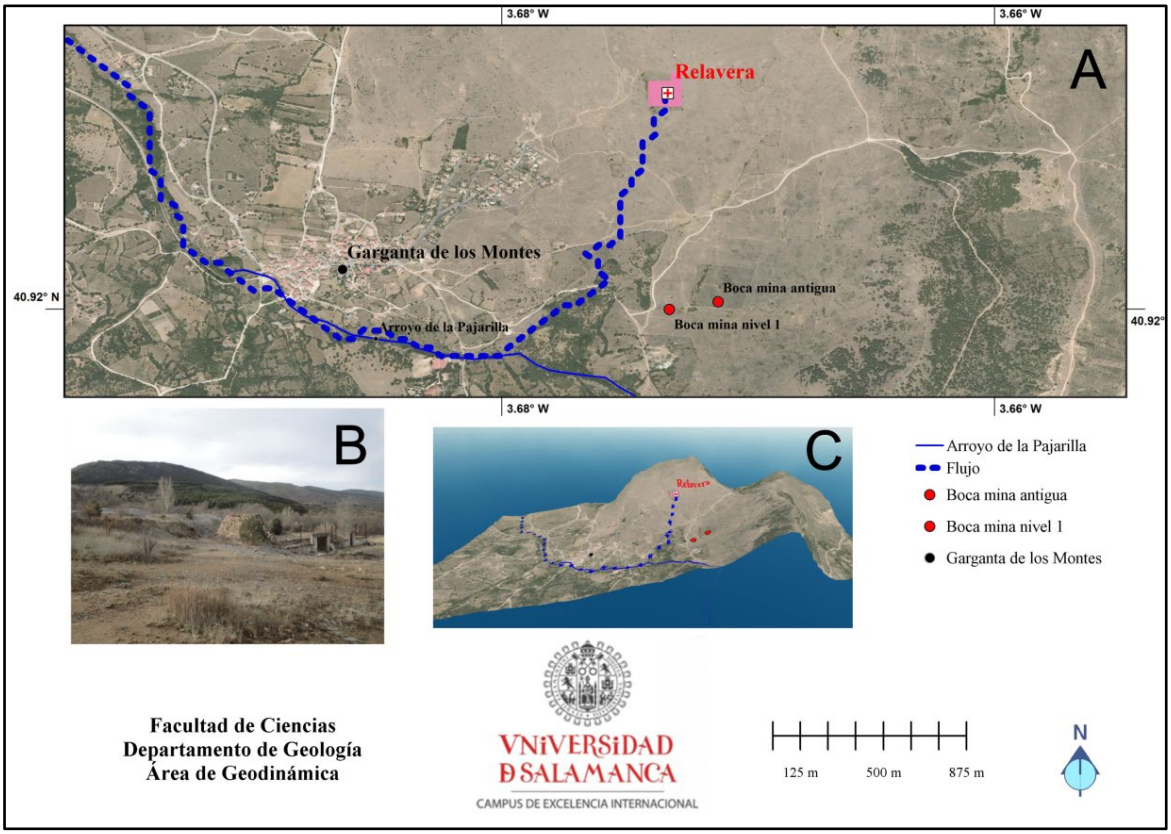


Figura 17. Ubicación de los acopios de estériles (relavera=escombrera) de la Mina Fernandito (A), instalaciones abandonadas (B) y modelo 3D del sector (C).

La escombrera, pertenece a la mina Fernandito, con una mineralización de calcopirita en paragénesis con pequeñas cantidades de pirita, blenda y marcasita, en materiales metamórficos gneises migmatíticos, muy próximos al granito de La Cabrera. Los suelos se clasifican como cambisoles húmicos (edafización in situ) y dístricos (poco desarrollados). Se ha efectuado una interpretación del estudio de especiación secuencial química de Cu, Cd, Cr, Ni, y Pb en los suelos del entorno de una escombrera de la mina abandonada, utilizando el Modelo de Rotura Morfológica, en base a una evaluación realizada previa (Encabo y Cala, 1997).

Se enfocó el problema de diferenciación en el comportamiento edafogeoquímico de estos metales respecto a su movilidad y dispersión, confirmadas por la aplicación de las rectas de Henry (efecto de la presión sobre la solubilidad de un gas en un líquido), investigado por los autores de la evaluación, anteriormente mencionados, y por la respuesta obtenida del Modelo de Rotura Morfológica en el transporte y posible localización de los mismos en el año 2003. El fraccionamiento secuencial de los metales pesados reveló diferencias apreciables tanto en lo referente al grado de asociación a los constituyentes de los suelos, como a su posible biodisponibilidad. En este sentido, el cobre muestra una tendencia generalizada de asociación hacia la fracción IV (metal asociado a materia orgánica y/sulfuros), y como componente del sulfuro al que pertenece, calcopirita, que ha liberado 2.5 % de Cu y se ha concluido que el resto del mineral se encuentra bajo formas más resistentes determinadas en la fracción V.

Los suelos situados en cotas superiores, presentan como tendencia de asociación secundaria la fracción III, que se interpreta como formas de cobre asociadas a óxidos de hierro y manganeso o a materia orgánica. Los suelos situados en cotas inferiores, con mayor contenido en materia orgánica y mayor grado de humificación, presenta mayores porcentajes de cobre en la fracción residual (fracción V), que en la Fracción III. Esto indica que, el cobre aparece bajo forma de sulfuros y/o asociado a materia orgánica más resistentes. En el muestreo realizado las muestras M41, M42 y M43 alejadas de la mineralización, presentan valores de cobre que pueden considerarse más representativos del fondo geoquímico de la zona correspondiendo a una Fracción V y en menor grado a la Fracción IV. Las muestras M14, M15, M17, M18 presentan valores que sobrepasan el valor límite de contenido total de cobre 50 ug/g, estipulado para suelos con PH menor que 7, y han sido considerado como valores tóxicos. Teniendo en cuenta la naturaleza biodegradable de la materia orgánica de los suelos, el cobre unido a las fracciones orgánicas puede ser considerado potencialmente tóxico. Los contenidos de cadmio, extraídos en las distintas etapas del fraccionamiento muestran una gran heterogeneidad, a excepción de la Fracción IV, que para este elemento es minoritario. Aparece en forma mayoritaria en la Fracción V, residual, con representaciones significativas en determinados puntos, M15, M16, M18 de la fracción I.

Los altos valores que se han encontrado, incluso en fracciones consideradas fácilmente biodisponibles (muestras M15, M18 M27), sugieren que la toxicidad de estos suelos respecto a este elemento, tiene un marcado carácter puntual. Los contenidos totales se han considerado elevados en la zona y muy tóxicos. Los contenidos de plomo en mayor porcentaje se encuentran en las fracciones III, IV y V, debido a la fuerte afinidad del plomo hacia la adsorción sobre la superficie de los óxidos metálicos y de la materia orgánica del suelo. El alto porcentaje de Pb en las fracciones I y II, es consecuencia de la desorción, provocada por encontrarse en sitios de baja energía de enlace. Níquel y Cromo aparecen mayoritariamente en la fracción residual, con elevados porcentajes de distribución, lo que ha provocado bajos contenidos en fracciones biodisponibles. Los contenidos totales de los metales estudiados, estimados mediante la sumatoria de las distintas fracciones, han evidenciado una gran heterogeneidad (bajos índices de correlación), en lo que se refiere a Cu y Cd, siendo Ni y Cr los metales con contenidos más homogéneos. Los elevados contenidos de Cu y Cd en varios puntos de la zona de estudio, superan los valores establecidos como límites de concentración de metales pesados en suelos con PH menor que 7. El análisis de dispersión realizado en el estudio, según las rectas de Henry, se ha comparado con los de correlación con la materia orgánica e histogramas de dispersión secuenciales de fraccionamiento para cada metal, y se ha verificado que el Cu presenta la mayor asociación a la biodisponibilidad en las fracciones I, II y II. Los valores anómalos de Cu, en la fracción I, corresponden a las muestras M1, M15, M16, M17 y M18 en la fracción II, las muestras M15, M16, M17 y M18 en la fracción III, las muestras M1, M15, M16, M17 y M18, en la fracción IV, las muestras M15, M17, M18, M19, M22, M26, y para la fracción V las muestras M1, M15, M16, M17, M18, M19, M22 y M26.

La facilidad de erosión de las escombreras, así como la dispersión de sus materiales, que pueden depositarse en un entorno más o menos próximo, ha provocado la modificación de las características físico-químicas de los suelos del entorno, tanto por acumulación de los elementos químicos sobre los mismos, como por acidificación originada por la oxidación de los sulfuros masivos.

La implementación del Modelo de Rotura Morfológica, a partir del MDE, ha simulado las líneas de flujo de la escorrentía superficial y de acumulación de agua, identificándose las avenidas de transporte, que regularon la distribución del contaminante y por tanto su posible contaminación a otros sistemas ambientales, Fig. 18 (A, B) En la Fig. 18 (C) se presenta un perfil topográfico de la zona.

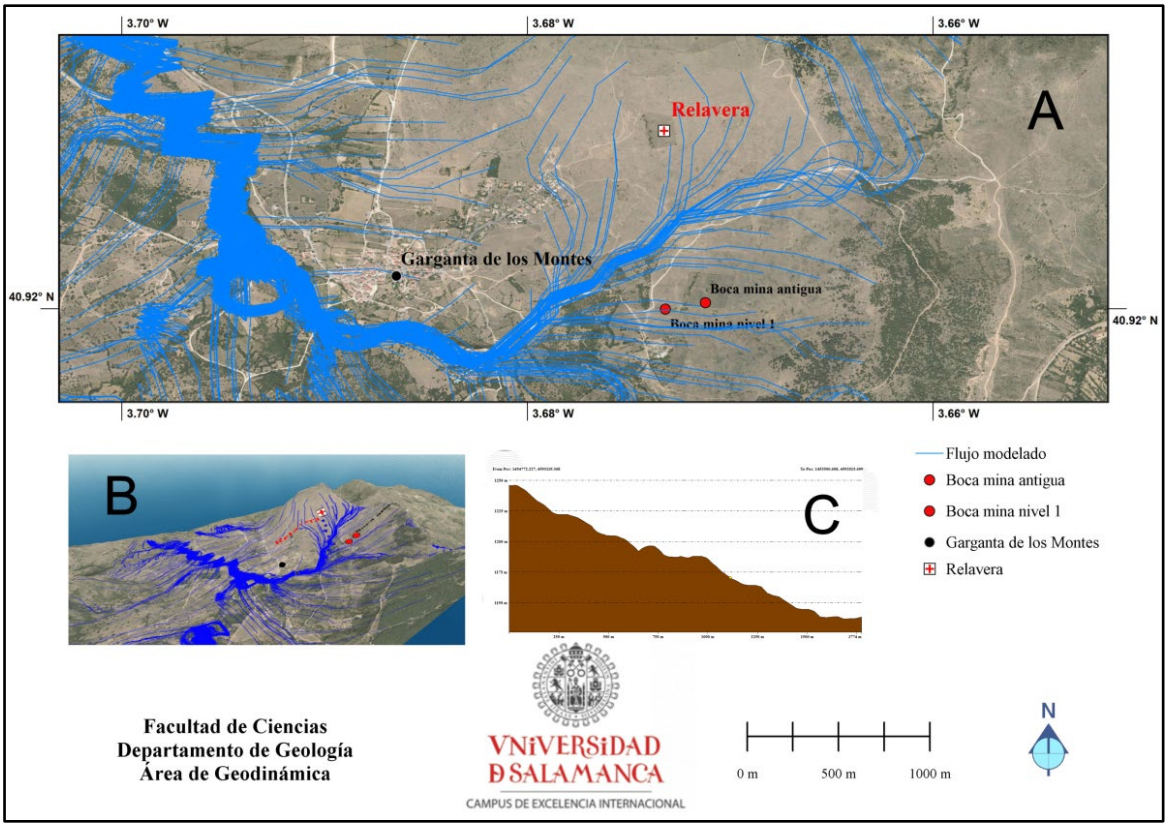


Figura 18. Flujos de la escorrentía modelados desde la relavera (A). Modelo 3D (B) y Perfil topográfico desde la relavera (C).

La modelación de los flujos de la escorrentía superficial del agua de lluvia, comprueba que las muestras de suelo M1, M 2, M14, M15, M16, M17, M18, M19, M22, M26 y M27 son las más contaminadas y aparecen en casi todas las fracciones (zonas de color con tendencia al rojo). Posiblemente, el encontrarse en este tren de flujo, desde la escombrera, pasando por el arroyo La Pajarita, hasta la zona DEP, los metales transportados pudieron haber llegado hasta la zona de reducción, DEP, en las cotas más bajas.

Las muestras M41, M42 y M43 alejadas de la mineralización, se encuentran en trenes de flujo de la escorrentía superficial del agua que no llevaron contaminantes elevados a los sectores deprimidos -DEP-.

Posiblemente el tren de mayor contaminación se encuentra en dos zonas separadas por las muestras 21, 32 y 33, separación posible por encontrarse en una frontera posiblemente depositada en el DEP en la parte baja de la zona de estudio, empezó en la escombrera siguió por el tren de contaminación desde la escombrera que siguió la ruta de flujo, Figura 19 A y Figura 19B, y el modelo 3D de los flujos y los sitios de muestreo Figura 19 C.

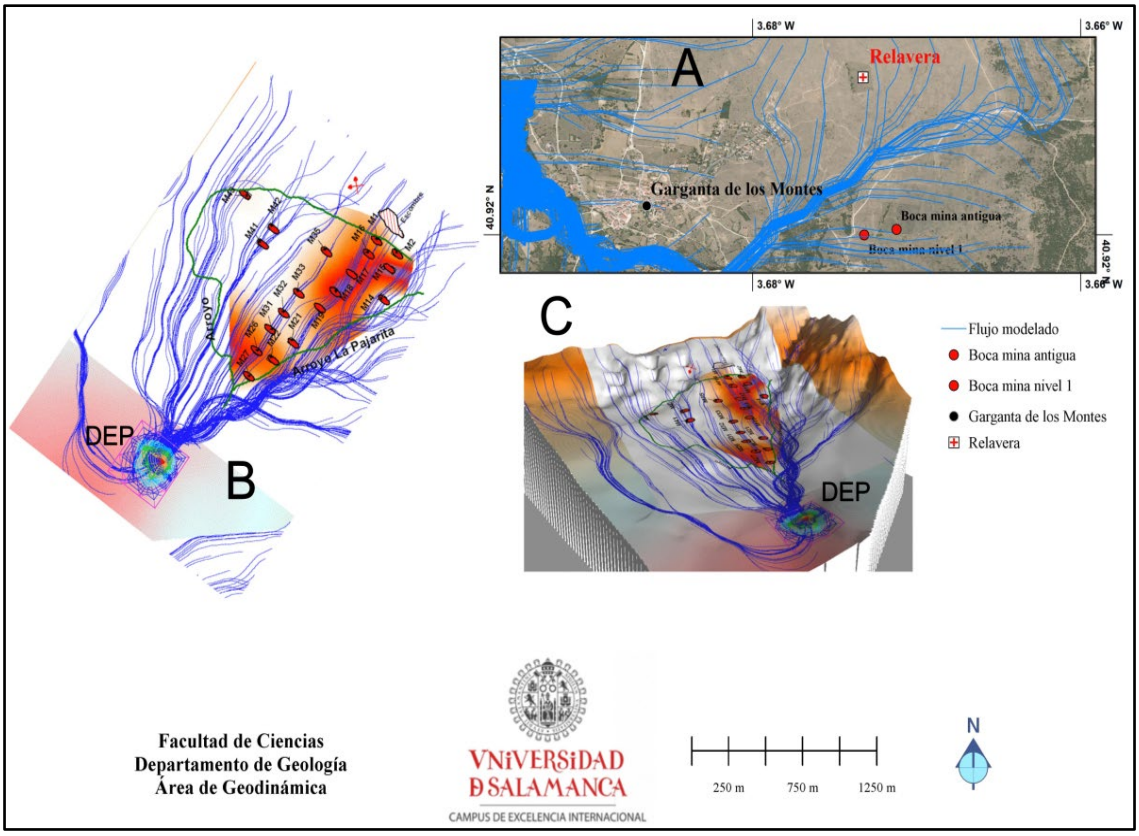


Figura 19. Relación de los puntos de muestreo, flujo y grado de contaminación, en planta (A). Modelo 3D de los flujos de acumulación que posiblemente llevaron las fracciones de metales pesados a la zona baja (B y C).

- Caso 4: El Modelo de Rotura Morfológica y su aporte en el control de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos causados por un vertedero de residuos.

En este caso de aplicación de la metodología primera, se presenta un modelo combinado para determinar la estabilidad geológica en el sector de ubicación de un vertedero de residuos en Jalonguilla, en la ciudad de Quito (Ecuador), modelo realizado en el año 2003 como investigación propia (Fig. 20). Se han utilizado los estudios de caracterización geotécnica del vertedero para la ciudad de Quito, con el principal objetivo de determinar la estabilidad geológica de una área acondicionada y dotada de espacios suficientes para la disposición final de residuos por largo tiempo (Cando, 2003).

El Modelo de Rotura Morfológica, constituyó una herramienta Geomática Aplicada para abordar problemas de movimientos en masa diferentes a los convencionales, ofreciendo soluciones innovadoras dentro del análisis de estabilidad geológica de difícil solución.

En este caso se utilizó el Modelo en conjunto con investigación tradicional de caracterización geológica-geotécnica del sustrato geológico de ubicación de las celdas para la construcción del vertedero y se determinaron áreas sensibles a fenómenos de movimientos en masa, incluyendo hundimientos y su posible afectación de acuíferos de agua dulce.

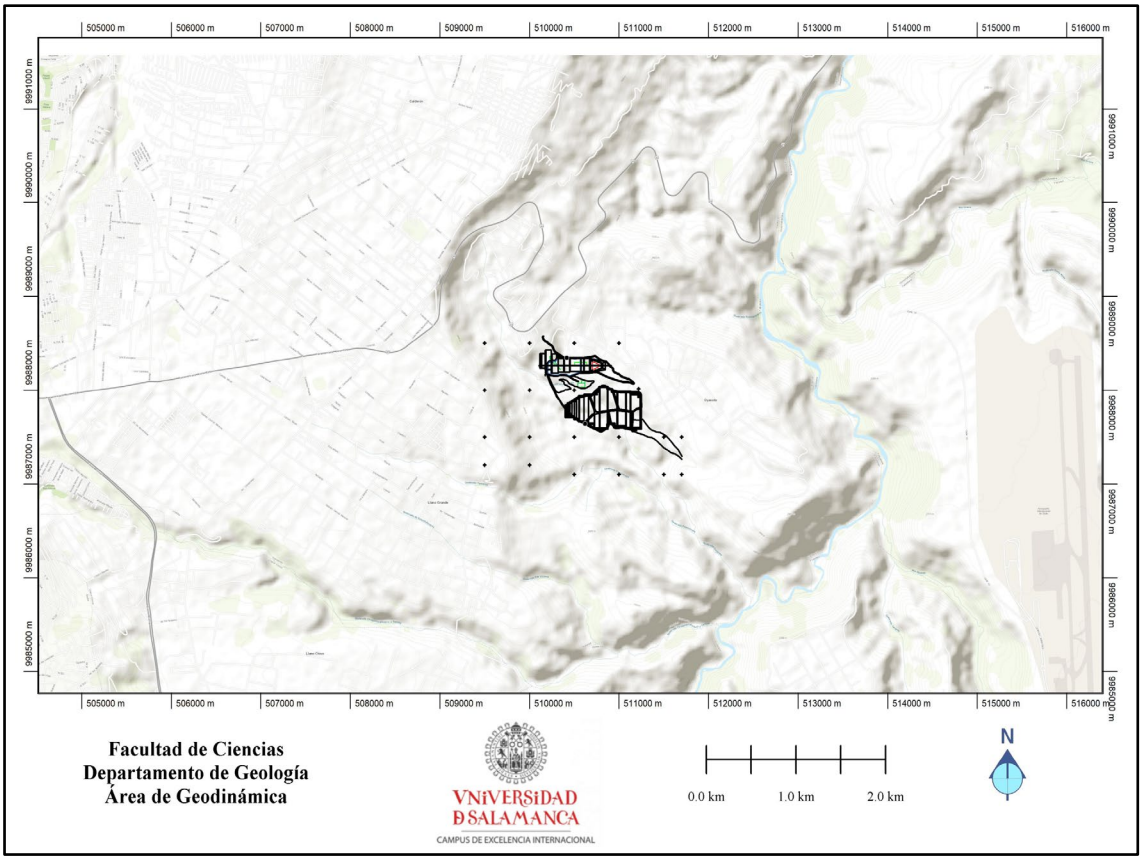


Figura 20. Ubicación del proyecto Jalonguilla. Sitio para la construcción de las celdas del vertedero de residuos de la ciudad de Quito.

A partir de la ubicación del sitio de construcción propuesto (Fig. 21A), se obtuvo la siguiente información de partida: base topográfica, escala 1:5.000 con malla de referencia UTM, drenajes, curvas de nivel (equidistancia 5 m), vías de comunicación, ubicación de las celdas del vertedero de residuos (Fig. 21B) e información geofísica (S.E.V.) (Fig. 21C) y la elación de fallas geológicas activas con la ubicación de las celdas del vertedero (Fig. 21D).

El procedimiento fue el siguiente: en primer lugar, se generaron capas de información estructural de 4 estratos, obtenidos de 9 S.E.V. (Fig. 21D). Posteriormente se analizó la relación de la condición de deformación del terreno vs. estructuras geológicas-condición geotécnica y se determinó la respuesta del Modelo de Rotura Morfológica y su concordancia con las zonas de caracterización geotécnica del proyecto.

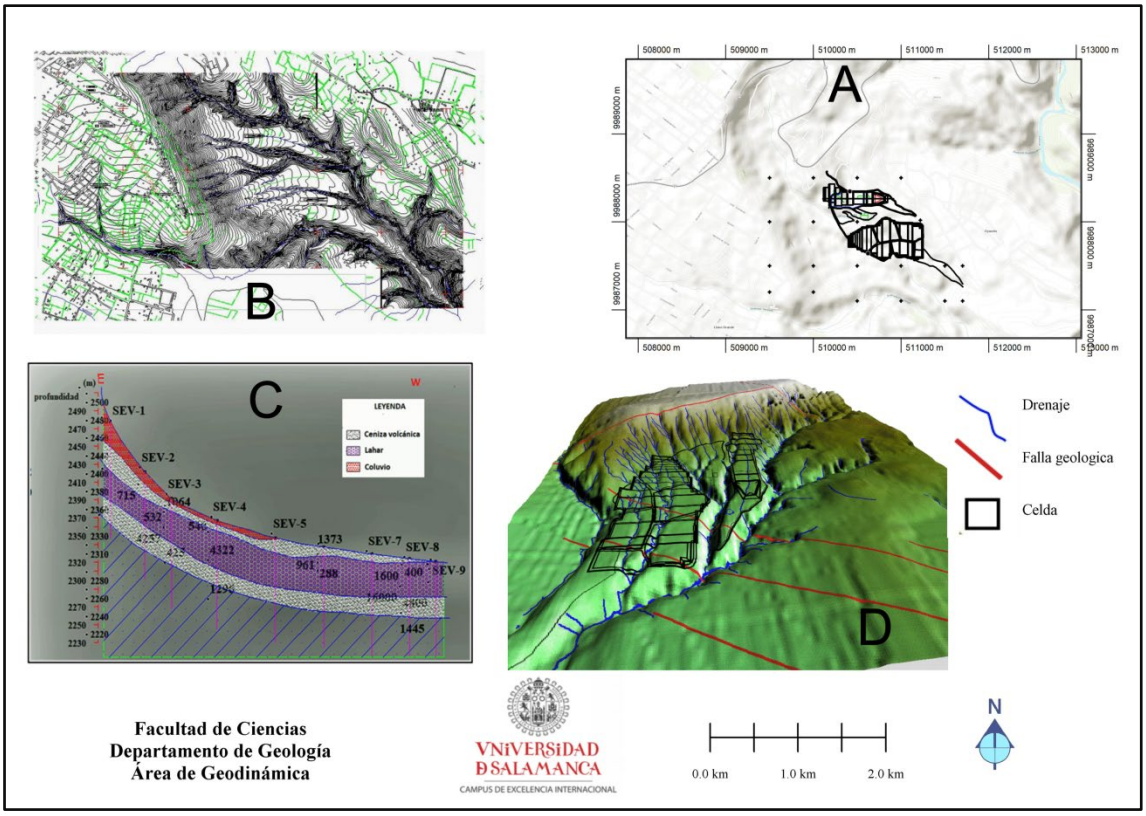


Figura 21. Información base para el análisis de estabilidad geológica del vertedero de residuos implementando la submodelo B y la información geotécnica.

Se modelizo la conexión de zonas de hundimiento entre estratos litológicos, desde la superficie del terreno deformada por la actividad de una falla geológica (Fig. 22A), con las posibles deformaciones de cada estrato (4 estratos). La aplicación del submodelo B permitió determinar que desde la superficie en donde se ubicaron las celdas del vertedero (Fig. 22B), existe una deformación común en todo el paquete estratigráfico, que es el sitio de posibles rutas subterráneas por donde pueden fluir lixiviados desde las celdas de depósito de residuos, capaces de contaminar los acuíferos de agua dulce.

La aplicación del Modelo de Rotura Morfológica con la caracterización geotécnica del sitio, permitió comprobar que el área escogida para el vertedero de residuos, no cumple la premisa de estabilidad geológica del sitio de construcción del vertedero, ya que presenta problemas de deformaciones intensas del terreno con rotura morfológica superficial (Fig. 22C). Se definieron algunos términos para explicar el gráfico del área de susceptibilidad crítica ante movimientos en masa, definiciones que explicaron el “estado actual de la deformación morfológica del terreno” que se presenta en la (Fig. 22D). Esta explicación es la siguiente: en la Figura 22D, se puede ver una zona de intersección de las líneas de flujo de acumulación de la escorrentía superficial y de rotura morfológica, delimitada por los siguientes bordes:

- ✓ Las zonas de borde de conflicto máximo, están representadas con líneas de color azul, y encierran el máximo conflicto morfológico entre las facetas o

caras morfológicas. Estas delimitan el vector máximo de continuidad de un movimiento en masa (deslizamientos, flujos de lodo y escombros, lahares, inundación, hundimientos...).

- ✓ Las regiones de Tensión Continua 1, están representadas por líneas de color celeste, y son franjas de tensión secundaria, o de empuje que transmiten las tensiones morfológicas, originadas desde el punto de disparo, a través de las zonas crítica y subcrítica, controlando el alcance de las zonas de borde de conflicto máximo.
- ✓ Las Regiones de Tensión Continua 2, son líneas de color fucsia, y unen zonas de tensión morfológica continua 1, en la misma dirección y hasta 90º del rumbo medio o preferencial de las caras morfológicas, incrementando franjas complejas y continuas de movimiento.
- ✓ La Región Subcrítica, identificada con líneas de color verde, constituyen zonas que actúan transmitiendo en forma de "palanca", las tensiones morfológicas, con apoyo en la zona crítica, de manera que son las generadoras de las regiones de tensión continua 2.
- ✓ La Región Crítica con líneas de color amarillo, es la zona inicial del movimiento, producido como resultado de la actividad dinámica del punto de disparo, o centro de tensión morfológica principal de color rojo. Esta región es la de mayor sensibilidad al movimiento, accionada por fenómenos naturales dinámicos: sismo-tectónicos, intensa precipitación-erosión, y fenómenos antrópicos como construcción de obras civiles en zonas crítica.

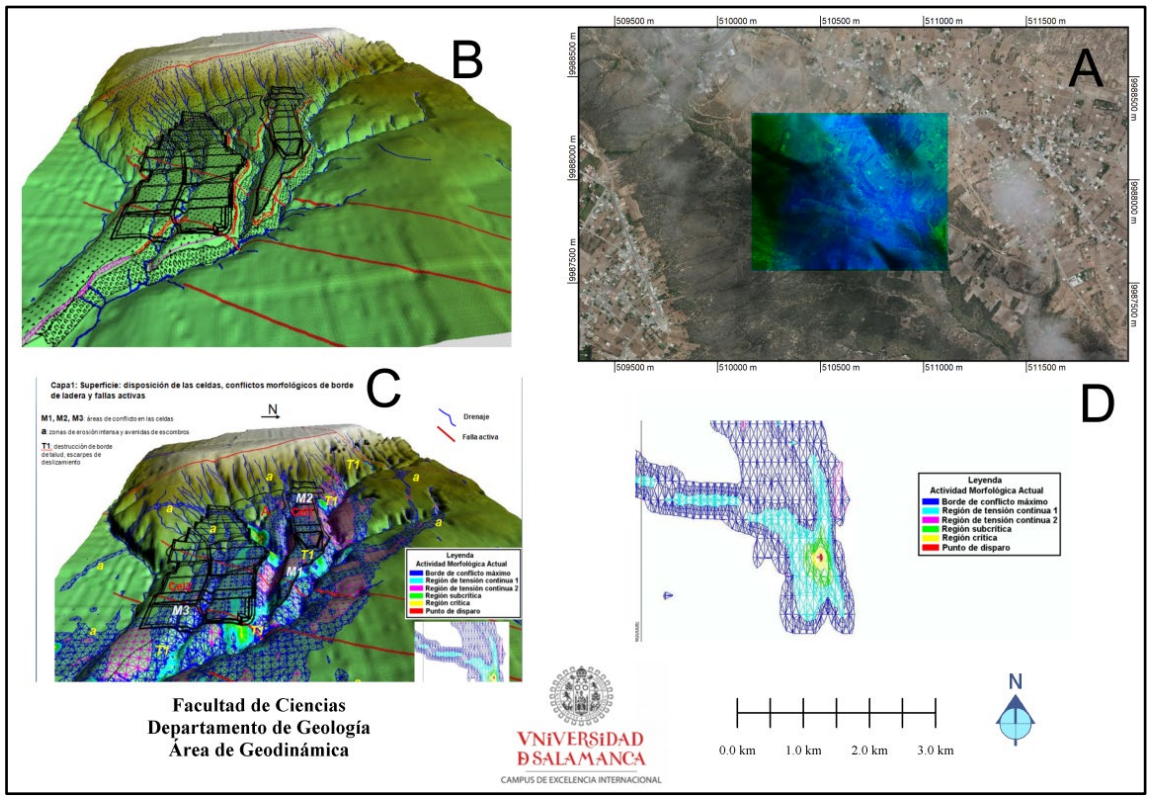


Figura 22. Deformaciones del terreno en el sitio por fallamiento geológico (A). Ubicación de celdas en el territorio estudiado (B). Conflictos de deformación superficial del terreno (C) y grafico de la zona o área de susceptibilidad crítica ante movimientos en masa (D).

Al aplicar el modelo desde la superficie (Fig. 23A), y desde el primer estrato hasta el último (Fig. 23B), se encontraron varias deformaciones de estos estratos y en especial en el punto “P1” (Fig. 23C) que es un punto de deformación que conecta a todos los estratos desde la superficie y es el punto de alta probabilidad de que cualquier lixiviado contaminante, pueda filtrarse hacia los estratos sobre los que se ha proyectado el funcionamiento del vertedero. La inestabilidad geológica del lugar posiblemente se debe presencia de zonas de hundimiento, destrucción de borde de talud, erosión intensa y de fallas geológicas activas. En base a la explicación anterior, desde la superficie, se identificaron zonas de erosión intensa, hundimiento con conexión estratigráfica, avenidas de escombros y de rotura de talud dentro del área de ubicación del vertedero de residuos. La correlación de los resultados de deformación del terreno con la información geológica y caracterización geotécnica, como parte de un conjunto mayor de información, corroboró la ubicación de este punto P1 de conexión estratigráfica. El producto final, desde la deformación superficial (Fig. 24A) es un mapa de ubicación de las áreas de conflicto morfológico superficial y de erosión con mayor conectividad morfológica-estratigráfica y dentro de ellas los puntos de disparo sensibles al movimiento, así como la zona de susceptibilidad crítica y de susceptibilidad ante movimientos en masa, incluyendo subsidencia del terreno (Fig. 24B).

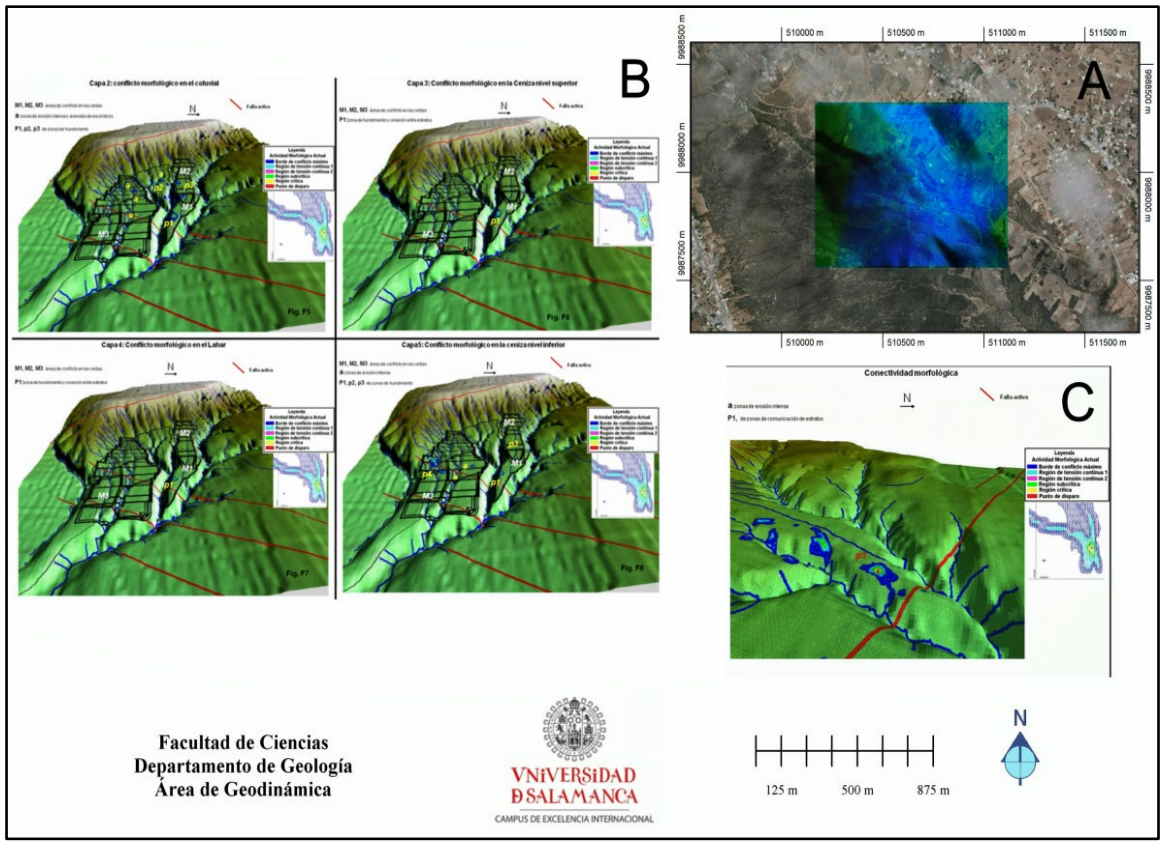


Figura 23. Determinación del punto de conexión P1 en todos los estratos a partir de los SEV y aplicación del Modelo de Rotura Morfológica.

La aplicación del modelo, con la correlación geológica-geotécnica, ha permitido comprobar que el área escogida para el vertedero de residuos, no cumplió con la premisa de estabilidad ambiental en la zona, ya que presenta problemas intensos de posibles roturas morfológicas, con alta probabilidad a que cualquier contaminante, pueda filtrarse hacia los estratos sobre los que se ha proyectado su funcionamiento, debido a la presencia de zonas de hundimiento (zonas P1, P2, P3 y P4), destrucción de borde de talud, escarpes de deslizamiento (zonas T1), zonas de erosión intensa y avenidas de escombros (zonas a), puntos de rotura que se repiten en todos los estratos porosos y permeables como es el punto P1 (común en el coluvial, ceniza nivel superior, lahar y ceniza nivel inferior), alta respuesta a la sismicidad y fallas geológicas activas.

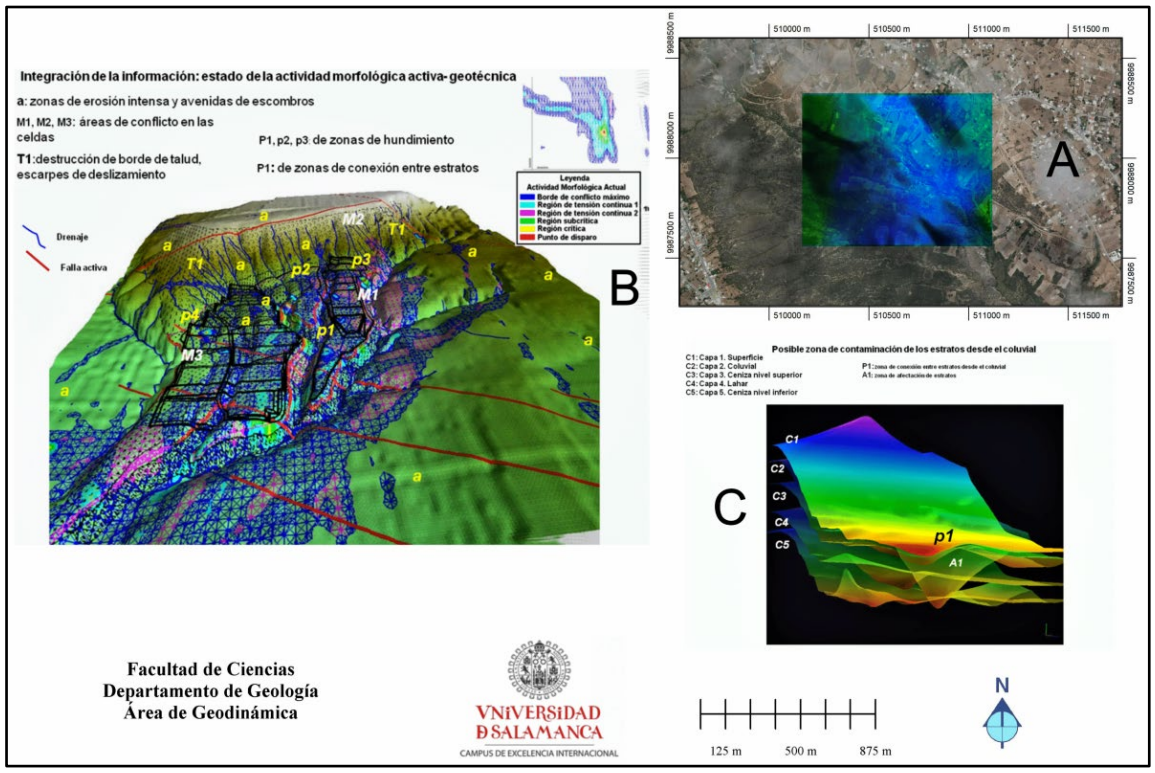


Figura 24. Superficie con la disposición de las celdas, conflictos morfológicos de borde de ladera y en los estratos relacionados a fallas activas.

Desde el punto P1, se puede identificar la zona de influencia que conecta a los estratos C, coluvial, ceniza nivel superior, lahar y ceniza nivel inferior, y define la posible zona de máxima afectación de estratos A1 (Fig. 24C). Esta zona se conecta desde la superficie que, debido a la actividad erosiva intensa, rotura de taludes, fallamiento activo, alta sensibilidad a la sismicidad y bajas condiciones geotécnicas, es el área que presenta la máxima vulnerabilidad para la posible contaminación de un acuífero. El Modelo, comprobó los resultados de la caracterización geológica-geotécnica de campo, y esto sirvió para determinar con mayor criterio técnico, las zonas inestables en el área de estudio.

Se comprobó la vulnerabilidad del área escogida para la construcción del vertedero de residuos, por lo tanto, el modelo cumple su función como sistema de prevención. Resultado de éste estudio se recomendó buscar una zona con mayor estabilidad para la construcción del vertedero. Finalmente, no se construyó en ese lugar el vertedero. El Modelo de Rotura Morfológica, en función de submodelo B, se puede aplicar, con mucho tiempo de anticipación (años), para identificar estas zonas de conflicto, a muy bajo costo, y solamente con la información topográfica, a cualquier escala de trabajo. En este sentido, el modelo puede realizar un monitoreo multitemporal, de infraestructura construida y verificar su estado de equilibrio con el entorno.

1.2.1.1. Submodelo C: Modelo Mixto (Modelo A+ Modelo B).

- Caso 5: Modelo de deformación superficial y subterránea, en base levantamiento de galerías mineras. Esta simulación que se realizó en el año 2001 con levantamiento de las galerías mineras a cinta y brújula principalmente en el Casco Colonial de la ciudad de Zaruma, donde han ocurrido hasta la actualidad, hundimientos provocados por minería ilícita (Cando et al., 2001).

El Distrito Metalogénico Aurífero - Polimetálico Minero, Portovelo - Zaruma, constituye un centro de explotación minera histórica, que se remonta a la época pre-colonial, según algunos historiadores, ya que de sus operaciones mineras habría procedido parte del Rescate del Inca Atahualpa (Murillo, 2000).

En la época republicana, a comienzos del siglo XX (1902), el Estado Ecuatoriano adjudicó en concesión a la empresa norteamericana South American Development Company -SADCO-, las operaciones de exploración, explotación, beneficio y comercialización de concentrados hasta 1951; después de lo cual, asume la gestión la Empresa CIMA, que estaba conformada por el Municipio de Zaruma (51%) representando los intereses del Estado y la empresa privada (49%). Al cese de las actividades de la empresa CIMA, surge y cobra auge la llamada “minería artesanal” o “informal”, que persiste hasta la actualidad y es la principal actividad económica del sector, pero con esta, se incrementó la ilegalidad y saqueo del yacimiento, incrementando los sectores de hundimiento en la ciudad. Esta ilegalidad no se somete a la legislación vigente, y tampoco responde por los daños que causa a la sociedad en particular y a las ciudades y al territorio en general.

En abril de 2001, técnicos de la Dirección Nacional de Geología de Ecuador, realizaron una inspección detallada de los sectores que presentaron hundimientos y deslizamientos provocados por la actividad minera en 600 ha de

la ciudad que incluyó el casco urbano colonial. La población era de 25.000 ciudadanos concentrados en la ciudad de Zaruma. La zona presenta un clima es templado, típico de relieve de montaña subtropical a 1.050 m. de altura y precipitaciones medias de 600 mm anuales. Desde el punto de vista Geológico, la mineralización del distrito minero Zaruma-Portovelo, se encuentra ubicada en volcanitas intermedias a silíceas de la Unidad Portovelo (Pratt et al., 1997) que está fallada contra las rocas metamórficas del sur a lo largo del sistema de fallas Piñas-Portovelo y se superpone disconformemente sobre el Complejo Metamórfico del El Oro. Esta Unidad está conformada en un mayor porcentaje de lavas andesíticas masivas porfídicas a basaltos andesíticos y brechas. También incluye tobas "ash flow" riolíticas a dacíticas con intercalaciones sedimentarias de pizarras y cherts. Las volcanitas andesíticas, muestran alteración propilítica generalizada (Vikentev et al., 2005).

El principal rasgo estructural es la falla Piñas-Portovelo, considerada como falla de cabalgamiento con dirección Este-Sureste, con un gran hundimiento en la parte Norte que separa las rocas volcanosedimentarias del Grupo Saraguro del Complejo Metamórfico del El Oro. Esta falla constituye el límite Sur del sistema de vetas auríferas. El desplazamiento del Grupo Saraguro al Oeste de la ciudad de Zaruma indica un salto vertical de al menos 3km entre las ciudades de Piñas y Portovelo. Las litologías del basamento metamórfico a lo largo del eje de esta falla, han sido deformadas cataclásticamente y brechificadas por el fallamiento normal joven (Aspden et al., 1992).

La caracterización geotécnica del sustrato rocoso se realizó a partir de observaciones de campo y la aplicación del método de Bieniawski, con la siguiente caracterización:

- Suelos arcillosos: superficiales de color amarillo rojizo por la oxidación de los metales, con comportamiento plástico y tendencia a la contracción por poca humedad, esponjándose cuando entra en contacto con ella. Presenta espesores muy variables de entre 10 a 80 cm. Este suelo tiene su origen de la meteorización del macizo rocoso expuesto a la intemperie, con una clasificación de tipo IV de Bieniawski considerada como roca de carácter geomecánico pobre.
- Roca meteorizada; la estructura original de la roca se encontró completamente destruida, con una resistencia a la compresión simple de 7 a 30 kg/cm^2, correspondiente a rocas muy blandas, con clasificación de tipo III según Bieniawski. La potencia de esta roca puede variar de pocos metros hasta una centena de metros.
- Roca fresca: esta roca no presenta señales de meteorización con una resistencia estimada a la compresión simple de 200 a 700 kg/cm^2. La clasificación de Bieniawski la ubica como roca buena tipo II.

La actividad minera extractiva que se desarrolla en el cantón Zaruma, tiene características formales que se desarrollan dentro de lo que establece la Ley de Minería No 126 vigente a la época y su reglamento. La minería informal o de subsistencia, la desarrollan los pobladores en labores mineras en donde la Minería formal ha culminado sus labores, es decir en zonas de relleno, y estribos de seguridad que sostienen las cámaras y evita la deformación de las galerías. En estos lugares, los “sableros” como se los llama actualmente, proceden a la extracción del mineral de los pilares de sostenimiento o de seguridad dejándolos con diámetros menores a 30 cm, y en muchos casos los extraen totalmente dejando a las cámaras y galerías sin sostenimiento y en algunos casos dejan las cámaras abiertas sometidas a meteorización.

El minero informal o sablero, no se somete a ningún tipo de legislación, no realiza trabajos técnicos, tornándose en un depredador ambiental temporal ya que trabaja periódicamente en varios sitios casi superficiales, muchas veces en contubernio con los propietarios de los terrenos, los que reciben un alto porcentaje del oro extraído (25%).En la Figura 25A, se puede ver la zona de exclusión minera determinada en el estudio del año 2006 (polígono de color negro). Las galerías mineras y bocaminas se representan con puntos y líneas de color rojo. Como se puede ver, las labores mineras no respetaron la zona de exclusión minera y perforaron el cuerpo mineralizado causando hundimientos en más de 13 sectores analizados en el año 2001.

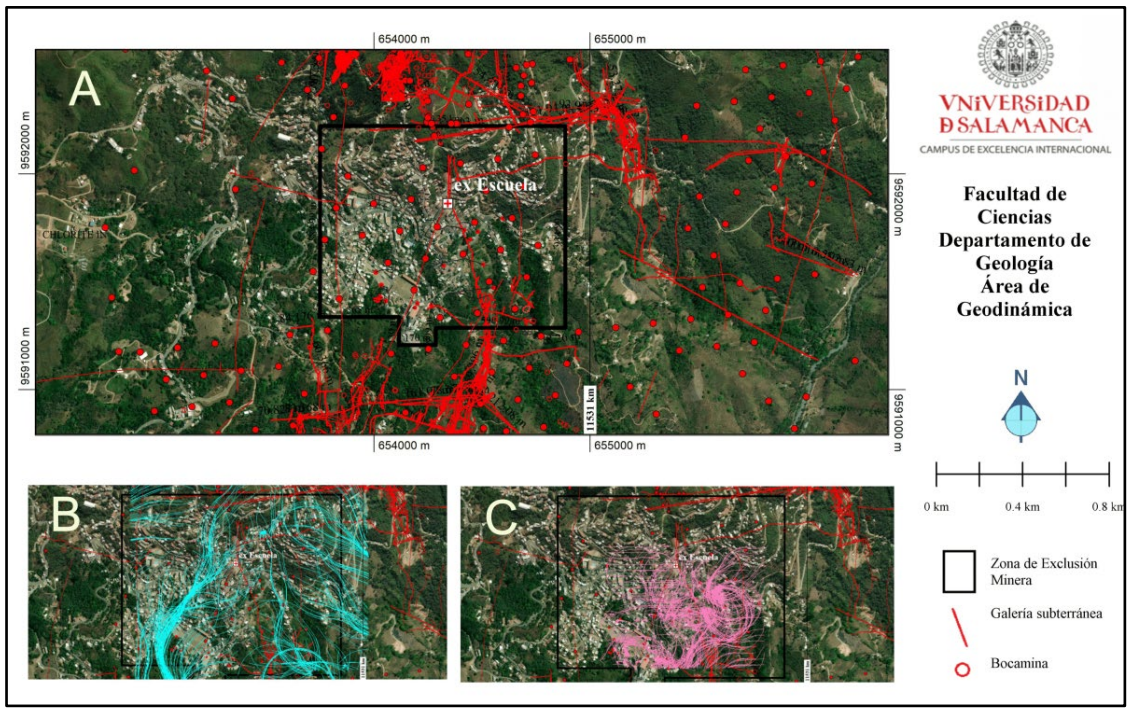


Figura 25. Zona de Exclusión Minera (negro), galerías (líneas rojas) y bocaminas (círculos rojos) (A). Líneas de flujo de la escorrentía superficial y de rotura morfológica superficial en color azul claro (B) y las mismas líneas, pero a nivel subterráneo en color rosa (C).

El avance con la implementación del Modelo de Rotura Morfológica, fue el de determinar las zonas de deformación del casco urbano de la ciudad, en función de la aplicación descrita en la metodología primera, y obtención de las líneas de flujo de la escorrentía y de rotura morfológica y sus concentraciones, en una primera instancia de la superficie del terreno a partir de un MDEde 5 m de resolución espacial (líneas de color celeste) (Fig. 25B) y posteriormente la elaboración de las líneas de flujo, de rotura morfológica interna (líneas de color cian) obtenidas mediante las direcciones, alturas y longitudes de las galerías en el límite del casco urbano de la ciudad (Fig. 25C).

Los principales riesgos geodinámicos fueron erosión, deslizamientos, hundimientos (superficiales y subterráneos) y deformaciones sismotectónicas activas. Se adoptó la hipótesis que las labores mineras subterráneas, legales e ilegales, se comportan como estructuras geológicas activas y que pueden desestabilizar tanto el macizo rocoso como la superficie del terreno en donde se ubica al casco urbano de la ciudad. Los eventos de deslizamientos y hundimientos, se relacionan con actividades mineras y deforestación, que en épocas de precipitaciones intensas se intensifican. En la Figura 26A, se muestra la intensidad de concentración de las líneas de flujo-rotura morfológica que en varios sectores tienen conexiones superficiales-subterráneas y son las que generaron hundimientos de los edificios y construcciones en el centro de la ciudad. El modelo 3D de estas líneas (Fig. 26B) y la captura del modelo de concentración de líneas de flujo-rotura morfológica en la que los colores con tendencia al cian-rojo son las zonas con alta susceptibilidad crítica ante movimientos en masa (Fig. 26C).

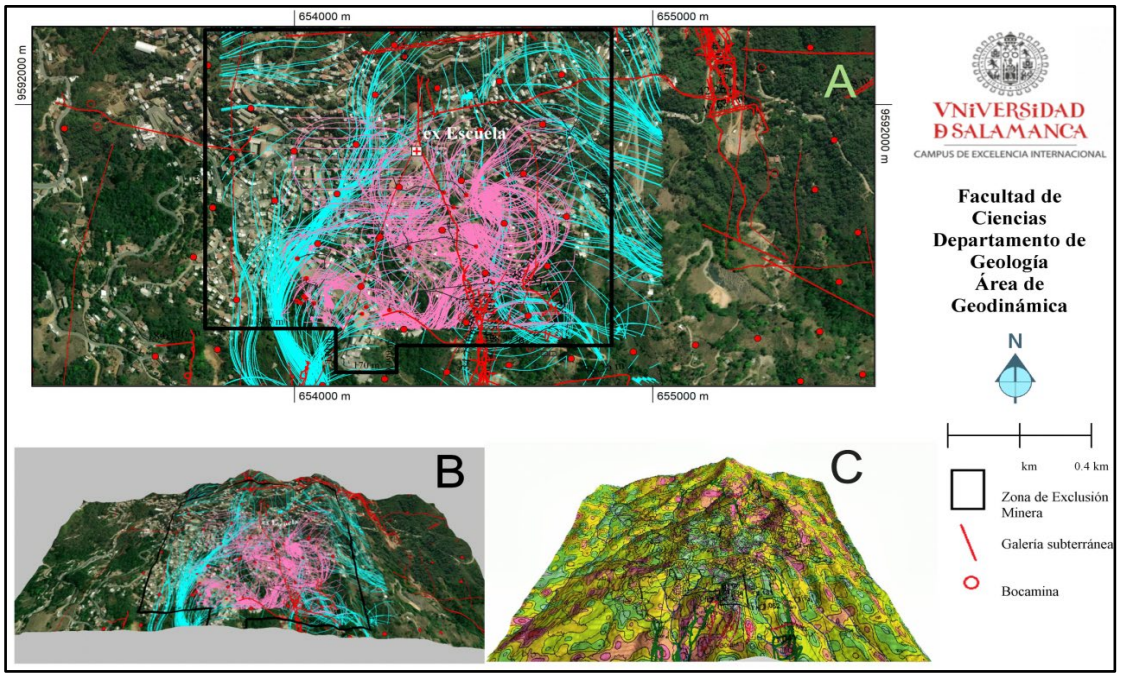


Figura 26. En (A) líneas de flujo de la escorrentía superficial del agua-rotura morfológica de color celeste y subterráneas de color cian. Vista 3D de estas líneas (B) y una captura de imagen con zonas de susceptibilidad crítica ante movimientos en masa de la zona(C).

La aplicación de método 1, confirmó el impacto ambiental de la actividad minera en el casco urbano de la ciudad de Zaruma, determinándose en esa época, seis zonas críticas de hundimiento en 136 ha y otras 400 ha consideradas como zonas de hundimiento potencial.

Las edificaciones que en la inspección de campo presentaron hundimientos en sus estructuras, construcciones que principalmente se encuentran ubicadas en la loma El Calvario, como los tanques de agua potable de la ciudad, la iglesia, la escuela-colegio San Juan Bosco y el hospital de la ciudad, entre otros 12 sectores más. En la Figura 27A se aprecia el modelo de la distribución de las zonas críticas de susceptibilidad ante deslizamientos, subsidencias y deformación del relieve obtenidas en el año 2001.En la Figura 27B del sector de El Calvario, se pueden ver las galerías antiguas de las empresas SADCO-CIMA de color verde y las galerías mineras actuales de color magenta. Estas galerías en su conjunto se comportan como verdaderas zonas de falla que desestabilizan los taludes y han producido los hundimientos y deslizamientos activados por lluvias intensas. La leyenda se refiere a zonas que levantan (+) o se hunden (-) con la siguiente descripción: la zona de color magenta representa las zonas de mayor argilización de las rocas volcánicas del cerro Zaruma Urco que se consideró como zona de debilidad máxima, con su área de influencia hasta la zona de color rosado claro que es una zona en la que la roca presenta debilidad alta. Estas zonas se encuentran limitadas por zonas de color verde amarillento que se consideran zonas de debilidad media en las que las rocas se encuentran con mayor argilización por la acción del tránsito de flujos de agua interna. Las parcelas de la ciudad se encuentran representadas con líneas delgadas de color claro.

La Figura 27C muestra los procesos de deformación, levantamiento, y subsidencia del relieve en los sectores del colegio San Juan Bosco y Hospital de la ciudad, en donde se evidenciaron hundimientos en la piscina del colegio y en las calles de acceso, fracturas en las paredes de las edificaciones, separación de las gradas con fracturas de hasta 3 cm. En el mapa de deformación superficial-subterránea. Todos estos resultados obtenidos a partir del Modelo de deformación total fueron comprobados en las visitas de campo. Las áreas con líneas inclinadas de color negro, representan el área de mayor hundimiento lento desde el colegio hasta el hospital de la ciudad, hundimiento causado posiblemente por la influencia de la galería que se encuentra bajo estas edificaciones. En las cercanías, fueron inventariadas otras zonas de colores verde claro y magenta, relacionadas a galerías mineras que se identificaron como zonas potenciales de hundimiento de menor a mayor intensidad respectivamente. Existen puntos acotados representados con polígonos pequeños de color negro con su altura en metros. Una respuesta importante de esta metodología en el casco urbano de la ciudad de Zaruma, ha sido la predicción de hundimientos con casi 20 años de anticipación, como es el caso específico de la escuela patrimonial La Inmaculada-Fe y Alegría de 100 años de

antigüedad que en el año 2016 colapsó totalmente por la influencia de galerías mineras subterráneas que se encuentran bajo su estructura.

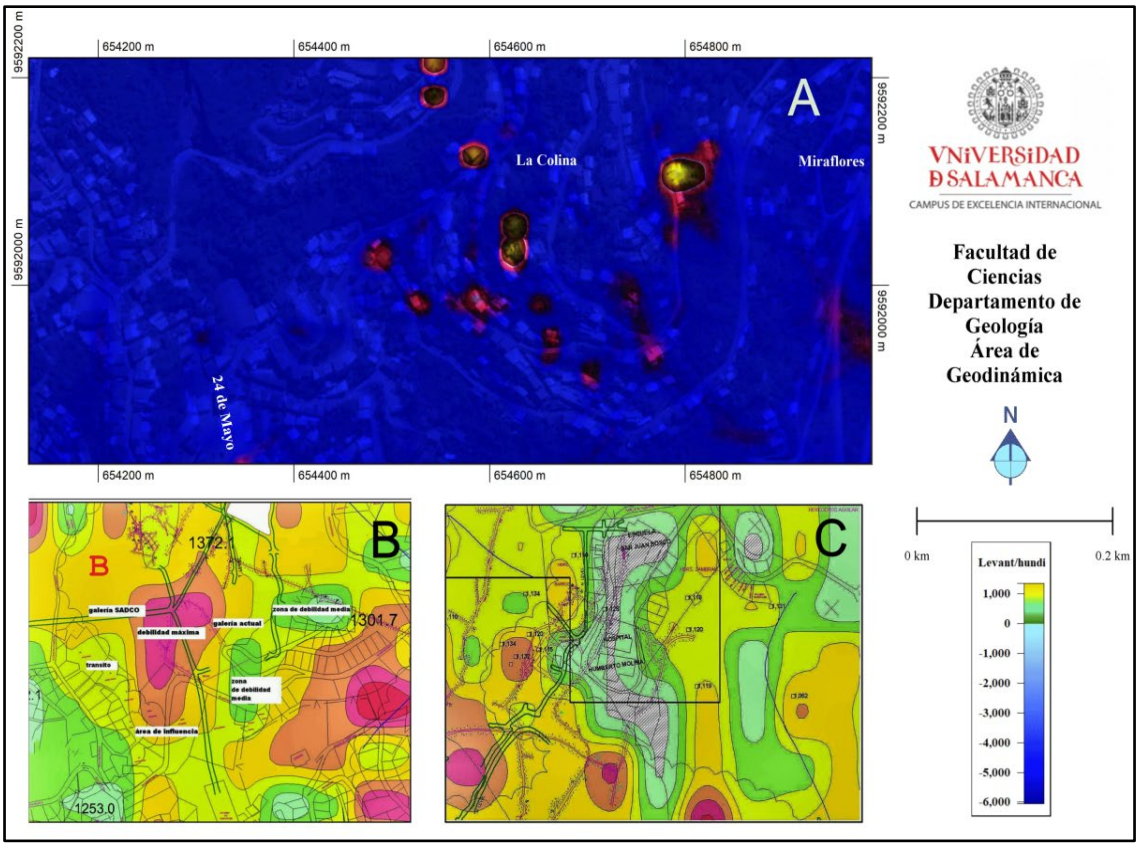


Figura 27. Captura de imágenes del informe DINAGE 2001. Distribución de las zonas activas y potenciales de deformación levantamiento-hundimiento del relieve obtenidas en el año 2001 (A). Deformaciones de los sectores El Calvario, el colegio San Juan Bosco (B) y el Hospital de la ciudad (C).

En la Figura 28A se puede ver la modelación de las líneas de flujo y de rotura morfológica superficiales y subterráneas modelizadas antes del hundimiento de 2016 en el periodo 1993-1995 y publicado internamente en un informe de la Dirección Nacional de Geología-DINAGE en el año 2001. En la Figura 28B se muestra el resultado de la modelación del área crítica susceptible ante subsidencias en base de concentración de estas líneas. En la Figura 28C se puede ver la proyección del hundimiento calculado en ese periodo en el sitio de ubicación del aula de la escuela La Inmaculada-Fe y Alegría. Esta proyección se hizo realidad en 2016, hundiéndose el bloque sur de la escuela y posteriormente el bloque norte. Este hundimiento se reactivó en el año 2019 (Cando et al., 2016).

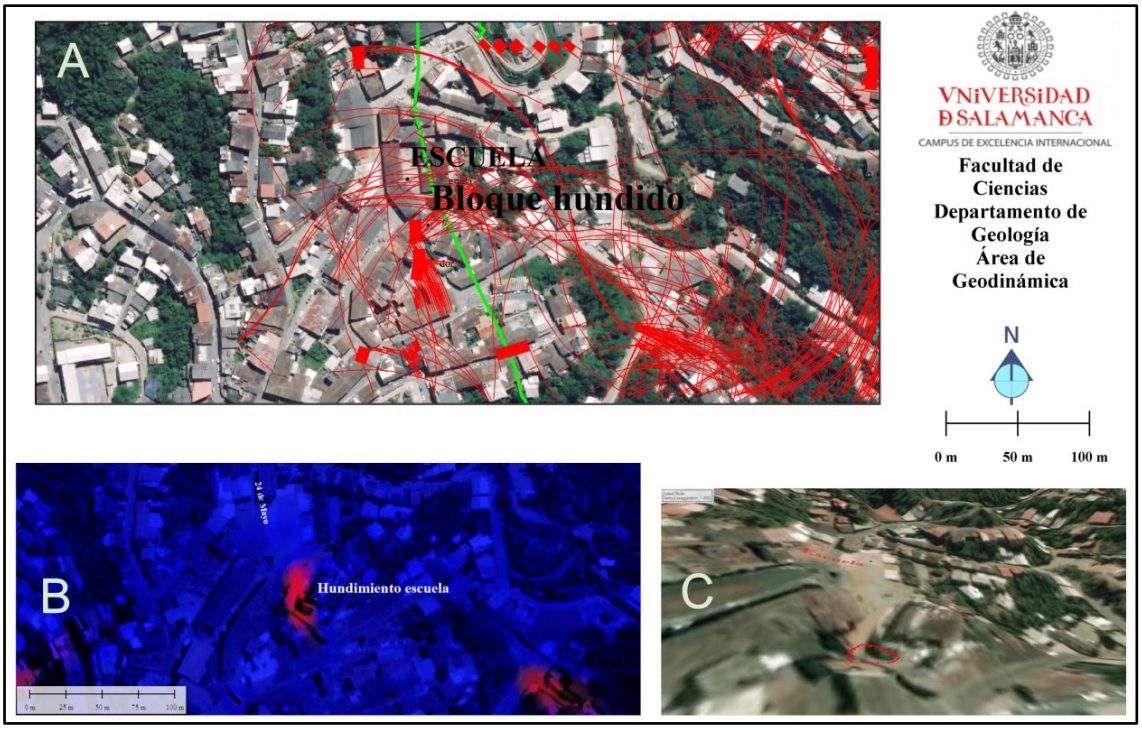


Figura 28. Líneas de flujo de acumulación de la escorrentía y rotura morfológica superficial y subterránea (líneas de color rojo), sobre una imagen 20 años antes del hundimiento del año 2016 (A). Concentración de deformaciones desde la superficie hasta el subsuelo determinadas mediante la metodología primera en el año 1995 (B). Proyección del hundimiento elaborado en el periodo 1993-1995 (C).

Aparte de estos sectores presentados, actualmente existen otros que progresivamente se siguen hundiendo como el sector del estadio, el canchón municipal, sector de Manuel Zambrano, calle Gonzalo Pizarro, avenida El Oro, sector del tanque de agua, sector de la piscina municipal, sector de la calle Colón, calle Manuel Zambrano, calle Gonzalo Pizarro y edificios del Municipio, Calle L. Chiriboga, sector de los tanques de agua, sector de La Alborada, avenida San Francisco, calles 24 de Mayo y Ernesto Castro, calle 26 de Noviembre incluyendo el Mercado Municipal de la ciudad.

- Caso 6: Otro ejemplo de la aplicación reciente del submodelo C, es el análisis de la variación o cambios del relieve a nivel multitemporal por desplazamiento del terreno en sectores de alta montaña, superficies amazónicas y sectores costeros. En la Figura 29 se observa el área de estudio (A) y se pueden ver dos deslizamientos en D1 (B) y D2 (C), ocurridos en el año 2014 en un sector de montaña en la parroquia La Unión del Toachi, provincia de Santo Domingo de los Tsachilas, Ecuador.

Estos deslizamientos fueron el resultado de varios sismos cercanos a 4.5 Mw y precipitaciones intensas. Antes de la ocurrencia de los deslizamientos, el relieve en la cuña en donde se ubica esta población, ya mostró indicios de deformación y remoción de masas. En la Figura 30 se observa el triángulo de

deslizamiento entre el estero Tuno y el estero La Chorrera (Fig. 30A), observando el triángulo de deformación del talud a cuyo pie se encuentra la población a cota 800 m (Fig. 30B). En el perfil topográfico E-W se observa la relación entre la situación de la población (UT) y la altura del talud (Fig. 30C).

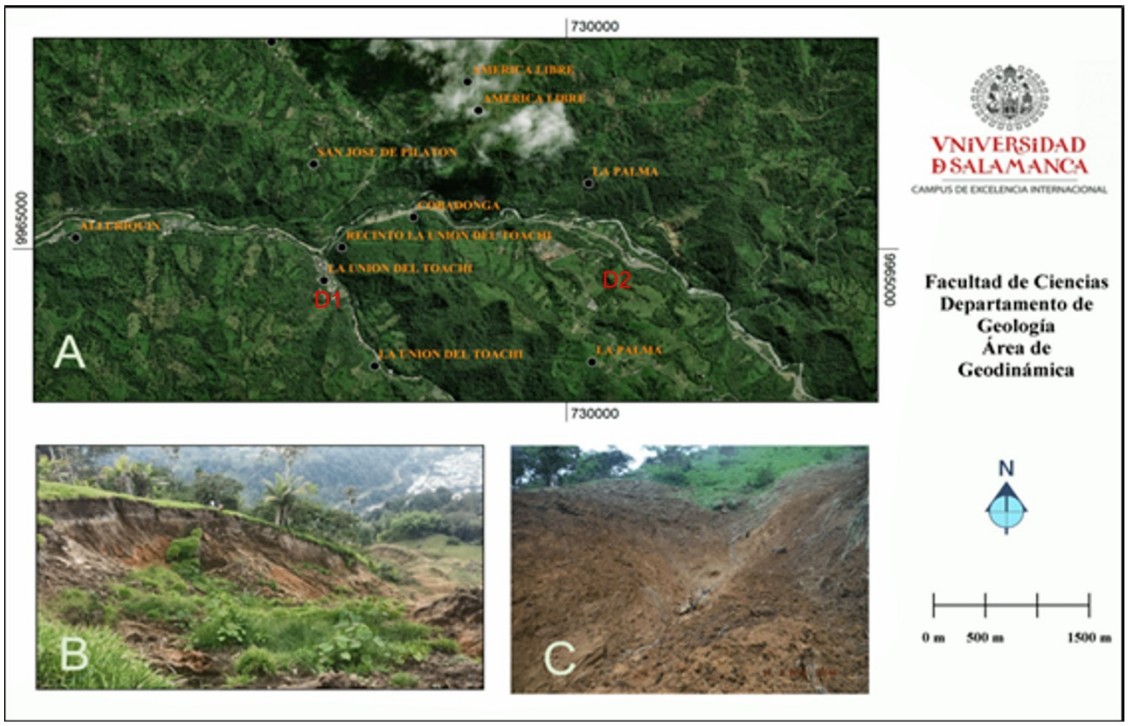


Figura 29. Ubicación de la Unión del Toachi (A) y los dos deslizamientos rotacionales D1 (B) y D2 (C) que se activaron en el año 2014.

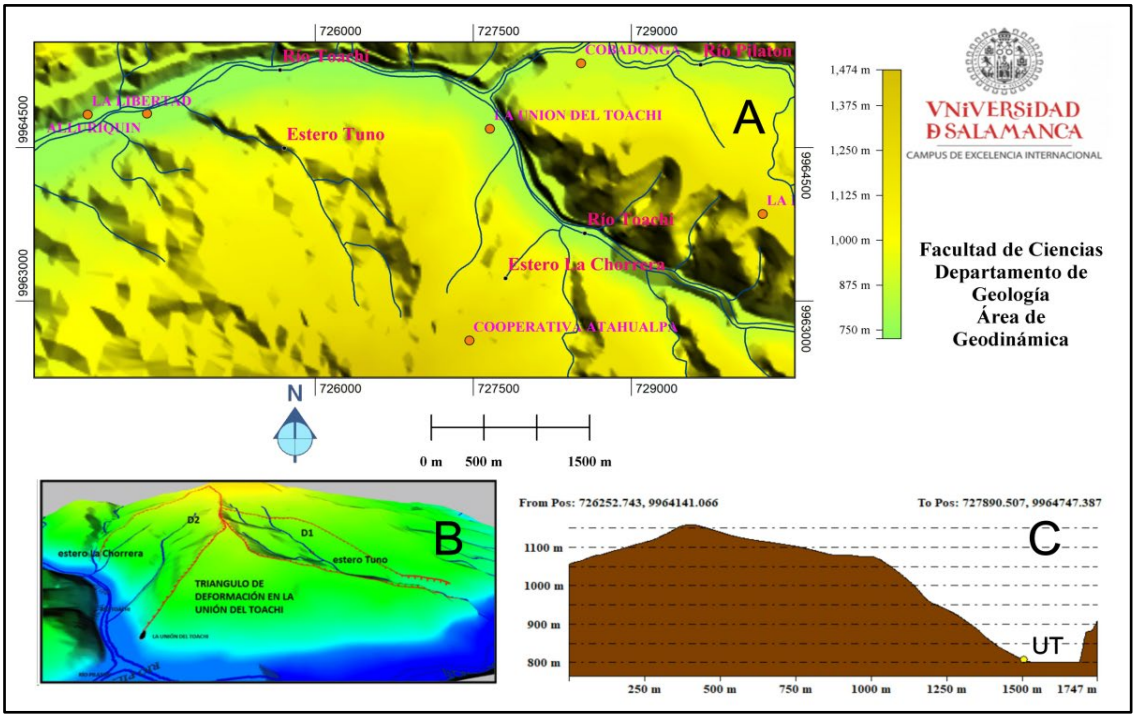


Figura 30. Curvas de nivel obtenidas del MDEdel año 2008 (A). Curvas de nivel obtenidas del MDE del año 2011 (B) yperfil del terreno (C).

En la Figura 31A se presenta el triángulo de deslizamiento analizado, área donde se calcula la deformación del relieve por acumulación de flujo utilizando el Método 1 del modelo hidrológico básico D8. El volumen de masa removido se determinó analizando la diferencia del volumen de masa deslizado en base a dos modelos digitales de elevación, antes que ocurran esos deslizamientos. Se utilizaron curvas de nivel con 10 m de resolución espacial del año 2008 y se definió el sector con pérdida de masa (polígono rayado) (Figura 31B) y del año 2011 (Figura 31C). Las imágenes son capturas del informe interno "IT_UNION_DEL_TOACHI_2014" de la Secretaria de Gestión de Riesgos (Cando et al., 2015).

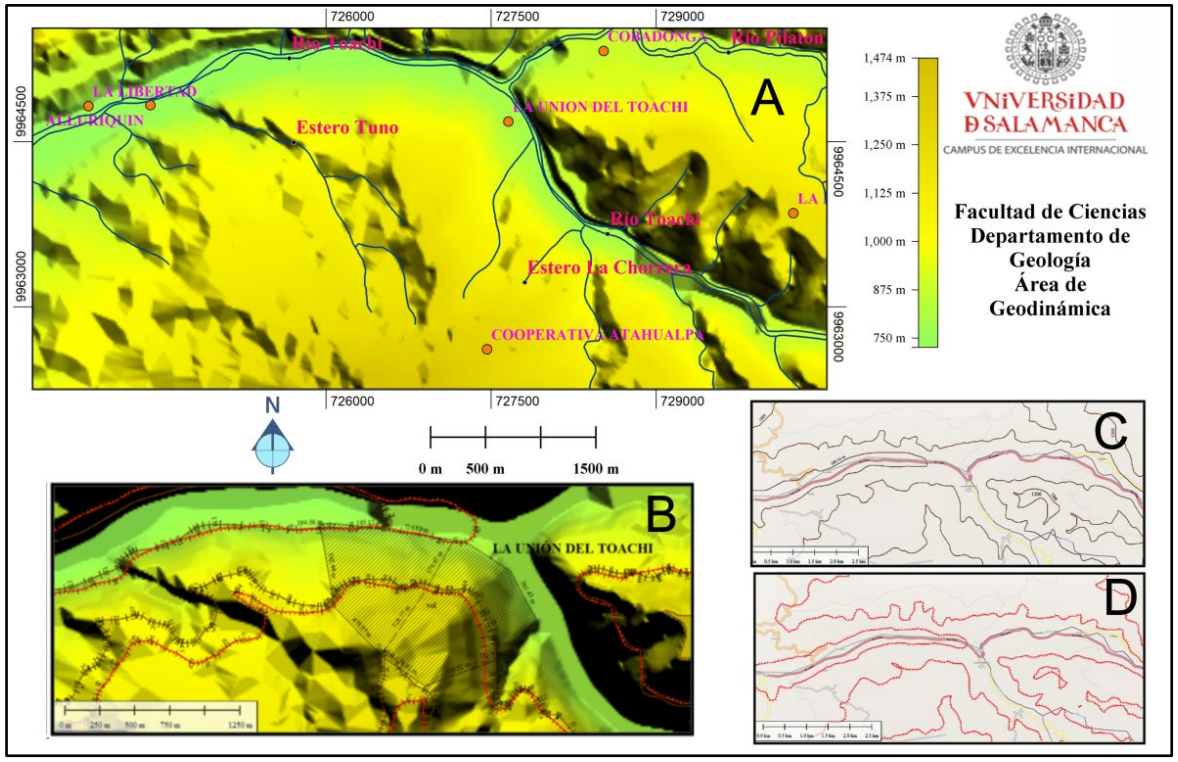


Figura 31. Situación de la Unión del Toachi (A). Triángulo de deformación-erosión sobre la Unión del Toachi (polígono con líneas achuradas) (B). Curvas topográficas de los años 2008 (C) y 2011 (D) utilizadas para el cálculo de la diferencia de volumen de masa.

La pérdida de masa del terreno en el periodo 2008-20011 (Figura 32). Esta pérdida es de aproximadamente 538.937 Tn en 115.15 ha y se ve reflejada en la ocurrencia de deslizamientos, derrumbes, flujos de lodo y escombros ocurridos en el año 2014, masa de sedimentos que se depositaron en los drenajes principales como en los ríos Toachi, Las Damas y en los esteros La Chorrera y Tuno. Este análisis sirvió como un mecanismo de predicción, con 6 años de anticipación, sobre los deslizamientos que ocurrieron y causaron pérdidas económicas y de vidas humanas en esa época.

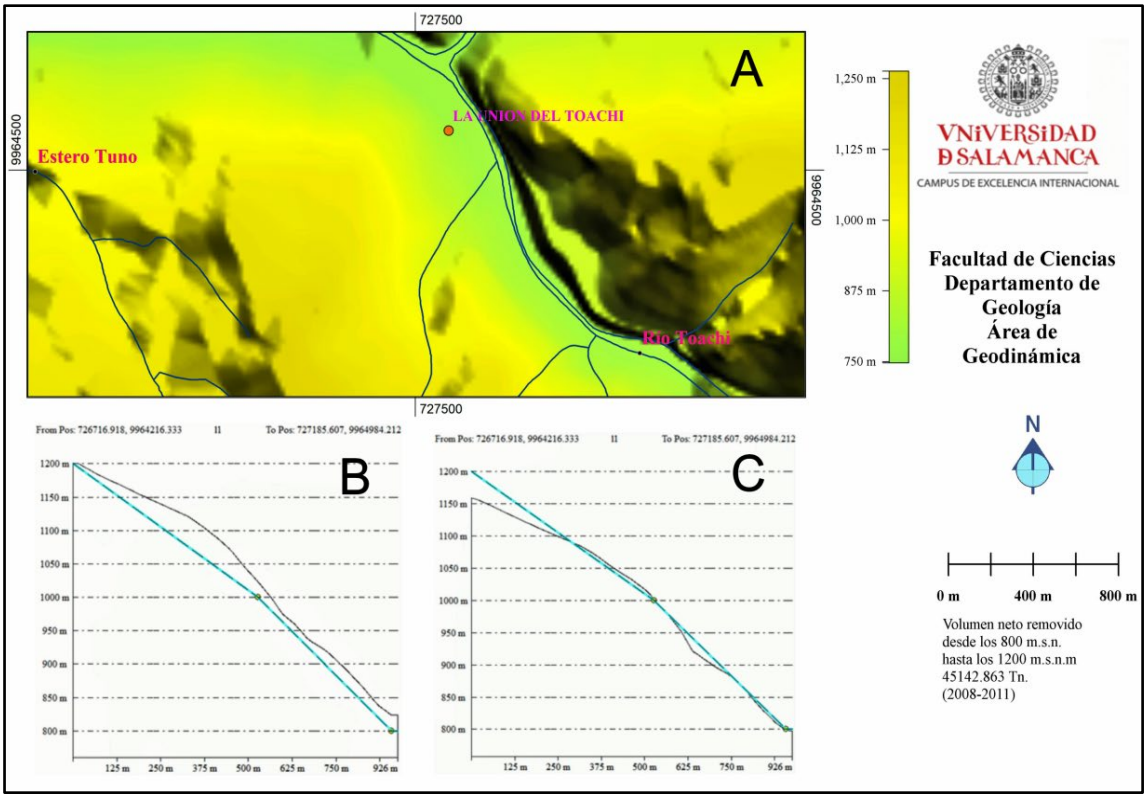


Figura 32. Situación de la Unión del Toachi (A). Perfil topográfico en función de las curvas de nivel del año 2008 (B). Perfil topográfico en base de las curvas de nivel de 2011 (C).

En general, los casos expuestos en este apartado son antecedentes de la aplicación del Método 1 que utiliza la teoría del Modelo Hidrológico Básico D8 y han sido realizados por el autor de esta Tesis mientras era funcionario de la Dirección Nacional de Geología del ministerio de Energía y Minas en las ciudad de Quito y como exdirector de Análisis de Riesgos Geológicos de la Secretaria Nacional de Gestión de Riesgos; determinando los patrones de flujo de la escorrentía superficial del agua de precipitación y líneas de rotura morfológica, a partir de modelos numéricos, teledetección y Sistemas de Información Geográfica, para el trazado de rutas de procesos activos en movimientos en masa.

En cuanto a las otras cuatro metodologías desarrolladas en la Tesis, presentan las especificaciones indicadas en el siguiente punto a tratar, en cuanto a su aplicación y herramientas de Geomática utilizadas:

1.2.2. Otros métodos propuestos de Geomática Aplicada.

Método 2: Determinación de las rutas de flujo de lahares primarios y secundarios de un volcán utilizando análisis INSAR, Modelo Numérico de lahares con LaharZ, índice de Estabilidad con SHALSTAB y parámetros morfométricos con SAGA.

Este segundo método consiste en la determinación de las rutas de flujo de lahares primarios y secundarios en edificios volcánicos utilizando análisis de radar de apertura sintética interferométrica (InSAR), Modelo Numérico de lahares con LaharZ, índice de Estabilidad con SHALSTAB y parámetros morfométricos con SAGA. A partir del prime método que determina los patrones de flujo de la escorrentía superficial se desarrolla este segundo método para determinar las rutas que siguieron y pueden seguir lahares secundarios destructivos por lluvias intensas, integrando el análisis de sensores remotos por Interferometría Diferencial, INSAR, en base a imágenes Sentinel 1A y 2A, para ubicar las áreas de mayor deformación y subsidencia del relieve en los flancos del volcán de Fuego en la República de Guatemala. Estas áreas son el origen de lahares secundarios. Para mejorar espacialmente la precisión de las trayectorias o rutas de este tipo de flujos, se utilizaron parámetros e índices morfológicos como la dirección-acumulación de flujo, longitud-magnitud de la pendiente y el índice de humedad topográfica implementados en software SAGA -System for Automated Geoscientific Analysis. Como complemento para determinar la trayectoria o ruta de este tipo de lahares, a las técnicas anteriores, se combinó el análisis de estabilidad de taludes utilizando el software SHALSTAB -Shallow Landslide Susceptibility- basado en la teoría de Mohr-Coulomb y sus parámetros: grado de saturación interna del suelo y precipitación efectiva. Éstos parámetros determinan la desestabilización de una ladera por este tipo de lahares que las erosionan e inundan. Esta metodología se aplicó en la República de Guatemala, posteriormente a la erupción del volcán de Fuego del 3 de junio de 2018. La aplicación de esta metodología complementaria de gran ayuda preventiva ya que proporcionó una respuesta más precisa de las áreas destruidas por lahares secundarios en las cercanías del volcán que fueron comprobadas por funcionarios del “Project Concern International” en el sector.

Son de gran aplicabilidad en el análisis de trazados de lahares secundarios destructivos generados por lluvias intensas y permite definir áreas de mayor deformación y subsidencia del relieve en los flancos de edificios volcánicos que son áreas madre de lahares secundarios o flujo de lava por deformación del relieve e estableciendo la estabilidad de taludes a partir del criterio de Mohr-Coulomb implementado en el software libre Shallow Landslide Susceptibility -SHALSTAB- (Fig. 33).

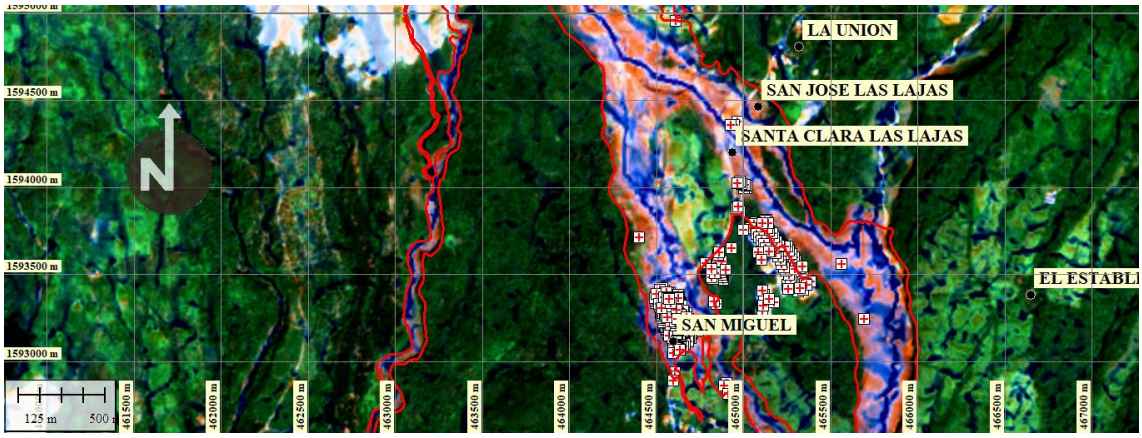


Figura 33. Modelación de lahares secundarios con modelos numéricos, Teledetección y SIG.

Método 3: Análisis de la deformación del terreno por Interferometría diferencial -DINSAR- y concentración de lineamientos geológicos-estructurales apoyados por investigación geofísica-geotécnica.

Este tercer método se corresponde con el análisis de la deformación del terreno por Interferometría diferencial y concentración de lineamientos geológicos-estructurales (Método 1) apoyados por investigación geofísica-geotécnica (tomografía eléctrica, georadar, sísmica pasiva y sondeos con análisis de laboratorio de testigos). Este tercer método se desarrolló para detectar y delimitar las áreas afectadas por deformación del terreno y procesos geodinámicos generados por el terremoto del 16 de abril de 2016 en la Zona Cero de la ciudad de Manta, Ecuador, utilizando análisis DINSAR con el apoyo de técnicas geofísicas como tomografías eléctricas del subsuelo y georadar. Esta técnica combinó el análisis de deformación tectónica, datos de sismicidad, perforaciones, velocidad de onda de corte Vs30 y simulaciones de procesos geodinámicos externos de superficie para delimitar áreas de alto riesgo sísmico que permitieron coordinar y gestionar los procesos de reconstrucción de la ciudad de Manta y especialmente la Zona Cero de máxima destrucción (Fig.34A).

Método 4: Interferometría Diferencial -DINSAR- para evaluar la subsidencia cosísmica del suelo apoyado por parámetros geotécnicos.

En la ciudad de Zaruma, provincia de El Oro, en el sector de la escuela La Inmaculada-Fe y Alegría ocurrieron hundimientos en el año 2016, que se reactivaron en el año 2019 y un nuevo hundimiento en el sector de la calle Gonzalo Pizarro en ese mismo año. Hundimientos causados por las galerías mineras sobre las que se asientan esta sestructuras, lo que ha puesto en peligro a estos y otros sectores cercanos.

Para reducir este tipo de Riesgo Geológico, esta metodología implementó la técnica de Interferometría Diferencial-DINSAR utilizando imágenes Radar de Apertura Sintética -SAR-, para obtener una nueva imagen denominada Interferograma, metodología basada en la medición de la diferencia de Fase, a partir de la adquisición de dos o más imágenes de radar de una misma zona tomadas en un intervalo de tiempo determinado. El sistema radar de apertura sintética o SAR, se fundamenta en el efecto doopler y es utilizado por los satélites europeos ERS-1, ERS-2, ENVISAT y J-ERS-1, entre otros.

La aplicación de esta metodología permitió detectar pequeñas deformaciones en la superficie del terreno para ubicar trazados, rastros o "huellas" de galerías subterráneas en la parte Occidental del la Zona de Exclusión Minera, estas galerías mineras no fueron inventariadas y no constan en el catastro minero oficial del sector; ya que posiblemente son la causa de la subsidencia del terreno en ese sector de la ciudad.

En la Figura 34B se observa la respuesta del método DINSAR para detectar subsidencias recientes en la superficie del terreno, donde se hundieron amplios bloques de aulas de la escuela La Inmaculada-Fe y Alegría en el año 2016. Esta misma infrestructura educativa colapsó completamente en el año 2019, ocasionando daños materiales afectando al barrio completo al que pertenece este districto educativo.

Método 5: Prevención de desastres relacionados con eventos extremos De deformación natural del suelo mediante utilizando la metodología DINSAR y la Sintaxis del Espacio.

Por último, el quinto método se basa en la prevención de desastres relacionados con eventos extremos de deformación natural del suelo utilizando DINSAR y la Sintaxis del Espacio. Teniendo en cuenta la relación deformación superficial del terreno/concentración poblacional en centros urbanos, se combina la distribución del espacio urbano y su relación con las deformaciones superficiales del terreno. Esta metodología modelizó la dinámica de las estructuras urbanas en función de la concentración o densidad poblacional en relación con un escenario de deformación del terreno condicionado por un evento sísmico mayor a 6 Mw que podría causar un desastre en el barrio La Mariscal al norte de la ciudad de Quito, capital de Ecuador.

Este método aplicado es pionero en este tipo de "interacción relacional" ya que, hasta la fecha, no se ha realizado ningún estudio que relacione la deformación del terreno con la Sintaxis del Espacio en la ciudad, por lo que es una nueva herramienta para la prevención en la ordenación urbana considerando la vulnerabilidad sísmica y la relación deformación superficial y densidad de población.

Esta metodología que utiliza algoritmos de apoyo morfométrico que analizan factores e índices con software libre. El enfoque práctico se enfoca a la relación deformación superficial del terreno-exposición poblacional en centros urbanos, combinando la distribución del espacio urbano-concentración poblacional y su relación con las deformaciones superficiales del terreno (Interferometría diferencial de radar de apertura sintética).

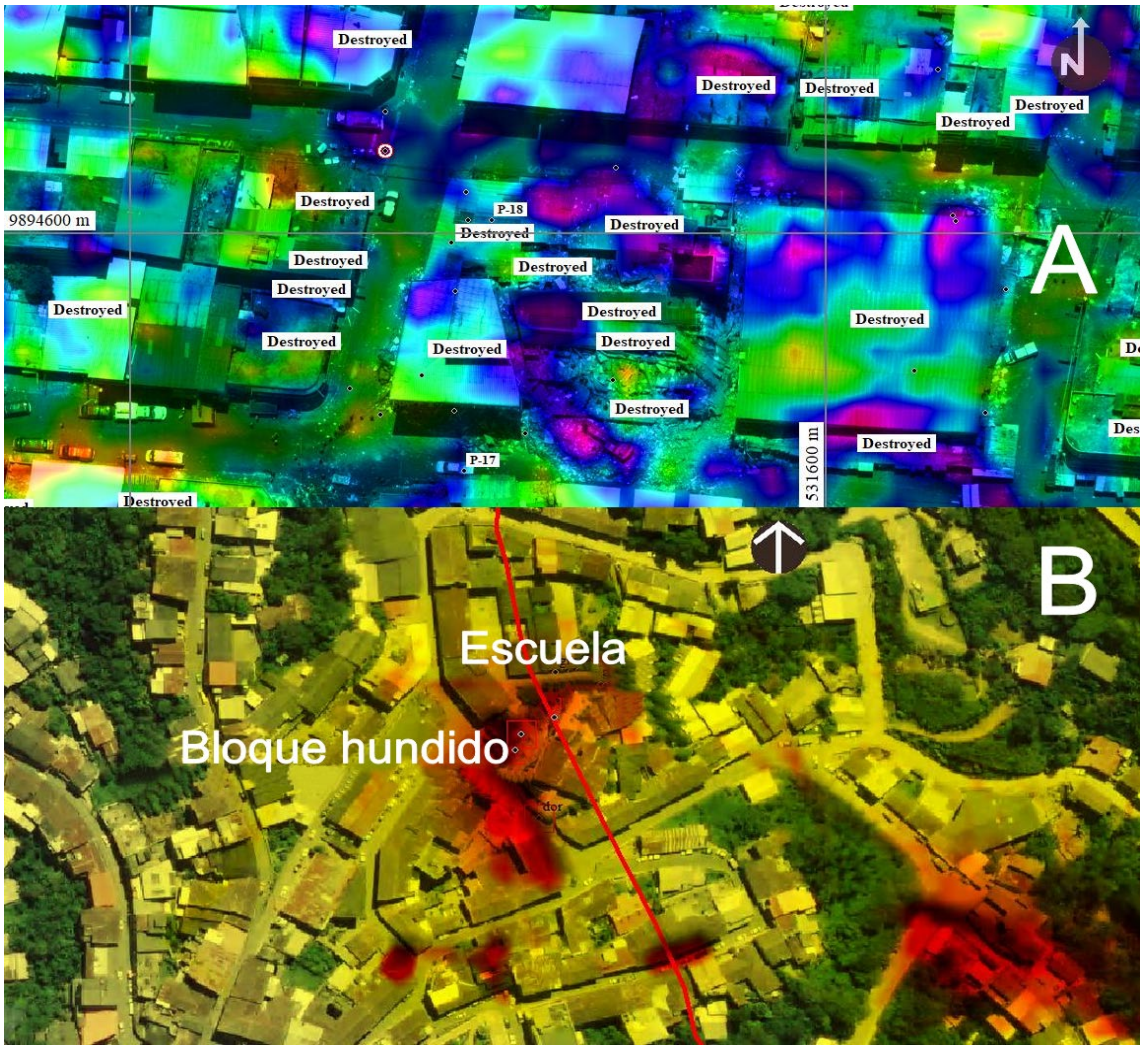


Figura 34. Detección y delimitación de zonas afectadas por deformación del terreno y procesos geodinámicos generados por terremotos intensos utilizando el modelo de Rotura Morfológica, análisis de Interferometría Diferencial (DINSAR) y métodos geológicos-geotécnicos-geofísicos en las ciudades de Manta (A) y Zaruma (B).

Esta metodología relacionó la dinámica de las estructuras urbanas-concentración o densidad poblacional en relación con un escenario de deformación del terreno condicionados por un evento sísmico. Un ejemplo es la modelización para de un sismo mayor a 6Mw en el barrio La Mariscal al norte de la ciudad de Quito, capital de Ecuador, donde el riesgo es directo a la exposición de las edificaciones y calles (Fig. 35) ante deformaciones del terreno e intensa concentración de personas (muy alta exposición con tendencia al color rojo), mostrando las áreas más susceptibles a pérdidas humanas y materiales.

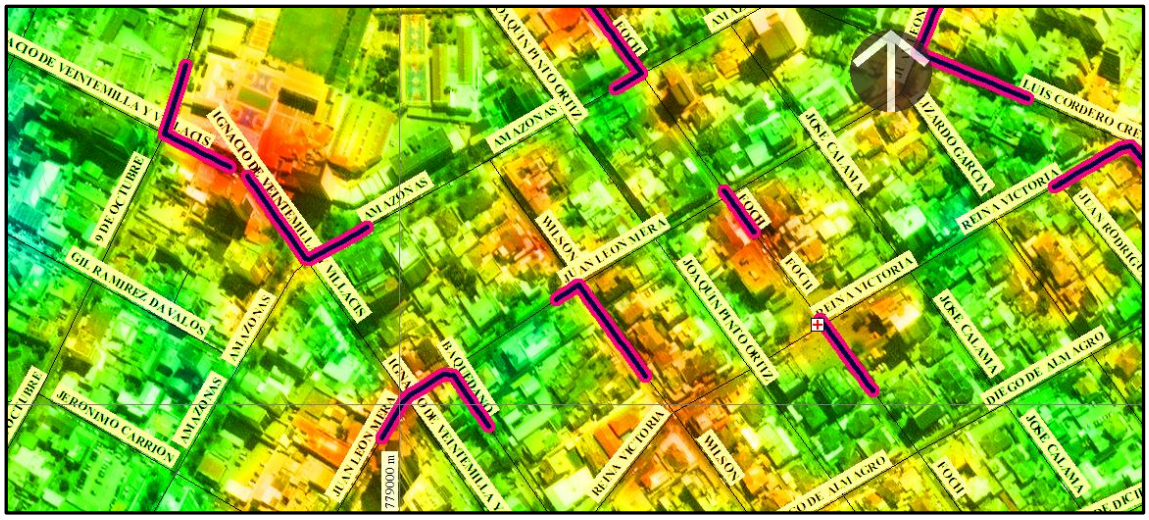


Figura 35. Exposición de las edificaciones y calles ante deformaciones del terreno e intensa concentración de personas (alta exposición con color rojo).

Este análisis pionero en este tipo de “relación”: deformación del terreno (INSAR) con la Sintaxis del Espacio en grandes ciudades, constituyendo una herramienta preventiva eficaz para los planificadores y diseñadores urbanos considerando la vulnerabilidad sísmica a partir de las relaciones entre deformación superficial del terreno y densidad de población y determinando áreas de mayor riesgo. Los resultados se complementan con reconocimiento de campo en función de la ubicación espacial de zonas de susceptibilidad donde se definen líneas de rotura de geoformas, fracturas, líneas de erosión, lineamientos estructurales, flujos en rocas, escombros y suelos, bloques de caída, deslizamientos rotacionales, traslacionales, extensiones laterales, líneas de escarpes…También permite determinar deformaciones superficiales como montes presión, facetas tectónicas triangulares y productos transportados, sedimentados-depositados como depósitos de coluviones, tránsito de aluviones y coluviones-aluviones

La implementación de estos métodos aportará de manera rápida y con alta precisión la determinación de zonas susceptibles ante estas amenazas naturales permitiendo tomar medidas estructurales preventivas y correctoras para reducir los riesgos geológicos de un territorio.

1.3. OBJETIVOS

En el apartado anterior se han podido analizar algunos antecedentes en los que el autor ha aplicado, en la determinación de zonas susceptibles a movimientos en masa, principalmente el Modelo Hidrológico Básico D8, retroalimentada con estudios geológicos, geofísicos y geotécnico, en un periodo de casi 25 años y en diferentes sectores territoriales de Ecuador.

Esta Tesis pretende continuar en esta línea de trabajo y ampliar el conocimiento en la determinación de la susceptibilidad del terreno a movimientos en masa, implementando Geomática Aplicada Avanzada con software especializado, Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Se plantea esta tesis, como una tesis por compendio de artículos, estando cada uno de los artículos, relacionados con un objetivo concreto, abarcando diferentes campos dentro del estudio de amenazas por movimientos en masa y su determinación espacial. En este contexto, se plantean los objetivos de la línea de investigación, clasificados en un objetivo general y varios objetivos específicos.

El objetivo general es el desarrollo, validación y aplicación de 5 métodos que implementan herramientas geomáticas en sus procedimientos, definidos en diagramas de flujo secuenciales, con la finalidad de reducir el riesgo geológico en base al análisis espacial de patrones de acumulación de la escorrentía superficial del agua de precipitación, flujos de lahares, deformaciones sismotectónicas y exposición de una población concentrada en edificaciones construidas sobre terrenos afectados por deformaciones capaces de colapsar ante sismos mayores. Estas herramientas son fácilmente aplicables en etapas de decisión para las diferentes administraciones además de objetivas, precisas y presentan un bajo costo en su implementación.

En el apartado de antecedentes, se ha podido ver el desarrollo histórico de las metodologías y sus aplicaciones en la determinación de amenazas naturales y antrópicas: desde la generación de líneas y patrones de acumulación de flujo-líneas de rotura morfológica, hasta la determinación de deformaciones del terreno de origen sismotectónico, pasando por la modelación de lahares secundarios. No obstante, aún hay muchos aspectos en los que profundizar y cuestiones por resolver como la aplicación de estas metodologías con modelos digitales de más alta resolución espacial como información Lidar o la integración de estas metodologías con imágenes Sentinel 3 para analizar las relaciones entre cobertura vegetal, deslizamientos, inundaciones, erosión.... En esta tesis por compendio de artículos, cada artículo desarrolla una solución geomática para la reducción del riesgo geológico concreto en un sector territoral definido.

Los Objetivos específicos son:

- Objetivo 1: Modelado numérico de patrones de flujo aplicados al análisis de susceptibilidad a los movimientos en masa en áreas deformadas por factores sismotectónicos, especialmente durante períodos de lluvia intensa. Este objetivo mediante la aplicación del modelo hidrológico D8 y sus parámetros morfométricos derivados, permitirá determinar el origen de estos movimientos en masa: erosión superficial, deslizamientos de tierra, propagación lateral del complejo roca-suelo, flujos masivos y deformaciones gravitacionales profundas.

- Objetivo 2: Determinación de las rutas de flujo de lahares primarios y secundarios de un volcán utilizando parámetros morfométricos. Este objetivo complementará la cartografía de las trayectorias de lahares obtenidos de software especializado para la simulación de estos fenómenos LaharZ, usando Teledetección (interferometría INSAR) en base a imágenes Sentinel 1A y 2A, permitiendo localizar áreas de deformación del relieve en los flancos del volcán y parámetros de desestabilización de ladera.

- Objetivo 3: Combinar las técnicas de Interferometría diferencial –DINSAR-, para establecer lineamientos estructurales y análisis de deformación del terreno por terremotos. Este objetivo permitirá delimitar áreas afectadas por deformación superficial y desplazamientos verticales del relieve en zonas con alta susceptibilidad sismotectónica, con el apoyo de técnicas geofísicas.

- Objetivo 4: aplicar la técnica de Interferometría Diferencial-DINSAR, para la detección temprana de zonas de subsidencia causadas por las labores mineras subterráneas con alta precisión, utilizando datos del Radar de Apertura Sintética-SAR, además de La aplicación la detección de pequeñas deformaciones en el relieve, para ubicar trazas, rastros o “huellas” de galerías subterráneas en la parte Occidental del la Zona de Exclusión Minera, galerías mineras que no fueron inventariadas y que no constan en el catastro minero oficial del sector y que posiblemente son la causa de los desplazamientos del relieve en esa parte de la ciudad.

- Objetivo 5: Prevención de desastres relacionados con eventos extremos de deformación natural del suelo mediante la aplicación de modelos espaciales en áreas urbanas de Quito (Ecuador). Este objetivo permitirá delimitar el grado de exposición de población concentrada en centros urbanos, la situación de edificaciones construidas en zonas con intensa deformación del terreno u cuantificar los desplazamientos acumulados en terreno con el tiempo.

En general se busca la implementación de herramientas de Geomática Aplicada en procedimientos de escenarios de amenaza por movimientos en masa, subsidencias sismo-tectónica, flujos de lahares volcánicos que ponen en riesgo a la infraestructura ingenieril, poblacional y sistemas socioeconómicos vitales para una región concreta. De esta forma se pueden optimizar los recursos geomáticos públicos, la detección temprana de zonas susceptibles al riesgo y cuantificar su efecto destructivo determinando la exposición y vulnerabilidad para prevenir daños materiales y humanos.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

El desarrollo de esta Tesis Doctoral ha seguido dos pasos fundamentales en cada uno de los Métodos de estudio que la componen: trabajo de gabinete y trabajo de campo. El proceso de aplicación de los diferentes métodos geomáticos propuestos, se complementó con reconocimiento de campo del autor, y apoyo de resultados geológicos, geotécnico-geofísicos para la caracterización físico-mecánica del suelo, proporcionado por instituciones que realizaron este tipo de estudio como Geosuelos, la Universidad Técnica de Manabí y la Secretaría de Gestión de Riesgos, así como los resultados las tomografías eléctricas del subsuelo, radargramas e interferogramas para el Método 3 (Zona Cero de la ciudad de Manta) y Método 4 sobre los procesos de subsidencia indicida por actividades mineras en galerías de extraciónde oro en la ciudad de Zamura.

La información Geomática de base: software gratuito de tratamiento de imágenes satelitales, Modelos de Elevación Digital, bases cartográficas y temáticas, fué adquirida o descargada de webs públicas como el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los estados Unidos, Proyecto Copernicus, Agencia Espacial Europea, Instituto Geográfico Militar de Ecuador, Instituto Geofísico Nacional, Sistema Nacional de Información, Instituto Espacial Ecuatoriano, Ministerio de Agricultura, Ministerio del Ambiente, y otras webs institucionales relacionadas con el territorio de estudio, como por ejemplo la Infraestructura de Datos Espaciales -IDEs- de La Junta de Andalucía en España.

La información Geomática obtenida se refiere a Modelos de Elevación Digital de 65, 32, 12.5, 10 y 3 m de resolución espacial, imágenes de radar Sentinel 1 y 2, planimetría de los sectores estudiados, puntos de inventario de elementos cartográficos expuestos a flujos de lahares, movimientos en masa y peligro sísmico, caracterización geológica, geotécnica, tomografía eléctrica, radargramas, velocidad de corte Vs30, índices de Plasticidad, calidad de la roca, entre otra información.

En el desarrollo de esta Tesis Doctoral se han utilizado diversas técnicas analíticas dentro de la Geomática Aplicada, para llevar a cabo el estudio de la peligrosidad natural, principalmente por movimientos en masa. La caracterización de las mismas, se ha llevado a cabo mediante el estudio de los patrones de flujo de la escorrentía superficial del agua de precipitación como factores originadores de este tipo de procesos, basados en el Modelo Hidrológico Básico D8, descrita en el método 1 y constituye el punto de partida de los procesos desarrollados en los restantes procedimientos y métodologías.

Otras técnicas utilizadas para la caracterización los peligros ante movimientos en masa, hundimientos y subsidencias, en conjunto con la anteriormente mencionada, fueron el análisis de las deformaciones y desplazamiento del terreno por Interferometría utilizando el Radar de Apertura Sintética INSAR y su variante Diferencial de Radar de Apertura Sintética DINSAR, aplicación de la Tomografía Eléctrica del subsuelo, Radargrametría, datos de perforaciones de pozos, datos sobre Ensayo de Penetración Estándar SPT, Sísmica Pasiva y geología de campo.

2.1. Metodología del Modelado numérico de patrones de flujo aplicados al análisis de peligros por movimientos del suelo (Método 1).

El primer producto de partida para desarrollar el analisi de peligrosidad natural, fue la modelación numérica de los patrones de flujo de la escorrentía superficial del agua de precipitación y líneas de rotura morfológica como generadores iniciales de movimientos en masa. Para el trazado de la dirección y la magnitud de los vectores de acumulación de flujo, de rotura morfológica, lineamientos geológicos estructurales y deformaciones de relieve topográfico, a partir de una cuadrícula de elevaciones o MDE, el procedimiento se basa en el trazado de un vector de dirección con sentido de la dirección o una flecha que apunta en la dirección "cuesta abajo" en cada nodo de la cuadrícula, a menos que se salten algunos nodos al cambiar la configuración de la frecuencia para su trazado (2x2, 4x4 u otra configuración). La longitud de la flecha dependerá de la magnitud o inclinación de la pendiente (más larga o más corta). Los Modelos de Elevación Digital MED utilizados, se procesaron con programas de uso público como SAGA (Brenning, 2008), ArcView (Sárközynce, 2018) y software comercial como Rockworks 7 (Harrop, 1996) y (Golden Software, 2014). El trabajo de campo realizado (300 puntos de control), permitió verificar la respuesta de este Método y recopilar datos en sectores susceptibles, así como los tipos de movimientos de masas asociados. El funcionamiento del Modelo Hidrológico Básico D8 desarrollado en este método se puede ver en el diagrama de flujo de la Figura 36. Este flujo de procesos se encuentra integrado como algoritmo o script en varios programas hidromorfológicos gratuitos como SAGA, Landserf, ArcView 3.2.a, Taudem, Qgis, entre otros.

Los primeros productos derivados de la aplicación del Modelo Hidrológico Básico D8 en el DEM, fueron la dirección y el trazado de las rutas de flujo de escorrentía superficial de agua de lluvia, que son la base para obtener líneas de rotura morfológica, lineamientos geológico estructurales, fracturas y deformaciones del relieve topográfico de origen tectónico y erosivo.

Un ejemplo de la aplicación de este proceso, presentado en la Figura 37, se puede ver la distribución espacial de una grilla de posiciones desde la C0 a la C8 para el cálculo de las direcciones de flujo y el trazado de las mismas.

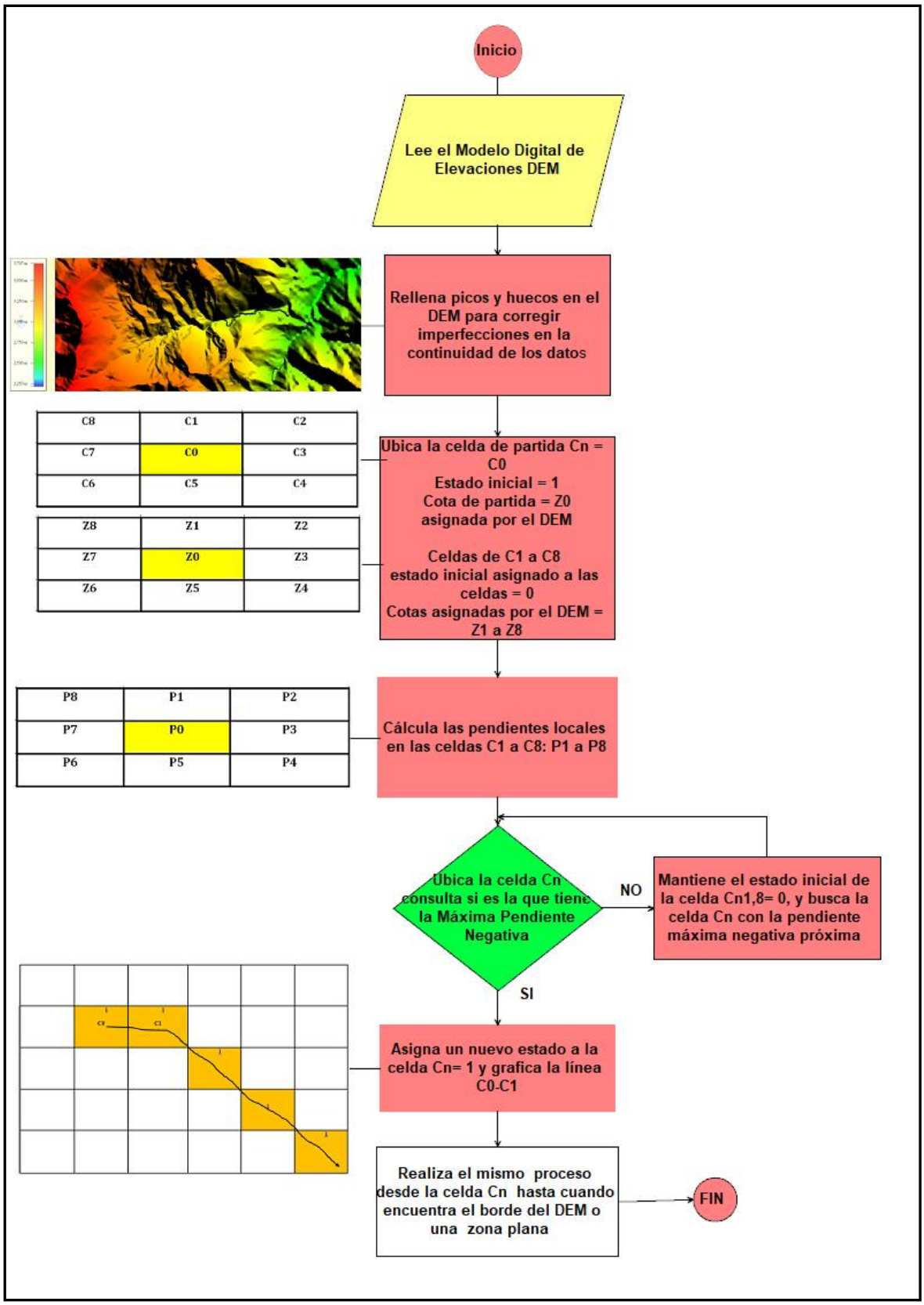


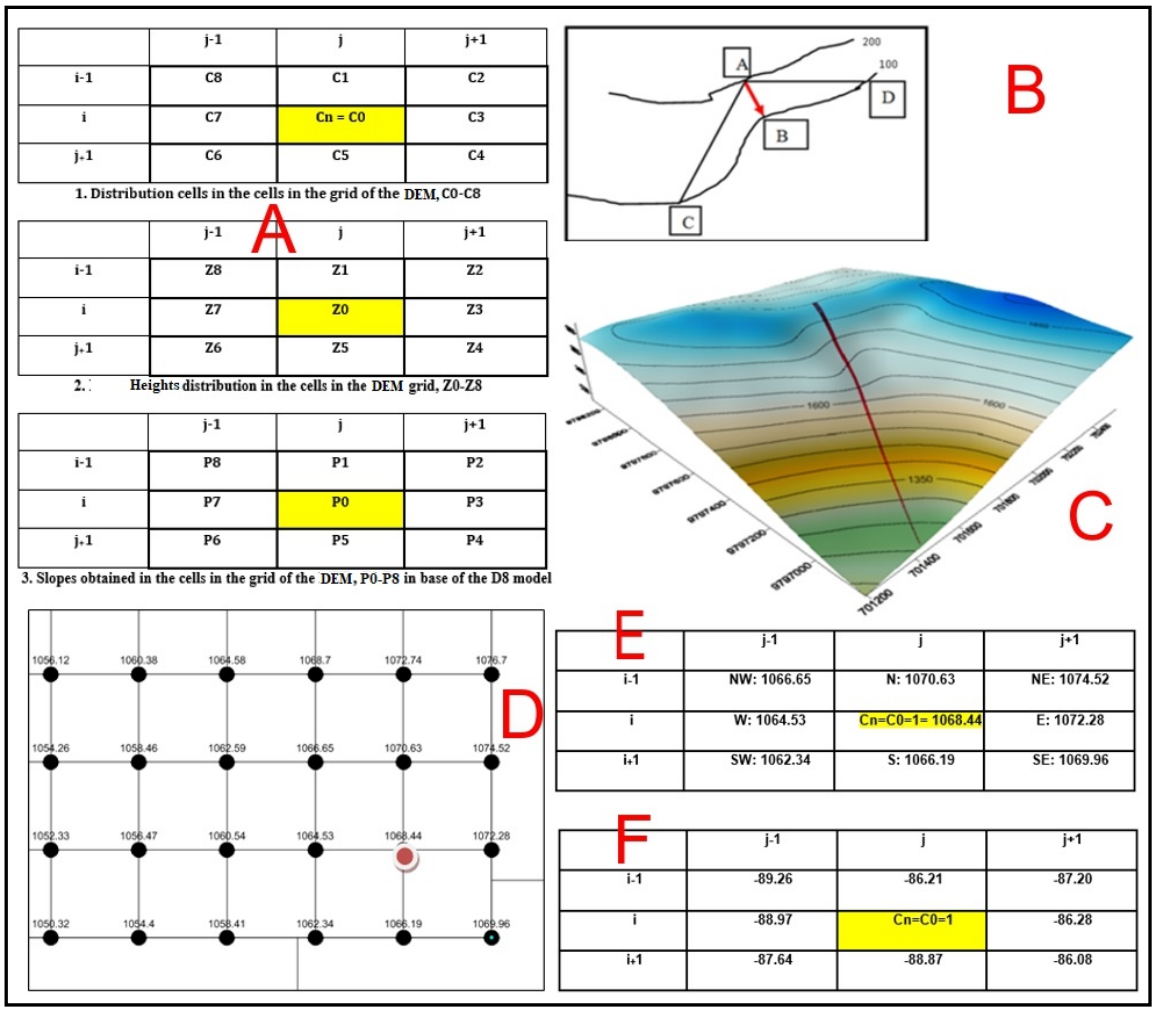
Figura 36. Proceso seguido para la extracción de los flujos de escorrentía superficial del agua de precipitación y líneas de rotura morfológica en base al Modelo Hidrológico D8.

El Método parte de una celda C0 con una cota de partida Z0, para cada celda C1 a C8 de una malla de cotas asignadas por el Modelo de Elevación Digital, calcula las pendientes Pn, de cada uno de sus ocho vecinos en direcciones Norte, Noreste, Este, Sureste, Sur, Suroeste, Oeste y Noroeste. Esto es, para cada vecino calcula la diferencia de elevaciones entre él y el punto en estudio y el resultado se divide por la distancia d en metros que los separa (ecuación 4). Se trata de calcular la tangente del ángulo que forma la horizontal con la recta que une el punto en estudio con el vecino:

P1= Arctg(Z0-Z1)/d; P2= Arctg(Z0-Z2/Sqrt(2d); P3=Arctg(Z0-Z3)/Sqrt(d); P4=Arctg(Z0-Z4)/Sqrt(d); P5=Arctg(Z0-Z5)/Sqrt(d); P3=Arctg(Z0-Z6)/Sqrt(d); P3=Arctg(Z0-Z7)/Sqrt(d); P3=Arctg(Z0-Z8)/Sqrt(d) (ec. 4)

En la Figura 37A se presenta este proceso desde la Asignación de celdas (C0 – C8) y alturas del terreno (Z0 – Z8) para el cálculo de pendientes (P0 – P8) según el Modelo Hidrológico Básico D8. En Figura 37B se determina la línea de Pendiente Máxima AB, que es la línea perpendicular recta más corta que une dos curvas de nivel. El Punto A es el punto de partida en la curva de nivel de 200 m. Los puntos B, C y D definen los segmentos AB, AC y AD, respectivamente. La línea de Pendiente Máxima corresponde al segmento AB más corto, que generalmente es la ruta a través de la cual fluye el agua desde el punto más alto A. En la Figura 37C se observa el trazado de la línea de Pendiente Máxima y su continuidad en cada nodo de las celdas en un Modelo Digital de Elevación – MDE-. En la Figura 37D se aprecia el punto inicial de la línea en el tiempo t = 0, con el estado inicial en la celda C0 = 1, y la dimensión asignada por el Modelo de Elevación Digital = 1068.44 m. En la Figura 37E esta celda inicial a la altura de 1068.44 metros sobre el nivel del mar (msnm), es el inicio para la generación de líneas de flujo de escorrentía meteórica de la superficie del agua de acuerdo con el Método D8. En la Figura 37F se puede ver el puntaje final del cálculo según la ecuación 3.

Este modelado utilizó el Modelo Hidrológico Básico D8, que, en la actualidad, lo ha mejorado en el trazado de las líneas de escorrentía y de rotura morfológica y su concentración a partir de Modelos de Elevación Digitalcon mayor resolución espacial (3m), ajustando el control de direccionamiento de los vectores dentro de la configuración del Método D8 en cada celda del MED.



	j-1	j	j+1
i-1	C8	C1	C2
i	C7	Cn = C0	C3
j+1	C6	C5	C4

	j-1	j	j+1
i-1	Z8	Z1	Z2
i	Z7	Z0	Z3
j+1	Z6	Z5	Z4

	j-1	j	j+1
i-1	P8	P1	P2
i	P7	P0	P3
j+1	P6	P5	P4

	j-1	j	j+1
i-1	NW: 1066.65	N: 1070.63	NE: 1074.52
i	W: 1064.53	Cn=C0=1= 1068.44	E: 1072.28
i+1	SW: 1062.34	S: 1066.19	SE: 1069.96

	j-1	j	j+1
i-1	-89.26	-86.21	-87.20
i	-88.97	Cn=C0=1	-86.28
i+1	-87.64	-88.87	-86.08

Figura 37. Ejemplo de la aplicación del trazado del vector de dirección de flujo según el Modelo Hidrológico Básico D8 desde una grilla del MDE de alta resolución.

En la Figura 38A se presenta un bloque diagrama 3D donde se pueden ver los vectores de dirección de flujo. En Figura 38B se presenta este trazado, tomando toda la longitud del eje del vector desde la parte alta de la celda. En Figura 38C se presenta el trazado desde el centro de la celda y en Figura 38D el trazado desde la parte baja de la celda. El criterio para saber desde donde trazar los vectores, depende exclusivamente del tipo de paisaje analizado y de la resolución del Modelo de Elevación Digital. En base a la práctica desarrollada en gran cantidad de este tipo de métodos en todos los paisajes del Ecuador y en otros lugares fuera del país, se ha comprobado que en paisajes de alta montaña, con fuertes pendientes, la mejor alternativa es trazar estos vectores desde el centro de cada celda, para que el vector resultante se dibuje todos los “downhill” o las direcciones “cuesta abajo” hacia otra mitad de la celda vecina haciendo un barrido en función de sus 8 vecinos cercanos (es algo parecido a obtener una línea de curvatura media). En territorios costeros con pendientes bajas, es recomendado trazar estos vectores desde la parte alta de las celdas del MDE y en paisajes de pie de monte con pendientes medias, es recomendable trazar estos vectores desde las partes bajas de las celdas.

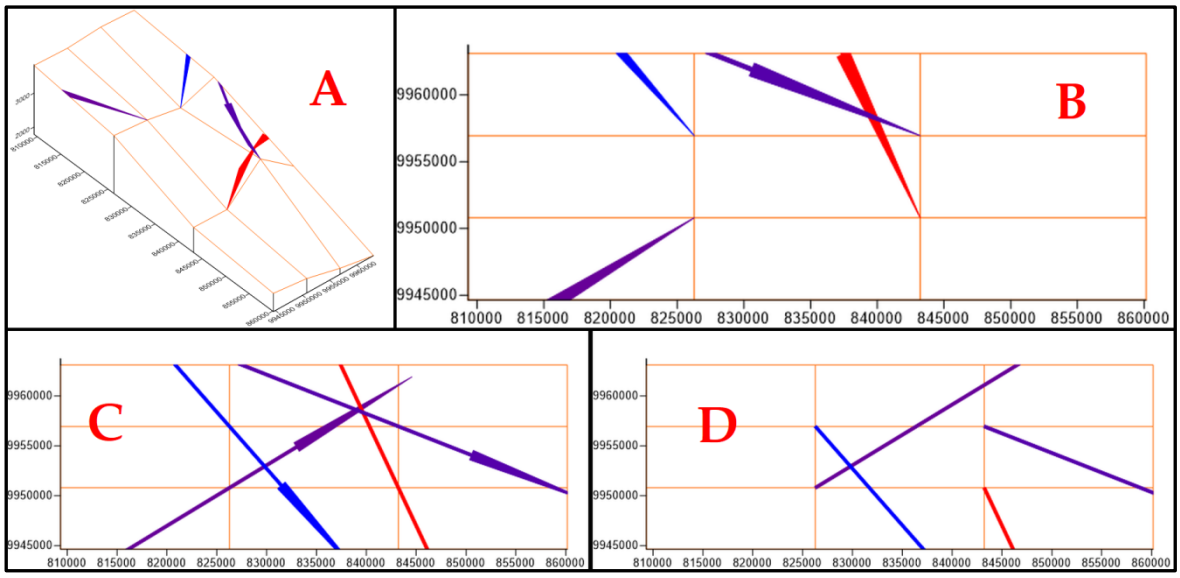


Figura 38. (A) Bloque diagrama de los vectores de flujo de la escorrentía superficial y su trazado inicial dentro del MDE. (B) Trazado desde la parte alta de las celdas. (C) trazado desde el centro de las celdas y en (D) trazado desde la parte baja de las celdas.

La idea general del trazado, es por medio del criterio de la "Ruta de la Gota de Agua" considerando una cuadrícula que contiene información de elevaciones. Si se vierte agua sobre la superficie, las flechas de dirección apuntarían en la dirección en que fluye el agua, desde la elevación alta hasta la elevación baja. La magnitud se indica mediante la longitud de la flecha. En el ejemplo del flujo de agua, las pendientes más pronunciadas tendrían flechas más largas que finalmente se concentran en la superficie terrestre, concentraciones en áreas o en flujo causante de erosión que posteriormente crearán canales de incisión como se puede ver en la Figura 39. El clima y el relieve influyen en el trazado de la red de flujo, pero la estructura geológica subyacente es el factor más influyente para la generación de las líneas de rotura morfol.

Los patrones de flujo están íntimamente relacionados con la Geología por lo que se han utilizados para identificar fallas, lineamientos geológicos y fracturas superficiales del relieve, aparte de zonas de deformación del relieve por concentración de estos patrones de flujo. Inicialmente, la clasificación de los principales patrones de flujo definió las redes de drenaje que en función del origen del vector de flujo se determinaron ajustando el tamaño de la celda (tamaño de la resolución espacial de la celda), canales de erosión y fallas geológicas, inluyendo fracturas muy superficiales del relieve. Este procedimiento también permitió asociar este tipo de estructuras geológicas con tipos de movimientos en masa como, así como de zonas levantadas (tendencia hacia el color rojo) y hundidas (tendencia al color azul), según la leyenda de la Figura 39.

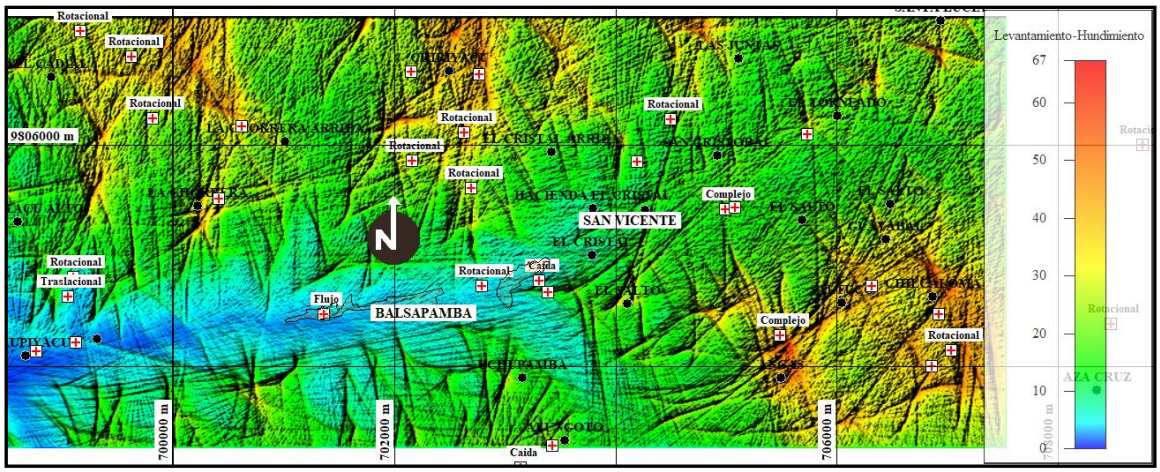


Figura 39. Generación de canales de erosión, juntas, fallas geológicas y deformaciones del relieve por concentración de líneas de flujo de la escorrentía superficial de precipitación y de rotura morfológica.

2.2. Metodología para determinación de rutas de flujo en lahares primarios y secundarios en volcanes según parámetros morfométricos (Método 2)

Una consecuencia directa del modelo Hidrológico Básico D8, es la desarrollada en esta metodología, para determinar las rutas que siguieron y pueden seguir lahares primarios originados por erupciones volcánicas y con mayor enfoque a la determinación de lahares secundarios destructivos por lluvias intensas en las laderas de los volcanes. Esta metodología se apoyó en la teoría y mecanismos de la Interferometría Diferencial DINSAR, para determinar deformaciones superficiales del relieve a partir de imágenes de satélite Sentinel 1A-2A y Parámetros e Índices Morfométricos obtenidos del MDE para mejorar el trazado de los lahares obtenidos por programas especializados como LaharZ, Titán 2D o Volcflow.

El análisis DINSAR, ubicó áreas de mayor deformación del relieve en los flancos de un volcán, áreas que posiblemente son el origen de lahares secundarios. Las trayectorias de estos lahares fueron obtenidas con LaharZ, y se mejoraron con el uso de parámetros e índices morfométricos implementados en software gratuito: System for Automated Geoscientific Analysis -SAGA-. Estos parámetros fueron el factor de Acumulación de Flujo -FCC- del que se detalló su funcionamiento en la primera metodología, además del Índice de Humedad Topográfica -TWI- y el factor Longitud-Magnitud de la Pendiente -LS-.

Los lahares primarios y secundarios en su trayectoria, generalmente causan inundaciones, erosión y movimientos en masa que fueron determinados mediante una combinación de los resultados obtenidos con LaharZ, índices Morfométricos con el análisis de estabilidad de taludes utilizando el software Shallow Landslide Susceptibility -SHALSTAB-, basado en la teoría de Mohr-Coulomb y sus parámetros, como el grado de saturación interna del suelo y precipitación efectiva, parámetros necesarios para desestabilizar una ladera por este tipo de lahares.

Esta metodología se aplicó a un caso práctico: el volcán de Fuego de Guatemala, posteriormente a la erupción ocurrida el 3 de junio de 2018 y lluvias intensas que provocaron lahares secundarios destructivos, lahares que no fueron cartografiados en los mapas de peligros volcánicos vigentes.

Los lahares primarios son flujos que se forman como resultado directo de una erupción volcánica. Tienden a ser voluminosos (107-109 m^3), altas velocidades (> 20 m / s) y un caudal de flujo máximo comúnmente entre 103-105 m^3/s. Estas características proporcionan a los lahares la capacidad de recorrer largas distancias, incluso cientos de kilómetros río abajo. Ocurren principalmente cuando durante un evento eruptivo el material incandescente causa la fusión rápida de grandes volúmenes de hielo y nieve de los glaciares que cubren algunos edificios volcánicos y fluyen por barrancos en su descenso. Estos lahares pueden generarse también por ruptura o expulsión del agua de lagos cratéricos durante las erupciones. La mezcla de agua y productos eruptivos forman lahares que fluyen pendiente abajo (Vallance, 2005; Vallance & Iverson, 2015).

Los lahares secundarios, incluyen principalmente los lahares causados por intensas precipitaciones. El material piroclástico no consolidado, depositado por erupciones previas, puede ser fácilmente removido por las lluvias. En general son de menor magnitud, comparados con los primarios, sin embargo, son más frecuentes durante periodos lluviosos. Los lahares originados por lluvias son relativamente pequeños. Su descarga y volumen se ven limitados por la intensidad, duración y acumulación de la lluvia, además del material disponible para ser incorporado a su flujo. Su volumen se encuentra en el rango de 104-106 m^3 y sus descargas en el orden de 102–103 m^3/s, con distancias de recorrido menores a 10 km (Mothes y Vallance, 2015). Pueden aumentar en tamaño y recurrencia incluso semanas o meses después de la erupción primaria por lo que su nivel de peligro es difícil de anticipar (Vallance & Iverson, 2015). La depositación de material piroclástico depositada por erupciones pasadas, puede ser eliminada fácilmente por las lluvias. Otro factor de origen de los lahares se debe al deshielo de los glaciares, acelerados por el Calentamiento Global o el fenómeno de El Niño en América Central y Sudamérica en los años 2015, 2016 y 2018.

Los lahares secundarios tienen menor velocidad, volumen y recorren distancias más cortas en comparación con los lahares primarios, sin embargo, son más frecuentes y destructivos durante los períodos de lluvia como ocurren en estas regiones de volcanes activos del Cinturón de Fuego del Pacífico.

El 3 de junio de 2018, en Guatemala, la fuerte erupción del volcán de Fuego produjo una densa nube de cenizas volcánicas de 10 km de altura y flujos piroclásticos destructivos que causaron casi 200 muertes y enormes pérdidas económicas en la región. Posteriormente, debido a fuertes lluvias, se produjeron lahares secundarios destructivos, que no se trazaron en los mapas de peligro utilizando el software LAHARZ.

Posterior a la erupción del 3 de junio de 2018 y después del colapso de la columna volcánica, los flujos piroclásticos y los lahares descendentes, causaron daños significativos y una gran cantidad de muertes alrededor de la montaña (CONRED, 2018). Después de la erupción, el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología –INSIVUMEH-, con el apoyo del Programa de Asistencia por Desastres de Volcanes -VDAP- del USGS, la Universidad de Edimburgo y la Universidad Tecnológica de Michigan, elaboraron escenarios de lahares para lluvias medias y fuertes basadas en los Métodos numéricos obtenidos del programa LAHARZ. En la Figura 40 A, se puede ver uno de los escenarios. El 19 de noviembre y por quinta vez durante el año 2018, el volcán Fuego hizo erupción, con un flujo de lava de 1.200 metros de largo que descendió al cañón de Ceniza. Este flujo volcánico con fragmentos de roca producto de la erosión en las laderas del volcán, se movió cuesta abajo, incorporando suficiente agua, de modo que formaron flujos de lodo y escombros volcánicos o lahares que descendieron por las laderas del volcán, afectando sectores como Las Lajas, El Jute, además de los barrancos de Ceniza y Seca, según el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología-INSIVUMEH en los boletines volcanológicos especiales de esa época.

Los escenarios realizados por el INSIVUMEH, no tomaron en cuenta varios sitios y poblaciones intermedias entre las áreas trazadas por LaharZ que fueron arrasadas por estos los lahares secundarios, por lo que para complementar los resultados obtenidos con este software, en Este Método se pupuso integrar las técnicas de análisis DINSAR, el Método Morfométrico y el Método de Estabilidad de Taludes, obteniéndose resultados más reales y cercano los flujos de lahares reales ocurridos en esas fechas, como se puede ver en la Figura 40B.

En este caso, el derretimiento posiblemente del glaciar, dio lugar a la formación de varias lagunas superficiales e intraglaciares (bolsones de agua en el interior del glaciar y/o hielo muerto) que al acumular mucha agua se desbordaron y/o colapsaron, proporcionando grandes cantidades del fluido en un tiempo corto, dando lugar a la formación de estos lahares secundarios.

Lluvias intensas más actuales en el volcán, han provocado nuevos lahares y han aumentado la probabilidad de su generación en varias quebradas cercanas a su alrededor, lahares que han puesto en riesgo a población cercanas.

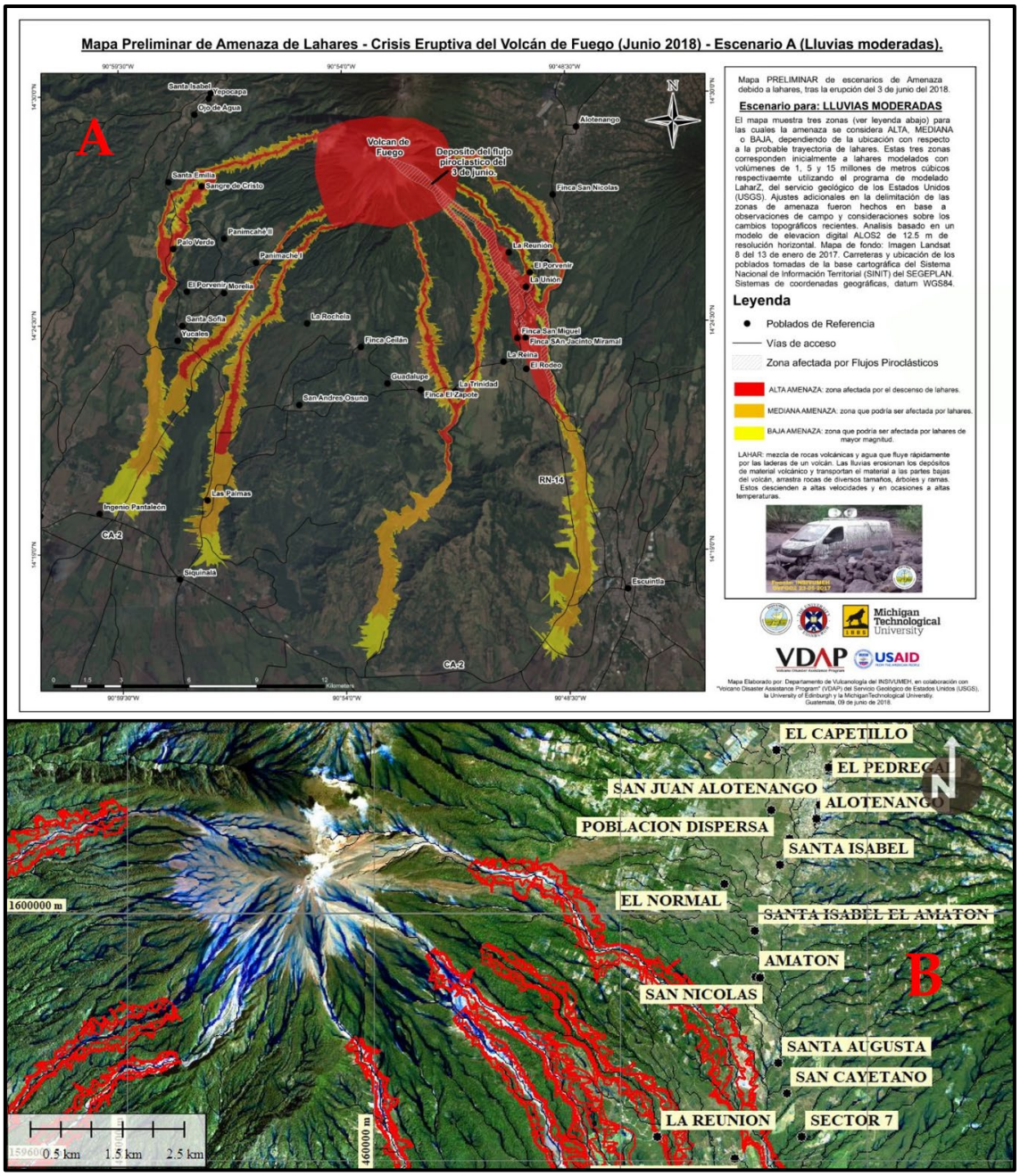


Figura 40. En (A) El mapa web preparado por MapAction como colaborador en el proyecto HazMap y en apoyo de INSIVUMEH, mapa de las rutas de lahares secundarios marcadas con polígonos de color rojo, preparado en junio de 2018. En (B) ubicación de flujos de lahares intermedios de color azul, que no fueron mapeados por LaharZ en los barrancos como Las Lajas, El Jute, Ceniza y Seca.

La elaboración de mapas de peligros por lahares secundarios en las microcuencas cercanas al volcán de Fuego, utilizando este método, dieron lugar a resultados que permitieron generar mapas de riesgos volcánicos más reales, que permitirán direccionar medidas estructurales de Prevención para la reducción de este tipo de peligros en favor de las personas que habitan en las zonas de riesgo.

LaharZ es un simulador numérico de lahares con licencia pública que permite calcular las alturas de llenado rápido de las quebradas, quebradillas y guías de agua que generalmente son las rutas por donde viajan los lahares, tomando como base un volumen hipotético de agua que fluye a través de una cuenca hidrográfica. Las dos técnicas restantes, son complementarias y aportaron una respuesta más precisa de las áreas probables que pueden ser destruidas por los lahares secundarios en las cercanías del volcán, así como de lahares potencialmente activos que pueden vulnerar los sitios ubicados aguas abajo de los drenajes principales.

Las imágenes Sentinel 1 y Sentinel 2, obtenidas del Alaska Satellite Facility (Dietrichnet et al., 2001), se usaron para determinar las deformaciones del terreno usando la técnica DINSAR con imágenes Sentinel 1 (Montoya, 2017) y combinación de bandas en la imagen Sentinel 2, para determinar los cambios en la morfología del relieve y el emplazamiento final de los lahares en esas fechas. Esto fue una mejora importante para la determinación de los posibles orígenes y rutas de lahares secundarios y compararlos con los resultados obtenidos del Método LaharZ.

Se trabajó con un MDE de 12.5 metros de resolución espacial, obtenidos del Proyecto Copérnico. El software utilizado fue LaharZ, Arcview 3.2a, SAGA, SHALSTAB, Qgis. Todos estos programas son de licencia pública. El flujo general de procedimientos utilizados en esta metodología se puede ver en la Figura 41, en base de la plataforma para analizar este tipo de imágenes y generar interferogramas, Sentinel Application Platform-SNAP, de la Agencia Espacial Europea.

Las imágenes Sentinel 1B y 2A, se han utilizado en periodos de tiempo antes y después de la ocurrencia de los lahares secundarios y fueron obtenidas del Alaska Satellite Facility (Gens y Logan, 2003).

Para determinar las deformaciones del terreno alrededor del volcán, incluyendo desplazamientos y hundimientos, se utilizó la técnica de Interferometría DINSAR, que tiene la capacidad de detectar pequeñas deformaciones con precisión milimétrica en el terreno, utilizando datos del radar de apertura sintética de microondas-SAR. Se utilizaron dos imágenes para determinar las deformaciones del terreno por el método clásico dentro de configuración estándar de DINSAR.

El estado del arte de las técnicas DINSAR, que hacen uso de los datos adquiridos por los sensores espaciales SAR, explotan la información contenida en la fase de radar de al menos dos imágenes SAR complejas adquiridas en diferentes épocas sobre la misma área, las mismas que forman un par interferométrico. En adelante, utilizaremos el término DINSAR como término genérico para referir la utilización de al menos 2 imágenes para la elaboración de los interferogramas. Existen varios estudios que han contribuido a mejorar la ubicación espacial de las deformaciones del terreno por varios eventos naturales y actividades antrópicas como sismos mayores a 7Mw, erupciones volcánicas, erosión causada por deforestación o actividades de extracción de recursos

minerales sin control de estabilidad de taludes como la minería, explotación de acuíferos, extracción de hidrocarburos, entre otras actividades (Zeni et al., 2014).

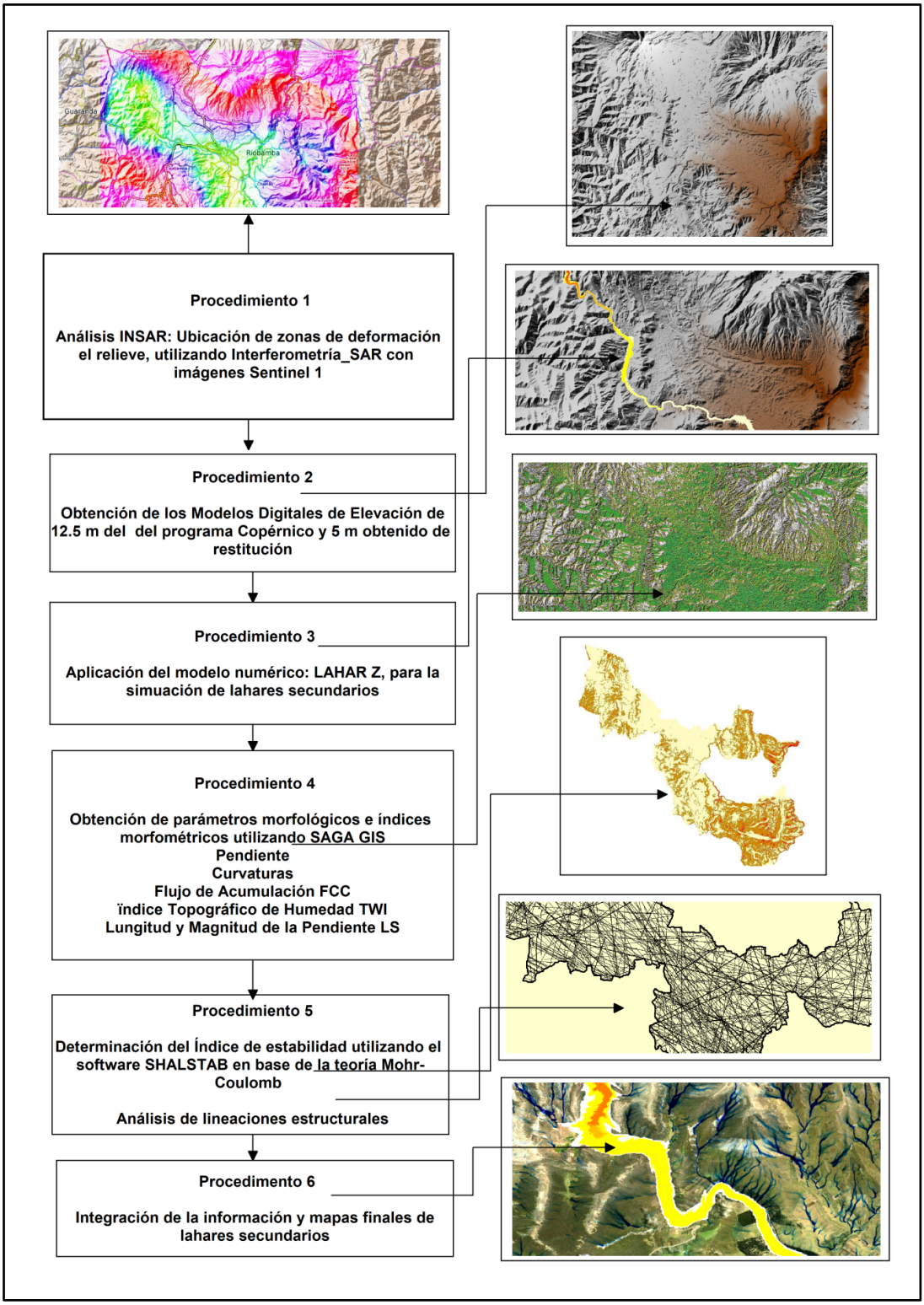


Figura 41. Proceso de flujo metodológico para la simulación de lahares secundarios con DINSAR, LaharZ, el Método Morfométrico SAGA-GIS y el Método de estabilidad SHALSTAB.

Las técnicas DINSAR han sido ampliamente documentadas en cientos de artículos en revistas científicas como Nature and Science, donde ha contribuido con éxito en diferentes campos de las Geociencias como en sismología, un campo en el que se han obtenido los mayores logros científicos, incluido el análisis cosísmico, análisis, deformación post-sísmica y deformación tectónica (Sillerico et al., 2010). La vulcanología es otro campo de aplicación importante, con varios estudios de deformación volcánica (deflación y elevación). Estas deformaciones volcánicas han permitido determinar los posibles orígenes de los lahares secundarios.

El análisis DINSAR sobre deslizamientos de tierra que, a pesar de ser una aplicación importante para la ubicación y reducción de estos eventos, según varios investigadores, tiene resultados menos eficientes, principalmente debido a la pérdida de coherencia debido al carácter heterogéneo de la composición de estos. Sin embargo, con las técnicas de dispersión Persistent Scatterres-PS, para algunos tipos de deslizamientos de tierra y deslizamientos de rocas, es posible realizar mediciones de deslizamientos de tierra más eficientes. Los resultados más relevantes se describen en (Foumelis et al., 2018).

En el caso de subsidencias y levantamiento de terreno, el análisis DINSAR ha obtenido resultados eficientes en varias partes del mundo que se han descrito en ampliamente en el mundo científico especializado. Se ha demostrado como túneles y galerías subterráneas han desequilibrado los sistemas de agua de la escorrentía superficial, así como los sistemas de flujo de agua subterránea, causando la destrucción de sistemas constructivos en la superficie. Otros procesos de subsidencia en todo el mundo han sido investigados por otros factores como el bombeo de fluidos, trabajos de construcción, actividad geotérmica, etc.

La mayoría de los resultados publicados se refieren a áreas urbanas, en las cuales los datos de DINSAR permanecen consistentes incluso con grandes períodos de observación, esto debido a la existencia de reflectores artificiales como las construcciones de ingeniería que permanecen estáticas en el tiempo. Con el advenimiento de las técnicas de dispersores persistentes con alta y pseudocoherencia, se han obtenido resultados más eficientes para monitorear las deformaciones del relieve fuera de las áreas urbanas, suburbanas e industriales (Tofani et al., 2013; Carlà et al., 2019; Govil et al., 2018; Aobpaet el al., 2009; Abdikan et al., 2014; Milan, 2009; Sousa et al., 2008; Roccheggiani et al., 2019; Qin & Perissin, 2015; Colombo, 2003; Thapa et al., 2016; Zhang, 2018).

Con respecto a Ecuador, hay pocos estudios que han utilizado imágenes SAR y sus Método s DINSAR y sus variantes. En Ecuador, específicamente, por ejemplo, en 1977, el Gobierno creó el Centro de Levantamiento Integrado de Recursos Naturales por Sensores Remotos -CLIRSEN-, una entidad tecnológica y científica destinada a integrar las tecnologías más avanzadas relacionadas con Geodesia, Recursos Naturales, Medio Ambiente, Catastro, Sistemas de Información Geográfica (SIG), y software especializado como Ilwis y Erdas.

Esta Institución, utilizó imágenes de radar de visión lateral y de apertura real -SLAR-, adquiridas por las compañías petroleras en la región amazónica y el primer mosaico semicontrolado de Radar Aerotransportado de Apertura Sintética -SAR-, imágenes tomadas para la exploración de campos petroleros en 1982. Posteriormente, el Clirsen fue reemplazado por el Instituto Espacial Ecuatoriano y en 2013 se lleva a cabo el primer proyecto de análisis DINSAR con imágenes Cosmo-SkyMed dentro del proyecto de Tecnología Espacial y Geofísica en gestión de Riesgos Geodinámicos Externos para la prevención y mitigación de inundaciones torrenciales (Muñoz et al., 2015). Este fue el primer proyecto que la institución regente en teledetección ejecutó en el país.

En 2014, uno de los primeros proyectos de análisis de deformación del suelo se llevó a cabo utilizando la técnica DINSAR en una región montañosa de la región andina. Este trabajo se realizó con el software Roi-Pac con muy buenos resultados (Torres & Platzeck, 2014). Desde 2016, después del terremoto destructivo de 7.8 Mw en la costa ecuatoriana que causó más de 600 muertes y pérdidas económicas de más de 3 mil millones de dólares, la Secretaría de Gestión de Riesgos implementó el proyecto de análisis de la zona de deformación en el país utilizando DINSAR.

El autor de esta Tesis ha desarrollado algunos proyectos utilizando DINSAR con un par de imágenes Sentinel y con gran número de imágenes, para determinar las deformaciones del terreno en el volcán Fuego en Guatemala, en el volcán Chimborazo en Ecuador, hundimiento en varias ciudades de Ecuador como Zaruma, Portovelo, Quito, Guayaquil, Manta, Portoviejo, Pedernales, Santo Domingo de los Tsachilas, Esmeradas, Cuenca, Loja, Ambato, Puyo, Limón-Indanza, Tena, Gualaquiza, entre otras ciudades.

El sistema de radar de apertura sintética-SAR, permite obtener imágenes de reflectividad del terreno, que posteriormente son procesadas por las técnicas DINSAR (Interferometría SAR), para la generación de mapas precisos de deformación del terreno. El radar de apertura sintética interferométrica (DINSAR), también conocido como interferometría SAR, es la medición del cambio de fase de la señal o interferencia a lo largo del tiempo. Cuando se mueve un punto en el terreno, la distancia entre el sensor y el punto en el terreno también cambia y, por lo tanto, el valor de fase registrado por un sensor SAR que vuela a lo largo de una órbita fija también se verá afectado. La Figura 42, muestra la relación entre ese movimiento del terreno y el cambio correspondiente en la fase de la señal entre dos señales SAR adquiridas en la misma área (Sillerico et al., 2010).

La gran ventaja de estas técnicas es la posibilidad de monitorear grandes áreas sin la necesidad de mediciones de campo y, por lo tanto, a un costo muy bajo (Gens & Logan, 2003).

Los SAR son sensores llamados activos, que registran imágenes de alta resolución espacial. Una antena de apertura sintética o virtual, consiste en un vector de señales de radar sucesivas y consistentes que son transmitidas y

recibidas por una antena pequeña que se mueve a lo largo de un cierto trayecto de vuelo u órbita.

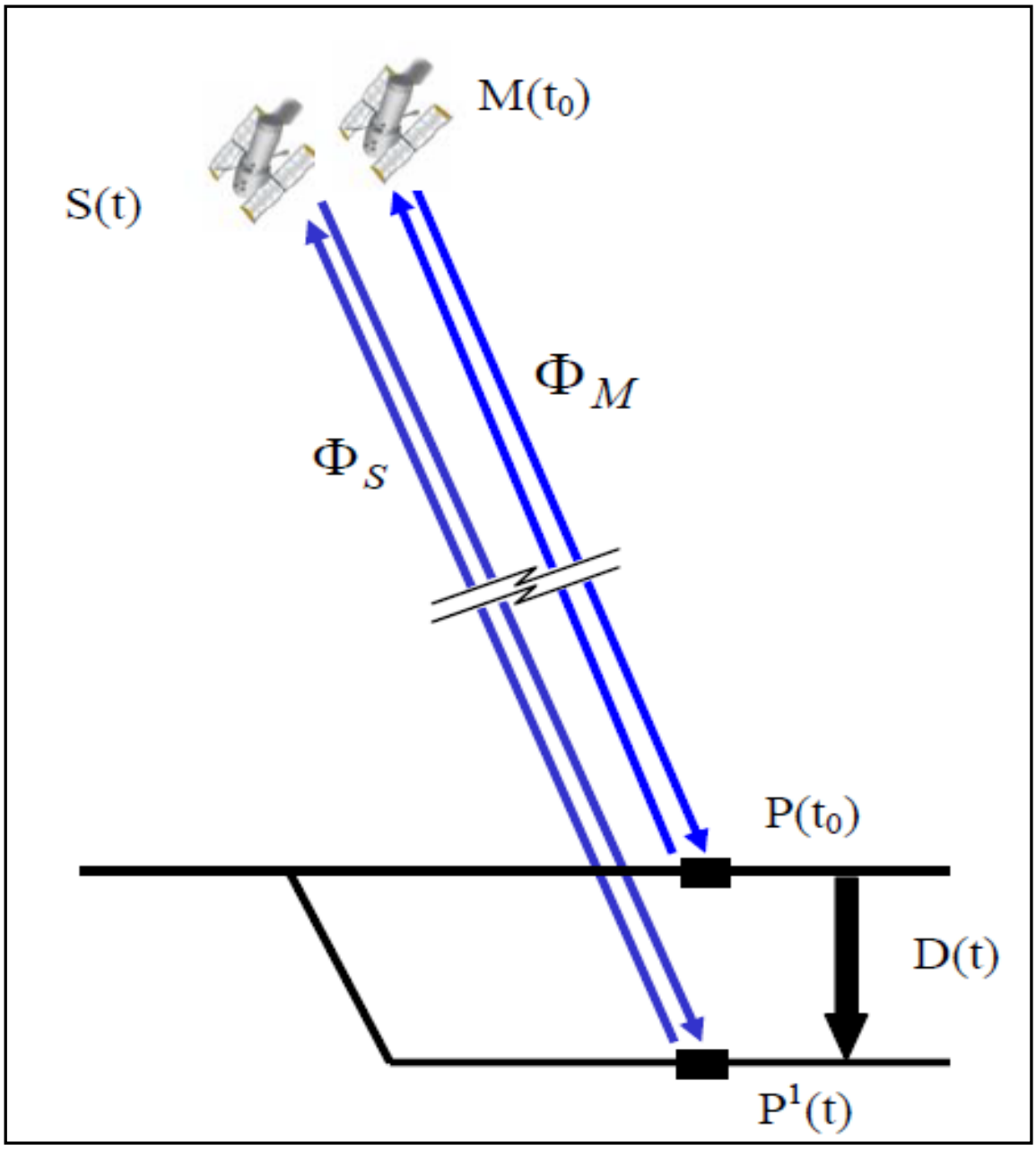


Figura 42. Esquema que muestra la relación entre el desplazamiento del suelo y el cambio de fase de la señal (Crosetto et al., 2005).

En referencia a la Figura 42, para la adquisición del interferograma, se ha seguido el siguiente procedimiento:

Los sensores adquieren una primera imagen SAR en el momento t_0, midiendo la fase Φ_M. El primer satélite y la imagen correspondiente generalmente se conocen como imagen Maestra, M. Suponiendo que se produce una deformación del terreno D (t), que tiene una evolución dada en el tiempo, el punto P se mueve a P^1.

Los sensores adquieren una segunda imagen SAR en el momento t, midiendo la fase Φ_S. El segundo satélite generalmente se conoce como el esclavo, S. Las técnicas DINSAR explotan la diferencia de fase de Φ_S y Φ_M. denominada fase interferométrica $\Delta\Phi_{Int}t$.

Suponiendo que D (t) no tiene datos, es decir, el terreno es estable y P^1 coincide con P, esta fase está relacionada con la diferencia de distancia $S_P - M_P$, que es el elemento clave para la generación de DINSAR DEM. Cuando el punto se mueve de P a P^1 entre dos adquisiciones de imágenes, además del componente de fase topográfica Φ_{Topo}, $\Delta_{\Phi Int}$ incluye la contribución del movimiento del terreno, Φ_{Mov}. En el caso general, $\Delta_{\Phi Int}$ incluye (ecuación 5):

$$\Delta\Phi_{Int}=\Phi_S - \Phi_M=\frac{SP-SM}{\frac{\lambda}{4.\pi}} + \frac{SP^1-SP}{\frac{\lambda}{4.\pi}} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Noise} = \Phi_{Mov} + \Phi_{Atm} \quad (Ec.\,5)$$

En donde Φ^{Atm}, es la contribución atmosférica; Φ_{Noise} es el ruido de fase; SP^1 es la distancia de esclavo a P^1; y λ es la longitud de onda del radar. Como se mencionó anteriormente, utilizando el componente topográfico ΦTopo es posible generar un DEM de la escena observada. En las técnicas DINSAR, se utiliza la transformación inversa: si hay disponible un DEM de la escena adquirida. Adicionalmente, ΦTopo se puede simular y restar de $\Delta\Phi_{Int}$, obteniéndose la llamada fase DINSAR $\Delta\Phi_{D-Int}$ para mejorar la respuesta de la deformación del terreno por remoción de la fase topográfica (ecuación 6):

$$\Delta\Phi_{D-Int} = \Delta\Phi_{Int} - \Phi_{Topo\ _\ Sim} = \Phi_{Mov} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Res\ _Topo} + \Phi_{noise} \qquad (Ec.\ 6)$$

En donde $\Phi_{Topo\ _\ Sim}$ es el componente topográfico simulado, y $\Phi_{Res\ _Topo}$ representa el componente residual debido a errores en la simulación de Φ_{Topo}, por ejemplo, errores en el DEM empleado.

Para obtener información sobre el movimiento del terreno, Φ_{Mov} debe separarse de los otros componentes de la fase.

Las técnicas que utilizan un MDE externo para derivar el componente de fase topográfica utilizan la denominada configuración DINSAR de dos pasos. Existe otra configuración, la interferometría de tres pasos, que puede funcionar sin un MDE conocido a priori, pero que requiere al menos tres imágenes adquiridas en la misma escena (Sillerico et al., 2010). En esta metodología, el análisis DINSAR se ha utilizado para determinar la deformación-desplazamiento del terreno y es una herramienta ideal para monitorear el hundimiento del relieve topográfico en grandes áreas y durante períodos prolongados de tiempo, con una alta precisión de unos pocos milímetros a centímetros. por kilómetro cuadrado. Las imágenes Sentinel en la banda C se usaron para determinar la deformación y el desplazamiento acumulado durante un período anterior a la ocurrencia de los lahares secundarios en el volcán de Fuego.

Como se mencionó anteriormente, para estudiar las deformaciones y hundimientos locales del terreno en las cercanías del volcán se usó un par de imágenes Sentinel 1B tomadas entre 2018/05/21 y 2018/06/14.

Las deformaciones del terreno obtenidas del análisis DINSAR, posiblemente tienen mayor certeza que las determinadas por LaharZ en función del Cono de Energía, por su concepto ya que parten de sitios de reflexión estables para determinar puntos de origen de lahares secundarios, determinados por concentración de esfuerzos deformadores del relieve lo que mejora la simulación numérica de los mismos. Para el caso del volcán de Fuego, las imágenes Sentinel 1B se procesaron con el software de procesamiento Sentinel Application Platform-SNAP de la Agencia Espacial Europea.

Las imágenes tienen las siguientes características:

Imágenes Base: Sentinel 1B

S1B_IW_SLC__1SDV_20180521T001317_20180521T001345_011012_0142C5_A797

S1B_IW_SLC__1SDV_20180614T001319_20180614T001347_011362_014DD5_D06F

Mission: SENTINEL-1B

Pass: ASCENDING

Polarization: VV

Se utilizó también una imagen Sentinel 2 para determinar los cambios en la morfología del relieve y el emplazamiento posterior de los lahares secundarios, a la erupción del 3 de junio de 2018, con las siguientes características:

Base image: Sentinel 2B: 2018-10-22T16:23:19024Z

Pass: Descending

Bands: 432

El análisis de deformación en relieve realizado por la plataforma de aplicación Sentinel, SNAP (Cando & Martínez-Graña, 2019), funciona de acuerdo al flujo de procedimientos (Fig. 43) que se detalla a continuación:

Flujo de procedimientos para análisis DINSAR para el volcán de Fuego con Snap de ESA.

Procedimiento 1: Análisis DINSAR. Ubicación de zonas de deformación regional del relieve en el volcán como posibles orígenes de lahares secundarios utilizando DINSAR. Preparación de imágenes Sentinel 1B-SLC. Este es un procedimiento estándar para importar o actualizar datos extraídos de las imágenes de Sentinel 1B.

Paso 1: Se selecciona el conjunto de datos SLC-Single Look Complex. Se leen las imágenes con la opción Read-Topsar-Split-Orbit (Fig. 43 A).

S1B_IW_SLC__1SDV_20180521T001317_20180521T001345_011012_0142C5_A797

S1B_IW_SLC__1SDV_20180614T001319_20180614T001347_011362_014DD5_D06F

Se selecciona el conjunto de datos SLC-Single Look Complex. Se establecen las órbitas para leer y establecer la escena de estudio. Extracción de imágenes maestras y esclavas; Selección de la imagen maestra: el software puede seleccionar automáticamente imágenes maestras que son las imágenes desde donde se va a medir la fase y coherencia de desplazamiento en referencia a otras imágenes esclavas. La imagen maestra también se puede seleccionar manualmente; Selección de imágenes esclavas.

Se verifican que las imágenes sean las correctas y que el sitio de análisis se encuentre ubicada en una de las fajas de ubicación espacial de adquisición de las imágenes tomadas por el sensor para el análisis (Fig. 43B).

En los productos Sentinel-1 IW SLC, hay 3 fajas o subconjuntos de adquisición de las imágenes, IW1, IW2, IW3. Cada subconjunto contiene porciones de la escena en fajas adyacentes y recopila datos satelitales por modo TOPS. El volcán de Fuego se encuentra en la faja IW3 (Fig. 43C).

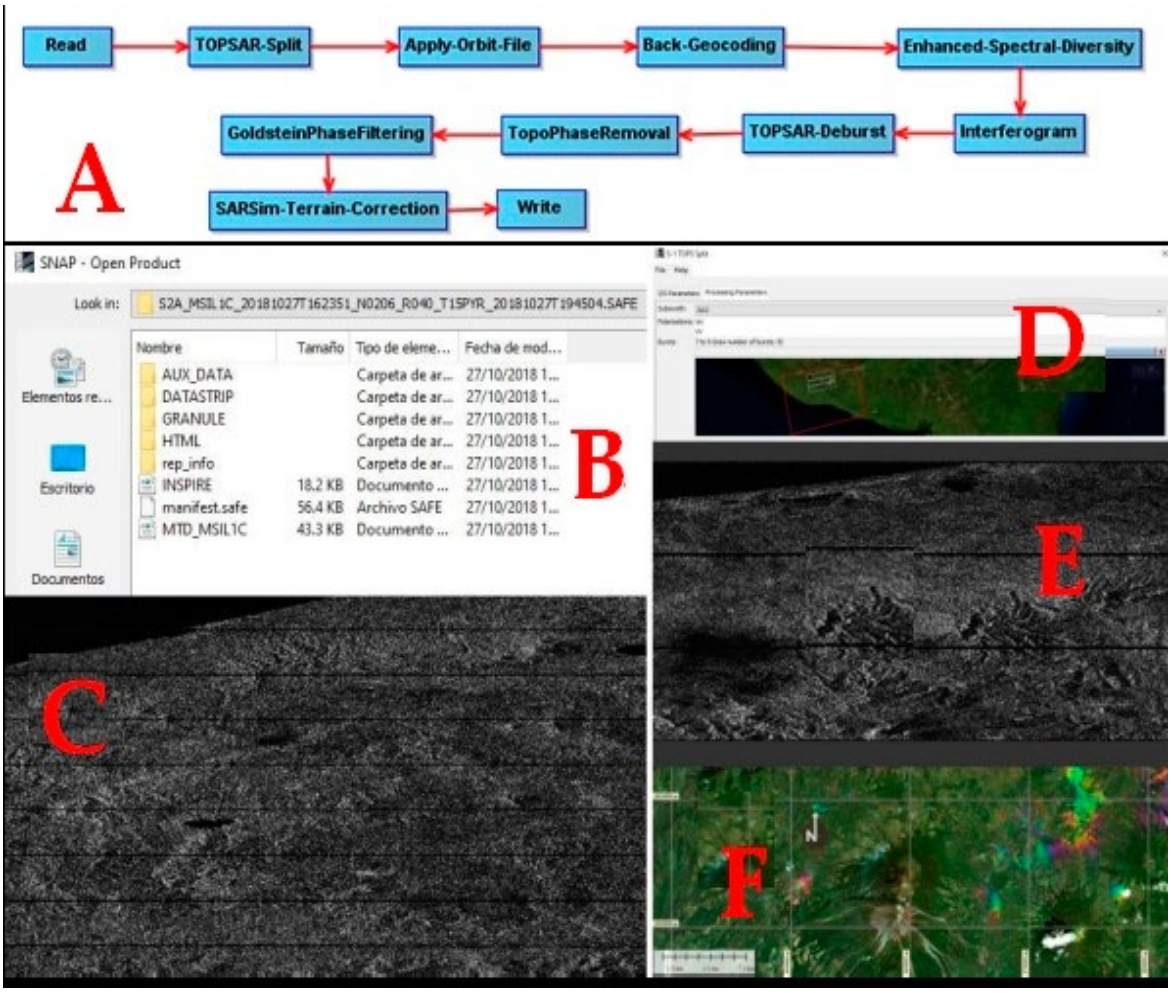


Figura 43. (A) El proceso de la plataforma de aplicación Sentinel -SNAP- utilizado para obtener las deformaciones del relieve por análisis DINSAR. (B-F) son los procedimientos para el análisis DINSAR en la Plataforma de Aplicóciones Sentinel -SNAP-. En el texto se describen brevemente estos procesos.

Paso 2. Geocodificación de las bandas con intensidades IW3_VV. Parámetros de Corregistro: con este procedimiento, fue posible colocar los píxeles de la imagen maestra sobre las imágenes esclavas con los mismos píxeles correspondientes para medir los desplazamientos y componer los interferogramas correctamente. Este proceso de coregistración de las imágenes se hace por pares o en una pila para el procesamiento interferométrico. Se selecciona una imagen como maestra y la/s otras imágenes se registran como esclavas. Los píxeles en las imágenes esclavas se moverán para alinearse con la imagen maestra con una precisión de subpíxeles (Fig. 43D).

Paso 3: Formación del Interferograma-Topsar Deburst-TopoPhase Removal-Filtering-Sarsim Terrain Corein-Write (Fig. 43E): Formación de interferograma desde el menú de Productos DINSAR. Parámetros DINSAR: con esta opción, se eligen los parámetros para el procesamiento DINSAR. Se estima la coherencia gráfica completa que se utiliza para leer los interferogramas de acuerdo con el gráfico de imágenes cargadas y calcula el mapa de coherencia espacial como la coherencia promedio del conjunto de interferogramas actuales. El procesamiento de interferogramas se realiza de acuerdo con el número de imágenes cargadas. Se generó un interferograma entre la imagen maestra y cada una de las imágenes esclavas. Una vez obtenidos los interferogramas, se realiza un nuevo mapa de mapa de coherencia de los mismos de acuerdo con el número de imágenes cargadas y calcula el mapa de coherencia espacial como la coherencia promedio del conjunto de interferogramas actuales.

Con la obtención del interferograma, se puede medir el desplazamiento en función de la Fase y del mapa de coherencia entre las imágenes maestra y esclavas con un proceso de desenvolvimiento de la fase que generalmente se realiza con software externo a SNAP como Snaphu, teniendo en cuenta que la Fase es el la cantidad en milímetros de desplazamiento de la posición de un punto en un tiempo inicial de toma de la imagen, con respecto a la posición del mismo punto tomado después en un periodo de tiempo que generalmente es cada 6 días.

Este es el último proceso en la generación del mapa de deformación, consiste en una estimación de la tasa de deformación-desplazamiento a partir de las imágenes obtenidas (Fig.43F).

La ubicación en dichas fechas de los lahares primarios y secundarios después de la erupción del 3 de junio de 2018 se obtuvo con una imagen de Sentinel 2 de 10 m de resolución espacial, combinando las bandas 4 (rojo), 3 (verde) y 2 (azul) con una resolución espacial de 10 m, en función de un flujo simple de procesos en SNAP de la Figura 42. En este flujo, se lee la imagen, se calibra, se realizan las correcciones geométricas y se combinan las bandas, las imágenes Sentinel 2 tienen 13 bandas. En la Tabla 3 se pueden ver las bandas espectrales para los sensores S2A y S2B.

Número de banda	S2A		S2B		
	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Resolución espacial (m)
1	442,7	21	442,3	21	60 60
2	492,4	66	492,1	66	10
3	559,8	36	559,0	36	10
4 4	664,6	31	665,0	31	10
5 5	704,1	15	703,8	16	20
6 6	740,5	15	739,1	15	20
7 7	782,8	20	779,7	20	20
8	832,8	106	833,0	106	10
8a	864,7	21	864,0	22	20
9 9	945,1	20	943,2	21	60 60
10	1373,5	31	1376,9	30	60 60
11	1613,7	91 91	1610,4	94	20
12	2202.4	175	2185,7	185	20

Tabla 3: Bandas espectrales para los sensores SENTINEL-2 (S2A y S2B)

Paso 1: Leer-Abrir los productos. Bandas de gránulos-img (Fig. 42A). Ver los productos (Fig. 43B): en los productos Sentine-2B-Granule-Img, hay 13 bandas espectrales en el espectro visible e infrarrojo cercano (VNIR) e infrarrojo de longitud de onda corta (SWIR), como se muestra en la tabla de la Figura 43 C.

Paso 2: Combinación de las bandas 4-3-2 colores naturales RGB. Ubicación de lahares primarios y secundarios (Fig. 43D).

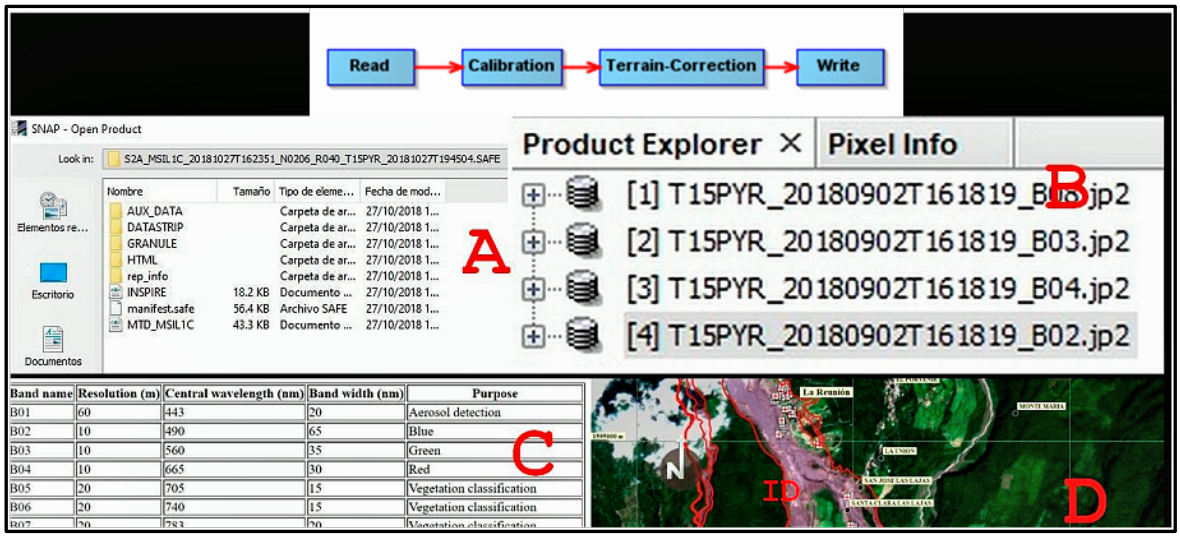


Figura 43. Flujo de proceso en SNAP. Ubicación espacial de los lahares primarios y secundarios de una imagen de Sentinel 2. Combinación de las bandas 4, 3 y 2. (A, B, C) Pasos de la plataforma de aplicación de Sentinel -SNAP- de cada parte de la rutina en imágenes de Sentinel 2A. Ubicación de lahares primarios y secundarios. [ÏD] La línea roja es la delimitación LAHARZ.

Procedimiento 2: Obtención de los Modelos de Elevación Digital. Cómo se indicó anteriormente, el Modelo de Elevación Digital de 12.5 m de resolución espacial para la simulación de lahares se obtuvo de forma gratuita del Proyecto Copérnico. En la Figura 44 se puede ver el Método digitales de elevación del volcán de Fuego.

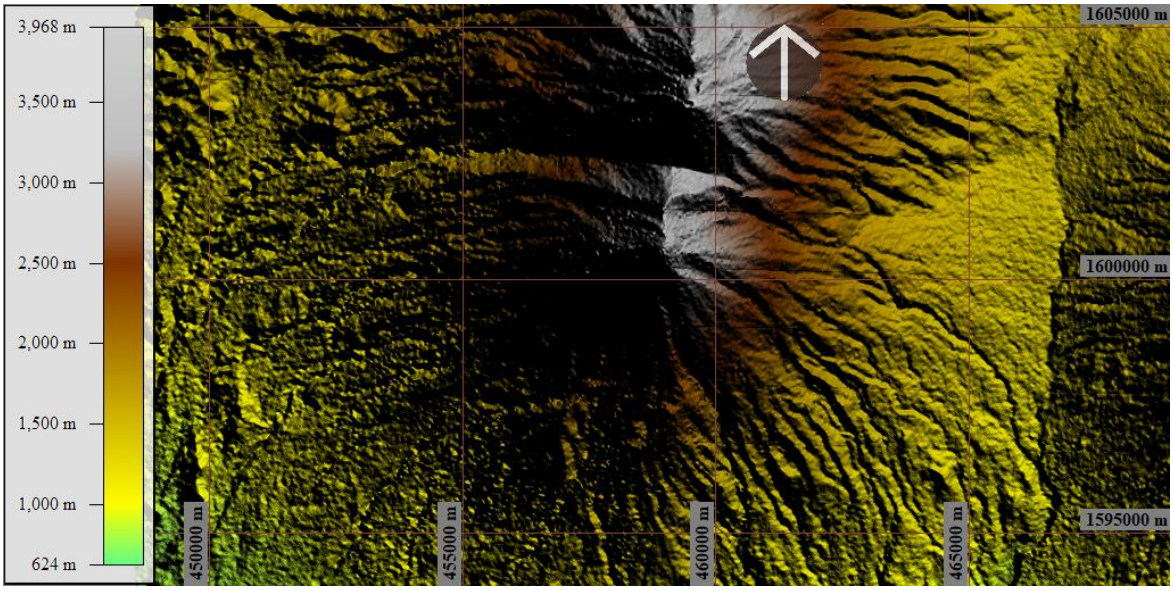


Figura 44. Método Digital de Elevación 12.5 metros de resolución espacial utilizados para el análisis de lahares secundarios obtenido del Proyecto Copérnico.

Procedimiento 3: Simulación de lahares secundarios con LaharZ. LaharZ fue escrito para delimitar áreas de inundación potencial con uno o más volúmenes de lahares especificados. Es un código que se ejecuta dentro de un sistema de información geográfica -SIG-, creado por el Servicio Geológico de

los Estados Unidos -USGS- (Schilling, 1998). Está basado en un método semiempírico que delimita las zonas de riesgo de inundación por lahares, es decir, traza las áreas de inundaciones probables durante un evento de lahares sobre un Modelo de Elevación Digital. El programa utiliza dos ecuaciones semiempíricas calibradas por análisis estadístico, en las secciones de un área inundada por un lahar (A) y el área planimétrica inundada (B), medida en 27 lahares- depósitos de 9 volcanes en los Estados Unidos, México, Colombia, Canadá y Filipinas (Schilling, 2019), (Fig. 45). Las ecuaciones son (ecuaciones 7 y 8):

$$A = \propto_1 V^{2/3} \qquad \text{(ec.7)}$$

$$B = \propto_2 V^{2/3} \qquad \text{(ec. 8)}$$

Donde A es el área transversal máxima inundada, B es el área total inundada y V es el volumen del lahar, $\alpha 1 = 0.05$ y $\alpha 2 = 200$, $\alpha 1$ y $\alpha 1$ son valores constantes obtenido de las modelaciones experimentales por los desarrolladores del software

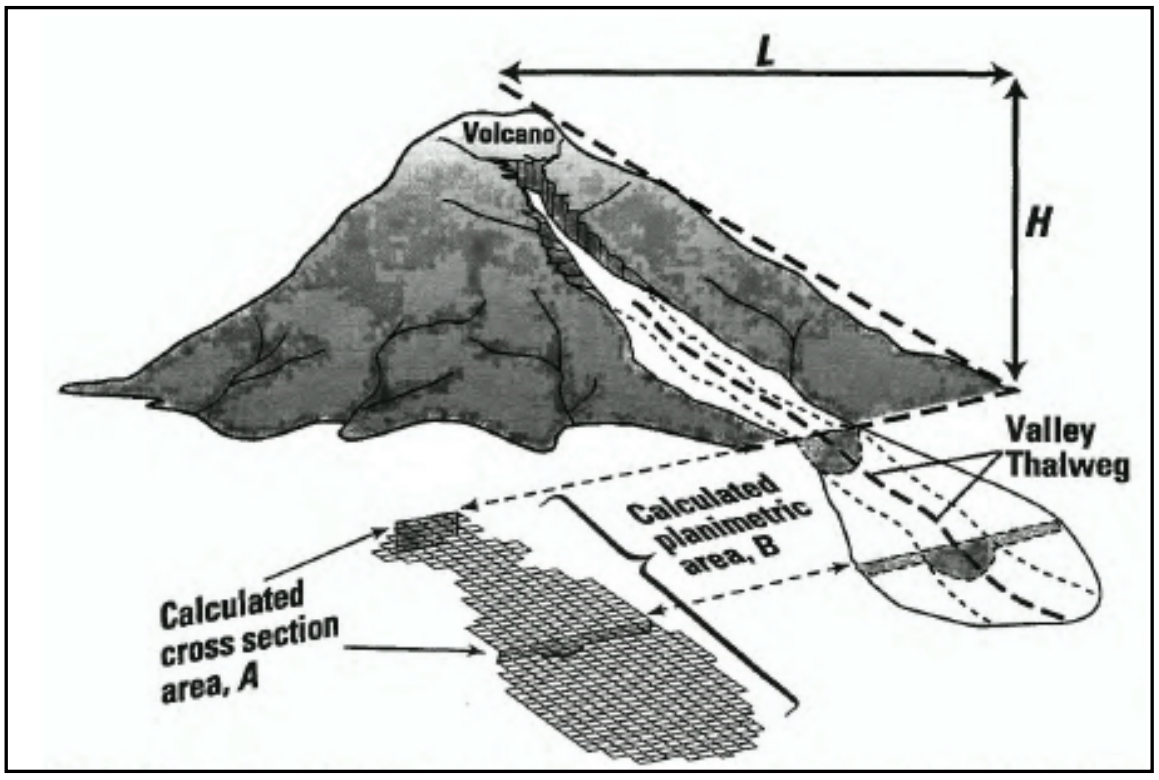


Figura 45. Diagrama de asociación entre dimensiones de un lahar idealizado en base del Cono de Energía y áreas de sección transversal (A) y planimétrica (B) calculadas por LAHARZ para un volcán hipotético. La relación entre la caída vertical (H) y la distancia de desviación horizontal (L) describe la extensión del peligro de volcán proximal. LAHARZ comienza los cálculos de las zonas de peligro de inundación por un lahar donde se cruza una corriente especificada por el usuario y el límite de la zona de peligro proximal.

El Método LaharZ funciona bajo los siguientes supuestos:

1. Las inundaciones de lahares anteriores pueden proporcionar la base de información para predecir posibles inundaciones futuras.

2. Las zonas de peligro distantes se limitan a los valles y se dirigen desde las laderas del volcán.

3. El volumen del lahar proximal controla la extensión de la inundación distal que se forma aguas abajo.

4. Los lahares muy voluminosos ocurren con menos frecuencia.

5. Nadie puede predecir el tamaño del próximo lahar que descenderá por un río.

6. La selección de volumen para el lahar y el sitio de origen del mismo controlan el rango de flujo.

Uno de los análisis en que se ha puesto énfasis en este estudio, es la capacidad de la infiltración de lluvias intensas a partir de la Acumulación de Flujo estudiado en el método 1, para predecir áreas de inundación, erosión y rotura de taludes por lahares secundarios. Estos flujos se encuentran como parte del proceso dentro de LaharZ y como parámetro morfológico en Saga y Shalstab. En Este Método la Acumulación de Flujo hace referencia al llenado rápido de quebradas y guías de agua a partir de acumuladores que hacen fluir el conjunto agua-escombros para alimentar lahares principales y secundarios que fluyen aguas abajo. Este es un dato-parámetro inicial para la corrida de la simulación.

El Modelo de Elevación Digital es el dato de entrada principal para el funcionamiento de la simulación. En este caso, como ya se mencionó, se utilizó el Modelo de Elevación Digital de 12.5 de resolución espacial. El método también utiliza coordenadas iniciales de partida que se las obtuvo de las zonas de máxima deformación del terreno obtenidas con el análisis DINSAR, en áreas proximales al volcán y distales. El tercer dato de ingreso para ejecutar el programa, es el volumen del flujo de escombros obtenido de datos históricos para ejecutar el programa que se estimó en 14’000000 de m3.

Procedimiento 4: Obtención de parámetros morfológicos e índices morfométricos. El método morfométrico con SAGA, se aplicó posteriormente a las Método s DINSAR y LaharZ. Los parámetros e índices morfométricos principales estudiados fueron los siguientes:

Acumulación de Flujo-FCC (O’Loughlin, 1986). La Acumulación de flujo, se calculó como el área de contribución ascendente (captación), utilizando el Modelo Hidrológico Básico D8, como se describió en el método 1. El resultado es un ráster de flujo acumulado para cada celda, determinada por la acumulación del peso de todas las celdas que fluyen hacia cada celda del Método numérico de elevaciones, pendiente descendente. El flujo acumulado se basa en el número total de celdas, o una fracción de ellas, que fluye a cada celda más baja en el ráster de salida (Fig. 46).

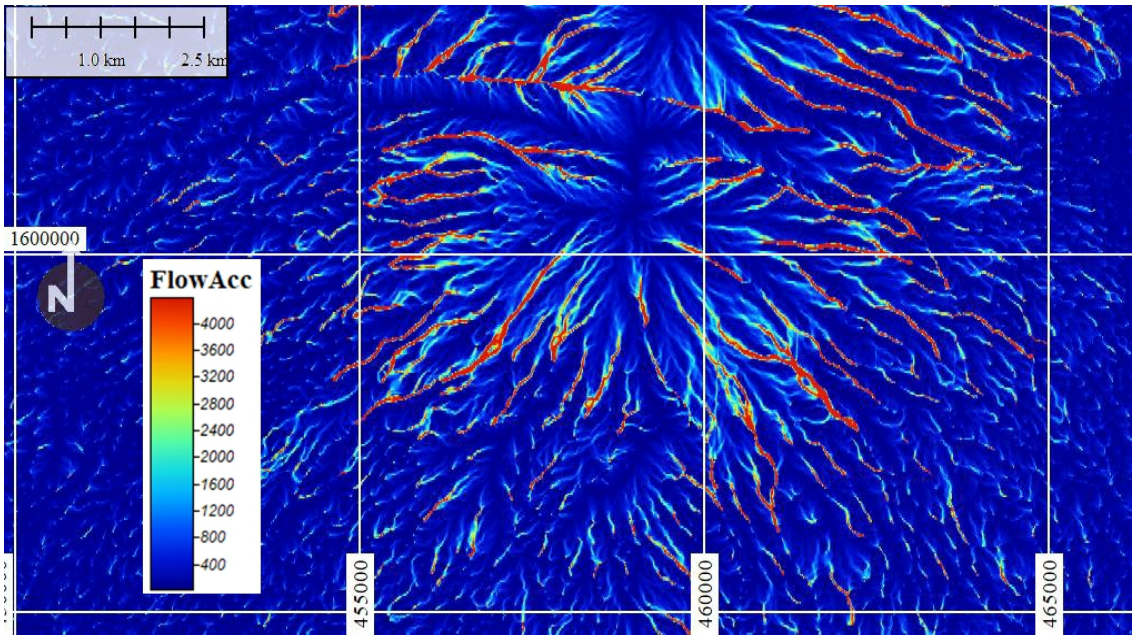


Figura 46. SAGA GIS. Acumuladores de flujo. Los valores más altos (tendencia al color rojo) representan mayores acumulaciones de flujo y áreas de flujo concentrado que pueden usarse para identificar canales de cursos de agua de llenado rápido y soporte de las rutas de lahares.

Índice de Humedad Topográfica-TWI (Sebastiano et al., 1979). El Índice de Humedad Topográfica modela la dinámica de los flujos superficiales y subterráneos basándose en el control topográfico de la escorrentía, que ofrece una mejor perspectiva en relación con la predicción de los sitios donde la saturación y la alta concentración de escorrentía pueden actuar como rutas de flujo iniciales de lahares hacia procesos mayores de inundación (Fig. 47). El ITW combina la contribución a la escorrentía de un área local drenada y su pendiente, y se usa comúnmente para cuantificar el control topográfico en procesos hidrológicos y se define (ecuación 9) como:

$$TWI = Ln\ (af/\tan \beta) \quad \text{(ec 9)}$$

Donde af es el área local drenada para un punto de cálculo, y tan $\boldsymbol{\beta}$ es la pendiente direccional de la celda de interés (y de los ocho vecinos en el caso del algoritmo D8). Ln es logaritmo natural.

Factor Longitud y Magnitud de la Pendiente-LS (Cando & Martínez-Graña, 2019). Esta es una combinación de la pendiente y la longitud de la pendiente, que es útil para predecir el potencial de erosión. El factor de longitud de la pendiente, L, calcula el efecto de la longitud de la pendiente sobre la erosión, y el factor de magnitud de la pendiente, S, calcula el efecto de la pendiente sobre la erosión. Los valores más altos de color hacia el negro representan un mayor peligro a la erosión (Fig. 48).

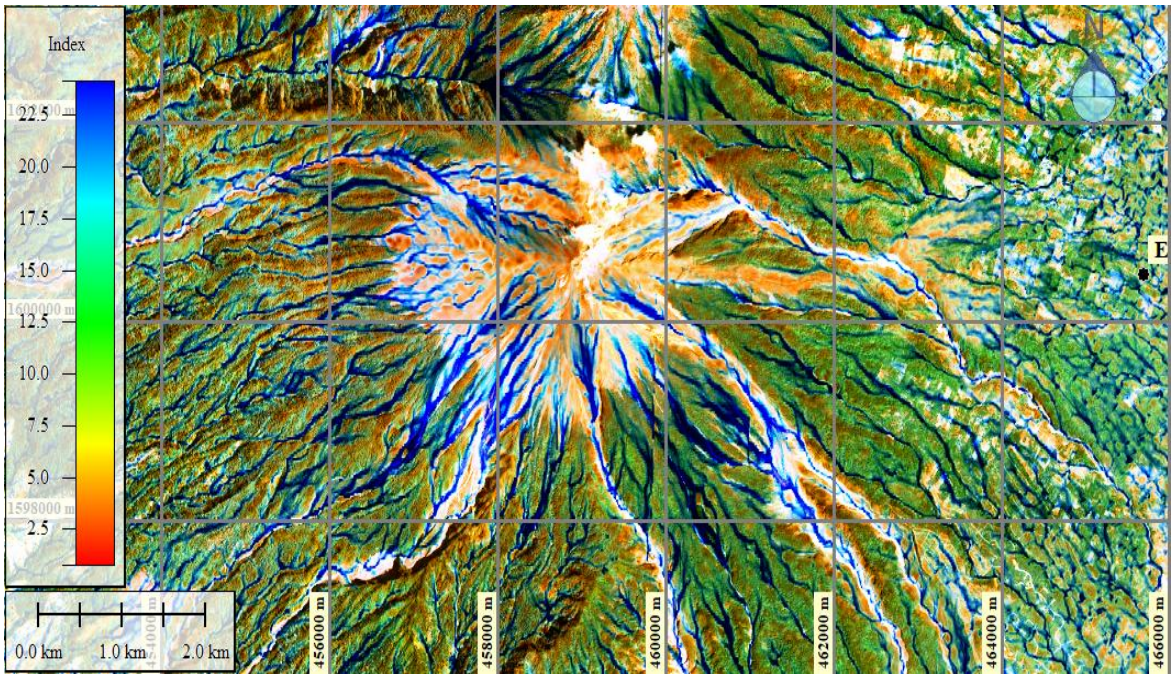


Figura 47. SAGA GIS. Índice de humedad topográfica (TWI). Valores más altos con tendencia al color blanco, representa depresiones y drenaje y valores más bajos con tendencia al color negro, representan crestas y montes.

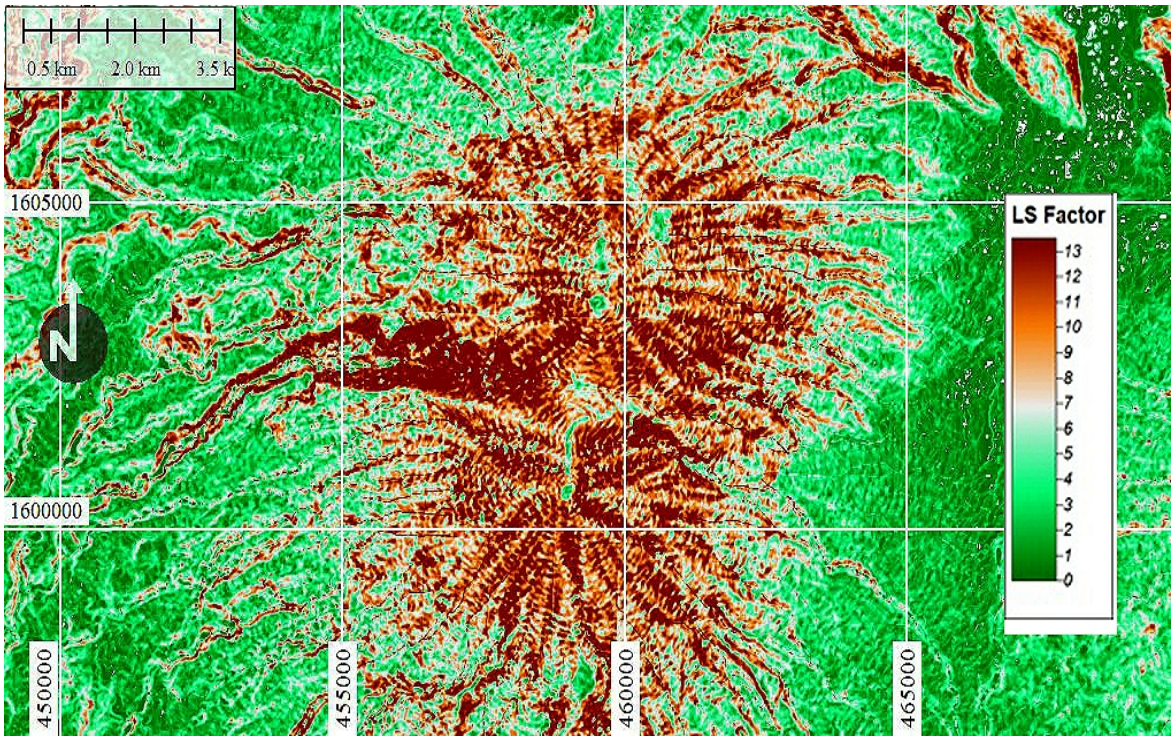


Figura 47. SAGA GIS. Longitud y Magnitud de la Pendiente-LS. Valores más altos con tendencia al color rojo, representan zonas de mayor erosión.

Procedimiento 5. SHALSTAB: Determinación del Índice de Estabilidad utilizando el software SHALSTAB en base de la teoría Mohr-Coulomb de análisis de lineaciones estructurales.

Este procedimiento, realizó el análisis de estabilidad de los taludes del volcán y para definir áreas potenciales de producción de sedimentos a través de procesos de erosión y eliminación masiva del suelo. El programa SHALSTAB fue utilizado para mapear terrenos inestables poco profundos. SHALSTAB combina las características de flujo estacionario del subsuelo (flujo de agua que se mueve a poca profundidad debajo de la superficie de la tierra con una velocidad constante), considerando la relación morfología-hidrología.

SHALSTAB utiliza dos tipos de Métodos Numéricos: el Método de estabilidad de taludes y el Método hidrológico.

El Método de estabilidad de taludes utilizado, está basado en la teoría del talud infinito, que simula el grado de estabilidad de una determinada porción del suelo, localizada sobre el afloramiento rocoso. Puede ser representado por la siguiente ecuación (ecuación 10):

$$\frac{h}{z} = \frac{C}{\rho_w g z \cos\theta \tan\theta} + \frac{\rho_s}{\rho_w}\left[1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi}\right] \qquad \text{(ec. 10)}$$

En donde h es la altura de la columna de agua en el subsuelo (m); z es el espesor del suelo (m); C es la Cohesión del suelo (kpa); g es la aceleración de la gravedad (cm/s2); ρ_s y ρ_w son las densidades del suelo y de la columna de agua respectivamente (kg/m3); φ es el ángulo de fricción interna de la masa del suelo (grados) y θ es el ángulo del talud natural del terreno (grados). Este Método supone, por lo tanto, que las resistencias al movimiento a lo largo de los lados y extremos del deslizamiento de tierra no son significativas.

El Método hidrológico determina la relación entre la concentración de agua y la transmisividad del suelo para determinar la condición de saturación. Este Método puede ser expresado a partir de la siguiente ecuación (ecuación 11):

$$W = \frac{Q}{T}\frac{a}{b\sin\theta} \qquad \text{(ec. 11)}$$

Donde: W representa el Índice de Humedad del suelo, que puede ser dado también en función de la razón «h» (grosor capa de suelo)/z (altura de la columna de agua en el subsuelo); Q es la intensidad de la lluvia (mm); T es la transmisividad del suelo (m²/día), es decir, el producto entre la conductividad hidráulica saturada y el grosor del suelo; a es el área de contribución o el área drenada dado en m²; b es el largo de contorno unitario (resolución de la grilla dado en m) y θ es la pendiente local medida en grados.

El análisis de la estabilidad en las laderas del volcán con SHALSTAB a través de la relación hidrológica Q/T, intensidad de la precipitación, Q, en relación con la capacidad del subsuelo para transmitir agua a lo largo de las laderas, T (Transmisividad), determinó que, cuanto mayor sea Q en relación con T, más probable será que el suelo esté saturado y mayor será el número de sitios con pendientes inestables. Esta relación utilizó la clasificación de píxeles con valores positivos estables a valores casi estables y crónicamente inestables con valores

negativos de acuerdo con las 7 clases de estabilidad que aporta SHALSTAB ilustradas en la Tabla 4.

Clases SHALSTAB	Interpretación de las clases
Inestabilidad crónica	Incondicionalmente inestable y saturado
Log Q/T -1 < -3,1	Incondicionalmente inestable insaturado
3,1<Log Q/T -1< -2,8	Inestable y saturado
-2,8<Log Q/T-1< -2,5	Inestable e insaturado
-2,5<Log Q/T-1< -2,2	Estable e insaturado
Log Q/T -1 > -2,2	Incondicionalmente estable e insaturado
Estable	Incondicionalmente estable y saturado

Tabla 4. Clases de estabilidad obtenidas con SHASTAB e interpretación de las clases obtenidas.

Procedimiento 6: Integración de la información y mapas finales de lahares secundarios. En este procedimiento se integraron los procedimientos anteriores para la elaboración de los mapas de lahares secundarios, que dependiendo de la resolución del Modelo de Elevación Digital el resultado tendrá mayor detalle de acuerdo con el punto proximal o distal escogido, aparte de los que LaharZ escoge; el o los volúmenes de agua para la simulación; la cantidad acumuladores de flujo que aporten a la generación de las rutas por donde los lahares secundarios discurran; las geoformas que presentan alta saturación que pueden aportar con la intensidad de las inundaciones en sitios con alta concentración de escorrentía que pueden actuar como rutas de flujo inicial de los lahares, además de zonas inestables de fácil erosión y que pueden desestabilizar los taludes por el paso de los lahares.

2.3. Metodología para el análisis de la deformación del terreno por Interferometría diferencial y concentración de lineamientos geológicos-estructurales apoyados por investigación geofísica-geotécnica (Método 3)

Esta tercer metodología, permite delimitar las áreas afectadas por deformación superficial y desplazamientos verticales del relieve, mediante el análisis de interferometría diferencial -DINSAR- y concentración de lineamientos geológicos-estructurales obtenidos de la aplicación del Método 1 -Modelo Hidrológico Básico D8-, con el apoyo de técnicas geofísicas tales como la tomografía eléctrica del subsuelo y del georadar, en combinación con datos de sismicidad y parámetros geotécnicos tales como índices de licuefacción del suelo, onda de velocidad de corte Vs30, entre otros parámetros.

Esta combinación de técnicas permitió la ubicación espacial, con mayor certeza, de áreas susceptible de riesgo sísmico para la construcción y relacionado con la tipología de suelos de la Norma Ecuatoriana de la

Construcción NEC-2011. El Método propuesto mejoró los mecanismos de pronóstico para la reducción del riesgo sísmico con base en mapas de peligros ante la posible ocurrencia de un terremoto de magnitud como el del 16 de abril de 2016. Pronóstico que puede ser realizado con anticipación, para proteger las obras de ingeniería y la población, especialmente en áreas deformadas tectónicamente. Para su validación práctica, la zona de estudio se ubicó en el municipio de Manta, unidad ambiental del Litoral y geográficamente al oeste de Ecuador, limitada al oeste por el Océano Pacífico; al sur y al oeste con los municipios de Montecristi y Jaramijó y al norte con el Océano Pacífico. La Zona Cero, se ubica la parroquia de Tarqui, que sufrió el mayor impacto y destrucción del terremoto del 16 de abril de 2016.

El terremoto del sábado 16 de abril de 2016 a las 6:58 p.m. (hora local), de magnitud 7.8 (Mw, magnitud de momento), cuyo hipocentro se ubicó frente a la ciudad de Pedernales (Manabí, Ecuador), a 20 km de profundidad, fue el resultado del desplazamiento entre dos placas tectónicas: la placa oceánica de Nazca que se sumerge bajo la placa continental de América del Sur (Instituto Geofísico Nacional, 2016a). La Zona Cero de la ciudad de Manta, que se encuentra en la parroquia de Tarqui, antes del terremoto fue el centro comercial y turística más grande desarrollada de la ciudad y es el área en donde murieron 206 personas. La infraestructura comercial y turística se redujo al 10%. La falta de de mapas de microzonificación sísmica, así como la mala calidad de los materiales de construcción, dificultaron la construcción de edificios resistentes a un sismo de esa magnitud, basadas en las normas de construcción sismoresistentes actuales en la zona.

Hasta el año 2001, de los 22 municipios de la provincia de Manabí, solo 3 tenían mapas de microzonificación sísmica. Manta era uno de los municipios que no tenían mapas de peligros naturales a escalas de gestión y, como las provincias restantes, los riesgos sísmicos se manejaban con mapas a una escala 1: 1,000,000 elaborado por el Instituto Geofísico Nacional y publicado en las Normas de la construcción ecuatorianas NEC11 y NEC15 (NEC-11, 2011). Los mapas de riesgo sísmico de esta época, ubicaron a la ciudad de Manta en la Zona 4 con aceleración máxima del terreno > 0.5 g y peligro sísmico crítica para la construcción. Además, la Secretaría Nacional de Planificación SENPLADES ubicó el municipio de Manta en alto peligro sísmico (ODEPLAN, 2001).

El mapa de peligro sísmico del Instituto Geofísico Nacional y la ubicación regional de la ciudad de Manta y la Zona Cero se ven en la Figura 48.

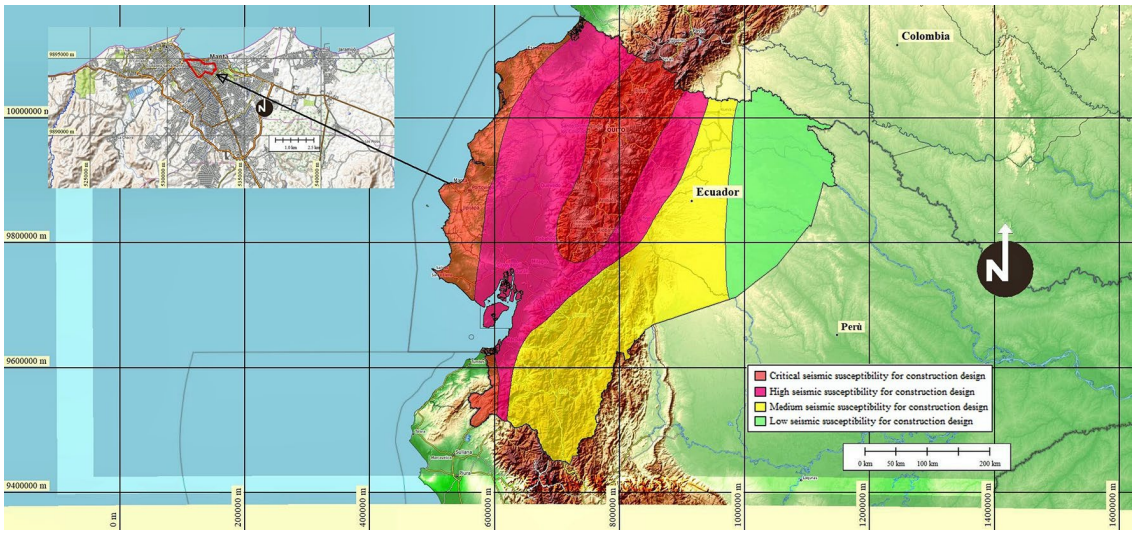


Figura 48. Mapa de riesgos sísmicos de 2001 del Instituto Geofísico Nacional-IGN, ubicación del cantón Manta y Zona Cero en la Zona 4, con aceleración de gravedad mayor de 0.5 g y grado de peligro sísmico crítico para el diseño de la construcción. Leyenda: peligro sísmico para el diseño de la construcción, rojo: crítico, rosa: alto, amarillo: medio, verde: bajo. La Zona Cero se ha demarcado con el polígono de color rojo.

Ante la posibilidad de ocurrencia de un terremoto similar que causó una pérdida económica de alrededor de tres mil millones de dólares y más de 600 muertes en toda el área, Este Método es una propuesta para predecir estas pérdidas a través de uso de Interferometría Diferencial -DINSAR-, combinada con el análisis de lineamientos geológico-estructurales para la determinación de deformaciones del relieve (Cando & Martínez-Graña, 2018), más los resultados de investigaciones geofísicas-geotécnicas que ayudaron a ubicar espacialmente las zonas de peligro ante terremotos como el ocurrido en la costa ecuatoriana que entre otras zonas, destruyó la zona comercial más importante de la ciudad de Manta.

El análisis de interferometría diferencial -DINSAR-, de lineamientos geológicos-estructurales para determinar la deformación del terreno, con el soporte de los métodos geofísicos-geotécnicos siguieron lo indicado en el flujo de procesos de la Figura 49.

El contexto sismotectónico y geológico general de la zona, para definir el estado de estabilidad geológica antes de la ocurrencia del sismo de 7.8 Mw, es el siguiente: Ecuador se encuentra en un margen activo de subducción donde la placa de Nazca choca y se seduce en los segmentos continentales de la placa de América del Sur y el Bloque Andino del Norte, a una velocidad de 6-7 cm por año (Chunga et al., 2018). En este margen activo, se pueden identificar dos fuentes sísmicas: (1) de subducción, en donde se pueden generar terremotos superiores o iguales a 8 Mw y (2) de falla cortical con generación de sismos en el interior del continente con magnitudes de 6 a 7 Mw e intensidades macrosísmicas de VIII a X. El análisis sísmico realizado por el Instituto Geofísico Nacional, de la Escuela Politécnica de Quito, obtuvo 8923 sismos tectónicos independientes, de magnitud mínima homogénea de 4.5 Mw y un máximo de 8.8

Mw. La mayoría de estos sismos, con unas magnitudes mayores a 5 Mw, han tenido su epicentro a lo largo de la zona de subducción.

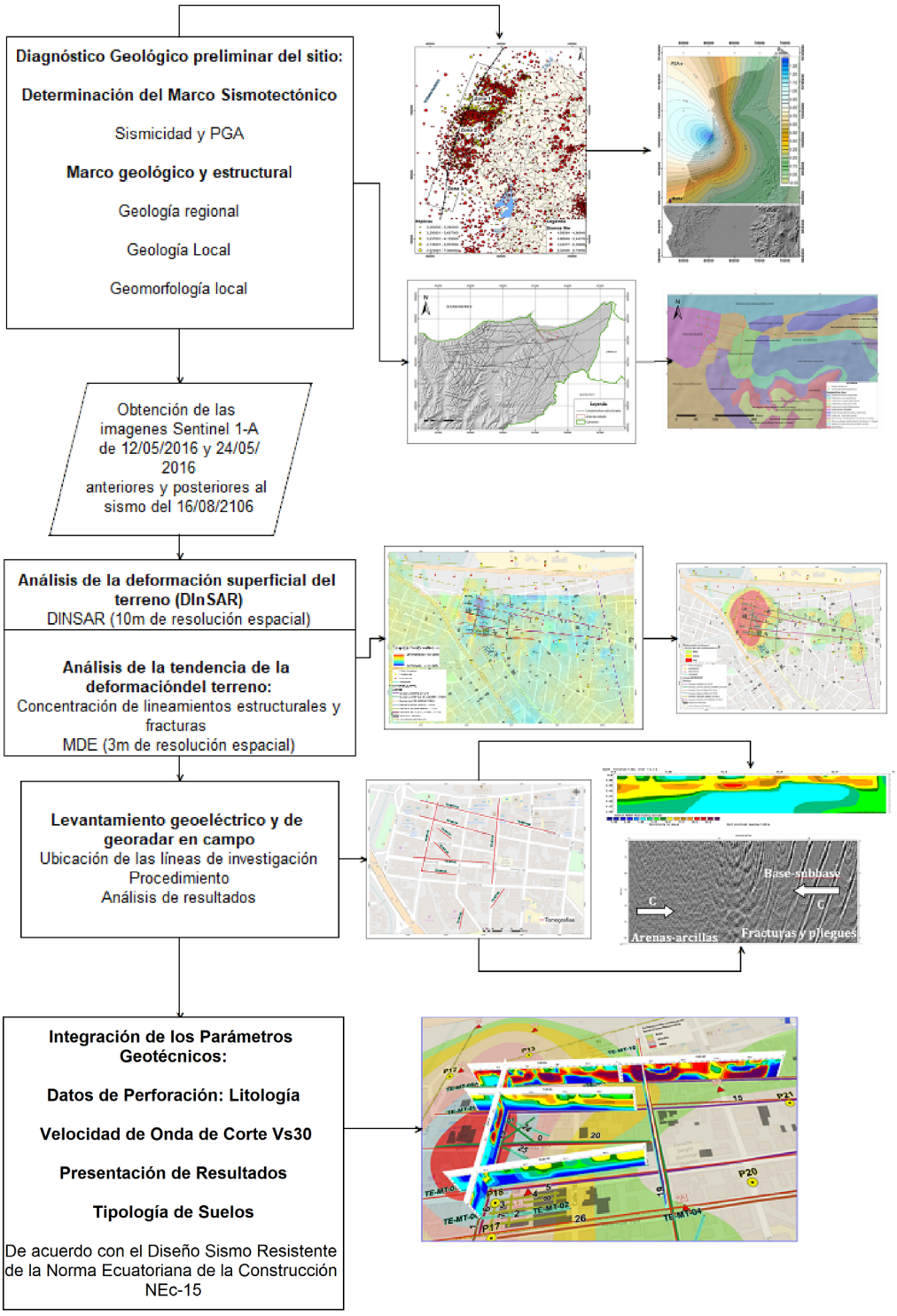


Figura 49. Flujo general de procesos para el análisis combinado del peligro sísmico en la Zona Cero de la ciudad de Manta.

En función de estas fuentes sísmicas, el Instituto Geofísico Nacional, ha delimitado el margen costero, a lo largo la trinchera tectónica ecuatoriana, en tres estructuras sismogénicas zonas: estructura Sur (Zona 3) corresponde a la Golfo de Guayaquil y el segmento continental de Santa Elena, Guayas y El Oro. La estructura central (Zona 2) que es el segmento central de la zona de subducción, en la provincia de Manabí, activada con el sismo del 16 de abril de 2016 (Mw 7.8); y la estructura norte (Zona 1) corresponde a la zona costera de la provincia de Esmeraldas (Chunga et al., 2018) (Fig. 50).

La instrumentación de la sismicidad del año 2016, determinó una mayor concentración de lineamientos sísmicos en la Zona 2, debido a la falla de empuje en la frontera de las placas tectónicas Nazca-Sudamericana, lo que ha causado erosión en la placa de América del Sur y un complejo comportamiento sismógénico que ha generado terremotos importantes y deformaciones superficiales del relieve, como lo sucedido el 16 de abril de 2016.

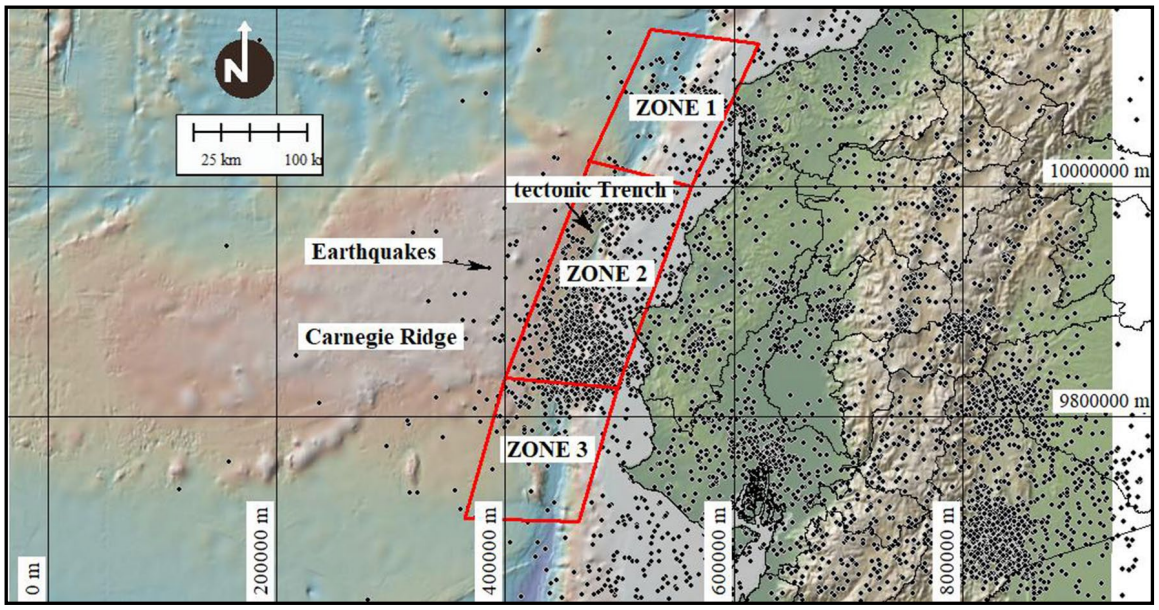


Figura 50. Zonas sismogenéticas de Ecuador a lo largo de la trinchera tectónica. (3) Zona Sur, Golfo de Guayaquil y el segmento continental de Santa Elena, Guayas y El Oro. (2) Zona central activada el 16 de abril, 2016 (MW 7.8). (1) Zona Norte, provincia de Esmeraldas.

Existe una mayor concentración de terremotos en la Zona 2, en la zona de subducción, debido a la falla de empuje en el borde de Nazca y Sudamericana, resultando en un complejo comportamiento sismógeno que posiblemente esté generando grandes terremotos como el del 16 de abril de 2016. En el informe sísmico especial No. 13 del 17 de abril de 2016, el Instituto Geofísico Nacional-IGN, menciona que en la Zona 2, existen niveles muy altos de acoplamiento interseísmico (ISC) y en donde estos segmentos sísmicos, fueron considerados en procesos de acumulación creciente de energía, con mayor probabilidad de ocurrencia de terremotos (Instituto Geofísico Nacional, 2016b). La zona en donde ocurrió el terremoto del 16 de abril de 2016 y sus respectivas réplicas, coinciden con el terremoto de 1942 y con el borde norte de la zona de réplica del terremoto de Bahía de Caráquez en 1998.

Históricamente, los procesos de subducción han originado los terremotos ocurridos el 31 de enero de 1906 (MW 8.8), que es el más grande registrado en Ecuador y el sexto más grande a escala global; el del 14 de mayo de 1942 (MW 7.8); y los del 19 de enero de 1958 (MW 7.8) y 12 de diciembre de 1979 (MW 8.1). Las fallas geológicas corticales más cercanas a la ciudad de Manta son la falla Barbasquillo-NE, ubicada en el noreste, a 4 km de distancia desde la Zona Cero, estimándose una magnitud máxima de 6.3 Mw y un valor de PGA de 0.33 g, y la falla El Aromo-Segmento Norte, localizada entre 2 y 3 km desde la Zona Cero. Fallas que posiblemente pueden generar terremotos de aproximadamente 6,8 MW y un PGA de 0.30 g.

Sismicidad y PGA: la distribución de la deformación geológica regional Jama-Pedernales, de acuerdo con el PGA (m/s^2), tiene en la ciudad de Manta altos niveles de sismicidad con un factor de aceleración del suelo de 0.35–0.55 g. Estos valores se encuentran relacionados con la sismicidad del Segmento Central (Zona 2). La población situada a 55 km de esta deformación, es muy susceptible a ser afectada por sismos generados en esta deformación activa (Fig. 51A).

En la Zona Cero, estas estructuras sismogénicas fueron posiblemente las responsables del terremoto del 16 de abril de 2016 y las siguientes réplicas, debido al proceso de subducción y al desplazamiento de la Cordillera de Carnegie bajo la zona continental en la Zona Central 2, frente a la costa de la provincia de Manabí (Gutscher et al., 1999). Como consecuencia, estos terremotos destruyeron la infraestructura ingenieril con pérdida de vidas humanas. Los suelos arcillosos y arenosos, fueron sometidos a procesos de licuefacción, en donde existen niveles de agua con muy poca profundidad de alrededor de 2 m, suelos que se fracturaron por desplazamiento, posiblemente por compresión y dilatación de los mismos (Fig. 51B).

Geología regional y estructural: a nivel regional, el municipio de Manta se ubica en una zona de deformación tectónica de los sistemas de fallas de Barbasquillo y El Aromo. Las fallas de desplazamiento se dirigen en direcciones NE – SW y E – O y atraviesan la Cordillera de la Costa, con la presencia de fallas menores que aparecen en la zona de San Lorenzo, San Mateo, Manta hasta Jaramijó. Esta deformación tectónica está en el margen occidental del Océano Pacífico ecuatoriano, entre las fronteras de Colombia y Perú, muy cerca de la trinchera ecuatoriana, directamente en frente de la Cordillera oceánica Carnegie Mountain, que tiene una altura de 2 km, y fue creada a partir del mismo punto de caliente que originó las Islas Galápagos (Norton, 2010).

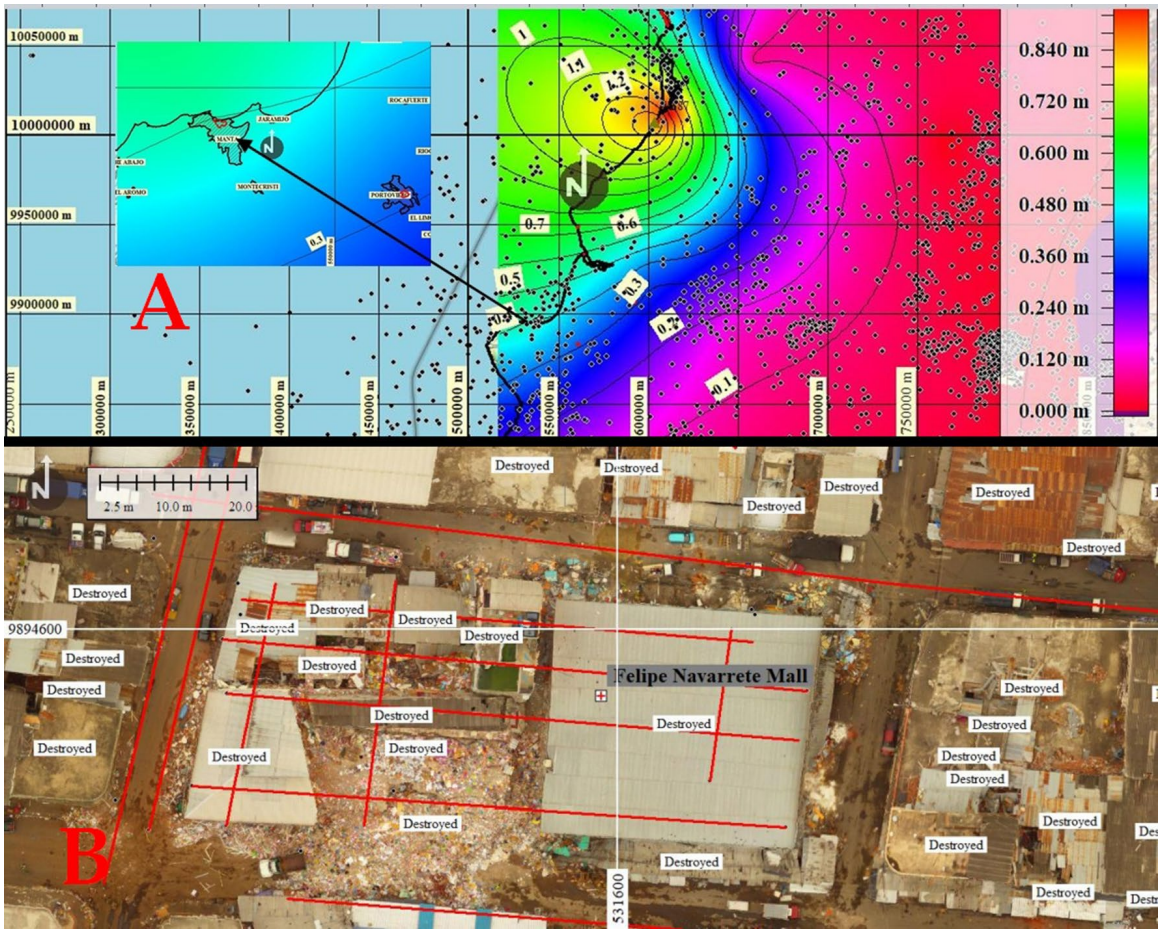


Figura 51. En (A) se observa el mapa regional de isosista de PGA, desde la deformación regional Jama-Pedernales y su distribución, según a los datos obtenidos de acelerogramas del IG-EPN, con visualización de valores máximos de amplitud (m / s²) y en el detalle, la distribución de la PGA (m / s²), en la ciudad de Manta con altos niveles de sismicidad y valores de aceleración del suelo entre 0,35 y 0,55 g. Valores relacionados a la sismicidad del segmento sismogénico central (Zona 2). En (B) La deformación de los suelos arcillosos, limosos y arenosos en los que casas y calles se han deformado y derrumbado en la Zona Cero de la ciudad.

La región costera, se encuentra en la pared interna de la Fosa Oceánica Ecuatoriana, que es el principal rasgo morfológico oceánico en la zona de subducción en Ecuador. Este es un doble Sistema Arc-Trench de alta complejidad que representa el límite entre dos placas corticales que se mueven en direcciones opuestas. En este caso, la placa oceánica de Nazca se está moviendo hacia el Este, mientras que la placa continental Sudamericana se mueve hacia el Oeste. El resultado de esta confrontación y la superficie de deformación de las fallas de Barbasquillo y El Aromo puede evidenciarse en la Figura 52A. En el área de estudio, existen lineamientos geológico-estructurales que controlan los patrones de drenaje en el margen costero y tienen relación con los sistemas de fallas regionales de gran influencia en las deformaciones del relieve, así como de la deformación de las estructuras ingenieriles civiles que se asientan en ellas. Los lineamientos geológico-estructurales fueron obtenidos en base al Metodo 1 desarrollado en esta Tesis.

Estos lineamientos geológico-estructurales en la Zona Cero de la ciudad, están directamente relacionados con el sistema de fallas geológicas regionales Barbasquillo-NE y su desplazamiento principalmente en las direcciones E – W, NO – SE y NE – SW (Fig. 52B).

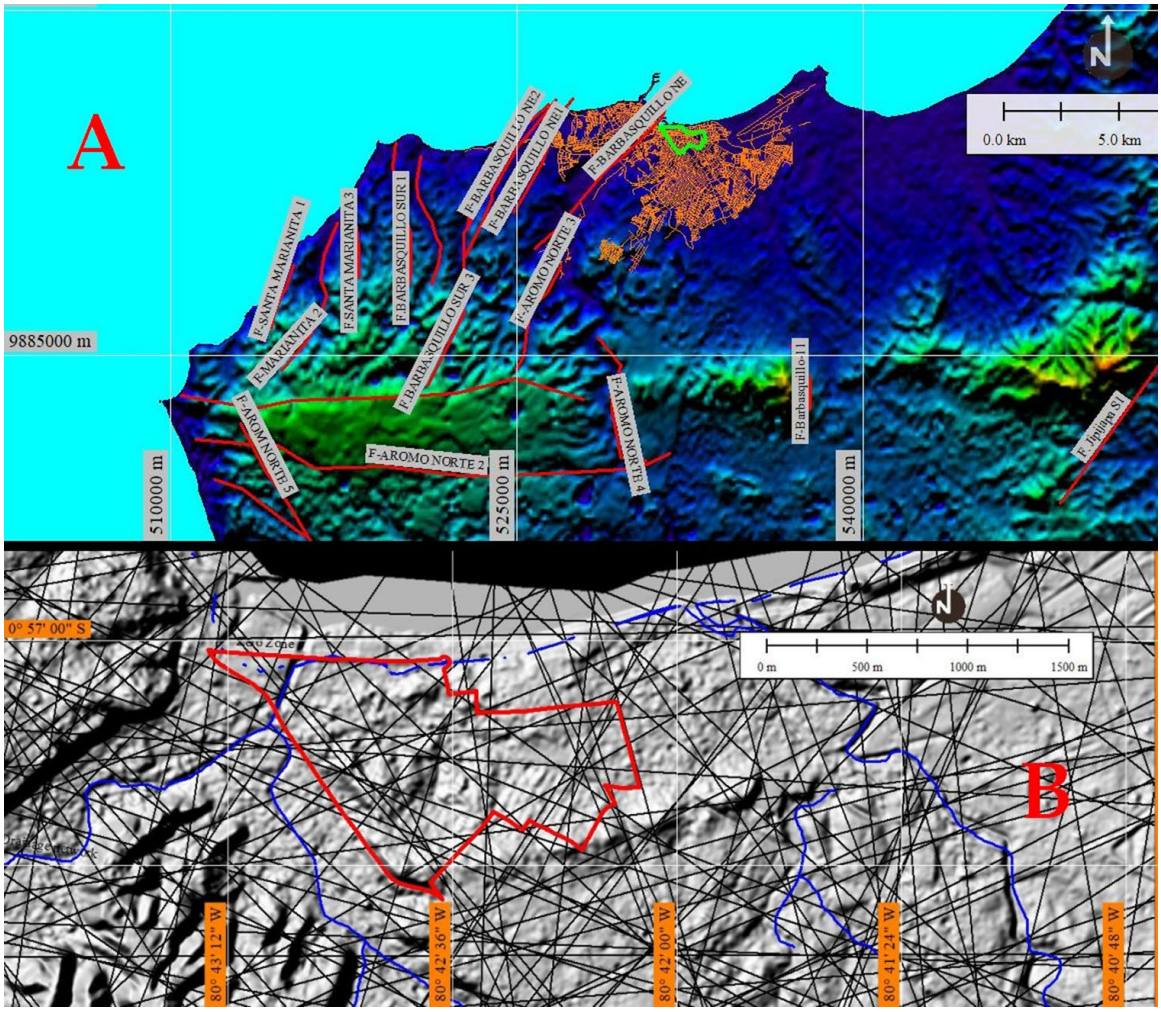


Figura 52. En (A) Sistema de fallas regionales El Barbasquillo-El Aromo, generadoras de terremotos mayores a 7.0Mw y deformaciones intensas de la del relieve topográfico, como sucedió el 16 de abril de 2016. En (B) Concentración de lineamientos geológico estructurales en la Zona Cero de la ciudad y áreas cercanas.

Litología y geomorfología locales: los resultados de la investigación geotécnica en la zona, realizada por Geosuelos S.A. (Vera, 2016) y de los estudios de geofísica obtenidos de la Secretaría de Gestión de Riesgos en el 2016, luego del terremoto (tomografías eléctricas y radargramas), confirmaron que la litología en el municipio de Manta está formado por depósitos sedimentarios cuaternarios, entre modernos aluviones de la Formación Canoa y depósitos de la Formación Tablazo (Fig. 53A).

Los materiales litológicos de la Formación Canoa (PC), son arenas limosas con presencia de arcillas, arenas finas amarillas, arenas ligeramente compactas de grano medianos a gruesos de color gris. Los aluviones modernos (Qt) de material detrítico son transportados y depositado como arena, grava, arcilla y limo. La Formación Tablazo (Qt), que son áreas en proceso de elevación, se compone de tres facies: el Tablazo Alto, atribuido al Pleistoceno inferior, contiene lumaquelas y arenisca calcáreas, depositadas en playas abiertas; el Tablazo Medio que contiene fósiles que sugieren facies salobres y El Tablazo Bajo que corresponde a un mar abierto del Pleistoceno Superior.

La península de Manta se presenta como una estructura con orientación este-oeste, desde el cabo de San Lorenzo al cerro de Montecristi. La cúpula o las geoformas más altas se extienden desde El Aromo, con una altura de 365 m, a Montecristi con 600 m. En la zona cero existen diferentes facies sedimentarias, como arenas de playa recientes, barreras de arena costera, marga arenosa en planicies de marea y facies franco arenosa en suelos de origen coluvial.

Las unidades regionales del paisaje litoral que dominar este sector corresponde a relieves montañosos bajos con facies erosionadas sobre limolitas, arcillas y arenas; superficies de mesas circundantes y frentes de mesa abruptos sobre areniscas, conglomerados, lumaquelas y arenas; relieves de colinas altas a muy altas sobre rocas volcánicas y sedimentos volcánico antiguos; depósitos sedimentarios cuaternarios, entre estos, modernos aluviones de la Formación Canoa y depósitos de la Formación Tablazo (Winckel, 1997). Los suelos de la región son principalmente arcillosos.

Las formas del relieve presentes en el municipio de Manta, tienen su origen en el proceso tectónico-erosivo que se ven representadas en relieves montañosos bajos, medios y altos; relieves estructurales en superficies de chevron; denudativo como coluviones antiguos y recientes, coluviones-aluviales, terrazas medias y bajas y causas de ríos, valles y acantilados fluviales) y deposicionales (tablas marinas, cañones, coluvios antiguos y recientes, llanuras costeras, litorales y playas). La geomorfología de la Zona Cero presenta costera y fluvio-marina Relieves sedimentarios de génesis deposicional, con geomorfología unidades bien marcadas como mesas marinas en amplias terrazas compuestas por arenas muy finas, grava, limo y arcillas, en pendientes muy bajas (Fig. 53B).

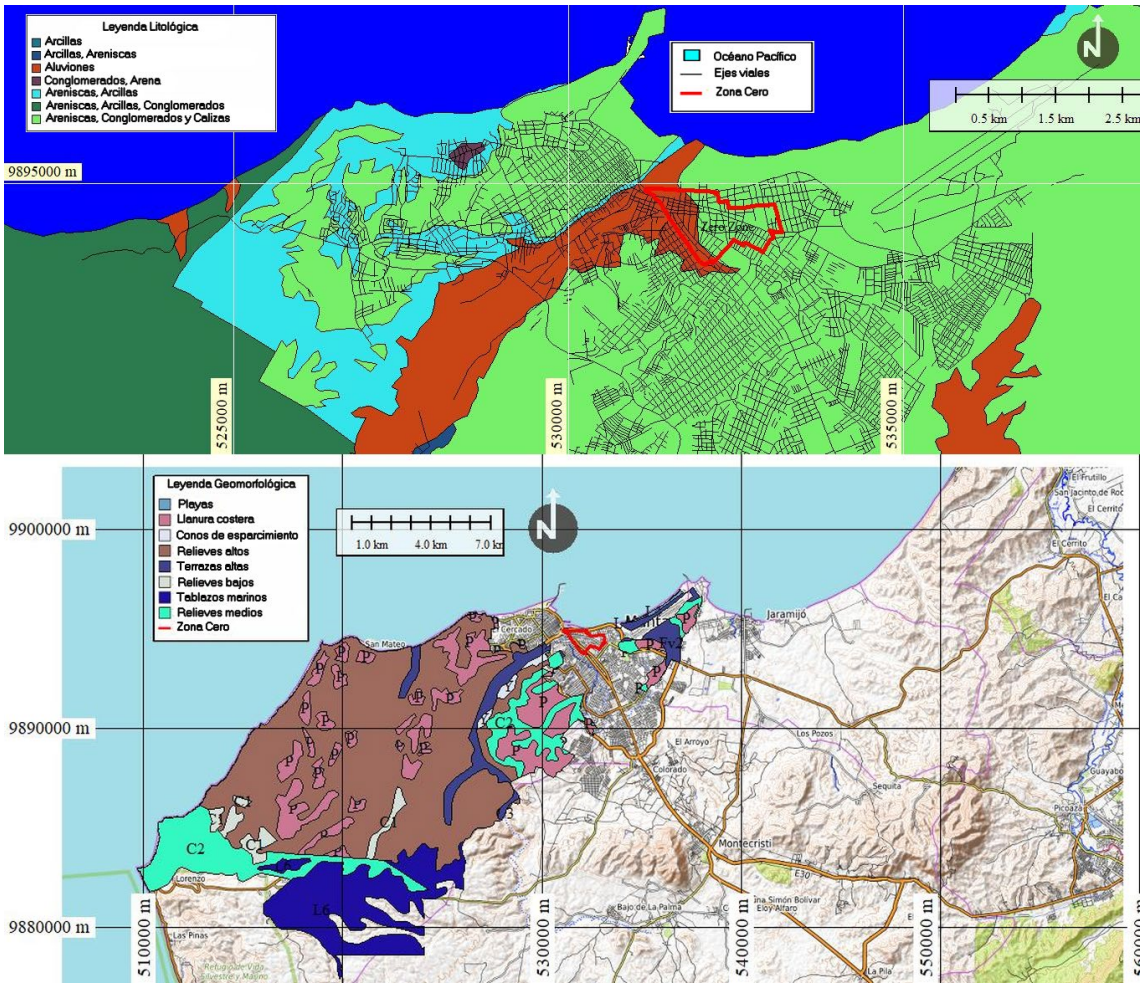


Figura 53. En la imagen superior se observa la litología local en la Zona Cero de Tarqui, conformada por depósitos sedimentarios cuaternarios. En la imagen inferior se muestra la zonificación geomorfologica de la Zona Cero de relieves marinos sedimentarios y fluviales costeros de génesis deposicional.

Teniendo en cuenta el marco sismotectónico y geológico general de la zona, para definir el estado de estabilidad geológica antes de la ocurrencia del sismo de 7.8 Mw, se presentan los procedimientos para el análisis combinado del peligro sísmico en la Zona Cero de la ciudad de Manta, procedimientos definidos en el flujo indicado en la Figura 54.

Procedimiento 1: Adquisición de imágenes Sentinel 1 y Análisis de deformaciones del relieve con DINSAR y el procesador SarScape de Envi.

La Figura 54A, se refiere a la adquisición de las imágenes: se obtuvieron seis imágenes de nivel Single Look Complex -SLC- que consisten en datos SAR georeferenciados, utilizando datos de órbita y altitud del satélite. Son imágenes de radar de banda C en órbita polar, que se pueden adquirir sin que las condiciones climáticas afecten la adqusición, de día y de noche, por que el sensor emite su propia onda electromagnética. Estas imágenes pertenecen al Programa Copérnico financiado por la Unión Europea, llevada a cabo por la ESA, y que consiste en una constelación de dos satélites ERS-1, ERS-2.

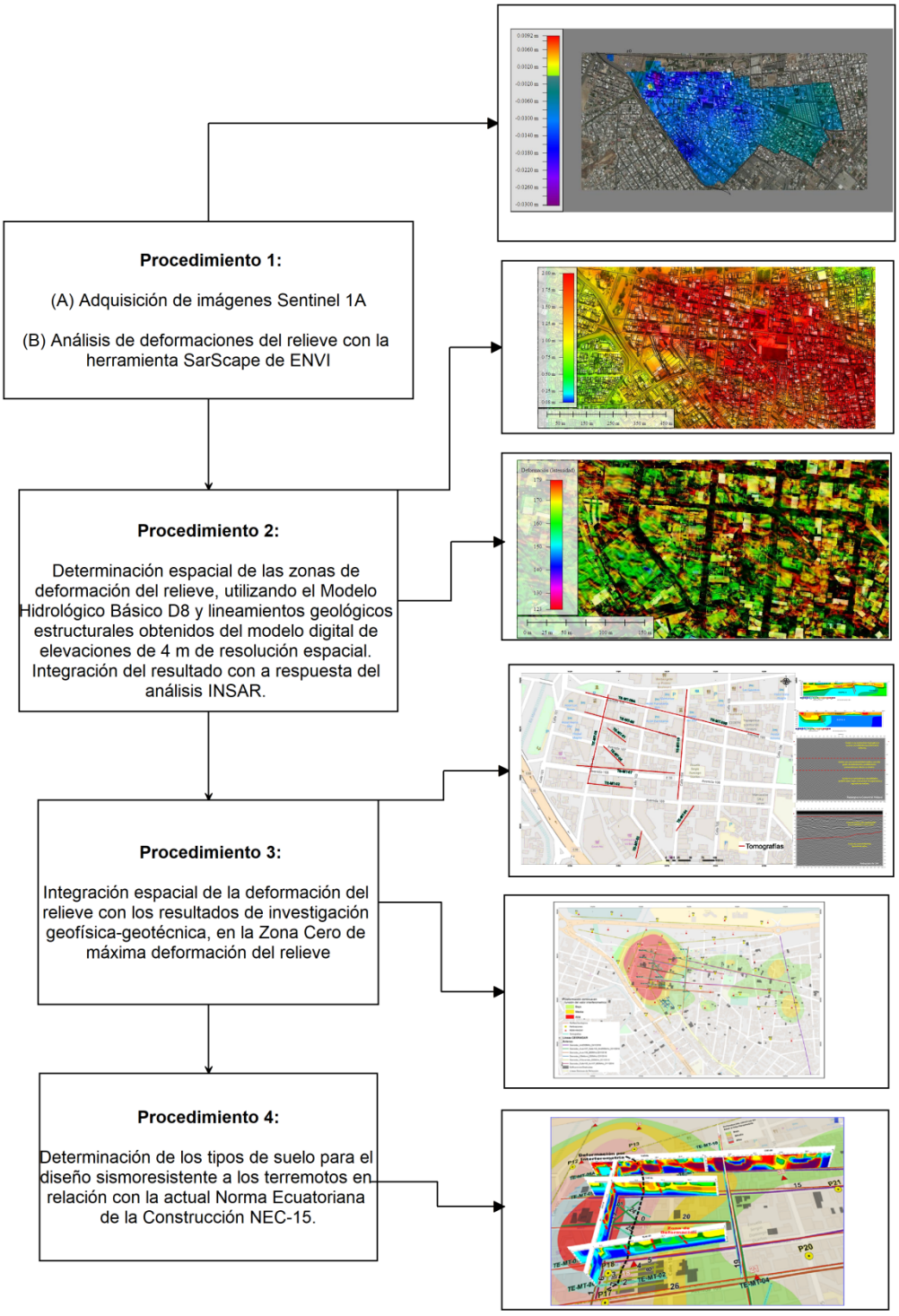


Figura 54. Flujo de los procesos aplicados en el análisis del peligro sísmico en base de la combinación de la tecnología DINSAR, la deformación del terrenon e información geofísica-geotecnia de campo.

Aunque un resumen de los conceptos de la tecnología DINSAR se presentó en la metodología anterior, se debe mencionar algunos conceptos para enfatizar que la técnica de Interferometría Diferencial DINSAR, es una técnica que utiliza un mínimo de dos imágenes de radar de apertura sintética -SAR- de una misma zona, tomadas en un intervalo de tiempo determinado, para obtener

los desplazamientos verticales del relieve en una nueva imagen denominada Interferograma. El sistema de Radar de Apertura Sintética SAR, se fundamenta en el efecto doopler y es utilizado por los satélites europeos ERS-1, ERS-2, ENVISAT y J-ERS-1, entre otros. Imágenes base para obtener el interferograma:

S1A_IW_SLC__1SSV_20160412T110033_20160412T110101_010787_0101F2_F95A

S1A_IW0_SLC__1SSV_20160412T110059_20160412T110126_010787_0101F2_7766

S1A_IW_SLC__1SSV_20160412T110006_20160412T110035_010787_0101F2_85F7

S1A_IW_SLC__1SSV_20160424T110001_20160424T110028_010962_010747_477F

S1A_IW_SLC__1SSV_20160424T110026_20160424T110054_010962_010747_6FC9

S1A_IW_SLC__1SSV_20160424T110052_20160424T110119_010962_010747_BA40

Análisis de deformaciones del relieve con la herramienta SarScape de ENVI: para este análisis, se realizó el corregistro de las imágenes para la generación del Interferograma que corregistra las imágenes empleadas a nivel de sub-pixel.

A las imágenes subidas a ENVI que se encuentran en Single Look Complex -SLC-, se aplicó un primer corregistro, llamado proceso Multilooking para reducir el ruido (o "moteado") en las imágenes SAR, al promediar los píxeles adyacentes. El efecto general de este proceso es reducir la desviación estándar del nivel del ruido y forzar una distribución más gaussiana del ruido en las imágenes. A continuación, se realiza el proceso Filtering, que es un segundo corregistro espectral de las imágenes, para lo que se escogen los pixeles de una imagen definida como Máster y las restantes que se denominan Esclavas, que están superpuestas, y tienen un espectro de frecuencia de respuesta retro dispersada, proveniente de diversos dispersores del relieve y de la geometría propia de los sensores en el momento de la adquisición de las imágenes. Este proceso necesitó de un doble filtrado especifico, de acuerdo con las direcciones en rango y en acimut según (Torlai & Saverio, 2010).

Posteriormente a realizar el proceso Filtering, se realizó una estimación de la Línea Base, en relación a la línea perpendicular mínima entre los satélites, estimación que permitió obtener información acerca de los valores de referencia y otros parámetros relacionados con los pares interferométricos a partir de la imagen Máster y las Esclavas, parámetros de medidas aproximadas destinadas a mejorar la toma de datos, la calidad de las imágenes y la respuesta interferométrica.

Finalmente se realizó el proceso de generación del Interferograma en donde a partir de los pares Máster-Esclava, se calculó la diferencia entre un punto en la Tierra y la posición del sensor en las dos adquisiciones, diferencia que puede ser medida por la diferencia de fase φ, corregistrado. El proceso se realiza multiplicando la imagen Máster por la conjugada compleja de la imagen esclava, lo que permite que la construcción del interferograma, en función de la fase de la señal, sea procesada en alta resolución.

Una vez obtenido el Interferograma, en donde se tiene para cada píxel el valor absoluto de la amplitud y el valor de la diferencia de fase, que corresponderá a la diferencia de la fase entre dos píxeles homólogos, este valor de diferencia sirvió para calcular el desplazamiento de fase causados por las señales reflejadas del objeto y el retraso de la propagación de la señal resultante del ruido atmosférico o la ionosfera. Generalmente el valor de la diferencia de fase siempre está asociado con un grado de incertidumbre, inherente al propio procesamiento de los datos de las imágenes y a la topografía de la superficie, que influyen en la estimación de los valores de altura (Piedra, 2012).

El producto final es una imagen del desplazamiento vertical del relieve después del terremoto que se puede ver en la Figura 55A.

Procedimiento 2: Determinación espacial de las zonas de deformación del relieve, utilizando el Modelo Hidrológico Básico D8 y concentración de lineamientos geológico estructurales obtenidos del Modelo de Elevación Digital de 4 m de resolución espacial. Integración del resultado con la respuesta del análisis DINSAR.

El análisis de las zonas de deformación del relieve, en función de la concentración de los lineamientos geológico estructurales, fue obtenido de la aplicación del Modelo Hidrológico Básico D8, definido en el primer método de esta Tesis (Cando & Martínez-Graña, 2018) (Fig. 55B), y es un apoyo para definir las relaciones entre los desplazamientos obtenidos del método DINSAR, con las fracturas superficiales del relieve por concentración de lineamientos geológico estructurales, extraídas del Modelo de Elevación Digital de 4 m de resolución espacial. La combinación de estos dos productos, es finalmente un producto cartográfico de desplazamiento máximo total local que sirvió para determinar el peligro de las construcciones civiles asentadas sobre estas deformaciones.

Procedimiento 3: Integración espacial de la deformación del relieve con los resultados de investigación geofísica-geotécnica, en la Zona Cero de máxima deformación del relieve.

El levantamiento de tomografías geoeléctricas y de georadar en campo, se realizó en la zona de deformación máxima obtenida de los procedimientos anteriores, en un área que incluyó a la zona del ex Centro Comercial Felipe Navarrete, Banco del Pichincha y del Mercado Central de la ciudad.

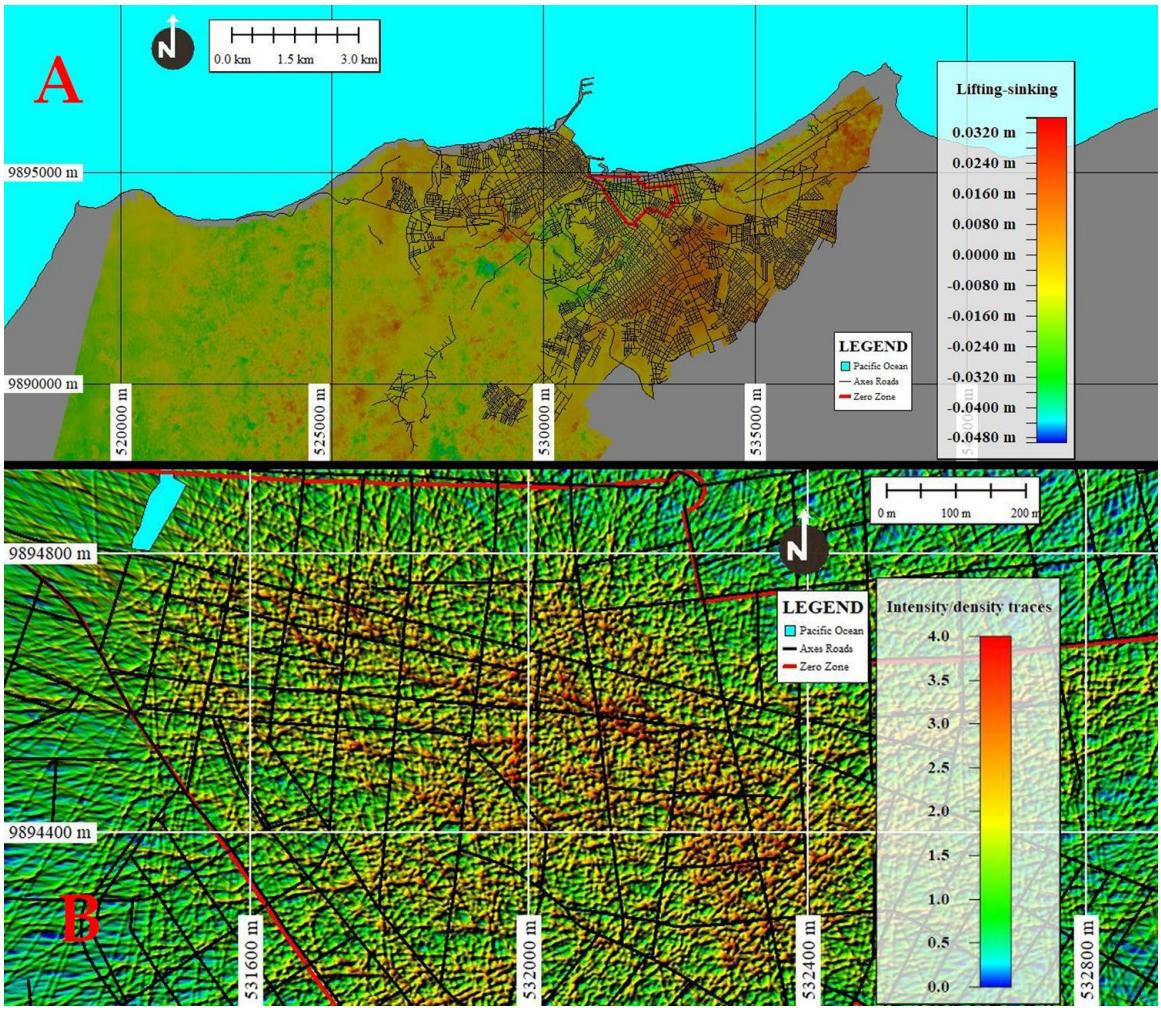


Figura 55. En (A) Las deformaciones de el terreno (subsidencia y levantamiento), se obtenidas del análisis DINSAR con deformaciones en un rango entre 4 cm a 8 cm de subsidencia regional. En (B) La Zona Cero con deformación máxima local del relieve, obtenida de la concentración de estructural, flujos de acumulación, lineamientos geológicos estructurales y fracturas superficiales, extraídos del Modelo de Elevación Digital de 4 m de resolución espacial.

Esta zona fue la base para delimitar la red de líneas de geofísica de tomografía eléctrica y de georadar para la investigación del subsuelo. En la misma línea de tomografía eléctrica se aplicó el georadar para tener coherencia en las respuestas de resistividad y conductividad obtenidas de las tomografías y radargramas. Esta red sobre las máximas deformaciones del relieve, se puede ver en la Figura 56.

Tomografía Eléctrica del subsuelo: Para el estudio se realizaron diez líneas de tomografía eléctrica con un total de 1.5 km de longitud (Fig. 57). Esto permitió correlacionar los suelos de la Zona 0 en donde se presentó la mayor deformación tectónica del subsuelo con los registros de las velocidades de ondas cortantes Vs30, registros de perforaciones y valores de conductividad obtenidos de los radargramas.

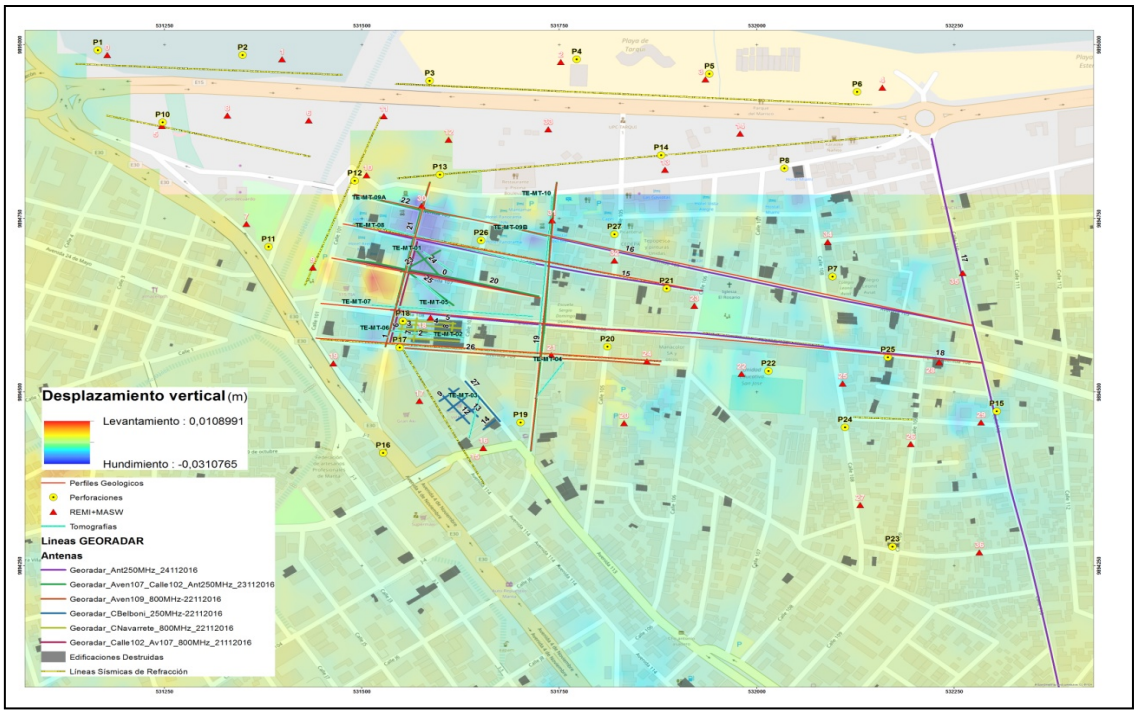


Figura 56. Mapa de desplazamiento vertical por deformaciones sísmicas del relieve y red de investigación geofísica. Zona Cero, Manta (SGR, 2016).

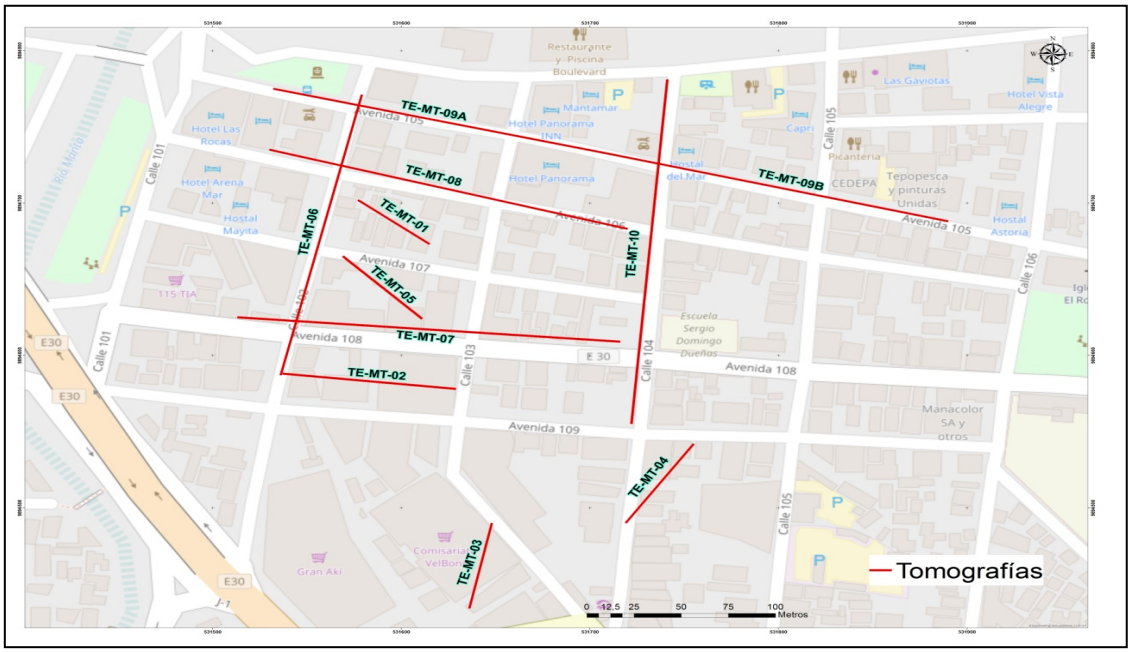


Figura 57. Ubicación de líneas geofísicas de tomografía eléctrica para la investigación del subsuelo

En este estudio, de acuerdo con el entorno sedimentario costero de la zona, el dispositivo Gradient Schlumberger se usó con un espacio de electrodos de 1 a 5 m, con longitudes de 40 a 200 my profundidades de 7 a 37 m. Se levantaron diez líneas de tomografía eléctrica en las áreas de máxima deformación del terreno, principalmente en el Centro Comercial Navarrete y áreas cercanas. La Tabla 5 se muestra los parámetros utilizados para la realización de las líneas geoeléctricas.

TOMOGRAFIAS ELECTRICAS REALIZADAS EN LA ZONA CERO - CIUDAD DE MANTA									
NOMBRE	COORDENADAS			RUMBO APROX. (AZIMUT)	REFERENCIA	PARAMETROS DE TENDIDO			
	Punto	X	Y			Configuración	Dist. Electrodos (m)	No. Electrodos	Longitud (m)
TE-MT-01	Inicial	531577	9894702	125° SE	Diagonal a cruce Avenida 106 y Calle 102	Gradiente/ Schlumberger	1,00	41	40
	Final	531615	9894673						
TE-MT-02	Inicial	531629	9894578	275° W	Paralela a Avenida 109 entre Calle 102 y Calle 103	Gradiente/ Schlumberger	2,50	37	90
	Final	531537	9894588						
TE-MT-03	Inicial	531648	9894490	190° S	Diagonal a Calle 103 con cruce de Av 113	Schlumberger	2,50	27	65
	Final	531636	9894434						
TE-MT-04	Inicial	531755	9894542	215° SW	Diagonal a cruce Avenida 109 y Calle 104	Schlumberger	1,00	56	55
	Final	531719	9894490						
TE-MT-05	Inicial	531611	9894624	315° NW	Diagonal a cruce Avenida 107 y Calle 102	Schlumberger	2,00	34	66
	Final	531569	9894665						
TE-MT-06	Inicial	531536	9894587	14° N	Calle 102 emtre Avenida 108 y Avenida 105	Schlumberger	5,00	41	200
	Final	531579	9894771						
TE-MT-07	Inicial	531513	9894625	95° E	Avenida 108 entre Calle 102 y Calle 104	Schlumberger	5,00	41	200
	Final	531716	9894609						
TE-MT-08	Inicial	531530	9894735	105° E	Avenida 106 entre Calle 102 y Calle 104	Schlumberger	5,00	41	200
	Final	531720	9894683						
TE-MT-09A	Inicial	531532	9894775	104° E	Avenida 105 entre Calle 102 y Calle 104	Schlumberger	5,00	41	200
	Final	531711	9894732						
TE-MT-09B	Inicial	531711	9894732	104° E	Avenida 105 entre Calle 104 y Calle 106	Schlumberger	5,00	41	200
	Final	531890	9894688						
TE-MT-10	Inicial	531741	9894781	185° S	Calle 104 entre Avenida 105 y Avenida 109	Schlumberger	5,00	41	200
	Final	531722	9894555						

Tabla 5. Parámetros utilizados para el levantamiento de las tomografías eléctricas.

Esta es una técnica geofísica no destructiva para el estudio del subsuelo, que consiste en introducir un voltaje de corriente eléctrica continua en la superficie del terreno a través de dos electrodos que se mide con otro par de electrodos.

A partir del valor obtenido de la corriente eléctrica inyectada y el voltaje recibido en respuesta de los materiales litológicos a través de los cuales cruza, se obtiene la "resistividad aparente" del subsuelo, que es la dificultad que encuentra la corriente eléctrica cuando cruza un material determinado. La resistividad eléctrica es una propiedad específica de cada material (no depende de sus características geométricas), se mide en ohm metros (Ω-m) y es inversa a la conductividad eléctrica (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2016a, Secretaría de Gestión de Riesgos, 2016b)

Cada tipo de material litológico, presenta un rango de resistividad "real" más o menos característico. Las cavidades vacías (llenas de aire) tienen una resistividad aparente que tiende al infinito. Los terrenos saturados con soluciones salinas son de mayor conductividad, por lo tanto, tienen baja resistividad. La mayoría de los componentes de rocas y suelos se consideran materiales de baja conductividad o con una alta resistividad, con excepción de algunos casos, como algunos minerales metálicos. La medición consiste en determinar la distribución de resistividad a partir de una serie de mediciones realizadas desde la superficie del terreno con electrodos que están "clavados" en dicha superficie.

Para el proceso de migración e inversión del campo para la medición de la resistividad aparente, se utilizó el método de diferencias finitas que es un método de interpretación confiable. Se utilizó la optimización local de los valores de resistividad con un filtro vertical para resaltar las capas sedimentarias y sus horizontes. La disminución de la amortiguación de la señal en profundidad y los rangos de resistividad para todas las secciones se estandarizaron (Fig. 58A).

Georadar: en la misma zona de máxima deformación, se aplicó la técnica Georadar (Ground Penetrating Radar-GPR), que es un método geofísico no destructivo utilizado para la exploración del subsuelo desde la superficie, a través de la emisión y recepción de ondas electromagnéticas, que varían en función de las propiedades electromagnéticas del material, así como algunos parámetros del entorno circundante. Las variaciones en las ondas electromagnéticas son captadas por un receptor y luego enviadas a una unidad de registro donde se procesan los datos para producir una imagen de alta resolución (Radargrama).

La profundidad de la investigación, así como la resolución, dependen del tipo de antena empleada que en este caso fueron antenas blindadas Mala Proex de 250 (con una profundidad de investigación de 30 m) y 800 MHz (profundidad de 2 m). Las antenas de mayor frecuencia obtienen un radargrama de mayor resolución, pero con menor profundidad de investigación.

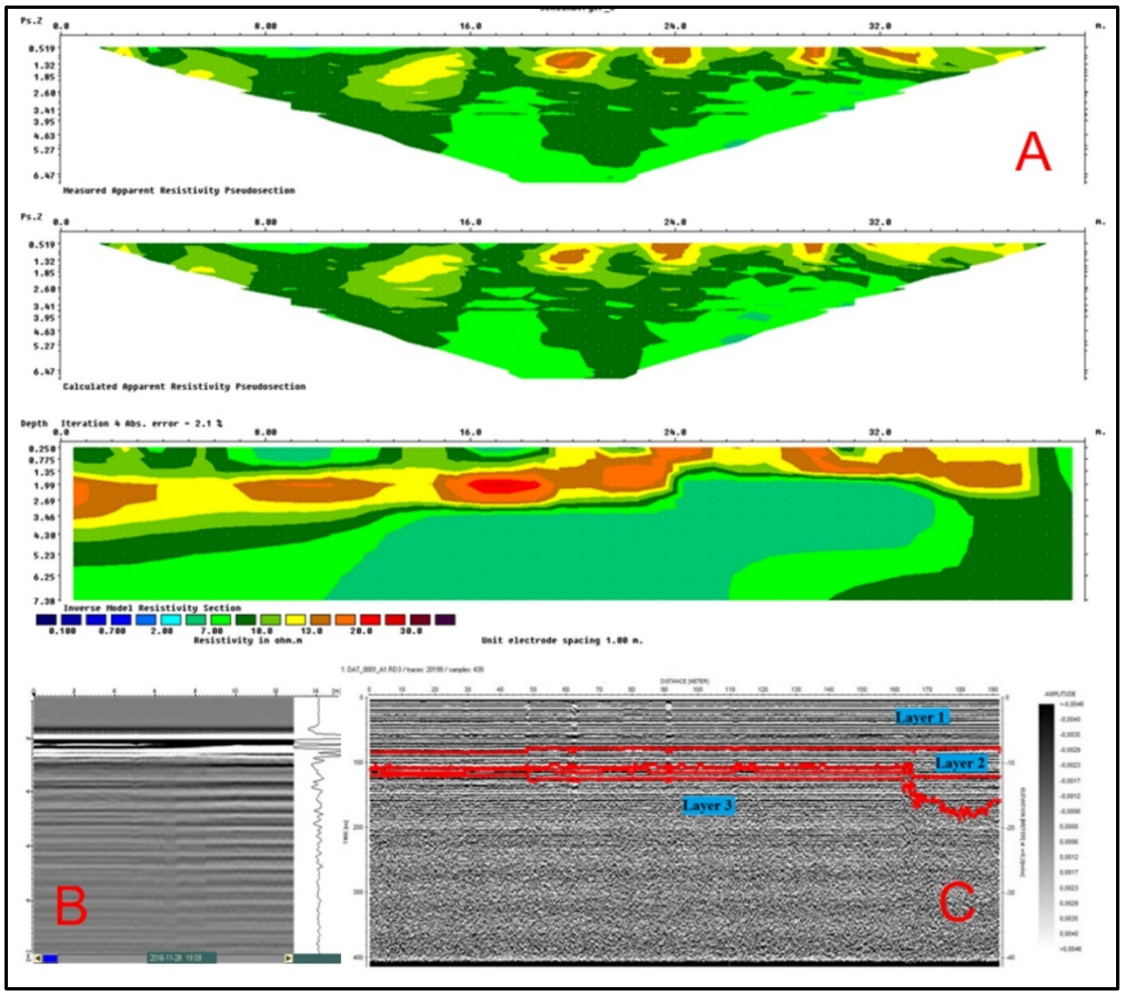


Figura 58. (A). La migración e inversión de la resistividad aparente medida en el campo, utilizando el método de Diferencias Finitas para la interpretación de las tomografías eléctricas. En (B), Radargrama final obtenido con el software Reflexw con los siguientes pasos: (B) Obtención de la imagen en bruto de las líneas de investigación y la aplicación de un filtro de banda de paso. (C) Eliminación del tiempo cero, eliminación de fondo y suavizado de ganancia lineal aplicódo.

La mayoría de las rocas y subsuelos en los que se realizaron el estudio pueden considerarse aislantes. En estos medios, la conductividad eléctrica existe debido a la presencia de flujo salino en poros y fisuras. Significa que cuanto mayor es el contenido de agua y sales disueltas y la porosidad del medio, mayor es su conductividad. La unidad de medida es Siemens/Centímetros (S/cm) y es lo opuesto a la resistividad. El procesamiento de los datos se realizó con el software Reflexw a partir de una imagen cruda (Fig. 58B). Posteriormente, se aplicó un filtro Pass Band para eliminar el ruido y resaltar las señales que pueden representar un objeto subterráneo (Fig. 58C). Se eliminó el tiempo cero para definir el inicio de referencia de la imagen eliminando el ruido ambiental, para la mejor definición de estratos; finalmente, se aplicó un filtro de ganancia lineal para mejorar la visualización de los objetos en el subsuelo.

Una vez obtenidas las tomografías y radargramas del subsuelo, dentro de las áreas de deformación continua máxima en la Zona Cero, la resistividad y la conductividad, se correlacionaron con los valores obtenidos de la información geotécnico-geofísica de Geosuelos S.A. y la respuesta de la deformación DINSAR-lineamientos geológicos estructurales. Con estas correlaciones espaciales se analizó la distribución de tipos de suelos existentes y su relación con el diseño sismoresistentes según la Norma NEC 11 de la construcción.

2.4. Metodología de Detección de deformaciones del terreno utilizando técnicas DINSAR en relación con hundimientos del terreno (Método 4).

Esta cuarta metodología relaciona la deformación del relieve con galerías de explotación minera subterránea en la zona urbana de la ciudad de Zaruma. El objetivo principal fue utilizar la metodología DINSAR para determinar las deformaciones y hundimientos del relieve topográfico en el período de 2016 a 2019, específicamente en el centro colonial de la ciudad de Zaruma.

Para estudiar la subsidencia del relieve del terreno, se han alcanzado objetivos específicos desde la obtención de la pila de imágenes Sentinel 1, la obtención de mapas de reflectividad, fase, coherencia y la elaboración de interferogramas y desplazamientos del relieve. Los resultados se verificaron con el reconocimiento de campo de los sitios que se han hundido debajo de los cuales se encuentran galerías subterráneas abandonadas y activas. La ciudad de Zaruma está ubicada en las estribaciones de la Cordillera Vizcaya de los Andes del Norte, al sur de Ecuador (Fig.59).

Figura 59. Ubicación del área de estudio en el sur del país, en la Cordillera de los Andes.

Entorno geológico y geomorfológico: el cantón Zaruma se desarrolla en las laderas externas de la Cordillera Occidental, presenta relieves diversificados en antiguos materiales volcánicos, con cobertura piroclástica parcial. La ciudad está ubicada sobre una serie de rocas de origen volcánico-sedimentarios andesíticos a porfiríticos, mineralizados con sulfuros metálicos deformados por intrusivos granodioríticos y tonalíticos (Vikentev et al., 2005). Los lineamientos estructurales, con direcciones NO – SE, se encuentran controlando el patrón de drenaje en el área de estudio. Sin embargo, las estructuras importantes, especialmente en la dirección E - W y N - S, controlan la mineralización y son responsables de los procesos de deformación geodinámica del relieve de toda la región.

Localmente, el área de estudio se encuentra dentro de la Unidad de Portovelo, expuesta en el trabajo de investigación de la hoja geológica Zaruma, escala 1: 100000, preparada por el Instituto Nacional de Investigación Geológica, Minería, Metalúrgica (Spencer et al., 2002). La mineralización en Zaruma se encuentra en volcanes intermedios a silíceos de la Unidad Portovelo, sobre rocas metamórficas del sur, a lo largo del sistema de fallas geológicas Piñas-Portovelo y se superpone discordantemente al Complejo Matamórfico El Oro. Esta unidad, en su mayor parte, está compuesta de lavas andesíticas de pórfido masivo a basaltos andesíticos y huecos con tobas intermedias. También hay tobas de tipo "Ash Flow" de riolítico a dacítico con intercalaciones de rocas sedimentarias (pizarras, pedernales). Los volcanes andesíticos presentan alteraciones propilíticas generalizadas a epidota, calcita y clorita. La principal característica geológica estructural de la región es el sistema de falla / empuje Piñas-Portovelo, dirección E-Sureste, que tiene un gran descenso en el bloque Norte y separa al grupo Saraguro del Complejo Metamórfico El Oro. Las rocas metamórficas del basamento, a lo largo de este sistema de fallas, han sido deformadas y brechadas cataclísmicamente.

La morfología del cantón Zaruma se caracteriza por presentar pendientes pronunciadas, crestas redondeadas y numerosas colinas que resultan del patrón dendrítico de los desagües secundarios. Las alturas son entre 1.150 y 2.800 msnm. Los principales desagües de la zona son el río Luís que se fusionan con el río Salatì y el río Ambocas y que terminan en el río Pindo. El río Calera y el río Amarillo también se encuentran dentro del área, que se une unos pocos kilómetros antes de su confluencia con el río Pindo que forma el río Puyango río abajo. Hay numerosas corrientes relativamente grandes. La geoforma predominante del área corresponde a pendientes heterogéneas, con pendientes medias a fuertes (> 25-40%), diferencias relativas entre 200 y 300 m, la densidad de drenaje es poco disectada, con largos de más de 500 m.

La explotación minera tiene un registro de la historia desde antes de la conquista de América. Según los datos de la Agencia de Control y Control Minero -ARCOM-, se extraen anualmente 288.000 toneladas de cuarzo con un promedio de 4 gramos de oro por tonelada, alcanzando una producción de 1.152 kilos de oro por año (Gad Zaruma, 2014).

Problemas de subsidencia del terreno: uno de los peligros para la ciudad causados por la minería subterránea está relacionado con las antiguas galerías abandonadas y piques llevadas a cabo por mineros ilegales, lo que está causando el hundimiento del relieve topográfico y el colapso de los edificios en el área de la ciudad de Uban. Recientemente, en los años 2016 y 2019, se produjeron subsidencias en algunas partes de la ciudad, como la ciudad hospitalaria, la calle Gonzalo Pizarro y la escuela Fe y Alegría-La Inmaculada, entre otros sectores, subsidencia que se detectó en varios estudios realizados en estudios previos. décadas (Cando, 2001; Cando, 2016).

El hundimiento es un fenómeno muy común en torno a las operaciones mineras de explotación subterránea. Estos hundimientos están causando dificultades en el desarrollo socioeconómico de la ciudad de Zaruma y han puesto en peligro directamente las viviendas, los edificios de los servicios básicos municipales, los centros educativos, las carreteras y los sistemas ambientales ininterrumpidos, incluida la posible pérdida de vidas humanas. Aquí nace la importancia de monitorear el hundimiento del relieve en el área colonial de la ciudad, monitoreo que fortalecerá las ordenanzas municipales apropiadas para la protección de la población, la ciudad y el medio ambiente. En particular, los esfuerzos de tensión causados por la flexión y la influencia de estas deformaciones han dañado los materiales de construcción haciéndolos frágiles.

Estas deformaciones y colapsos del relieve fueron investigados desde 1995 hasta 2001, en una primera etapa, donde las galerías mineras fueron inventariadas bajo el casco colonial de la ciudad, con cinta métrica, brújula y caracterización geológica. Tanto las deformaciones en relieve superficiales como subterráneas obtenidas del inventario se obtuvieron aplicando la metodología de patrones de flujo y la línea de rotura morfológica (Cando & Martínez-Graña, 2018).

Esta metodología utilizó el criterio del Modelo Hidrológico Básico D8 basado en dos Modelos Digitales de Elevación, uno superficial con una resolución espacial de 5 my el otro con el Modelo Digital de Elevaciones de la superficie equipotencial de las galerías mineras inventariadas en el eje de las mismas, con una resolución espacial de 5 m.

El análisis de las deformaciones de los dos relieves fue puntual, pues era casi imposible tener dos superficies equipotenciales de las galerías mineras antes de 1995. En ambas superficies, se aplicó el criterio del Modelo Hidrológico D8 para determinar y trazar las direcciones. del flujo de la escorrentía superficial de la precipitación y los flujos internos de agua, como generadores de deformaciones en relieve y movimientos de masa. Este mecanismo se utilizó una década antes de la aparición de la metodología DINSAR y sus variantes.

Un ejemplo del resultado de esta metodología aplicada en 2001 puede verse en la captura de las imágenes del informe de estabilidad geológica de la Dirección Nacional de Geología para 2001 (Fig. 60). En la Figura 60A, el autor de esta Tesis, mide el pilar de soporte de la roca de caja que soporta una de las galerías mineras, pilar que su diámetro se ha reducido a 30 cm, diferente de lo que dicen las regulaciones mineras que un pilar de soporte debe tener 4 m de diámetro. En la Figura 60B el modelo de deformación del relieve en la ciudad hospitalaria de Humberto Molina y la Escuela San Juan Bosco, para zona de subsidencia antropogénica (área con líneas negras inclinadas), causada por galerías mineras representadas por líneas de colores verde y cian. La aplicación de esta metodología en 2001 mostró que hubo alertas de pronósticos sobre lo que sucedió décadas después en 2016 y 2019.

En la Figura 60C se presenta un perfil topográfico WE, desde la calle Sucre hasta la calle Miraflores, perfil obtenido de las mediciones de las galerías con cinta métrica y brújula desde la superficie hasta las bases de las galerías inventariadas en ese momento (los puntos amarillos representan las bocaminas de las galerías). Este perfil topográfico fue parte del estudio de las galerías mineras en el área colonial de la ciudad, dentro de un estudio de estabilidad geológica preparado por un equipo de geólogos de la Dirección Nacional de Geología del que el autor de esta Tesis fue parte integrante (Cando, 2001). Este fue el primer estudio de análisis de deformación de la superficie de la tierra en relación con las superficies topográficas y del subsuelo, y sirvió para correlacionar subsidencias que tienen una conexión desde la superficie al subsuelo. En la Figura 60D se observa la tomografía eléctrica del subsuelo. Fue el primer trabajo realizado en Ecuador para correlacionar este tipo de deformación. Antes de este trabajo, no había estudios para analizar este tipo de subsidencia minera.

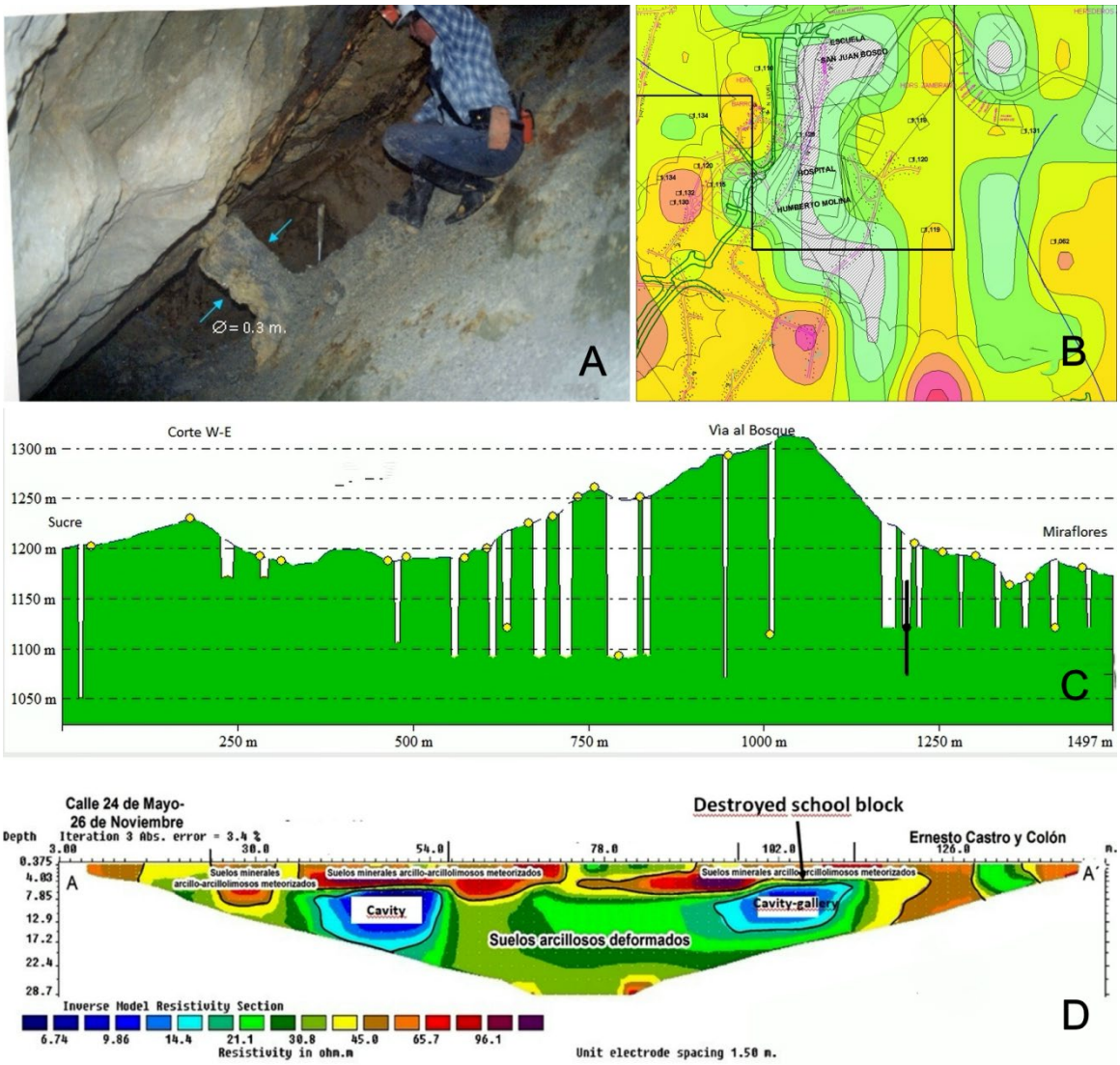


Figura 60. Captura de imágenes de la Dirección Nacional de Geología-DINAGE 2001 y tomografía eléctrica del subsuelo de la Secretaría de Gestión de Riesgos-SGR 2016, informes internos. (A) Pilares explotados y destruidos, sin resistencia a la carga de la roca superior y el suelo que en el sector alcanza más de 50 metros de espesor. (B) Hundimiento que data de 2001 utilizando la técnica del patrón de flujo y las líneas de ruptura morfológica. (C) Perfil topográfico E-O y subsidencia causada por galerías mineras en proyección subterránea en la parte superior de las galerías. (D) tomografía eléctrica del subsuelo.

En la Figura 61, se presenta la deformación en la Escuela Fe y Alegria-La Inmaculada obtenida con el método indicado en el 2001. En la Figura 61A se muestra la ubicación de la escuela y en la Figura 61B el bloque de aulas colapsado. Las líneas de color rojo representan el área de hundimiento y la galería minera subtarránea activa bajo la escuela. Como se verá más adelante, este resultado coincide con los resultados obtenidos de la tomografía eléctrica del subsuelo y con las investigaciones de subsidencia llevadas a cabo por INIGEMM en 2017 (Campoverde, 2017).

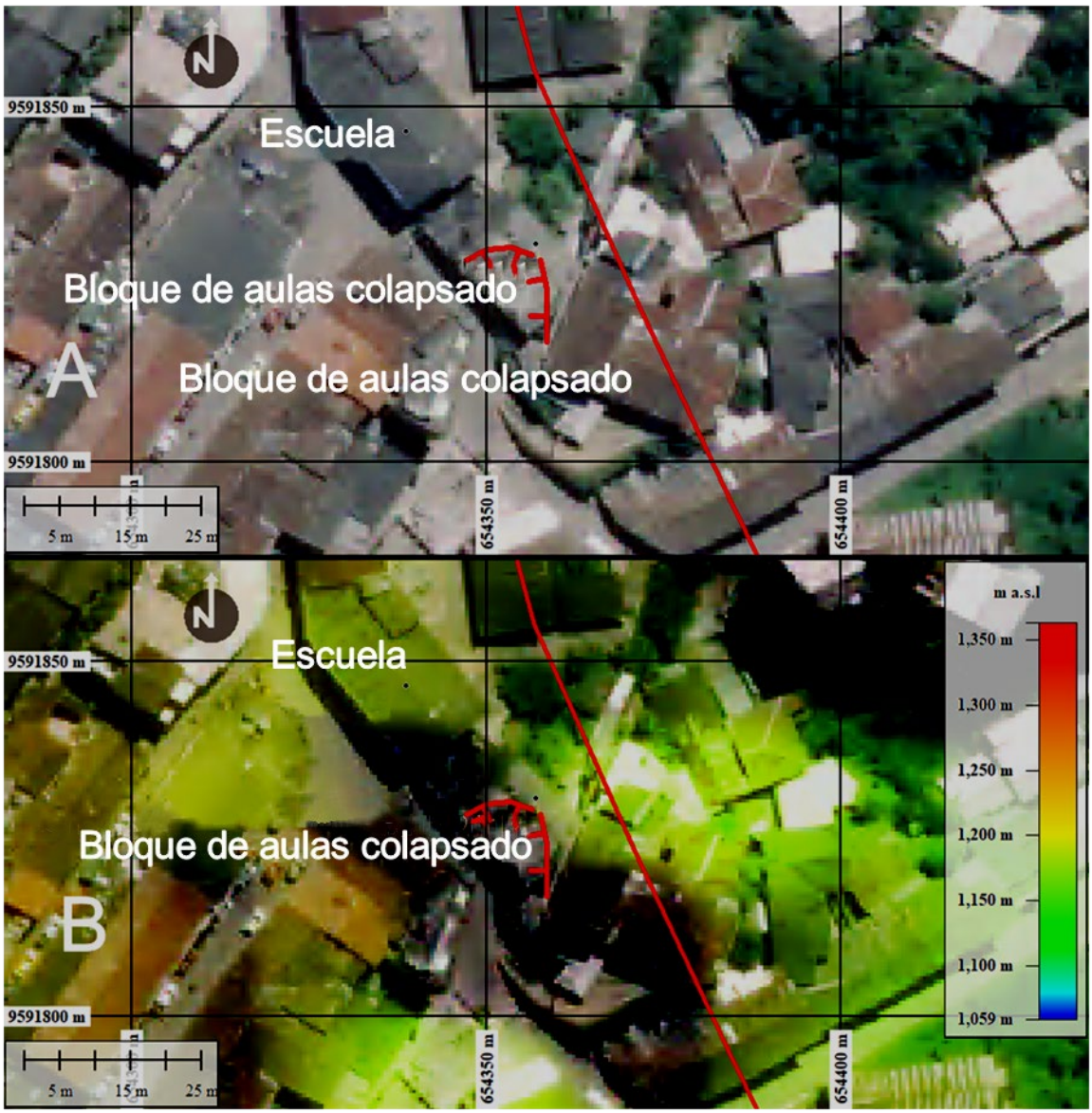


Figura 61. Bloques de aulas antes y después del colapso de 2016, utilizando el método del patrón de flujo. Hundimiento inicial 5 m. En (A) Ubicación de la escuela y (B) bloque colapsado del aula. Las líneas de color rojo representan el área de hundimiento y la galería minera bajo la escuela.

El estudio realizado por la Secretaría de Gestión de Riesgos mediante tomografía eléctrica del subsuelo en 2016, verificó que las áreas susceptibles de subsidencia detectadas en la década anterior se activaron y provocaron el colapso de la Escuela La Inmaculada-Fé y Alegría.

Posteriormente se produjeron hundimiento en las calles 24 de mayo, 26 de noviembre, Ernesto Castro, Colón y Gonzalo Pizarro. Hundimientos que se detectaron previamente en el 2001. La Figura 60D muestra la cavidad que se llenó con escombros después del colapso del bloque del aula en 2016. Debajo de este bloque, hay una galería minera en funcionamiento.

En diciembre de 2016, la escuela Fe y Alegría-La Inmaculada, se derrumbó por completo posiblemente debido a estar sobre una antigua galería y varios piques de explotación ilegal, según lo determinado por varios informes técnicos recientes (Cando et al., 2016). La escuela se derrumbó cuando se hundieron sus cimientos y, en consecuencia, las estructuras se fracturaron y colapsaron. La figura 62 muestra la ubicación de la escuela, el bloque hundido y la línea de tomografía A-A´, presentada en la Figura 60D. En esta figura también se presenta un nuevo colapso en el sector de Gonzalo Pizarro en 2019.

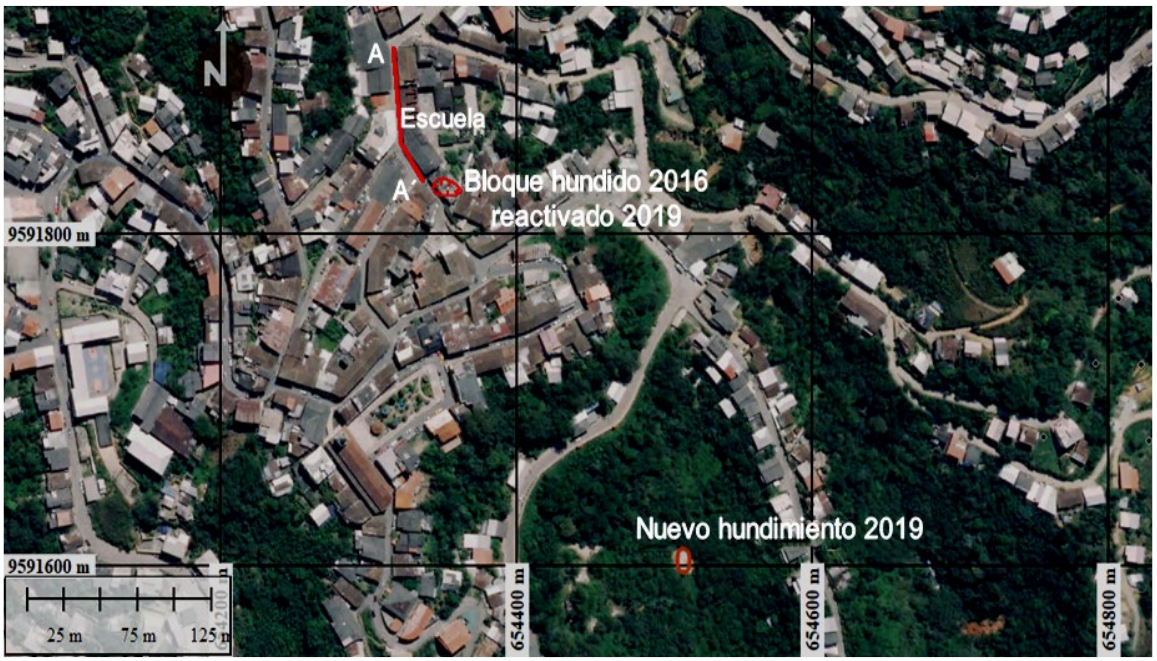


Figura 62. Ubicación de la escuela, bloque de aulas colapsado en 2016, reactivación del hundimiento en la escuela y nuevo colapso en el sector Gonzalo Pizarro 2019. Tomografía eléctrica línea roja A-A´.

La Figura 63, muestra el colapso de la escuela en octubre de 2016 (Fig. 63A), el relleno técnico realizado en 2017 (Fig. 63B), el nuevo colapso en el mismo lugar 2019 (Fig.63C) y el nuevo colapso en el sector de la calle Gonzalo Pizarro (D), que ocurrió en 2019.

La ciudad tiene un área de exclusión minera, declarada mediante Resolución de Emergencia No. SGR-029-2015, que encierra el centro colonial de la ciudad y es el límite interno en donde está prohibido realizar trabajos mineros, área de exclusión que no se han respetado.

Figura 63. (A) Colapso de la escuela Fe y Alegría, en octubre de 2916. (B) Llenado técnico realizado en el sitio en 2017. (C) Reactivación del colapso en el lugar donde estaba la escuela en 2017. (D) Nuevo colapso cerca de la calle Gonzalo Pizarro en 2019. Imágenes tomadas del periódico El Expreso, Ecuador en vivo, página de Facebook Pichincha Universal y Arden los Socavones.

Cuando los mineros ilegales realizan obras mineras subterráneas y las galerías entran en la zona de exclusión, explotando y persiguiendo las vetas cargadas de oro, después de un tiempo, abandonan esas "picas" sin ningún cierre técnico, dejando huecos debajo de la superficie que se han derrumbado después de varios años de asentamiento. Esto ha provocado el colapso del suelo y, como en el caso de la escuela Fe y Alegría-La Immaculada, causó un sumidero que inicialmente tenía 10 m de profundidad y actualmente puede alcanzar los 150 m. Las galerías subterráneas en ese sector pueden alcanzar más de 250 metros de profundidad.

La morfología del terreno en Zaruma ha cambiado intensamente debido a la intensificación de la minería ilegal. Cuando las galerías se abandonan debido a la menor ley del mineral, los mineros ilegales dejan las galerías sin cierre técnico, lo que hace que las capas superiores colapsen. Este proceso de hundimiento continúa hacia la superficie y eventualmente hace que el suelo se hunda, fracturando las viviendas sobre ellas.

La consecuencia de la explotación minera alrededor de las vetas mineralizadas que han sido explotadas indiscriminadamente durante décadas, ha causado nuevas condiciones hidrológicas superficiales y subterráneas locales, que influyeron en el equilibrio de las especies de plantas, animales y otros organismos que ocupan esas áreas y que han tenido que adaptarse a las nuevas condiciones impuestas por los límites del crecimiento de la minería urbana, que los ha puesto al límite de su extinción (López & Bravo, 2016).

En los últimos años, la interferometría diferencial DINSAR se ha utilizado para medir deformaciones del relieve de manera muy eficaz, en base a grandes pilas de imágenes SAR, a diferencia de las dos imágenes clásicas utilizadas en configuraciones INSAR estándar (Fárová et al., 2019).

El estado del arte de las técnicas DINSAR que hacen uso de los datos adquiridos por sensores espaciales SAR explotan la información contenida en la fase de radar de imágenes SAR complejas adquiridas en diferentes momentos sobre la misma área. Varios estudios han contribuido a mejorar la ubicación espacial del hundimiento mediante la excavación de túneles que provocan la desecación de los acuíferos mediante extracción subterránea de minerales (Crosetto et al., 2005).

En este estudio, la metodología DINSAR se ha utilizado para determinar deformación del relieve y es una herramienta ideal para monitorear el hundimiento del relieve topográfico en grandes áreas y por períodos prolongados, con alta precisión de unos pocos milímetros a centímetros por Km^2. Las imágenes de Sentinel 1, en la banda C, se utilizaron para determinar la deformación y el desplazamiento acumulado durante un período de 2016 a 2019 (Wegmuller et al., 2004). Un período en el que ocurrieron varios hundimientos como se mencionó anteriormente.

Para estudiar el hundimiento local del suelo, se procesó una serie multitemporal de imágenes con una pila de imágenes de Sentinel 1 antes del colapso de la Escuela Fe y Alegría-La Immaculada y después. Los resultados se verificaron en aquellos sitios que se han hundido desde 1995 bajo los que se encuentran minas subterráneas abandonadas y activas.

Hay estudios históricos que reportan edificios severamente dañados, posiblemente debido a estar en áreas de subsidencia en el Casco Colonial de la ciudad de Zaruma (Cando et al., 2001). La Figura 64 muestra la ubicación de la ciudad, el área de exclusión minera (línea de color naranja), las galerías mineras subterráneas (líneas de color rojo) en la parte central y hacia el este y las bocaminas están representadas con puntos de color blanco. En la parte occidental, no hay inventario de galerías mineras catastradas, excepto una con dirección E-O, representada con una línea de color rojo.

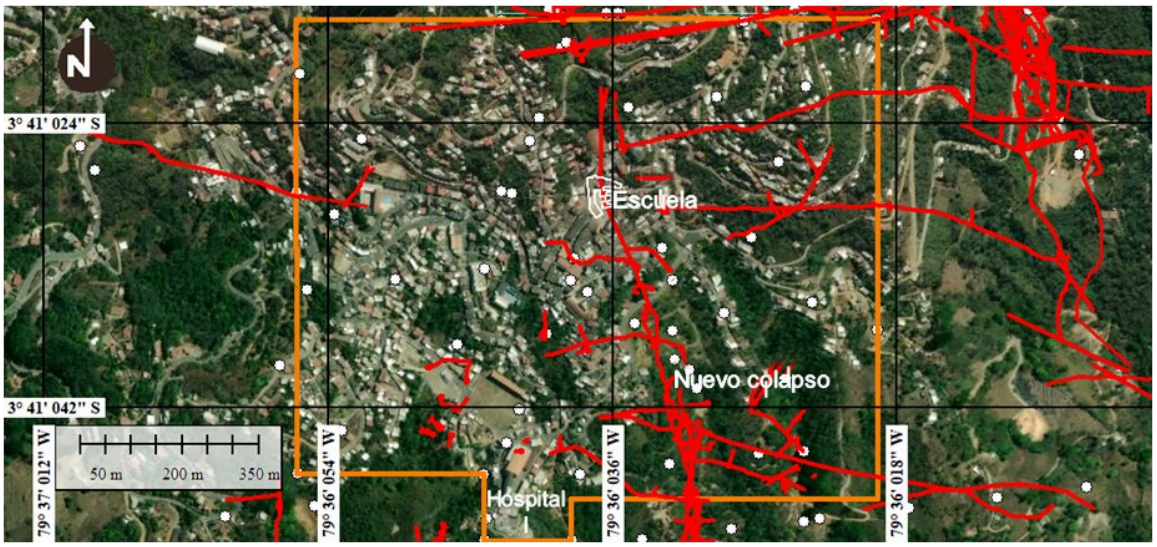


Figura 64. Ubicación subterránea de galerías mineras fuera y dentro del área de exclusión de la ciudad de Zaruma. En color naranja, el polígono de la Zona de Exclusión, las galerías mineras desde el centro hacia el este en líneas rojas. Los puntos de color blanco son bocamines. Fuente de datos (Cando et al., 2016).

La tecnología DINSAR, es una herramienta ideal para monitorear el hundimiento del relieve topográfico en grandes áreas y por períodos prolongados de tiempo, con una alta precisión de unos pocos milímetros a centímetros por Km2. Teniendo en cuenta la capacidad de detectar pequeñas deformaciones del relieve topográfico con alta precisión utilizando datos SAR de microondas, en este artículo, la metodología DINSAR se utilizó para determinar deformaciones y desplazamientos acumulados del relieve en mm/año utilizando imágenes Sentinel 1, en la banda C, en un período desde el 2016 al 2019. Un período en el que ocurrieron varios hundimientos (Cando et al., 2020).

El cálculo del desplazamiento acumulado puede tener errores debido al ruido atmosférico, que en este caso se redujo con el filtro para la herramienta de reducción de pantalla de fase atmosférica -APS-, para obtener interferogramas con alta coherencia, lo que garantiza los resultados del desplazamiento acumulado en mm/año. El error residual es de 0,1 mm y el desplazamiento dentro del período estudiado tiene un rango de +- 20 mm / año, levanramiento/ hundimiento del relieve.

Las imágenes se adquirieron del 2016-25-10, antes del hundimiento, hasta el 10-22-2019 despues del hundimiento e incluyen imágenes del 2016, 2017, 2018, período dentro del cual se ubica el comienzo del hundimiento en la escuela (26-10-2016). Esto permitió analizar cómo evolucionó el hundimiento y determinó la posible reactivación del nuevo hundimiento en el mismo sitio (2019-22-10), como también el el nuevo colapso en la calle Gonzalo Pizarro en agosto de 2019.

Por su facilidad de procesamiento de las imágenes Sentinel 1 y por ser un software muy potente y versátil que implementa una amplia gama de técnicas de procesamiento de Radar de Apertura Sintética -SAR-, SAR Interferométrico (InSAR) e InSAR Multi-Temporal se utilizó una licencia temporal de SARPROZ

en base al proceso interferométrico estándar, de acuerdo con el diagrama de flujo de la Figura 65. Este proceso se puede seguir en el sitio de Sarproz, en base al documento “APS Estimation & Multitemporal analysis with Sarproz”, tutorial document (Yixia, 2018).

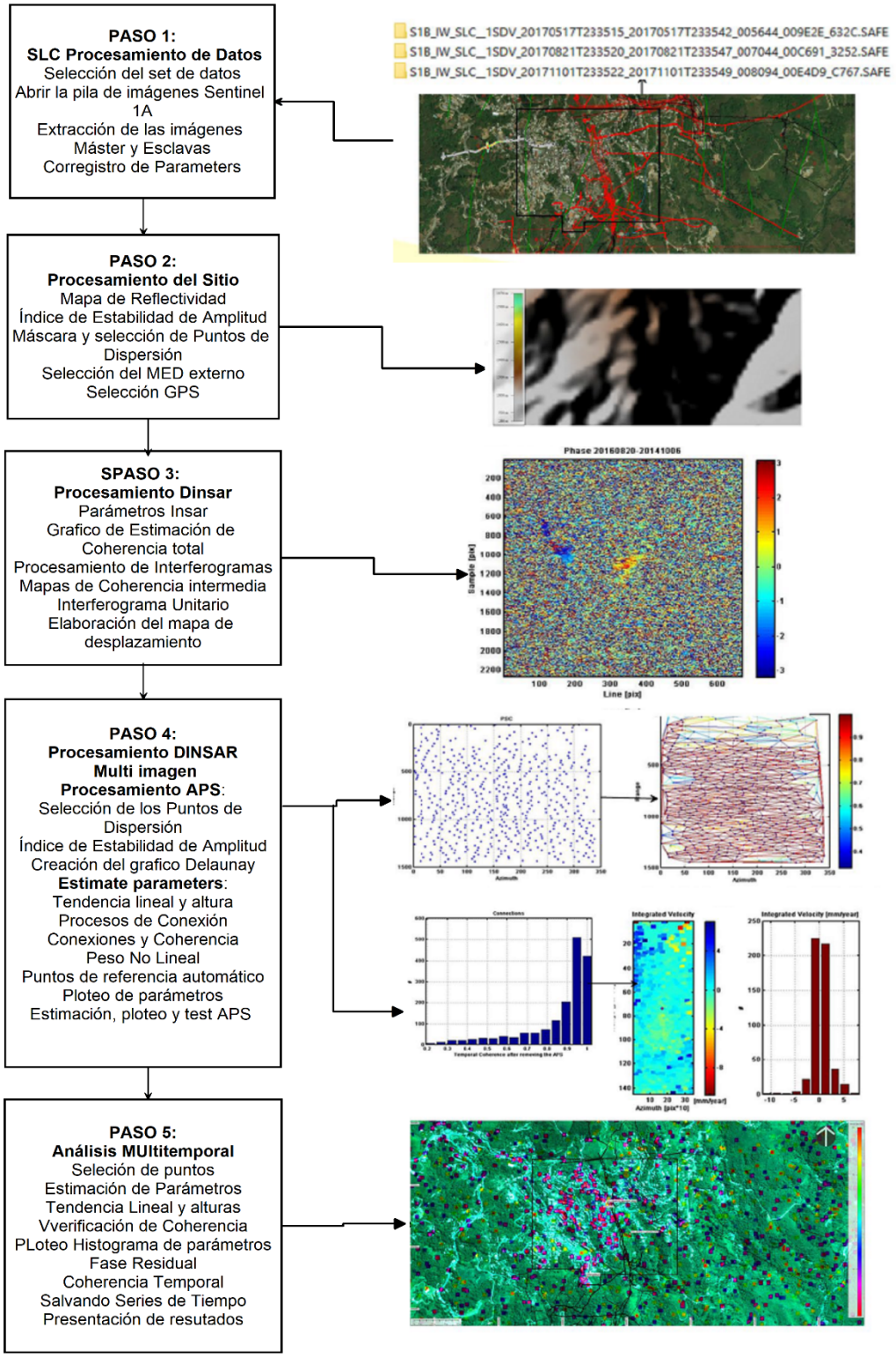


Figure 65. Flujo de procesos en SARPROZ para obtener las deformaciones en relieve mediante análisis DINSAR.

Para obtener los Interferogramas con mayor precisión, se redujo el error de la influencia del ruido atmosférico mediante la aplicación de un filtro de pantalla de fase atmosférica (APS) en el software SARPROZ (Roccheggiani et al., 2019), teniendo en cuenta que, en esta área central de la ciudad, la cobertura vegetal es mínima y es poco probable que cause ruido atmosférico importante como para distorsionar la adquisición de las imágenes, elaboración e interpretación de los interferogramas.

Este filtraje, permitió obtener un alto grado de coherencia en los resultados, para garantizar que los valores acumulados de velocidad de desplazamiento, tengan una alta correlación con la tasa de hundimientos locales causado por la minería subterránea.

En este estudio, el filtro para la reducción de la pantalla de fase atmosférica -APS- se utilizó con la metodología de interferometría de dispersión persistente PS-DINSAR, en una pila de 20 imágenes multitemporales Sentinel 1 B disponibles. La dispersión persistente PS-DINSAR es una técnica de procesamiento de DINSAR que utiliza múltiples imágenes tomadas a intervalos regulares para lograr mejores resultados de medición de la Fase y Coherencia en la generación de los inteferogramas.

El método se centra en encontrar dispersores estables a lo largo del tiempo, no influenciados por el ruido atmosférico, los que pueden proporcionar una señal de respuesta estable, que, en el caso de la ciudad, corresponden a estructuras artificiales como edificios, carreteras, obeliscos, entre otras estructuras. Estas estructuras artificiales, se las conocen como dispersiones persistentes -APS- y proporcionan un historial de fases estables durante el tiempo de adquisición de las imágenes, porque no sufren una correlación temporal sino persistente, lo que permite la observación a largo plazo y el monitoreo de la deformación de los sectores en su entorno.

A continuación, se realiza una breve descripción de los pasos realizados en SARPROZ para obtener los mapas de deformación y desplazamiento del relieve en mm/año.

Paso 1: Procesamiento de datos SLC, para importar o actualizar datos extraídos de imágenes de Sentinel 1. Las imágenes maestras y esclavas se extraen y se definen seleccionándolas de forma manual o automática. La coherencia espacial promedio de un interferograma entre la imagen maestra y las esclavas es directamente proporcional a la línea de base espacial/temporal más pequeña para obtener una mayor coherencia espacial y para mejorar la respuesta de la señal de los interferogramas elaborados. En el gráfico de estrellas en la Figura 66A, la imagen maestra está cerca del centro del dominio de línea de base perpendicular y temporal en relación con los puntos a la derecha para tratar de minimizar los efectos de las líneas de bases normales y temporales de los parámetros de registro de los píxeles de las imágenes esclavas. En la Figura 66B se presentan los puntos de dispersión para obtener los interferogramas.

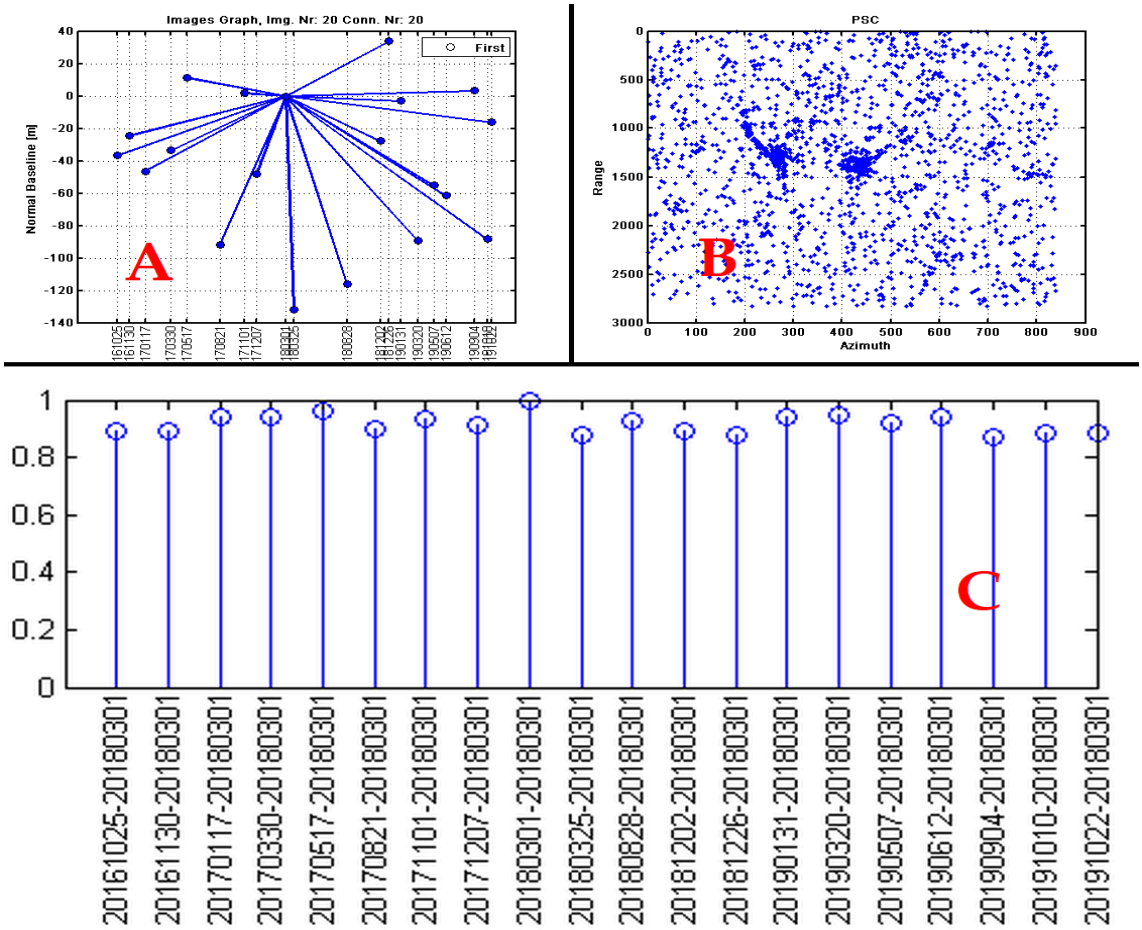


Figura 66. (A) Representación del conjunto de imágenes Sentinel 1 B, en el espacio basal-temporal normal, donde cada punto y línea representa una imagen y un interferograma, respectivamente. (B) Puntos dispersos para el análisis PS-INSAR. (C) Consistencia mayor o igual a 0.85 de la pila de imágenes de Sentinel 1.

Paso 2: Llamado Procesamiento del sitio, en este paso, se extraen parámetros preliminares de las imágenes, como el mapa de reflectividad, del tiempo promedio de reflectividad de todas las imágenes en la pila. Se calcula el índice de estabilidad de amplitud, que es un número único que proporciona una propiedad estadística de la serie de amplitud con rangos entre 0 y 1. Se genera una máscara para la selección de los puntos dispersos en función de un valor umbral del índice de estabilidad de amplitud, por el cual los valores por encima del umbral ingresan al proceso interferométrico y los valores por debajo de este umbral se enmascaran y no ingresan al proceso. Se selecciona un MDE externo, para eliminar la fase topográfica y geocodificar las imágenes con la opción Selección de Punto de Control de Tierra-GPC, para corrección orbital, aplanamiento de interferogramas y definición de dispersores persistentes. La característica básica de un MDE es que debe tener puntos de referencia estables y georeferenciados que, en este caso, es obtenido del SRTM que tiene un alto grado de confianza en su posición. Se pueden usar otros MDE externos de varias resoluciones espaciales, siempre que tengan puntos de referencia estáticos estables (reflectores estables) que no hayan cambiado con el tiempo.

Finalmente, se calcula la coherencia gráfica completa, para estimar la coherencia de todas las conexiones posibles (interferogramas) en la escena de las imágenes.

Paso 3: Llamado procesamiento de InSAR en el que los parámetros para el procesamiento interferométrico, se definen mediante la estimación de la coherencia gráfica completa de acuerdo con la pila de imágenes cargadas y la coherencia promedio de los interferogramas generados. A partir de esta coherencia calculada, se genera un interferograma entre la imagen maestra y cada una de las imágenes esclavas. En este procedimiento, también se puede generar un único Interferograma, elegido libremente de la imagen maestra con cualquiera de las imágenes esclavas.

Paso 4: Llamado InSAR Procesamiento de múltiples imágenes, en el que se elimina el ruido atmosférico APS y se seleccionan los puntos candidatos para generar la dispersión persistente-PS, aquellos que tienen una posición estable en términos de deformación del relieve topográfico. En base a estos puntos, el programa calcula la altura de desplazamiento, la velocidad de desplazamiento y los residuos de los parámetros que sirven para recuperar el retraso de la fase atmosférica.

Los puntos candidatos de dispersión persistente-PS en el área urbana de Zaruma, corresponden a las construcciones de edificios que permanecen estables en el tiempo tanto en radiometría como en la fase interferométrica (Milan, 2009). La pila de 20 imágenes utilizadas es el factor más importante para estimar la coherencia de los píxeles, ya que permitió identificar PS adecuadas para el análisis de desplazamiento del relieve. El uso insuficiente de las imágenes producirá una sobreestimación de la coherencia en toda la escena, una estimación pobre de la PS, por lo tanto, en falsos desplazamientos. La ubicación de PS se considera confiable cuando se usan 20 o más imágenes. En esta fase, también se estimó el ruido ambiental APS, que puede afectar el proceso de generación de los inteferogramas debido a las diferentes condiciones atmosféricas en el momento de la adquisición de la imagen. Al eliminar el ruido atmosférico APS, mejoró la coherencia y la señal de respuesta de fase de las imágenes para obtener datos de desplazamiento del relieve más precisos.

Paso 5: Llamado Análisis múltitemporal, es un procedimiento que, basado en el procedimiento de reducción de ruido atmosférico anterior, se utiliza para el análisis de la interferometría multitemporal MT-InSAR basada en la dispersión persistente (PS). Con este procedimiento, se identificaron dispersores, cuya señal es dominante dentro de la dispersión total de los píxeles analizados y con la que se obtuvo un mapa de deformación del relieve topográfico, en el que la tasa de deformación se representa a partir de la serie temporal obtenida. Estos mapas están formados por miles de PS (dispersiones persistentes) y cada PS está asociado con un valor de velocidad lineal anual (mm/año) y con el desplazamiento acumulado en cada fecha de adquisición de las imágenes.

En este caso, el programa eligió puntos PSC (candidatos de dispersión persistente) en función de su ubicación en una red de conexión y con un valor de umbral de coherencia superior a> 0,8. Como se mencionó, estos puntos son partes de estructuras civiles artificiales para analizar la dispersión de la estabilidad de amplitud alrededor de esos puntos, dibujando una red de conexión de puntos coherente (gráfico de conexión espacial de Delaunay). Este procedimiento estimó una alta coherencia en las conexiones de cada punto de la red para obtener la altura y la velocidad de desplazamiento del relieve con alta confianza. Después de estimar los parámetros anteriores con alta consistencia, se eliminó el ruido atmosférico. La elección del número de imágenes en la pila mostró una coherencia mayor o igual a 0.8, como se presenta en la Figura 66C y la estimación del ruido atmosférico APS con alta coherencia para todo el conjunto de puntos se procesó con un espacio espacial no lineal distribución, asegurando que la coherencia final sea satisfactoria.

Los histogramas verificaron que la velocidad de conexión y la altura residual de la conexión son consistentes en la distribución del valor residual de la velocidad de desplazamiento (mm/año) / altura (m), como se presenta en la Figura 67A, B y C, en donde se observa un histograma, sin saltos y alta coherencia (líneas de conexión con tendencia al color rojo) (Fig. 67D).

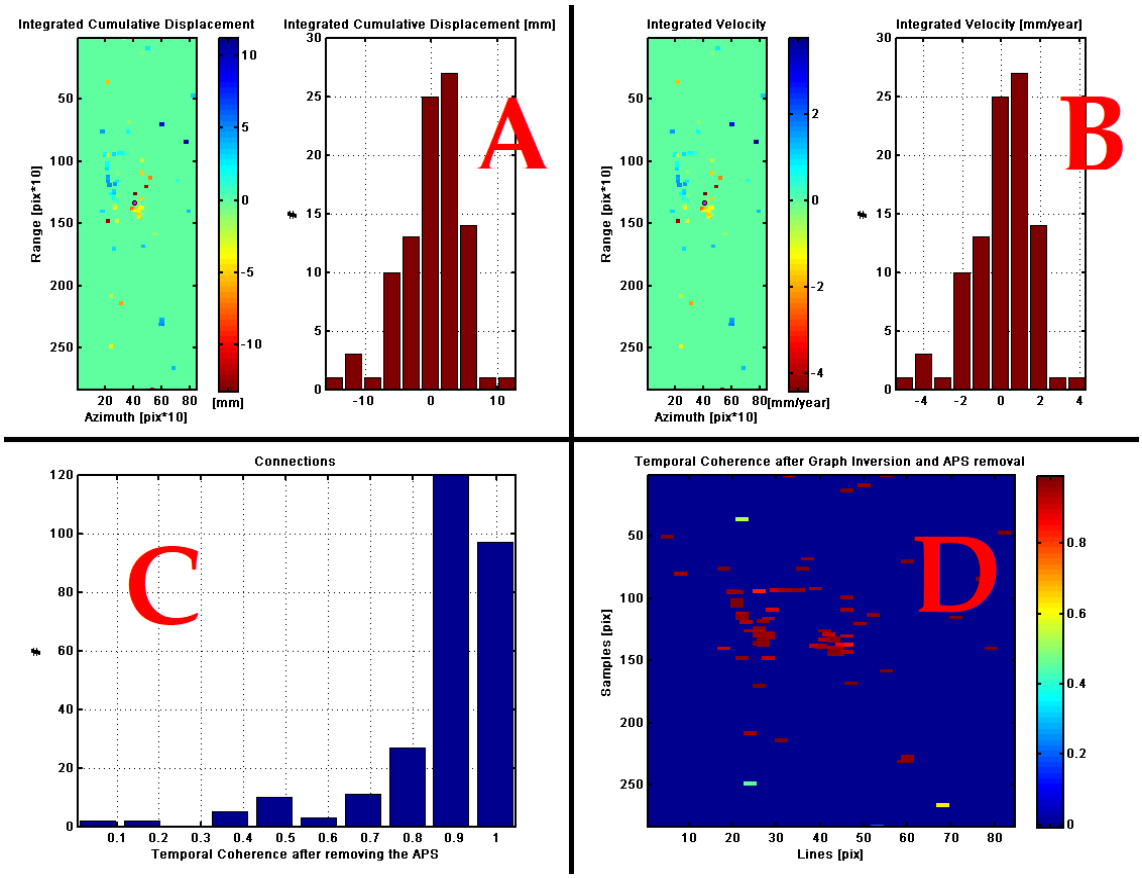


Figure 67. (A) Histograma de conexiones integradas de desplazamiento acumulativo, (B) Velocidad integrada, (C) Histograma y coherencia temporal después de la eliminación del ruido APS (D).

2.5. Metodología de prevención de desastres relacionados con eventos extremos de deformación natural del suelo mediante la aplicación de métodos espaciales en áreas urbanas (Método 5).

El objetivo de este método fue el de determinar el grado de peligrosidad ante un sismo de 7 Mw o mayor, de una población concentrada en centros urbanos de acopio (mercados, centros comerciales, de servicios públicos (administraciones municipales, ministerios, servicios de salud) o de diversión (bares, discotecas, museo, parques y zonas verdes), centros construidos sobre intensas deformaciones del terreno y que han tenido un desplazamiento acumulado en un periodo de tiempo.

Este grado de peligrosidad de las construcciones en los centros urbanos y de la población, se determinó utilizando Interferometría de Radar de Apertura Sintética (INSAR) y la teoría de la Sintaxis del Espacio que es una técnica dentro de la arquitectura que se aplicó para cuantificar y describir la intensidad de concentración y movimiento de la población a través de los espacios urbanos de una ciudad y este objetivo trata de responder a la pregunta. ¿Qué pasaría si un terremoto mayor a 7?2 Mw, como el ocurrido en 1859, ocurre en estas áreas de concentración de la población que se encuentran en estos centros, de acopio construidos sobre deformaciones intensas del terreno?. Para responder esta pregunta, se ha utilizado el Método de Interferometría Diferencial Radar de Apertura Sintética (DINSAR), técnica descrita en anteriores Métodos, basada en la obtención de las diferencias de fase de dos imágenes de radar, adquiridas por un satélite desde órbitas separadas y en diferentes momentos, para obtener una imagen de desplazamiento del suelo de un área de estudio. Esta imagen resultante como se ha mencionado, se llama Interferograma.

Por otro lado, se utilizaron los conceptos de la Sintaxis Espacial, que como se ha mencionado, cuantifica y describe el nivel de facilidad de movimiento de la población a través de cualquier espacio urbano en una ciudad, basado en al análisis de flujo de tránsito peatonal, desplazamiento, accesibilidad y concentración de la población en áreas de servicios básicos, salud, seguridad, comercio y entretenimiento. Estos dos conceptos combinados, determinaron el grado de peligrosidad de la población del barrio La Mariscal en la ciudad de Quito, a que las deformaciones del terreno sobre la que se encuentren dentro del los espacios urbanos, puedan ser destruidos ante la ocurrencia de un sismo mayor a 7.2 Mw como el ocurrido en 1859 (Naya, 2010).

Sobre el Riesgo Sísmico en la ciudad de Quito, se han publicado muchos estudios de vulnerabilidad sísmica, pero no hay estudios que relacionen la deformación del terreno con la técnica DINSAR y la Sintaxis Espacial, por lo que este método presenta una nueva visión en la aplicación conjunta de estas herramientas. Una visión útil para los planificadores y diseñadores urbanos, considerando la ocurrencia de un gran terremoto en áreas de edificios que se encuentran en intensas deformaciones del terreno y tienen altas concentraciones de población.

Este estudio se ha preparado en tres fases:

En la Primera Fase, se determinaron las áreas urbanizadas concentradas en deformaciones intensas del terreno por desplazamiento acumulado obtenido utilizando la estimación del Atmospheric Phase Screen APS y el análisis multitemporal de imágenes Sentinel 1A y 1B por análisis de series de tiempo PSI-DINSAR.

En la Segunda Fase, a través de la teoría de la Sintaxis del Espacio y el uso del software DepthmapX, se analizaron los patrones de movimiento, flujos de tráfico y concentración de la población, mediante gráficos de espacios interconectados por calles (Mapas Axiales), para predecir el comportamiento espacial de los peatones y su concentración en los sitios mencionados.

Finalmente, en la tercera fase, se integraron los resultados, determinando el grado de peligrosidad de la población en áreas construidas con desplazamiento de alto a muy alto rango (mm/año) y concentración de población intensa.

El criterio desde el punto de vista de la Prevensión y Pronóstico que se tuvo en este estudio, es “obtener mapas de peligrosidad" antes de que se activen y provoquen desastres como por ejemplo el desastre provocado por el terremoto de magnitud sísmica 7.8 Mw, en la costa ecuatoriana el 16 abril de 2016, que destruyó las zonas Cero de Manta y otras ciudades.

Un pequeño antecedente de lo ocurrido en la ciudad de Manta y que no se desea que ocurra en el barrio de La Mariscal de la ciudad de Quito, se refiere a que en esa época hubo intensa acumulación de la población en el centro de comercio de ciudad ya que se acercaba el inicio de clases anual y los padres de familia, con sus hijos, se encontraban realizando compras de material escolar, necesarios para el desarrollo de las clases del nuevo año lectivo. Toda la Zona Cero estaba repleta de personas que hacían sus compras de inicio de año. El colapso del Centro Comercial Felipe Navarrete y de otras edificaciones, que se encontraban en una zona de intensa deformación del terreno, con intensa concentración de la población en esos instantes, causó más de 96 muertes, en menos de 1 minuto.

Antes de la ocurrencia de un terremoto de la magnitud como el mencionado, el análisis combinado DINSAR-Sintaxis del Espacio, determinó que las Zonas Cero de las ciudades destruidas, tuvieron un fuerte núcleo espacial "multi-escala" de concentración peatonal. Esto significó que estas zonas fueron, simultáneamente, zonas importantes de movimiento poblacional local, principalmente en las áreas comerciales centrales, ya que en sus cercanías se concentran las vías y accesos a múltiples servicios que las personas caminando llegaron hacia ellos y en muchas ocasiones fueron parte de su tránsito diario para llegar a sus sitios de trabajo.

En el barrio La Mariscal, la jerarquía espacial urbana cambió en un periodo de tiempo de 30 años en este barrio, con algunas consecuencias importantes. En primer lugar, la población pudiente de la ciudad y muchas empresas se trasladaron a este barrio, desde otras partes de la ciudad. En segundo lugar, surgieron varios centros nuevos de concentración poblacional, cuando la configuración espacial cambió lo suficiente como para hacer que estos se conectaran con mayor fuerza dentro de las redes viarias cercanas al barrio. En tercer lugar, el barrio La Mariscal, es un ejemplo de una zona en donde las empresas se reubicaron según el nivel de de demanda de servicios y consumo de la población. Este proceso hizo de La Mariscal uno de los barrios de más alta plusvalía y capacidad económico-social de la ciudad, incluyendo que ahí existe el mayor centro de diversión o Zona Rosa de la ciudad, a donde concurren diariamente miles de ciudadanos. La concentración de la población y de centros económicos que concentran a la población en La Mariscal, se puede ver en la Figura 68.

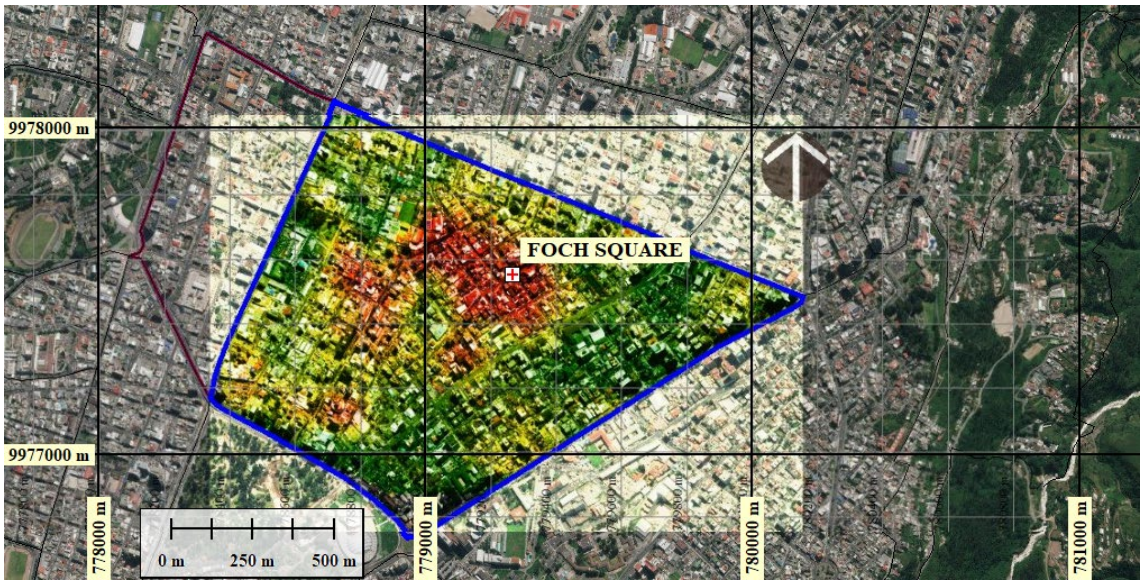


Figura 68. Concentración de actividades económicas en el barrio de La Mariscal. Los sectores con la mayor aglomeración de actividades económicas productivas (rojo). Los sectores con menor aglomeración de estas actividades (verde).

Este estudio se considera innovador porque es la primera vez que se utiliza en el país como mecanismo de Prevención y pronóstico. Un dato muy importante que hay que tener en cuenta es que, según las estadísticas mundiales, alrededor de las tres cuartas partes de todas las muertes relacionadas con terremotos, se deben al colapso de los edificios (Ismail-Zadeh, 2014).

En relación a las fases de análisis desarrolladas en Este Método , en la primera fase, se determinó la deformación y el desplazamiento acumulado del terreno (valor de desplazamiento total en mm/año), utilizando al análisis DINSAR que mide el desplazamiento de un punto del terreno en referencia a un punto de partida relativo o punto estable conocido medido en una serie de tiempo, para lo que se utilizó el criterio de reducción del ruido ambiental con la herramienta

Atmosferic Phase Screen –APS- y análisis de series temporales con Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-DINSAR), análisis basado en imágenes Sentinel 1A y B, en un período de tiempo desde el 2 de septiembre de 2015 hasta el 28 de noviembre de 2019.

En la segunda fase, se aplicóron los conceptos y herramientas de la Sintaxis del Espacio y el uso de DepthmapX, para determinar los patrones de movimiento y los flujos de tráfico de la población a través de gráficos de espacios interconectados por calles y sus intersecciones (Mapas Axiales), para predecir comportamiento espacial humano y su concentración en lugares de intenso comercio, entretenimiento y servicios públicos.

Finalmente, los resultados se integraron, determinando la intensidad de peligrosidad de la población que vive en áreas construidas con desplazamiento de alto a muy alto y una alta concentración de la población. Este estudio se ha centrado en la peligrosidad desde el punto de vista del peligro de los edificios y la población a verse afectados por un riesgo sísmico específico y la probabilidad de estar expuestos a deformaciones intensas del relieve que pueden moverse con terremotos de más de 7.2 Mw.

Con respecto a la ciudad de Quito que está expuesta a un alto riesgo sísmico (Naya, 2010), se debe mencionar que la ciudad se ha visto afectada por terremotos que ocurren debajo de ella, en la falla de Quito, y por grandes terremotos que ocurrieron en el valle interandino o en las cadenas montañosas cercanas.

El último gran terremoto que afectó a Quito fue en 1868. En ese momento, la población de la ciudad consistía en unas 45.000 personas que vivían en un área de 4 km^2 (Chatelain et al., 1999). Desde esa fecha, se ha evidenciado un rápido crecimiento de la ciudad, que dio paso a una gran cantidad de edificios y edificaciones de baja calidad en sitios inestables como barrancos llenos de tierra suelta y pendientes pronunciadas, y el aumento de la población a más de tres millones de habitantes, por lo que, si ocurriera un gran terremoto, el daño sería considerable (Naya, 2010).

Los estudios de sismicidad actuales muestran que cada 50 años (en promedio), se han producido terremotos con epicentros ubicados a distancias cercanas a la ciudad capital, que le han causado un daño significativo.

A partir de 1541, cuando comenzaron los registros históricos, siete terremotos con intensidad VI o superior se sintieron en la capital (Aguiar, 2019). Este valor de intensidad de la escala de intensidades Medvédev-Sponheuer-Kárník-MSK corresponde a un terremoto en el que las personas se asustaron y abandonaron sus hogares, y los viejos muros de barro, adobe o mampostería sufrieron graves daños, con la aparición de pequeños deslizamientos de tierra. Los dos terremotos más cercanos que afectaron a la ciudad de Quito con mayor intensidad fueron el de Guayllabamba (6.4 Mw en 1587) y el de Quito (7.2 Mw en 1859). Ambos tenían una intensidad de VIII de la escala MSK que, según los informes de la época, causaron dificultades para que los residentes se pararan

y se produjo el colapso de los edificios antiguos. Además de los terremotos mencionados, otros terremotos distantes han causado daños a la ciudad. Entre ellos se pueden mencionar los de Ambato (7,6 Mw, 1698) y Riobamba (7,6 Mw, 1797) al sur de la ciudad capital; Ibarra (7.2 Mw, 1868) al norte y Baeza (6.9 Mw, 1987) al Este de la ciudad.

En los últimos tiempos, y después del mega terremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile, que tuvo una magnitud de 8.8 y dejó una cifra de más de 500 muertos, con pérdidas económicas estimadas en 30 mil millones de dólares (Naya, 2010), las autoridades del Gobierno Ecuatoriano, enfocó procedimientos para la reducción de la vulnerabilidad sísmica en las principales ciudades ubicadas en el perfil costero ecuatoriano en caso de un terremoto de esa magnitud, teniendo en cuenta que en 1906 hubo un terremoto de 8.8 en la costa de la provincia de Esmeraldas. Todavía no se tenía idea de lo que ocurrió con el terremoto del 16 de abril de 2016. Para algunos investigadores (Aguiar, 2013), las pérdidas causadas por un evento de esta magnitud en Ecuador, duplicarían o triplicarían las de Chile. Este enfoque implica el análisis de la vulnerabilidad sísmica en las ciudades del interior del continente, ubicadas en la Sierra, Litoral, Amazonía y las Islas Galápagos. Esta preocupación en las autoridades ecuatorianas condujo a la creación del Código de Construcción ecuatoriano de 2015 NEC-SE-DS, Cargas sísmicas y diseño de terremoto resistente, un código en el que se reguló el espectro de diseño elástico (aceleración y desplazamiento del suelo). Con respecto al área del barrio La Mariscal, según el Instituto de Geofísica de la Escuela Politécnica Nacional -EPN-, este sector de la ciudad de Quito está construido sobre una importante zona sísmica-tectónica con un sistema de fallas geológicas de aproximadamente 50 km de longitud que cruza la ciudad.

Esto significa que el área de La Mariscal es vulnerable a la ocurrencia de un terremoto de más de 6 Mw que puede causar daños a la población y su infraestructura pública y privada, así como al medio ambiente y la economía del sector (Parra, 2015). En este sector hubo cuatro terremotos de 6 y 7 Mw indicados dentro del rectángulo verde de la Figura 69.

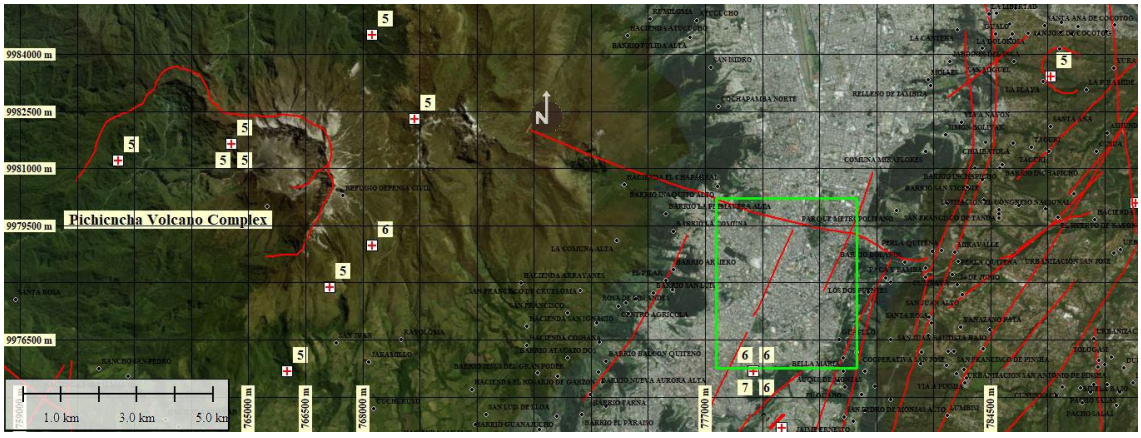


Figura 69. Ubicación de La Mariscal en la ciudad de Quito (polígono verde). Fallas geológicas (líneas en rojo) y epicentros sísmicos (cruces en rojo).

Fase 1: Interferometría del radar de apertura sintética. Breve resumen de la estimación de reducción del ruido atmosférico con la herramienta de Sarproz, Pantalla de la Fase Atmosférica (APS) y la tecnología de análisis multitemporal PS-DINSAR. La deformación del relieve y el desplazamiento acumulado se analizaron con el software SARPROZ (Qin et al., 2015; Roccheggiani, 2019) que tiene una amplia gama de herramientas para el procesamiento multi-temporal-PS-DINSAR.

El diagrama de flujo de los procedimientos de esta fase se puede ver en la Figura 70, en base a imágenes de Sentinel 1A y 1B obtenidas del Alaska Satellite Facility (Gens, & Logan, 2003). Estas imágenes corresponden a una pila de 32 escenas con complejo de aspecto único de nivel 1 (SLC), del 2 de septiembre de 2015 al 28 de noviembre de 2019.

Una de las principales limitaciones para medir la deformación del suelo mediante interferometría de radar de apertura sintética (DINSAR) son los efectos de retardo de fase atmosférica. En las regiones volcánicas, como en este caso, los efectos de retardo de fase atmosférica pueden causar serios problemas en la detección de la deformación del relieve volcánico porque el ruido atmosférico está inversamente relacionado con la elevación de una montaña volcánica, descomponiéndose la pantalla de fase atmosférica -APS- en componentes estratificados y turbulentos que debe ser reducida para mejorar la señal.

En este estudio, se aplicó la técnica de la APS para la reducción del ruido atmosférico y la Interferometría de Dispersión Persistente PS-DINSAR, para el análisis de series de tiempo, independientemente de la ocurrencia actual de un terremoto intenso. Se utilizaron imágenes SAR, que cubren el período comprendido entre el 2 de septiembre de 2015 y el 28 de noviembre de 2019, para analizar utilizando la técnica PS-DINSAR en una pila de 32 celdas, para calcular el desplazamiento del terreno con una precisión milimétrica a largo plazo.

El dispersor persistente PS-DINSAR, también llamado Coherent Target Monitoring (CTM), es una técnica de procesamiento de pila de imágenes DINSAR que utiliza múltiples imágenes tomadas a intervalos regulares para lograr mejores resultados de medición. El procesamiento de la pila permite determinar el movimiento de la superficie por la variación temporal de fase para cada píxel a lo largo del tiempo. El método se centra en base a la respuesta elecyromagnética de dispersores estables y precisos que no sufren ruido y proporcionan una señal determinista. Estos son los llamados dispersores persistentes (PS) y proporcionan un historial de fases estable durante el período de tiempo de adquisición de las imágenes. Las fases de PS son estables en el tiempo y no sufren de descorrelación temporal, lo que permite la observación a largo plazo y la monitorización de la deformación en multitiempo.

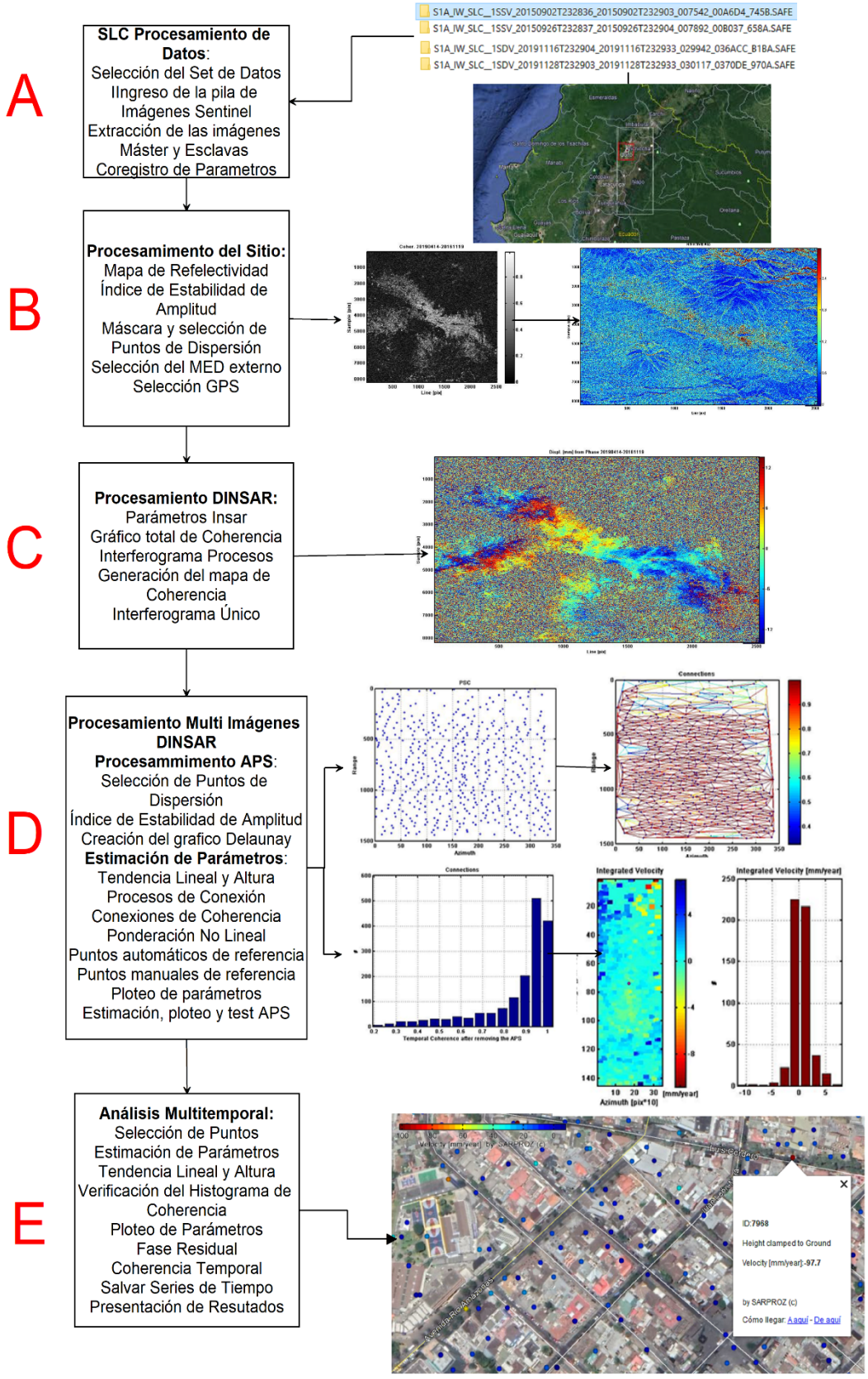


Figura 70. Procedimientos APS y PS-DINSAR Multitemporal con el software SARPROZ, para obtener deformaciones del terreno en el barrio La Mariscal de la ciudad de Quito.

A continuación, se describen los procedimientos seguidos:

Procedimiento 1 (A): Preparación y procesamiento de la pila de imágenes SAR Sentinel 1A-1B-SLC, Banda C.

Este es un procedimiento estándar para importar o actualizar datos extraídos de las imágenes de Sentinel 1, mediante la importación de una pila de imágenes Sentinel 1A-1B, Single Look Complex (SLC) y se establecen las órbitas de la escena para su tratamiento espacial. En este procedimiento se extraen las imágenes maestras y esclavas, que como se explicó, el software puede seleccionar automáticamente imágenes maestras, con la opción de seleccionarlas manualmente. Hay que procurar que la imagen maestra no se encuentra tan alejada de las imágenes esclavas. En el gráfico de estrellas de la Figura 71A, la imagen maestra está cerca del centro del dominio de línea de base temporal y perpendicular entre las imágenes de Sentinel 1A a la izquierda y 1B a la derecha, para tratar de minimizar los efectos de las líneas de base normales y temporales.

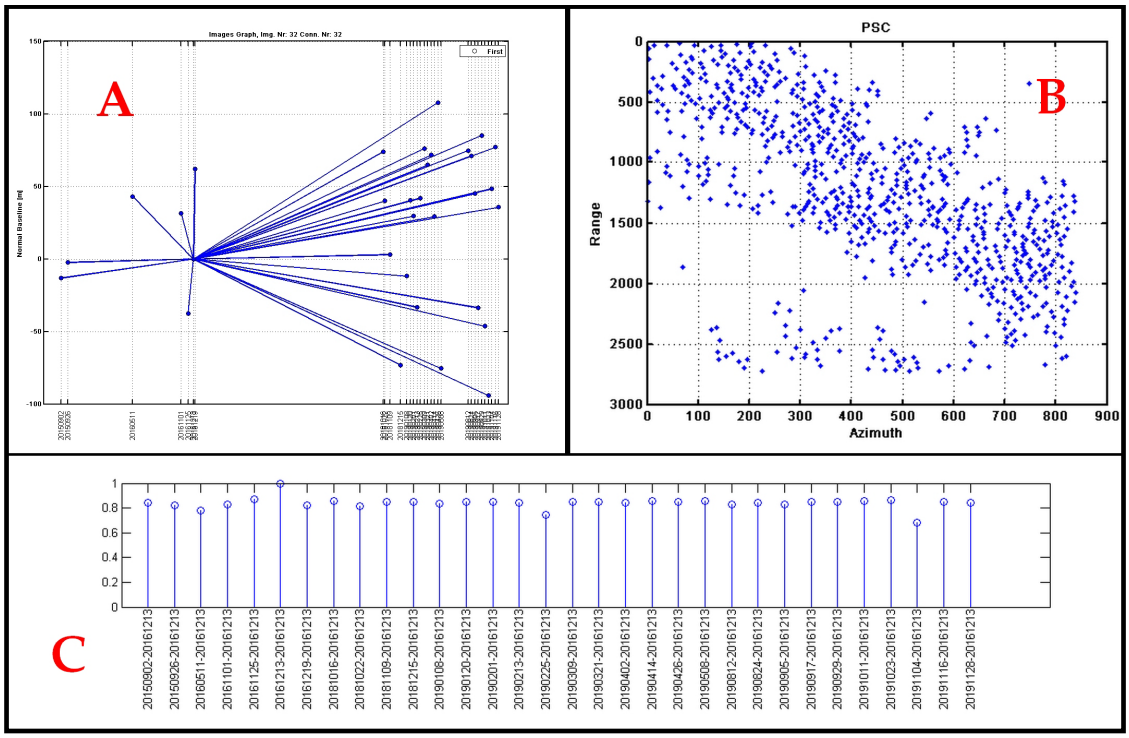


Figura 71. (A) Gráfico que muestra el conjunto de datos de Sentinel 1 analizado en el espacio basal-temporal normal, donde cada punto y línea representa una imagen y un interferograma, respectivamente. (B) Gráfico de selección de punto disperso. (C) El número de imágenes en la pila con coherencia mayor o igual a 0.65.

Después de la selección de las imágenes Maestra (M) y Esclavas (S), se determinaron los parámetros de Corregistro de las imágenes, para colocar los píxeles de la imagen Maestra con las imágenes Esclavas sobrepuestas en los mismos píxeles correspondientes y generar interferogramas coherentes correctamente.

Procedimiento 2 (B): Procesamiento del sitio. Este procedimiento obtiene el mapa de reflectividad de respuesta electromagnética de los dispersores PS de las imágenes, como el promedio temporal de todas las imágenes del conjunto de datos que se han elegido para procesar. Genera el Índice de estabilidad de Amplitud que es un número único entre 0 y 1, que proporciona una propiedad estadística de estabilidad de la serie de amplitud de los dispersores. Se genera una Máscara desde un punto disperso de referencia PS con un umbral del valor del Índice de Estabilidad de Amplitud, que permitirá calcular el interferograma a partir de ese umbral y con valores superiores y resto de valores bajo ese umbral no se procesarán. Este procedimiento asegura la coherencia de las respuestas del interferograma, de los datos de deformación y desplazamiento más certeros (Fig. 71B). Como se mencionó en los métodos anteriores, se seleccionó un Modelo de Elevación Digital de origen externo como del SRTM, para eliminar la fase topográfica que genera errores por topografía. Además, el software selecciona el punto de control del suelo –GPC- para la corrección orbital, geocodificación y aplanamiento o desenvolvimiento de los interferogramas en función de los dispersores persistentes PS. En este procedimiento se calcula el mapa de coherencia gráfica completa que se utiliza para estimar la coherencia de todas las conexiones posibles y de los interferogramas generados con la pila de imágenes.

Procedimiento 3 (C): Procesamiento DINSAR. Con esta opción, se eligen los parámetros para el procesamiento DINSAR. Se estima la coherencia gráfica completa, como la coherencia espacial promedio del conjunto de interferogramas actuales generados. Posteriormente al cálculo de esta coherencia, se genera un interferograma entre la imagen Maestra y cada una de las imágenes Esclavas. También se puede generar un Interferograma Único libre para procesar y visualizar un interferograma entre la imagen Maestra y cualquiera de las imágenes esclavas.

Procedimiento 4 (D): Procesamiento Multi Imagen DINSAR. Una vez generados los Interferogramas, se reduce el ruido atmosférico mediante la estimación de la Atmospheric Phase Screen –APS-. Para esto, se seleccionan candidatos de Puntos Dispersos PS que son puntos de referencia que generalmente se coloca en una ubicación estable en términos de deformación del terreno, para estima los parámetros altura (m) y velocidad de desplazamiento del terreno (mm/año) y finalmente usa los residuos para recuperar el retraso de la Fase Atmosférica (ruido atmosférico). El software crea un gráfico de estimación de parámetros de altura absoluta (m) y velocidad de desplazamiento (mm/año) en la serie de tiempo estimada. Los candidatos a PS en el área urbana de La Mariscal, corresponden a las construcciones de los edificios existentes que permanecen estables en el tiempo tanto en radiometría como en la fase interferométrica (Roccheggiani et al., 2019).

La pila de imágenes utilizada fue el factor más importante para la estimación de coherencia de píxeles, ya que permitió identificar PS adecuados para el análisis de desplazamiento del terreno. El uso insuficiente de las imágenes producirá una sobreestimación de coherencia en toda la escena, lo

que dará como resultado una sobreestimación del PS, por lo tanto, en falsos desplazamientos. La identificación de PS generalmente se considera confiable cuando se usan 20 o más imágenes. La estimación del APS y el procesamiento PS-DINSAR se ve afectado por diferentes condiciones atmosféricas en el momento de la adquisición de las imágenes. La reducción del ruido atmosférico APS es importante ya que mejora la señal de respuesta en coherencia y fase de las imágenes para obtener datos de desplazamiento del terreno más precisos. Se estima utilizando filtros temporales espaciales. El APS estimado se eliminó de los resultados. Las fases restantes se usan para estimar el error de altura topográfica y la velocidad de deformación lineal.

Procedimiento 5 (E): Análisis multitemporal. A partir del procedimiento de reducción de ruido atmosférico anterior, se aplicó el análisis de interferometría de radar multi-temporal: MT-DINSAR para dispersiones persistentes (PS). Este procedimiento permitió la identificación de dispersores cuya señal es dominante dentro de la dispersión total de las celdas analizadas. Este es el último proceso en la generación del mapa de deformación y desplazamiento del terreno.

Consiste en la estimación de la tasa de deformación a partir de las series de tiempo obtenidas. Los mapas de deformación de series temporales obtenidos están formados por miles de PS. Cada PS está asociado con el valor de la velocidad lineal anual (mm/año), estimada durante el período analizado y el desplazamiento acumulado en cada fecha de adquisición del sensor. En esta fase nuevamente, para garantizar los resultados de altura, velocidad y desplazamiento acumulado, se redujo el ruido atmosférico que puede causar falsas señales e interpretaciones. Este ruido se redujo mediante la aplicación de la herramienta de estimación APS anteriormente descrita.

Un requisito previo en el análisis con PS-DINSAR es que las señales a lo largo de series temporales de imágenes SAR deben permanecer consistentes para la extracción de puntos PS y analizar su dispersión. En este caso, para medir el desplazamiento relativo y el desplazamiento acumulado en función de un punto de referencia, se seleccionó un punto estable (una construcción artificial anclada al suelo, por ejemplo) cuyo pico en el histograma tiene una altura residual de valor 0 que indica que este el punto de referencia está en el suelo (los puntos que no están en el suelo tienen más probabilidades de ser inestables). PS-DINSAR mide el movimiento relativo a este punto de referencia, por lo tanto, es importante seleccionar un punto que sea más estable como punto de referencia.En el caso del barrio La Mariscal, el programa eligió los puntos de Candidatos de Dispersión Persistente (PSC) en función de su ubicación en una red de conexión y en función de un valor umbral con una coherencia superior a> 0,8. Estos puntos son generalmente partes de estructuras civiles artificiales para analizar la dispersión de la estabilidad de amplitud alrededor de esos puntos, dibujando una red de conexión de puntos coherente (gráfico de conexión espacial de Delaunay). Este procedimiento estimó nuevamente la coherencia de las conexiones en los parámetros analizados en cada punto de la red con una tendencia lineal como la altura y la velocidad de desplazamiento. Finalmente, se obtuvo una alta coherencia temporal de las conexiones de puntos en la red.

Después de estimar los parámetros anteriores con alta coherencia, se eliminó el ruido atmosférico.

El análisis DINSAR aplicado parte de este Método, se realizó bajo el concepto de estimar el APS para reducir el ruido atmosférico y el análisis multitemporal de series de tiempo, con una pila de 32 imágenes (2015-2019) que permitió determinar el movimiento de la superficie topográfica de acuerdo con la variación de la fase para cada píxel en el tiempo. Se eligió el número de imágenes en la pila (32 imágenes) que mostró una coherencia mayor o igual a 0,65, (Fig. 71C). La estimación del ruido atmosférico APS con alta coherencia para todo el conjunto de puntos, mediante el uso de residuos invertidos (IR) y el análisis del ruido de otras fuentes, se procesó con una distribución espacial no lineal (pocos puntos, puntos demasiado dispersos o inexactitudes orbitales), asegurando que la coherencia final sea satisfactoria.

La velocidad integrada y el desplazamiento acumulado integrado se calcularon teniendo en cuenta que el desplazamiento acumulado = velocidad × tiempo. En el punto de referencia, el pico del histograma de velocidad integrado y el desplazamiento acumulado integrado tiende a cero. Esto significa que la mayoría de los puntos tienen una velocidad relativa cero cuando se acercan y se comparan con el punto de referencia. Los histogramas ayudaron a verificar que la velocidad de conexión y la altura residual de la conexión, al verificar la distribución del valor residual de velocidad / altura, sean consistentes como se ve en la Figura 72 A, B y C, en donde se ve un histograma sin saltos y alta coherencia (líneas de conexión con tendencia al rojo) (Fig. 72D).

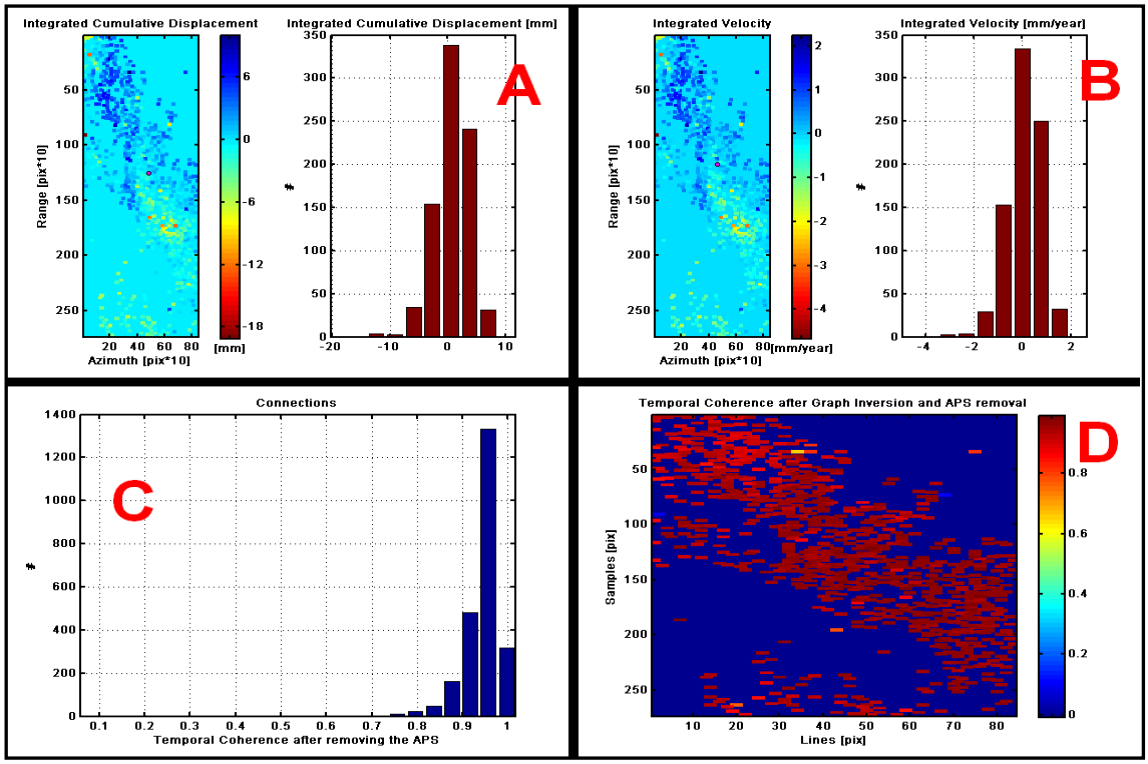


Figura 72. (A) Histograma integrado de desplazamiento acumulado de las conexiones, (B) Velocidad integrada, (C) Histograma de la Coherencia sin el ruido Atmosférico APS y (D) Coherencia temporal alta después de la eliminación de APS.

Posteriormente, se realizó un análisis de múltitemporal sin ruido atmosférico, basado en el "índice de estabilidad de amplitud" y desde un umbral desde el cual se eligió un conjunto de puntos de la red de conexión para calcular la serie temporal (5,277 puntos) (Fig. 73 A y B). La altura y la tendencia lineal de la velocidad de desplazamiento, se estimaron entre rangos probables de [−20, 60] y [−20, 60] (mm) respectivamente, para analizar la consistencia temporal de los datos seleccionados. En este caso, la consistencia de los datos fue alta, por lo que mejoró la estimación de los parámetros altura y velocidad de desplazamiento acumulado (Fig. 73C y D).

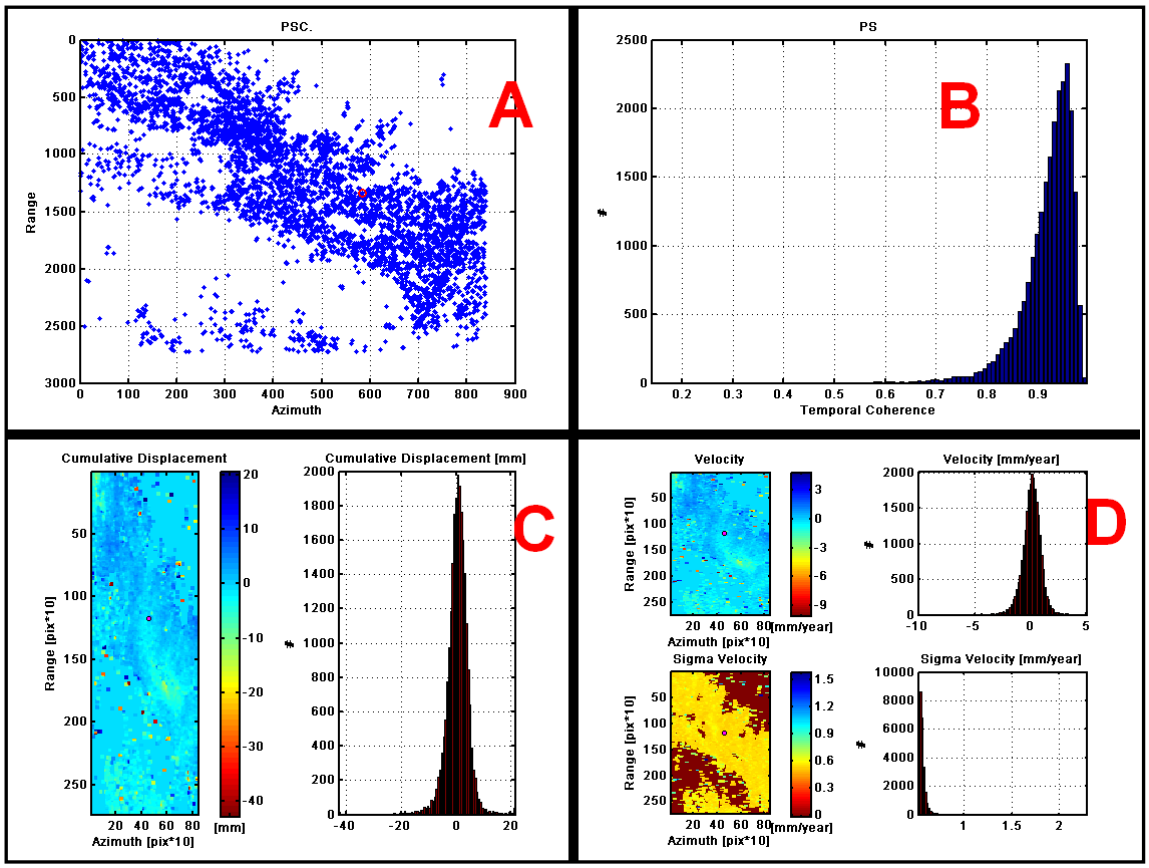


Figura 73. (A) Determinación de 5277 puntos para análisis de múltitemporal de desplazamiento del terreno sin ruido atmosférico. (B) Histograma de puntos dispersos para verificar el análisis multitemporal de coherencia para la estimación del desplazamiento acumulado (C) y la velocidad (D).

Los diagramas de dispersión se utilizaron para verificar que los resultados que se procesaron previamente en función de la coherencia y la estabilidad de los puntos dispersos en la red de tiempo calculados tengan también coherencia, en relación con un valor umbral de 0,8, obteniendo diagramas de dispersión de velocidad para cada punto en el área (Fig. 74A), el desplazamiento y la velocidad en una serie de tiempo entre 2015-2019 (Fig. 74B).

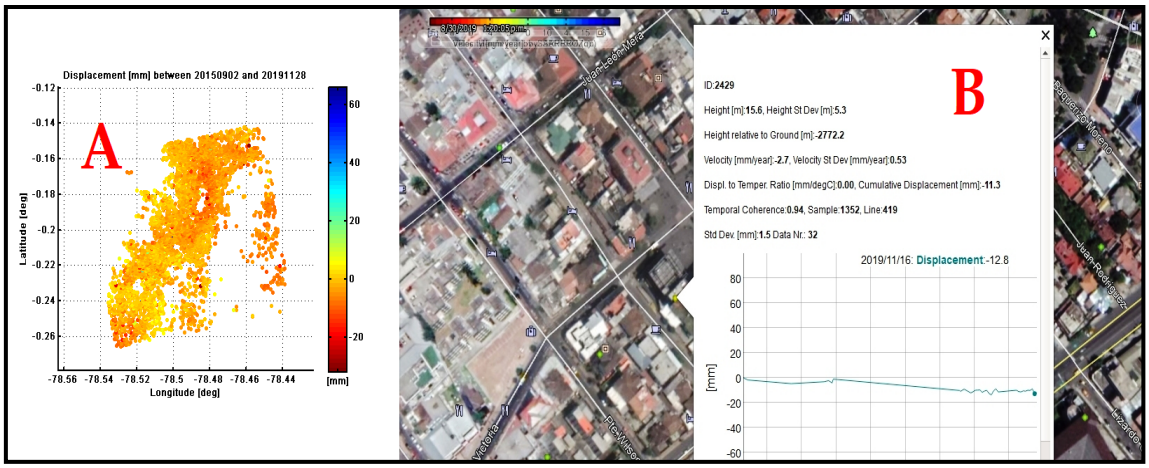


Figura 74. (A) Gráficos de dispersión de velocidad para cada punto del área. (B) Análisis de desplazamiento y velocidad en múltiples tiempos (serie 2015–2019).

Fase 2: Análisis de la Sintaxis del Espacio.

La Sintaxis del Espacio, es un conjunto de técnicas para analizar diseños espaciales y patrones de comportamiento de la actividad humana en edificios y áreas urbanas. Se basa en la idea de que todos los espacios en un entorno urbano están interconectados y que sus partes están unidas entre sí. Esto quiere decir que los espacios pueden dividirse en componentes, analizarse como redes de opciones, y luego representarse como mapas y gráficos que describen la conectividad relativa y la integración de esos espacios.

Este enfoque geográfico fue creado como una herramienta para ayudar a los arquitectos a simular los posibles efectos sociales de sus diseños, por Hillier, Hanson a fines de los años 70 y principios de los 80 del siglo pasado (Hillier & Hanson, 1984). Según Hillier & Vaughan, 2007, la Sintaxis del Espacio, se basa en concebir al espacio como función social, la cual define un sistema de barreras que regula el desplazamiento y la presencia humana en base a patrones sociales de comportamiento. Así, se describe al espacio mediante un conjunto de reglas geométricas de configuración, a saber: espacios convexos, en los que se puede ir en línea recta desde cualquier punto interior a otro sin salir del espacio; ejes axiales, que son las rectas que representan el desplazamiento más frecuente en él (calles, pasos peatonales, túneles, etc.), y las isovistas, que representan el campo visual de un observador dentro de un espacio convexo. Esto permite representar al espacio mediante grafos que componen una red urbana y analizarlo a partir de conceptos y herramientas simples (la configuración, la profundidad y la teoría del movimiento natural) que explican algunas de sus propiedades: conectividad, integración, elección e inteligibilidad. Dichas variables se usan para cuantificar la propiedad configuracional de un asentamiento urbano. El cálculo se focaliza en las relaciones que se dan entre los “nodos” que unen líneas axiales y los espacios axiales.

Según el mismo autor, en una escala urbana, la Sintaxis del Espacio considera el movimiento como una función genérica de espacios de nombres y calles y, por lo tanto; estos espacios se reducen a las líneas más accesibles que cubren todos los espacios convexos en un mapa, es decir; las líneas axiales o "líneas de visión".

Estos componentes básicos y sus relaciones de adyacencia pueden representarse mediante una red (nodos o vértices de un gráfico morfológico GA). El gráfico de GA constará de dos conjuntos de información; los vértices (que representan líneas axiales) VA = {vA1, vA2, ... vAn} y un conjunto de líneas LI = {lI1, lI2, ... lIL}, cada línea en el gráfico GA representa una intersección entre dos líneas axiales (dos vértices) de la red espacial. En función de estos conjuntos, la adyacencia espacial es la relación fundamental que caracteriza la forma en que podrían establecerse estructuras en un diseño espacial. Dos áreas, i y j, se consideran adyacentes en el gráfico dual GA, cuando es posible acceder a un espacio directamente desde otro, sin tener que pasar por espacios intermedios. En teoría de grafos, los gráficos GA se consideran gráficos duales, no Planar. No es direccional en eso; LK = (vi, vj) = (vj, vi).

En los mapas axiales, la profundidad se identifica como el cambio de dirección entre una línea axial y otra. La profundidad es topológica, es decir, no tiene valor geométrico. Los mapas axiales son representaciones sintácticas fundamentales en teoría, porque reflejan muchas propiedades estructurales de las redes urbanas de mapas de calles, es decir, longitudes de línea, inteligibilidad y sinergia (tan unitariamente como una ciudad) (Hillier, 1999).

Para analizar estas relaciones fundamentales sintácticas de los elementos espaciales urbanos básicos, se ha utilizado el programa de código abierto DepthmapX (Turner, 2001; Batty et al., 2003).

El objetivo del software es producir un mapa de elementos de espacio abierto, conectarlos a través de alguna relación (por ejemplo, intervisibilidad o superposición) y luego realizar un análisis gráfico de la red resultante de transito y concentración de la población. En la Figura 75 se puede ver el flujo del proceso utilizado para el análisis espacial con DepthmapX.

Con esta teoría, se puede predecir el comportamiento espacial humano en entornos urbanos y se puede analizar la morfología urbana (la forma de las ciudades). Además, los espacios urbanos se pueden dividir en componentes, que se analizan como redes de elección de la población en mapas y gráficos que describen la relación de integridad y conectividad de esos espacios (Penchev, 2015).

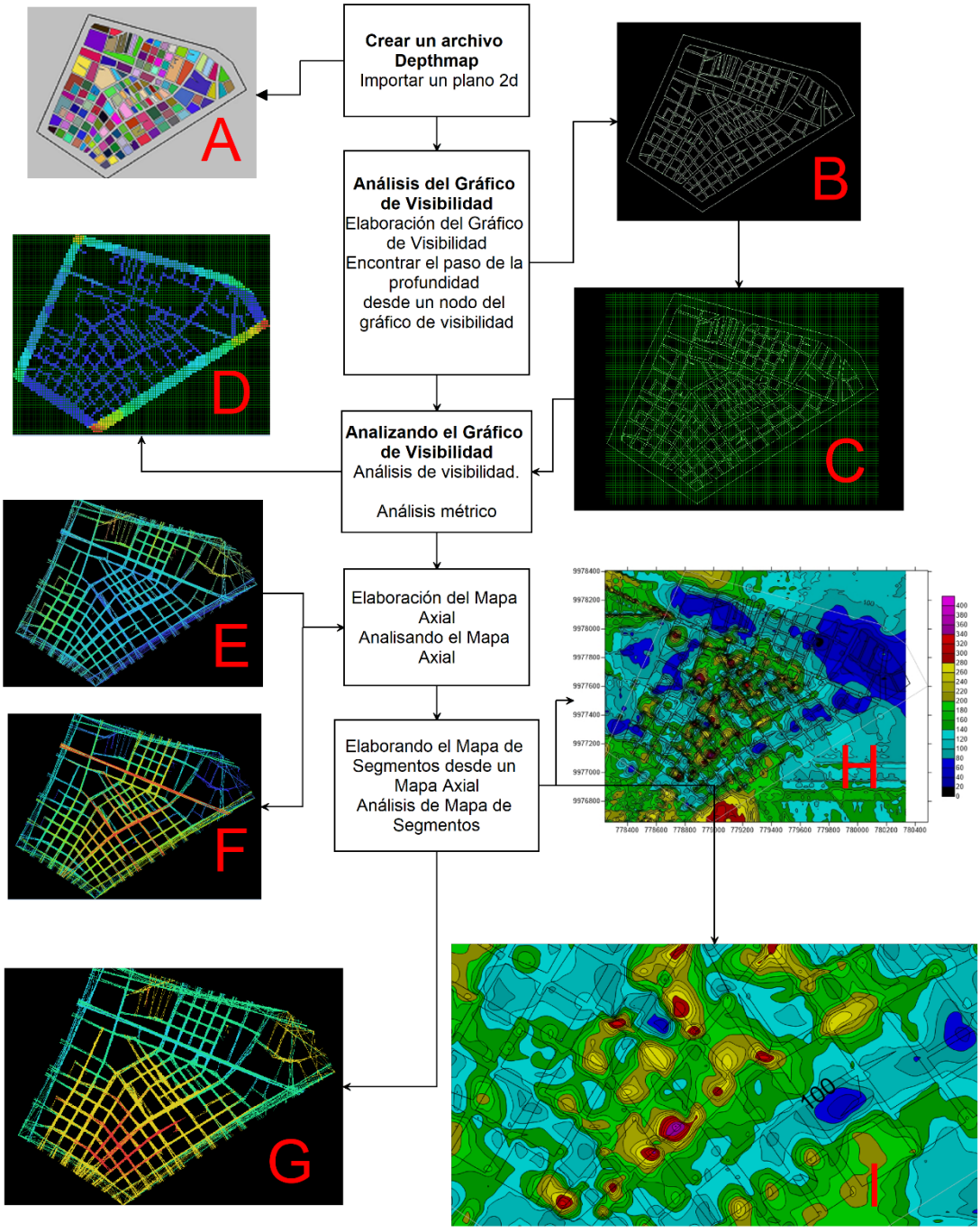


Figura 75. Diagrama de flujo de proceso con DepthmapX, utilizado para analizar las relaciones espaciales de los elementos urbanos básicos, de acuerdo con la teoría de la Sintaxis del Epacio. La descripción de cada proceso (A – I) se describe en el texto.

La Sintaxis del Espacio, se basa en dos componentes fundamentales (Hillier, 1999):

1) Representaciones espaciales: los elementos espaciales se representan a través de sus formas geométricas y de cómo los experimentar las personas. Pueden definirse por su geomtría en punto, línea axial, segmento, espacio convexo e isovista, o definirse por su funcionamisnto, por ejemplo, habitaciones en un edificio o almacenes en una ciudad. La Línea Axial, es la línea recta más larga que representa la extensión máxima de entre dos puntos en el espacio.

Esta línea axial puede encadenar dos polígonos o espacios convexos. Segmento, es la sección de la línea axial definida como calle o camino que se extiende entre dos intersecciones. Una Isovista, polígono de visibilidad o espacio visible, es un conjunto de todos los puntos visibles desde un punto de vista dado en el espacio con respecto a un entorno. La forma y el tamaño de una vista pueden cambiar con la posición. Espacio convexo o polígono, es el espacio en el que no se dibuja una línea recta entre dos puntos. Las líneas axiales y los polígonos convexos se encuentran como mapas axiales o mapas convexos.

2) Análisis de relaciones espaciales: las relaciones entre elementos espaciales resultan de su configuración. Estas relaciones pueden analizarse objetivamente utilizando diversas medidas, que incluyen la Conectividad, Integración, Elección y Profundidad:

Conectividad: Mide la cantidad de nodos que están conectados de forma directa a un nodo de origen (profundidad=1).

Integración: Mide la distancia topológica (grado de profundidad) de un nodo de origen a todos los otros nodos en un sistema. Los espacios muy integrados se representan en la gama del rojo, degradando hacia el violeta. El valor de integración i, es la inversa de la Asimetría Relativa (representa el grado de integración de un nodo en el sistema expresado en valores inversamente proporcionales, de modo que i=1/AR).

Elección (choice): Mide el flujo de movimiento a través de la red urbana a partir de evaluar los trayectos más cortos desde todos los orígenes a todos los destinos y el menor cambio angular. Sirve para conocer el potencial movimiento de peatones y vehículos.

Inteligibilidad: Es el coeficiente de correlación entre conectividad e integración. Determina la capacidad para comprender la estructura global de la red desde una posición local.

Estas medidas reflejan los dos elementos fundamentales en el movimiento humano: primero, la selección de un destino y, segundo, la selección de una ruta. El primero, mide la facilidad de acceso (integración) y el segundo mide el flujo de pasos (elección). La Integración “n”, mide cuántos giros deben realizarse desde un segmento de una calle para llegar a todos los demás segmentos de las calles en la red, utilizando las rutas más cortas. Si se analiza la cantidad de giros necesarios para llegar a todos los segmentos en el gráfico, el resultado es el análisis que mide la integración en el radio 'n'), y la elección, que representa el número de intersecciones que deben cruzarse para llegar a una calle y la distancia de profundidad que es la distancia lineal desde el punto central de cada segmento de calle hasta los puntos centrales de todos los demás segmentos.

La accesibilidad a los parques, zonas verdes y edificios, se lleva a cabo a través de las calles y los espacios abiertos y es un índice para saber cómo se mueven las personas alrededor de estos elementos arquitectónicos. En este caso estamos interesados en conocer las relaciones de visibilidad, tránsito y concentración de las personas.

El mapa de profundidad, determina el movimiento o tránsito y concentración de la población (permeabilidad) a todas las áreas del barrio, en función de la ocupación del suelo, que es la condición prioritaria para que una estructura de diseño urbano sea funcional (Batty et al., 2003).

En este caso del barrio La Mariscal, se ha trazado una representación de la estructura espacial del límite de barrio en un mapa convexo de casas 2D (plano topográfico) y la estructura del espacio abierto de los bloques o manzanas del barrio.

Teniendo en cuenta que un Mapa Axial, es el conjunto mínimo de líneas que pasan a través de cada espacio convexo y que son las que forman los enlaces axiales, el Espacio Urbano (Fig. 76A) se representa por un conjunto de líneas axiales más pequeñas, más largas y transitables (Fig. 76B). Las líneas axiales están representadas por un gráfico con diferentes valores de puntos de vista (Fig. 76C), y conectividad (grado) para cada vértice que las interseca y que son resaltados de la siguiente manera: Los vértices que tienen más conexiones con sus vecinos inmediatos tendrán mayor conectividad (Fig. 76D). Estos valores de conectividad se iluminan en el mapa axial para revelar la estructura de la red local de los espacios de las calles (colores tendentes al rojo) (Fig. 77A). Las líneas axiales que se representan en el gráfico (E), se destacan por sus valores de cada conectividad de vértice (grado). Los vértices que tienen más conexiones con sus vecinos inmediatos y de mayor conectividad se representan en la Figura 77B. Estos valores de conectividad con tendencia hacia el rojo, en el mapa axial revelan también la estructura de la red local en la relación calles-espacios vacios (Fig. 78A) que generalmente son los que muestran un mayor movimiento de personas y densidad de peatones. En la Figura 78B se puedne ver los patrones de la relación conectividad-deformación del suelo obtenido de análisis DINSAR y el Tránsito - Densidad peatonal, patrones que se representaron en un mapa ráster de detallado en la Figura 78C para predecir las zonas de concentración de actividades sociales y económicas que pueden ser afectado por un terremoto.

La accesibilidad a los edificios se realiza a través de calles y espacios abiertos, que son indicadores para saber cómo se mueven las personas alrededor de estos elementos arquitectónicos. Finalmente, los mapas de intensidad de visualización y la densidad de flujo de peatones, se transformaron a formatos de cuadrícula de trama (Fig. 78C), para luego integrarlos con los mapas de desplazamiento acumulado obtenidos con DINSAR y predecir la peligrosidad de los edificios en donde la población desarrolla actividades sociales-económicas diarias, que pueden verse afectadas por un terremoto de intensidad mayor a 7.2 Mw (Silva et al., 2017).

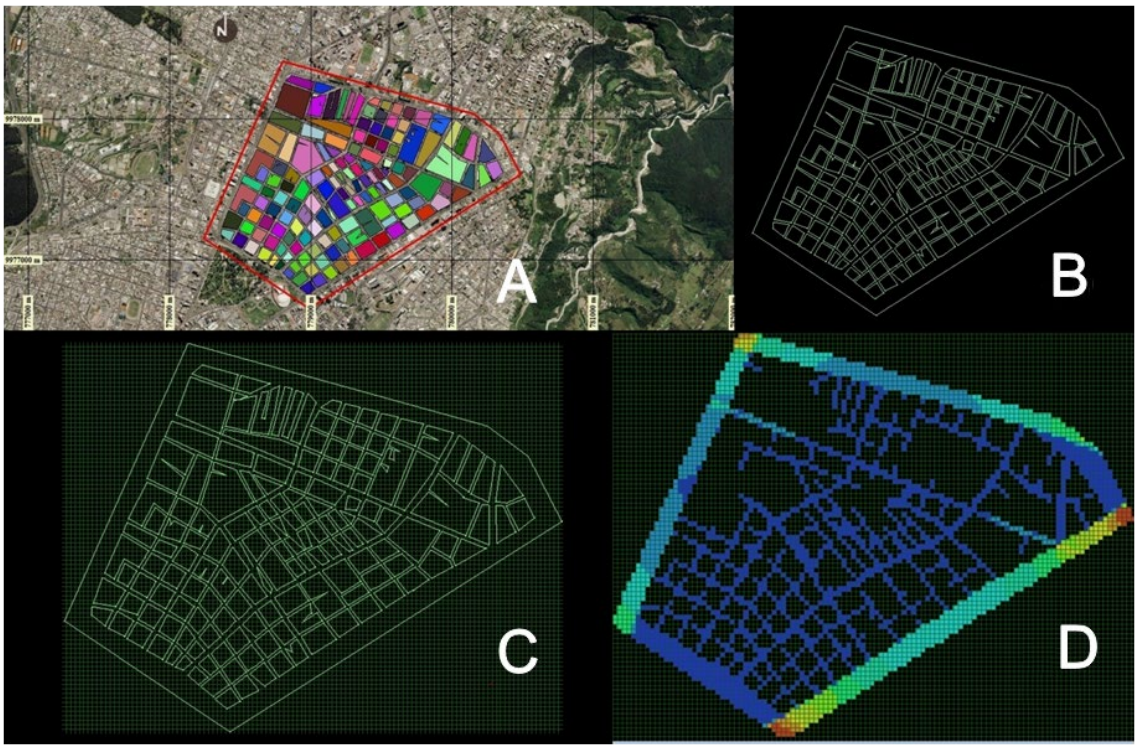


Figura 76. Productos obtenidos para obtener el mapa de profundidad con DepthmapX. (A) Mapa base topográfico. (B) Líneas axiales. (C) Gráfico de red para la ubicación de puntos de vista. (D) Mapa de Integración de visualización.

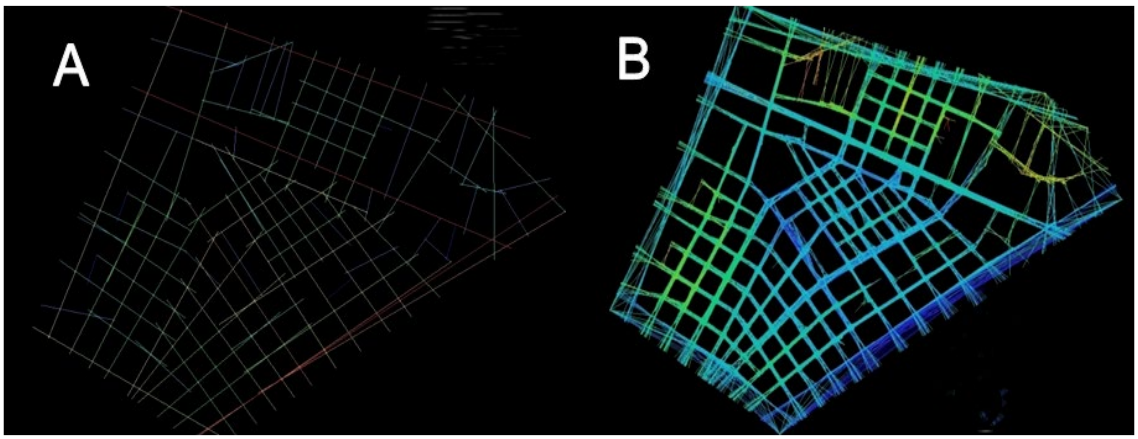


Figura 77. Productos obtenidos para obtener el mapa de profundidad con DepthmapX. (A) Líneas axiales conectivas por vértices o nodos axiales. (B) Valores de mayor conectividad de vértices con sus vecinos inmediatos.

En este análisis, se integraron espacios abiertos (parques, vías verdes, reservas, etc.), incluidos espacios abiertos públicos (calles y plazas) y espacios abiertos privados (jardines, parques infantiles) (Turner et al., 2005). En caso de un terremoto mayor, estas áreas abiertas se convierten en un refugio para las víctimas y un hogar temporal para miles de personas que necesitan adaptarse rápidamente a su nuevo entorno durante días, meses o incluso años después del terremoto.

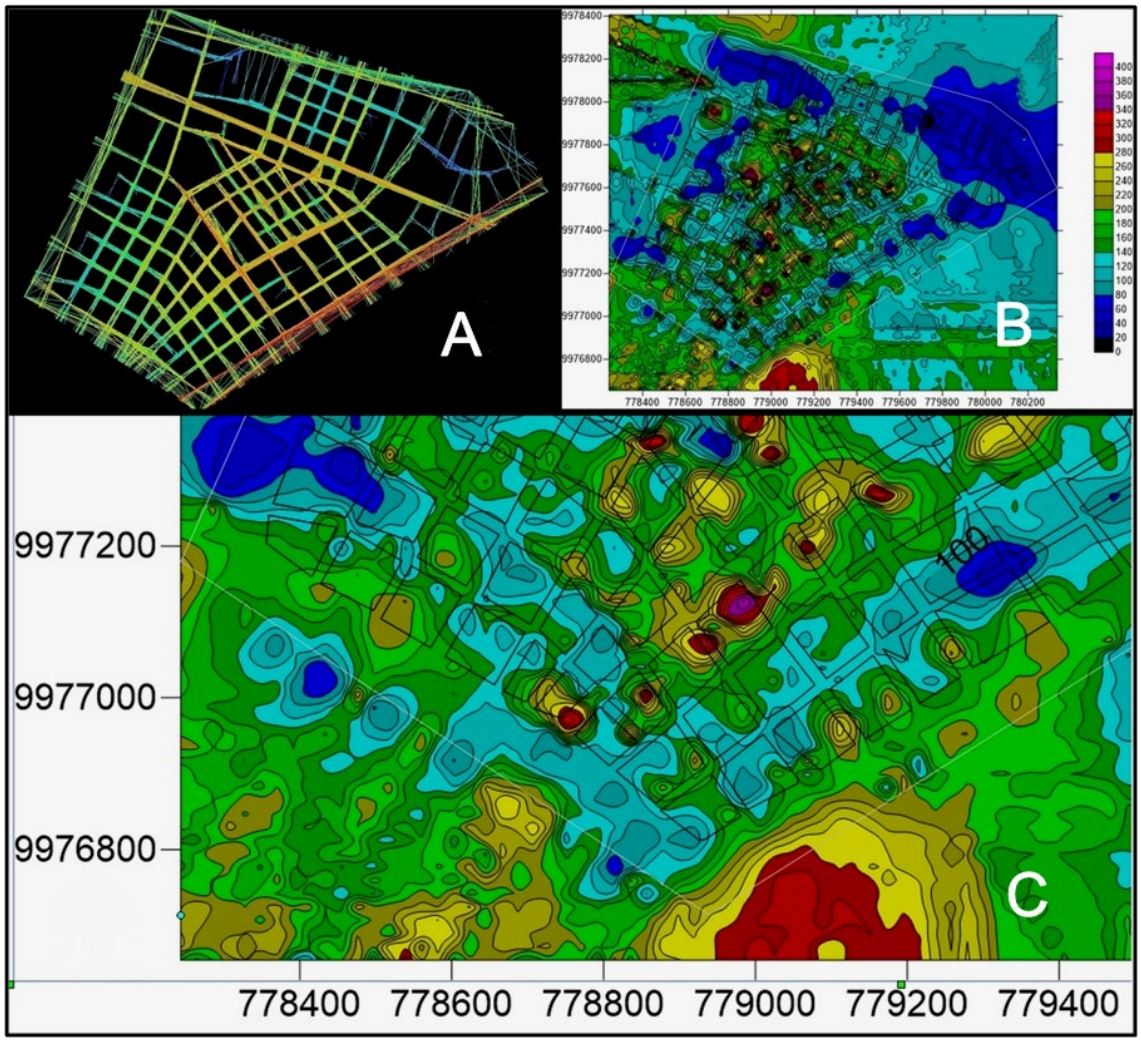


Figura 78. (A) Valores de conectividad con tendencia hacia el rojo en el mapa axial de mayor movimiento de personas y densidad de peatones. En (B) patrones de la relación conectividad-deformación del suelo- tránsito - densidad de población. En (C) detalle de los Patrones ráster de conectividad-deformación del relieve- tránsito - densidad de población.

Esta metodología también se centra en "la proyección de la ciudad después del terremoto", que se define como una proyección del sistema estructural urbano que puede verse afectado por su destrucción parcial o total y la creación de áreas no accesibles (fracturas en estructuras civiles, hundimientos y colapsos) (Bostenaru et al., 2015).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se muestran los resultados y la discusión de los mismos en función de la aplicación de las diferentes metodologías en varios sectores estudiados de Ecuador, España y Guatemala. Estos resultados se presentan de forma sintetizada en los diferentes artículos publicados.

3.1 Resultados Aplicación Método Modelado numérico de patrones de flujo aplicados al análisis del peligro por movimientos del suelo.

El Método numérico de patrones de flujo se calibró en varias zonas de estudio, con el mecanismo descrito anteriormente, y se obtuvieron patrones de flujo para 5 Modelos de Elevación Digital con resoluciones espaciales de 65, 32, 30, 10 y 3 m respectivamente, que finalmente fueron integrados en una sola imagen y posteriormente fueron relacionados con deformaciones cuaternarias superficiales del terreno comprobados en el campo, con fallas regionales activas y con eventos de movimientos en masa en los sectores de calibración, Esta relación se puede ver en las Figuras 79, 80 y 81.

Las deformaciones cuaternarias obtenidas en la zona de prueba 1, desde El Cadial hasta Angas en la provincia de Bolívar, Ecuador y la comprobación de campo, permitió validar de manera rápida, con bajo costo y alta precisión los resultados obtenidos, en función de la intensidad de lineamientos estructurales derivados de la generación de patrones de flujo y líneas de rotura morfológica que han puesto en inestabilidad a los sectores.

El Método de patrones de flujo del SRTM de 65 m de resolución de la Figura 79, determinó inicialmente patrones amplios de lineamientos estructurales relacionados con tectónica activa y con deformaciones superficiales en las Unidades Estructurales Regionales y de Paisaje influenciados por fallas geológicas regionales e intrusivos graníticos emplazados y erosionados en la zona.

Los patrones de flujo obtenidos de los Modelos de 32 m del AsterGdem y de 30 m de resolución espacial del IGM-IRD de la Figura 80A y B, presentan resultados similares con deformaciones más detalladas en paisajes de montaña relacionadas con tipos de deslizamientos rotacionales, traslacionales y caída de bloques.

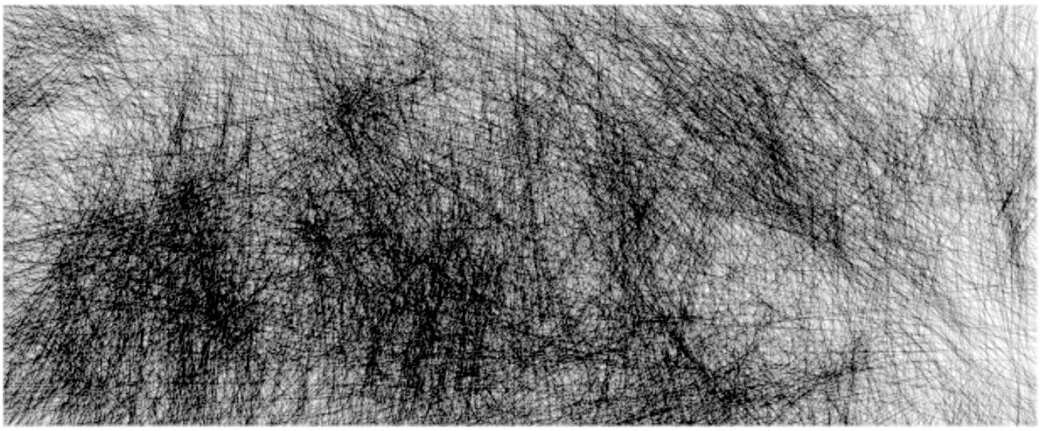


Figura 79. Patrones de flujo obtenidos del SRTM de 65m

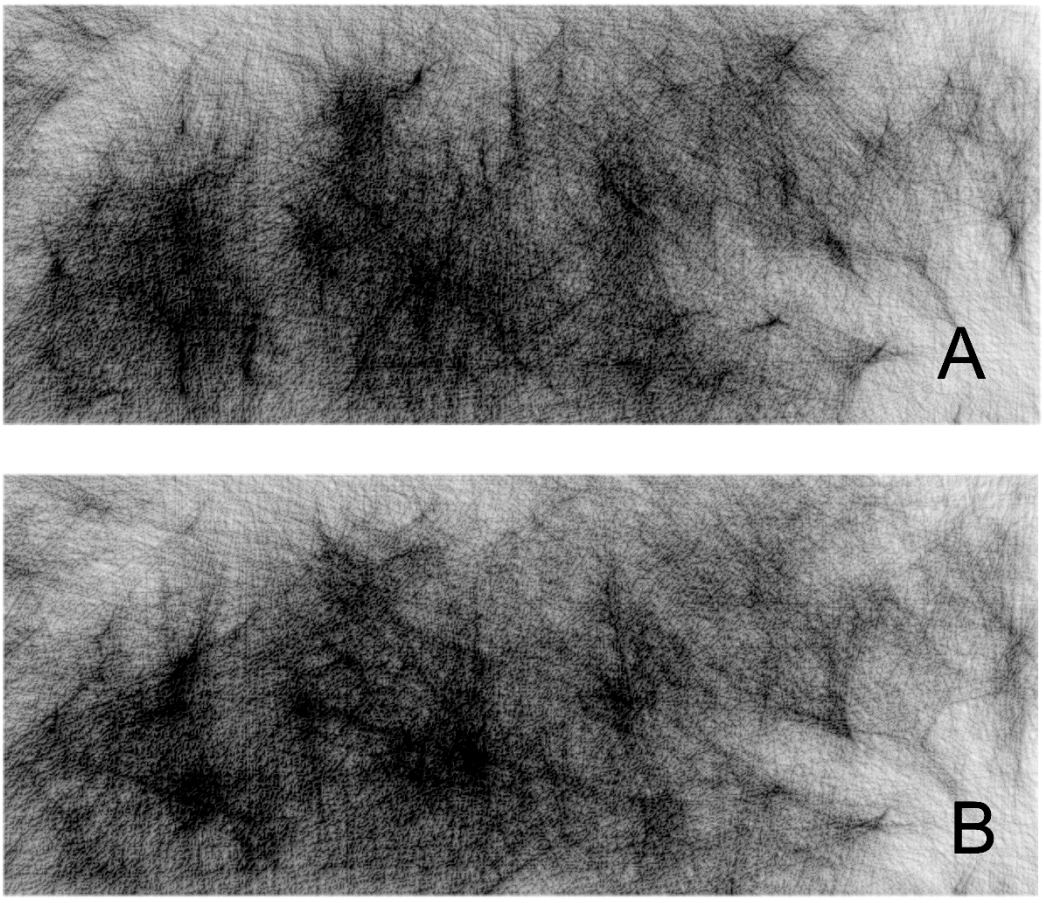


Figura 80. En (A) Patrones de flujo del AsterGdem de 32 m de resolución espacial. En (B) Patrones de flujo del IGM de 30 m de resolución espacial.

Los Modelos con 10 m de resolución espacial de Telespazio y de 3 m de SIGTIERRAS de las Figura 81A y B, mejoraron sustancialmente el detalle de las deformaciones y sus relaciones con movimientos en masa del tipo flujo en quebradas y vertientes erosionadas. Por la alta resolución espacial del Modelo de Elevación Digital, se logró mejorar la relación del peligro de estas deformaciones con los tipos de movimientos en masa y con las poblaciones del sector y sus sistemas agroproductivos.

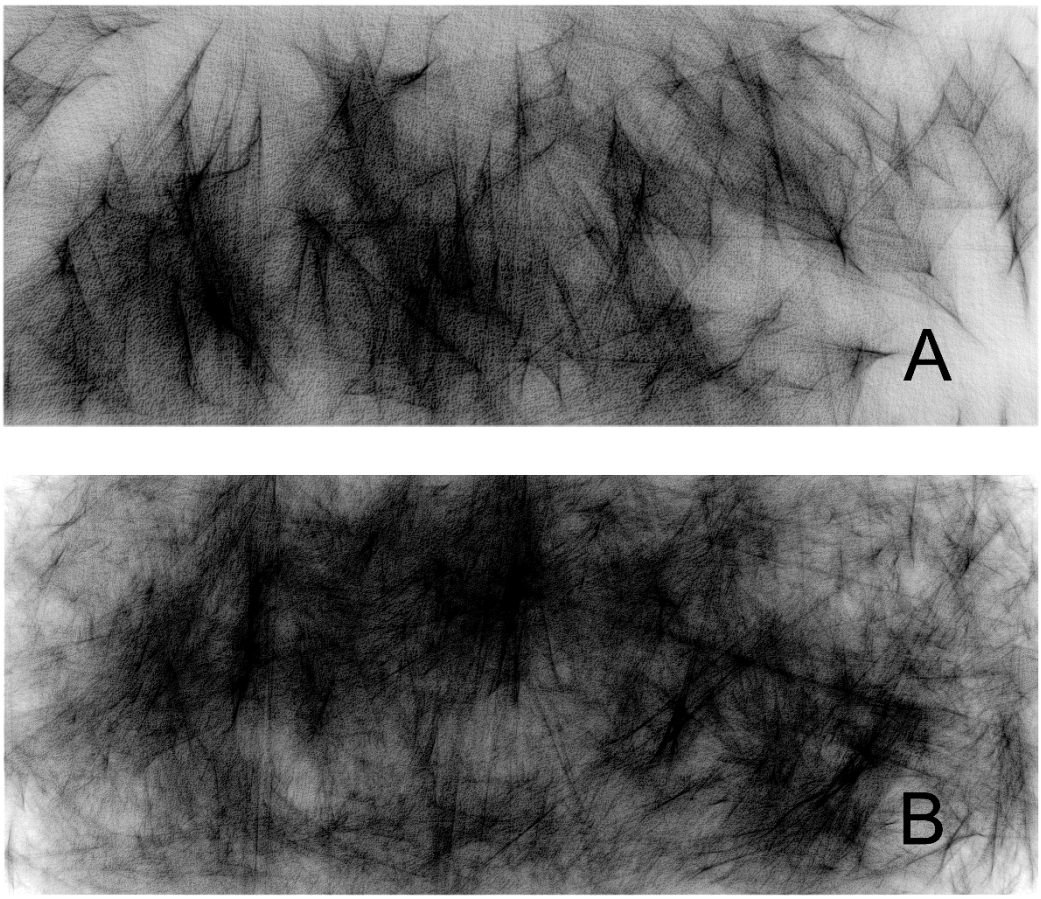


Figura 81. En (A) Patrones de flujo de Telespazio de 10 m de resolución espacial y en (B) de 3 m de SIGTIERRAS.

La integración final de estas líneas de flujo, de rotura morfológica y concentración de las mismas, en una sola imagen de la Figura 82, permitió identificar lineamientos estructurales y fracturas que fueron relacionadas y comprobadas en reconocimiento de campo, lo que validó la relación entre los estos rasgos geológicos y varias tipologías de movimientos en masa, que generalmente se encuentran en zonas deformadas o sobre estos lineamientos y fracturas. Los valores más altos con tendencia al color rojo, presentan mayor deformación del relieve con hundimiento. Los colores con tendencia al azul sin valles.

La delimitación de los tipos de movimientos en masa como deslizamientos rotacionales, traslacionales y caídas de bloques está intrínsecamente relacionada con estos lineamientos estructurales y fracturas superficiales extraídas con este método como se puede ver en la Figura 83. En la Figura 84 A, B y C, se pueden observar los planos de traslación-rotación de deslizamientos y zonas de caídas de bloque en geoformas de altas pendientes.

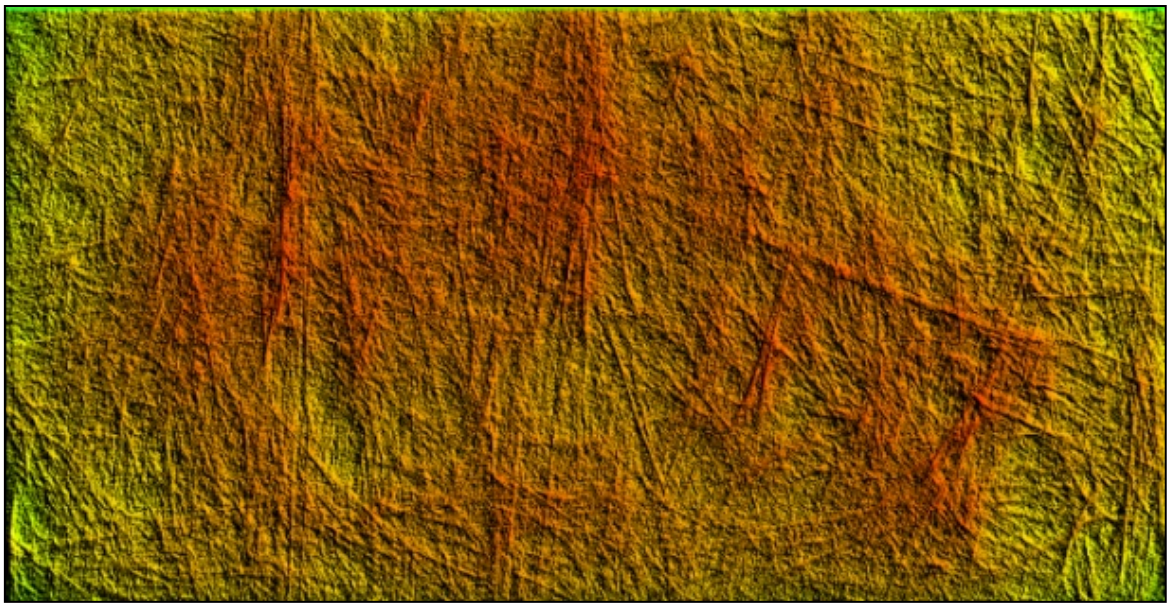


Figura 82. Integración en una sola imagen de los lineamientos estructurales y fracturas obtenidas de los Modelos de Elevación Digitalde varias resoluciones

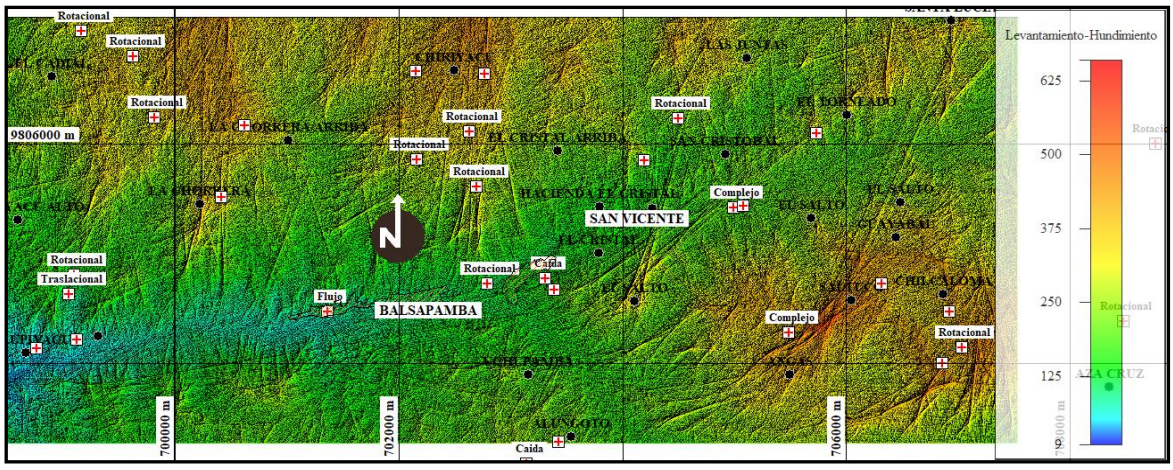


Figura 83. Integración total de todos los patrones de acumulación de flujo y de rotura morfológica, relacionados con estructuras geológicas, deformaciones gravitacionales del terreno y tipos de movimientos en masa.

La delimitación de los tipos de movimientos en masa como deslizamientos rotacionales, traslacionales y caídas de bloques está intrínsecamente relacionada con lineamientos estructurales y fracturas superficiales extraídas con este Método.

Otros sitios de calibración y comprobación del primer método, en el mismo sector, se presentan en unidades estructurales de las vertientes de la Cordillera Occidental de los Andes y primeras estribaciones, corredores deprimidos y valles en garganta, que permitieron reformular los límites de estas unidades estructurales relacionadas con procesos de deformación tectónica intensa. Es en estas unidades estructurales de alta montañas, donde se originan los problemas que repercuten en el piedemonte y llanura aluvial, hasta tal punto que de la estabilidad y sustentabilidad de estas unidades depende la sustentabilidad de las partes bajas.

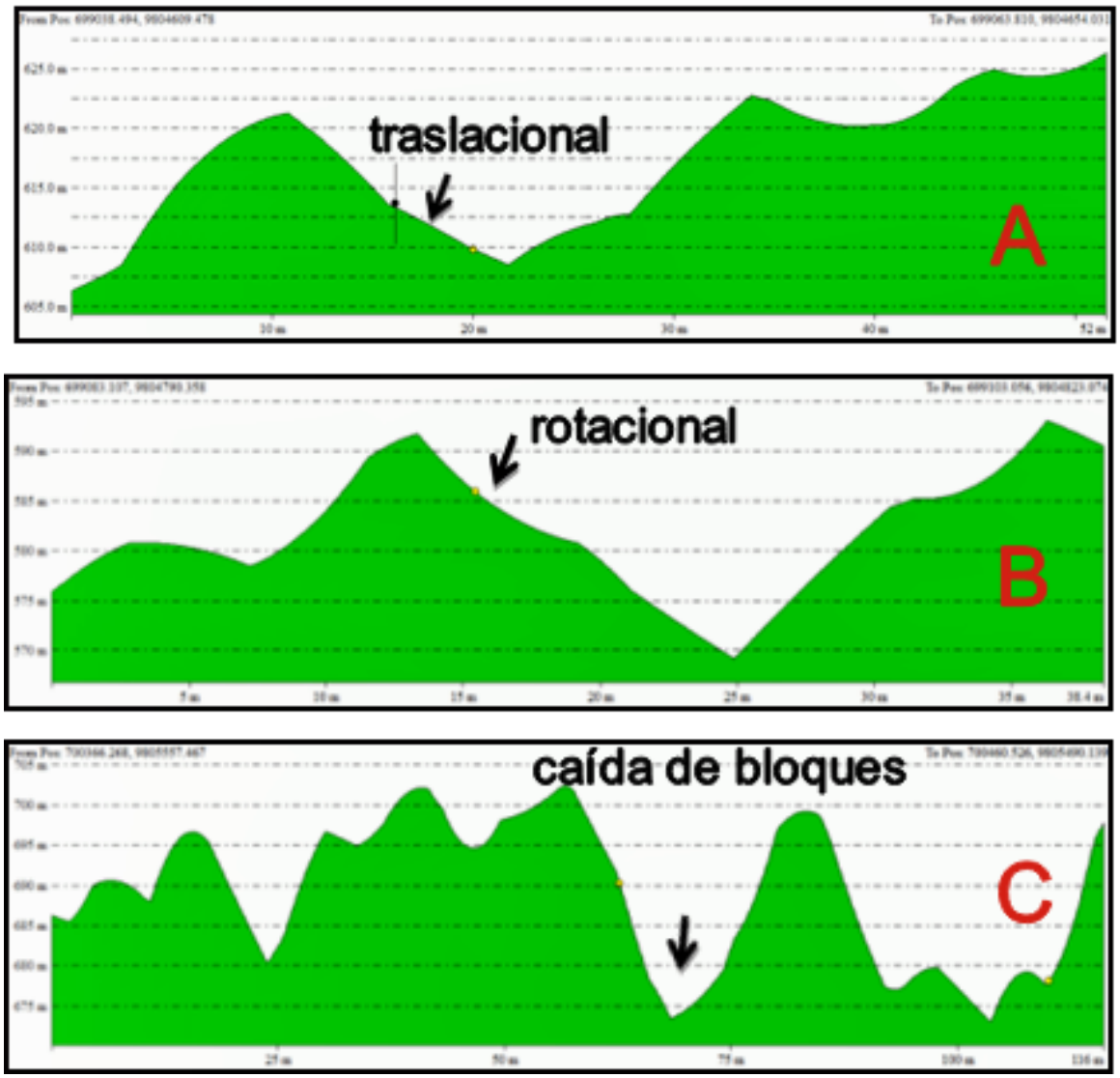


Figura 84. Planos de tipos de movimientos en masa. En (A) Planos de traslación, (B) rotación y en (C) zonas de caída de bloques.

La ubicación espacial de estas zonas deformadas, ayudó a confirmar el estado de deformación del relieve fracturado, con alto grado de meteorización y por lo tanto de fácil transporte que representan marcadores de inicio de zonas de desestabilización de las geoformas con el consiguiente proceso de erosión-movimiento de masa desde las zonas de recarga y cabeceras de los drenajes en vertientes altas, con caída de bloques, flujos aportantes de transporte de masa en los taludes de las vertientes medias y piedemonte y finalmente del depósito de masas arrastrados y formación de cauces de los drenajes principales en la llanura aluvial.

En estas unidades estructurales, se han producido deformaciones de varias magnitudes desde pequeñas áreas hasta regionales, como procesos de hundimiento-levantamientos rápidos o subsidentes en largo periodo de tiempo. Este tipo de deformaciones (Figura 85, Figura 86, Figura 87 y Figura 88), se identifican en las montañas posiblemente por su fracturación debido al material intrusivo.

En estas imágenes se pueden ver detalles del relieve topográfico antes y después de la aplicación del primer método, para obtener deformaciones y lineamientos estructurales. Se presentan intensas concentraciones de líneas de flujo y de rotura morfológica de deformación del relieve cóncavos y convexos que implican zonas de montes de presión meteorizados y deformados que terminarán en coluviones activos y potenciales relacionados con deslizamientos con planos de rotación, traslación, expansión lateral en suelos y rocas, en geoformas con pendientes entre el 25% al 45% y mayores. Las zonas y superficies de erosión lineal, reptación y solifluxión se encuentran relacionadas con zonas en pendientes del 5% al 25%. En la Figura 85 se puede ver una proyección de la aplicación del metodo, con un Modelo de Elevación Digital de 3 m de resolución espacial en vertientes convexas. En (A) se encuentra el talud real con deformaciones naturales del relieve, quiere decir el estado actual. En (B), detalle del talud y sobrepuesta la capa de intensidad de deformación del relieve, en donde se pueden visualizar procesos de deformación tectónica como fracturas en sentido de la pendiente del talud natural y transversales en forma de líneas de rotura morfológica, capaces de producir caídas de bloques, deslizamientos y flujos de masa. En esta imagen corresponde a un talud convexo presionado y fracturado junto a vertientes cóncavas también fracturadas.

La Figura 86, presenta la aplicación del metodo, para la determinación de tipos de movimientos en masa en una vertiente cóncava. En (A) el talud natural con señales de intensa concentración de deformación del relieve con valores negativos o cóncavos, que implican posiblemente zonas de antiguos deslizamientos que terminarán en coluviones activos y potenciales y flujos de masa, incluyendo caída de bloques. En (B) la proyección del estado final del talud después de aplicar el método, en donde se determinaron deslizamientos rotacionales, de traslación, flujo de masa y caída de bloques.

La Figura 87, presenta la aplicación del metodo, para la determinación del tipo de movimientos en masa en vertientes mixtas. En (A) el talud natural con señales de intensa concentración de deformación del relieve que se presentan como cicatrices antiguas de deslizamientos y flujos de masa medianos y de gran magnitud, que ocasionarán la producción de coluviones activos y potenciales, además de deslizamientos con planos de rotación, traslación, expansión lateral en suelos y rocas, reptación y solifluxión. En (B) la proyección del estado final de los taludes después de aplicar el Método 1, en donde se determinaron potenciales deslizamientos, flujo de masa y caída de bloques mencionados.

Un caso especial fue la determinación de zonas de reptación y solifuxión en paisajes de alta montaña como se puede ver en la Figura 88. Los flujos de acumulación de la escorrentía superficial del agua de precipitación generaron el desplazamiento masivo y lento por gravedad de formaciones arcillosas sobre el permafrost a causa de la plasticidad y fluidez adquirida por estos suelos por sobresaturación.

En estos mismos sectores se pudieron determinar zonas reptables por variación de la humedad estacional en el suelo, lo que favoreció que el agua actúe como lubricante, además del aumento del peso del suelo, generalmente terminando en flujos de barro.

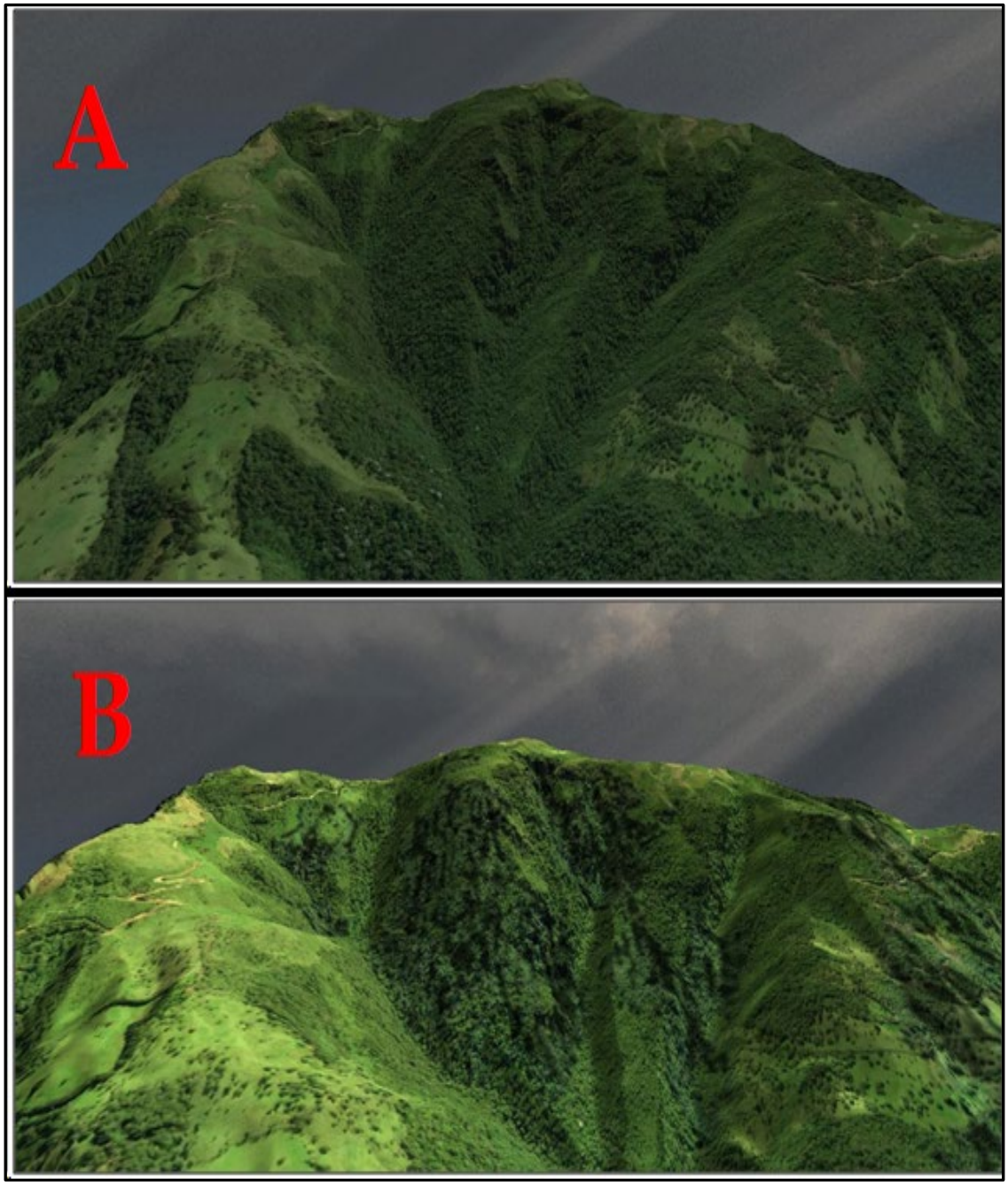


Figura 85. Aplicación del primer metodo, para determinar deformaciones del terreno en vertientes convexas. En (A), detalle de un talud natural sin sobreponer la capa de intensidad de deformación del relieve. En (B), detalle del talud natural sobrepuesta la capa de intensidad de deformación del relieve en donde se pueden visualizar procesos de deformación tectónica proyectados.

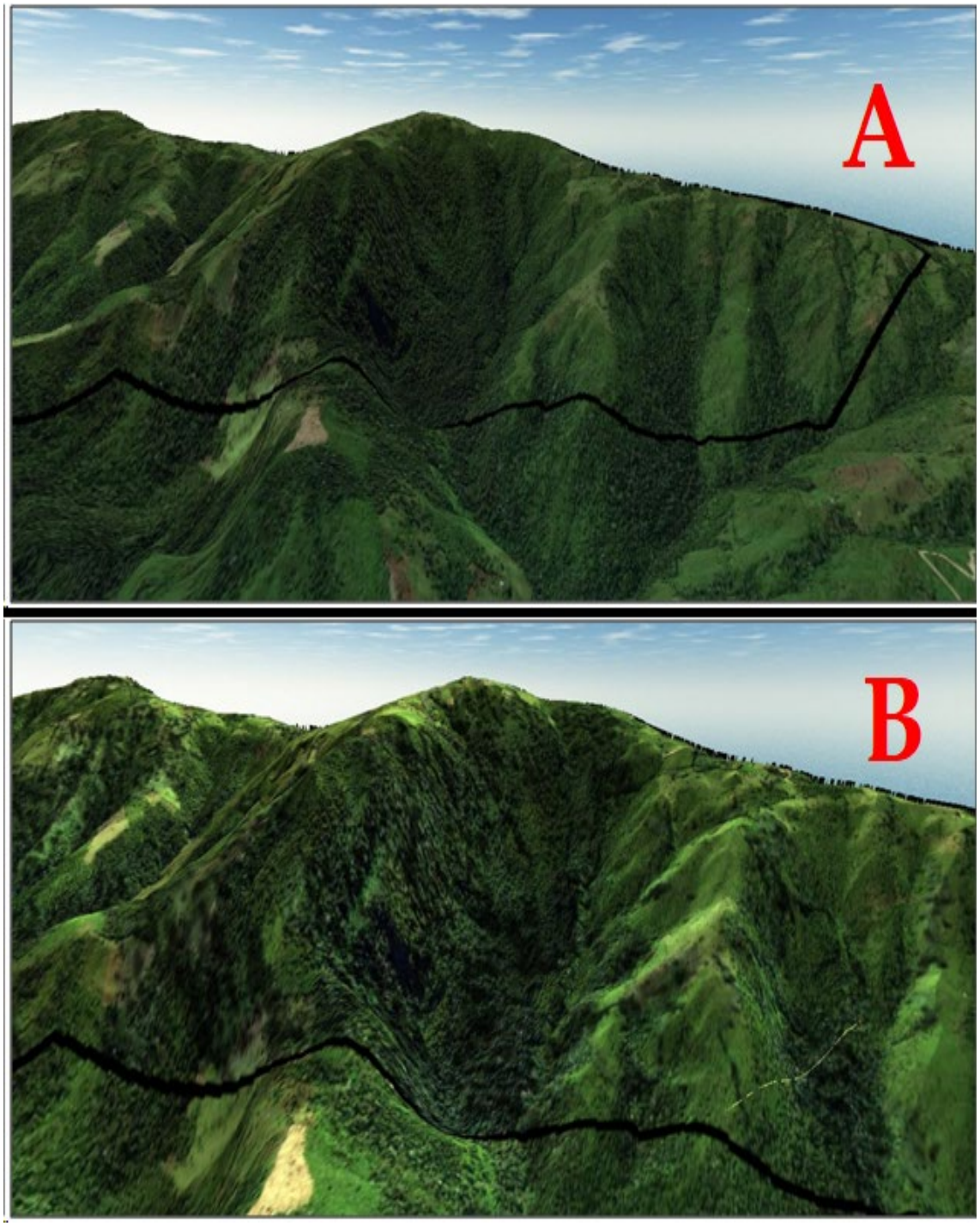
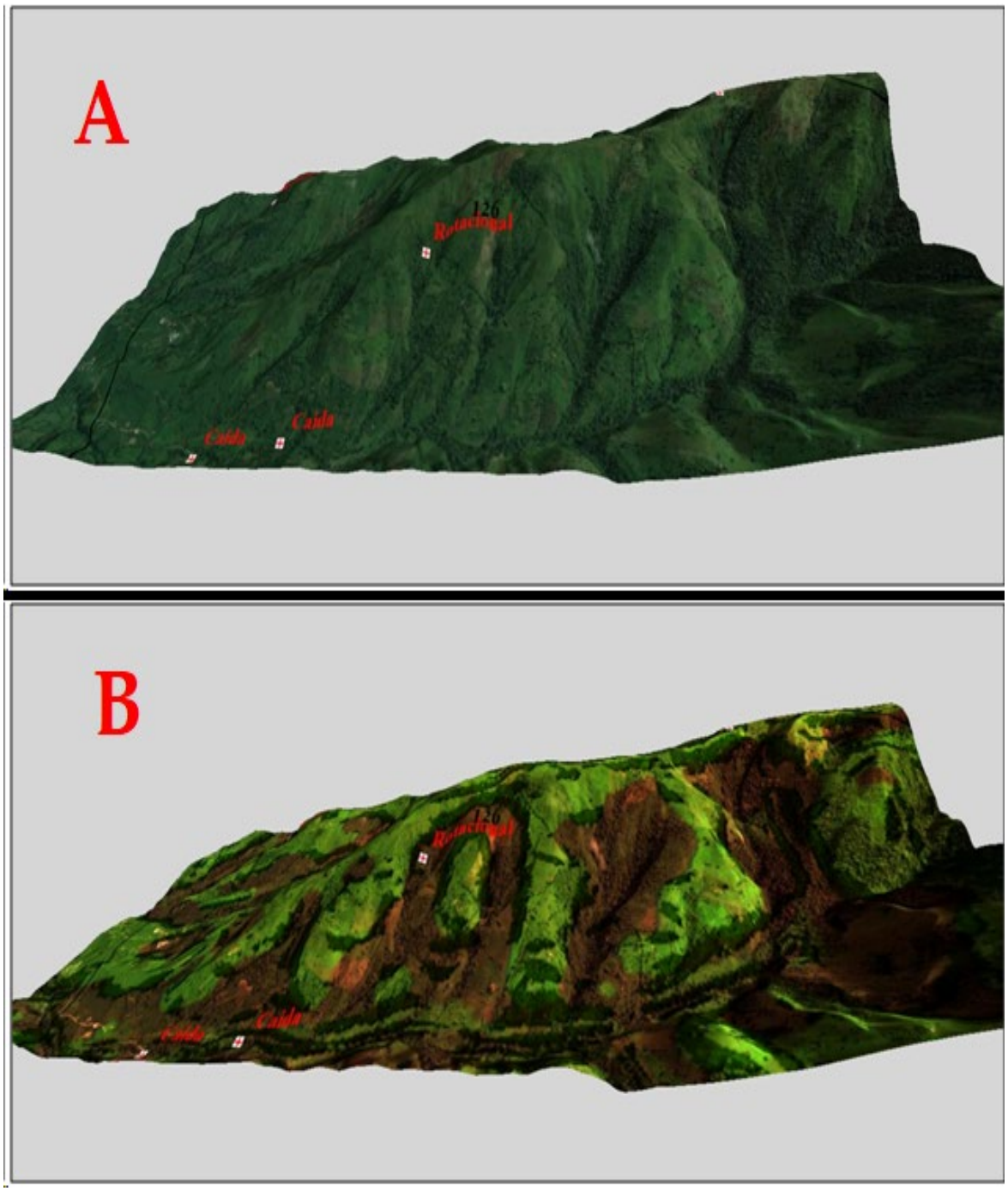


Figura 86. Aplicación del Método 1, para determinar deformaciones del terreno en vertientes cóncavas. En (A) El talud natural sin sobreposición de la capa de intensidad de deformación del relieve. En (B) procesos de deformación tectónica en taludes cóncavos con deformación tectónica en sentido de la pendiente del talud natural.



Figuras 87. Aplicación del Método 1, para la determinación de tipos de movimientos en masa en vertientes mixtas. En (A) El talud natural con señales de antiguos deslizamientos y flujos de masa, antes de aplicarse el Método. En (B) Proyección del estado final de la geoforma después de aplicar el Método, en donde se determinaron deslizamientos rotacionales, de traslación, flujo de masa y caída de bloques.

En esta Figura 88 se aprecia que los flujos de acumulación de la escorrentía superficial del agua de precipitación que inician su tránsito en las partes altas de las microcuencas, son los causantes más importantes en la erosión de los taludes ya que penetran en las geoformas y mueven masas del complejo roca-suelo inestables, deformadas, meteorizadas o con intensa actividad de deforestación y cambio en el uso del suelo.

Esto ha provocado desde sistemas de erosión laminar leves, erosión lineal, cárcavas profundas y quebradas originando movimientos en masa de pequeña, medianas y de gran magnitud. El mantenimiento de las coberturas vegetales originales, es la mejor recomendación para reducir este tipo de fenómenos y mantener estables los taludes.

Los resultados de la aplicación de esta metodología, se comprobaron en más de 300 puntos de control de campo.

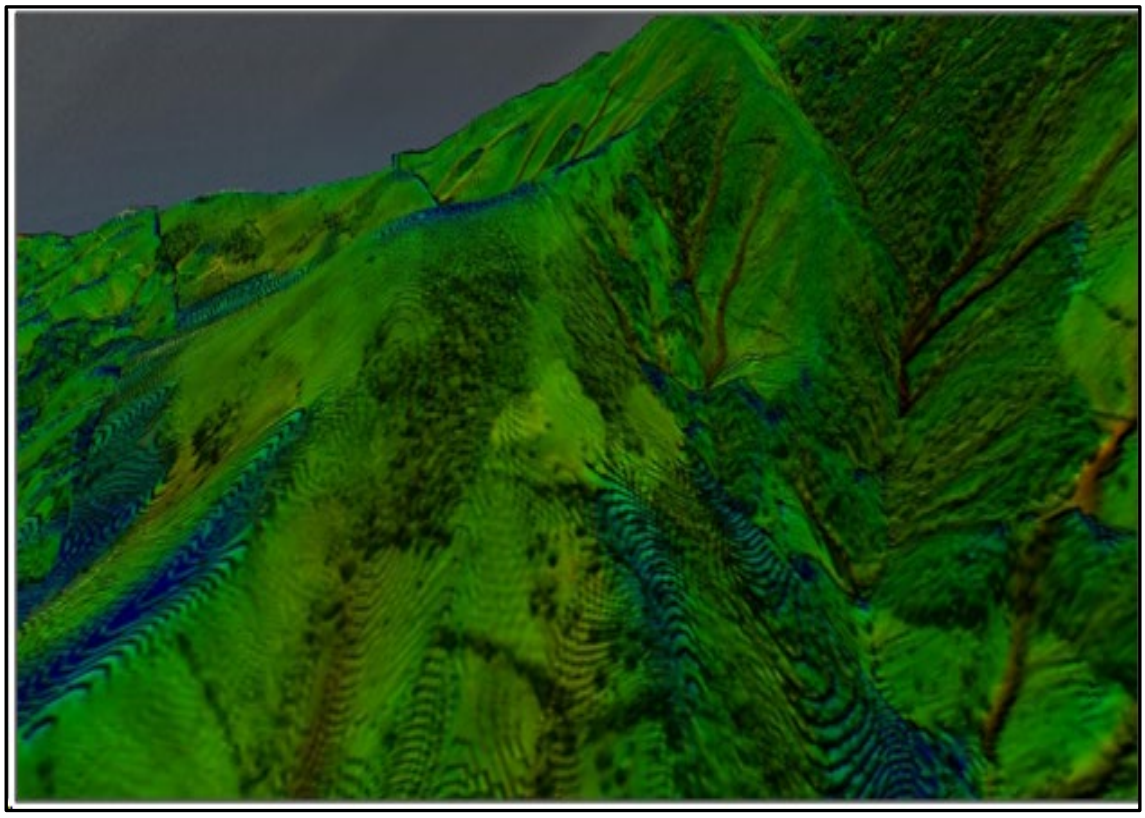


Figura 88. Flujos de acumulación de la escorrentía superficial de aguas lluvias implementados desde SAGA GIS (flujos de color verde-ocre), se encuentran asociados a sistemas de erosión de taludes por reptación- solifluxión (franjas concentradas circulares perpendiculares al talud natural de color azul y café).

3.1.1. Discusión del método del modelado numérico de patrones de flujo aplicados al análisis del peligro por movimientos del suelo.

El método estandarizado por la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos-SGR, utilizando criterios heurísticos y ponderación de variables para evaluar el peligro por movimientos en masa, no identifica lineamientos estructurales geológicos, rupturas morfológicas, líneas, fracturas y deformaciones en relieve superficial. Tampoco identifica diferentes tipos de movimientos de masas, hundimientos y hundimientos específicos en áreas pequeñas. Sin embargo, estos mapas son una referencia base para incorporar en ellos los rastros geomorfológicos mencionados, obtenidos con el método propuesto que usa direcciones de flujo y líneas vectoriales con magnitud y dirección. También traza líneas de ruptura morfológicas utilizando valores de pendiente, orientación de la pendiente y curvaturas planas y longitudinales en software de licencia pública como SAGA y Arcview, y en software comercial como Surfer y Rockworks 7 utilizados en este análisis. De esta forma, a nivel geomorfológico, se obtuvieron trazas de manera rápida, a diferencia del método heurístico con variables ponderadas, y métodos analógicos como el análisis de Mora Varhson que necesita una cobertura temática más amplia y una mayor cantidad de tiempo para su procesamiento.

Los Modelos de Elevación Digital de m, 5 m y 3 m de resolución espacial utilizados fueron suficientes para obtener zonas de deformación en relieve basadas en lineamientos estructurales y fracturas en relieve. Estas zonas de deformación posiblemente presentan características geomecánicas débiles, de poca resistencia, capaces de generar movimientos en masa por lluvia como en la Zona 1, o por terremotos con más de 6 puntos en la Escala de Richter, como el los que sacudieron la costa ecuatoriana (2016) y Arenas del Rey, Andalucía, España (1884). Estos casos se detallaron en el artículo 1 publicado.

Este método se puede usar con MDE de diferentes resoluciones espaciales con rangos de 1 m (Lidar) hasta grandes resoluciones obtenidas de SRTM, AsterGdem, ALOS-PALSAR, Open Topography, y GTOPO 30, entre otros servidores.

La facilidad para obtener Modelos de Elevación Digital de sitios públicos para su análisis morfodinámico, permitió una rápida obtención de resultados para delimitar fronteras de inestabilidad y áreas seguras que se pueden utilizar para ubicar puntos de encuentro, rutas espaciales y áreas seguras para movilizar a la población en caso de este tipo de peligro. La aplicación de este Método puede fortalecer el funcionamiento de los sistemas de alerta temprana para estos tipos de peligros.

3.1.2. Conclusiones del método del modelado numérico de patrones de flujo aplicados al análisis del peligro por movimientos del suelo.

Este primer método aplicado a la zonificación de la peligrosidad por movimientos de masa, basado en las direcciones de flujo y líneas de rotura morfológica obtenidas con el Modelo Hidrológico Básico D8 Básico, utilizó Modelos de Elevación Digital de varias resoluciones espaciales, procesados con software libre y comercial, facilitando la identificación y localización rápida de lineamientos geológicos estructurales, fracturas superficiales, áreas de deformación del relieve y diferentes tipos de movimientos de masa.

Una característica especial del método, es la capacidad para obtener lineamientos estructurales, fracturas y deformaciones del relieve superficial, que dependiendo de la resolución espacial del Modelo de Elevación Digital, es posible extraer características geomorfológicas ocultas como calderas volcánicas extintas, cicatrices de movimientos en masa antiguos, relieves deformados por rocas intrusivas, montes de presión fracturados y laderas deformadas-erosionadas, canales de erosión, entre otros rasgos geomorfológicos.La ubicación de áreas deformadas por concentración de lineamientos estructurales y fracturas del relieve, obtenidas por este método, fue verificado con 300 puntos de control de campo, lo que corroboró los resultados. Se puede decir con certeza, que este método propuesto, a diferencia de los métodos estandarizados y analógicos, es económico, con un alto grado de precisión y se puede aplicór en cualquier región geográfica antes de un ocurra un desastre causado por movimientos en masa, y activados por lluvias intensas o terremotos mayores a 6 Mw, por lo tanto, este Método puede usarse como un mecanismo de prevención y pronóstico a través de mapas de lineamientos estructurales, fracturas y deformaciones cuaternarias del relieve con sus movimientos en masa asociados.

Este método determinó varios tipos de movimientos en masa, como deslizamientos, flujos, caída de bloques, reptación y solifluxión, lo que permitió evaluar el grado de vulnerabilidad de las poblaciones ubicadas en o cerca de estos peligros y predecir hundimientos, colapso estructural, deslizamientos de en taludes cercanos incluyendo procesos de meteorización erosión. Esto posibilitó la elaboración de mapas de peligrosidad para su posube reducción y minimizar el Riesgo Geológico. El método y sus productos servirán para fortalecer la planificación municipal del territorio, así como de sus unidades de Gestión de Riesgos, mejorando los protocolos de respuesta y reducción de riesgos.

Este método, se ha sintetizado en el artículo 1: Numerical modeling of flow patterns applied to the analysis of the susceptibility to movements of the ground, en donde se recogen todas las ideas y aplicóciones en territorio para determinar las zonas susceptibles a movimientos en masa con este enfoque aplicódo en dos sectores de Ecuador y uno en España. Esta metodología constituye la base de los métodos posteriores descritos en esta Tesis, puede ser un complemento importante de los métodos cartográficos-heurísticos y otros métodos más

refinados para determinar movimientos en masa, basados en los parámetros reológicos como densidad, cohesión, ángulo de fricción interno de las partículas, así como de softwae especializado basados en criterios de estabilidad como la teoría Mhor-Coulomb o Flow-2D y otros. El interés en la aplicación del método básico, es el estudio en detalle de los mecanismos de generación de los patrones de flujo de la escorrentía superficial del agua de precipitación y líneas de rotura morfológica, como generadores de movimientos en masa a partir de zonas de meteorización, transporte y depositación de sedimentos que en su trayectoria generalmente, causan inestabilidad de las geoformas, aumentando el riesgo geológico de poblaciones y sistemas de infraestructura estratégica de una región.

3.2 Resultados de la determinación de las rutas de flujo de lahares primarios y secundarios de un volcán utilizando parámetros morfométricos.

El análisis de interferometría de radar de apertura sintética diferencial (DINSAR), basado en imágenes el Sentinel 1, mostró que para esa época 3 de junio de 2018, en el volcán de Fuego, existió poca deformación del terreno por magmatismo antes de la erupción, pero había bastantes subsidencias en los flancos del volcán que se activaron por el tránsito y depósitos de material laharítico.

Esta falta de deformación magmática corrobora los estudios realizados por varios investigadores en los volcanes del área (Ebmeier, 2013) que atribuyeron la ausencia de deformación a las diferencias en el almacenamiento de magma en relación con otros arcos volcánicos continentales. La ausencia de deformación magmática antes de los lahares puede significar que la intrusión del magma no es el detonante de los mismos. Lo más probable es que la lluvia intensa haya sido el factor causante para que ocurran los lahares secundarios.

En la Figura 89A se puede ver una imagen de Global word después de la erupción del 3 de junio de 2018 y los posibles sitios de origen proximal desde donde iniciaron los lahares secundarios en las quebradas Barranca Honda, Las Lajas, río el Jute, quebrada Las Cañas, río Achicuate, río Ceniza, zanjón Santa María y El Jute, quebrada y zanjón Barranca Seca.

En la Figura 89B se pueden ver las deformaciones actuales del terreno obtenidas con la Metodología DINSAR. Los colores hacia el rojo, pasando por los tonos iridiscentes, significan mayor deformación del terreno. En la figura 90 (A), se puede ver que la mayor deformación superficial del terreno en los flancos del volcán se encuentra en los puntos P1 y P2 de mayor concentración de este color, a diferencia de los puntos P3 al P7 en donde la distribución de esta iridiscencia tiene mayor esparcimiento, lo que da la idea de mayor dispersión y flujo de los sedimentos volcánicos.

El posible punto de partida de los lahares se puede clasificar según su origen y la dirección hacia donde han fluido, como hacia el Este, desde los puntos de máxima deformación del terreno actual P1 y P2, en la que los sedimentos volcánicos sueltos fueron arrastrados por las lluvias intensas y fluyeron por la quebrada Barranca Honda. A la época actual es en esa zona en donde se siguen produciendo lahares destructivos.

Los puntos P3 y P4 son sitios en donde se han originado lahares históricos que se han dirigido al Sur-Sureste, desde antes de junio de 2018 hasta la actualidad, por las quebradas Las Lajas, Las Cañas, río El Jute y quebrada Playa Trinidad.

Hacia el Suroeste se han generado lahares que han transitado por el río Achiguate, río Ceniza, zanjón Santa María, río Taniluyá, río Tempiscal, quebrada y zanjón Barranca Seca.

El Sitio P5-P6 es un caso especial de generación de un lahar primario muy actual desde el cráter del volcán, con dirección Noroeste marcado por la deformación obtenida con DINSAR.

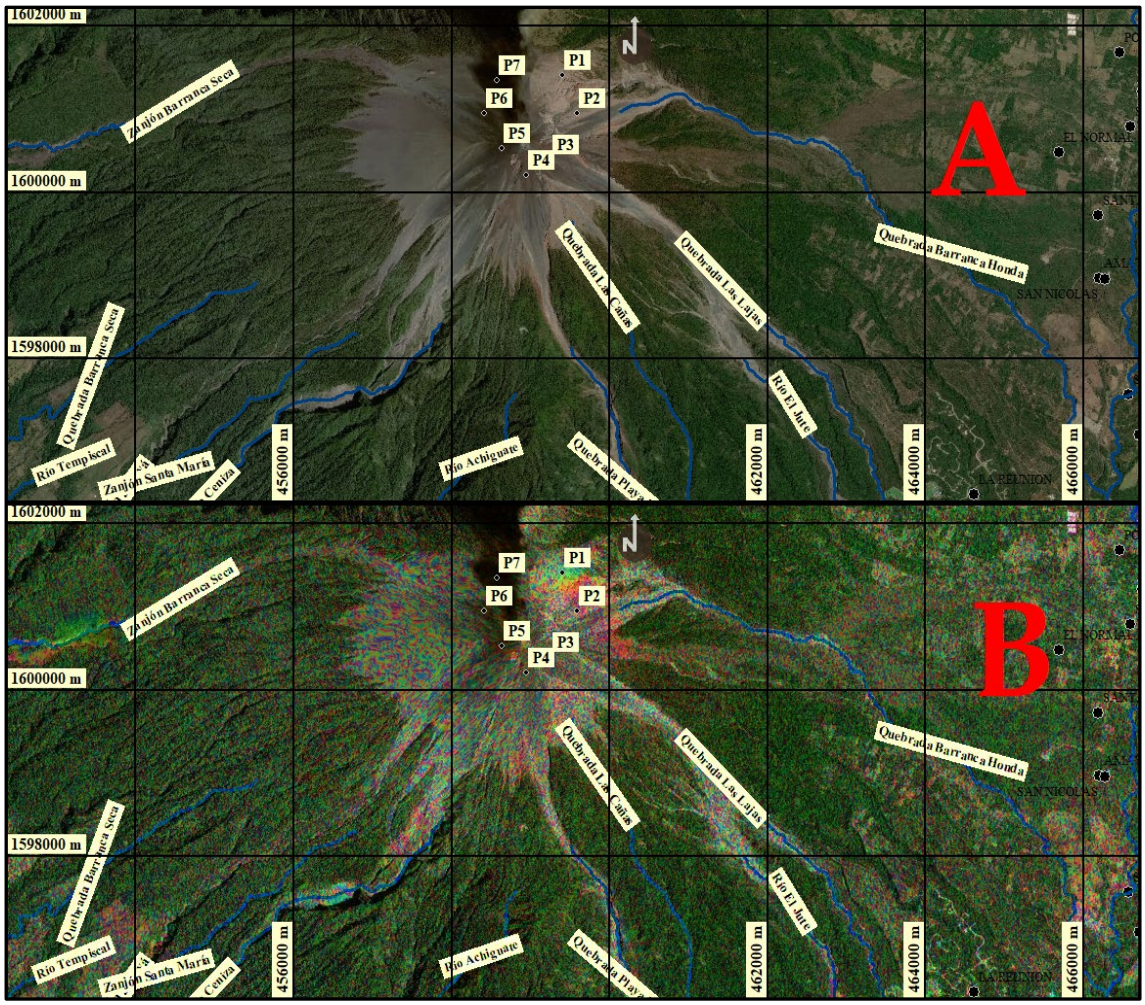


Figura 89. Deformaciones del terreno obtenidas por análisis DINSAR, posibles orígenes de lahares secundarios. En (A) los puntos de inicio de lahares secundarios del P1 al P7 en todas las direcciones. En (B) las deformaciones que dieron origen a los lahares secundarios desde el 3 de junio de 2018.

En la Figura 90, se pueden ver las deformaciones actuales del terreno obtenidas por análisis DINSAR con mayor detalle y los posibles orígenes de lahares actuales en deformaciones recientes del relieve. En (A) los puntos de inicio de lahares secundarios desde P1 a P7, desde la quebrada Barranca Honda al Este, hasta el zanjón Barranca Seca al Oeste. En (B) las deformaciones que dieron origen a los lahares secundarios desde el 3 de junio de 2018.

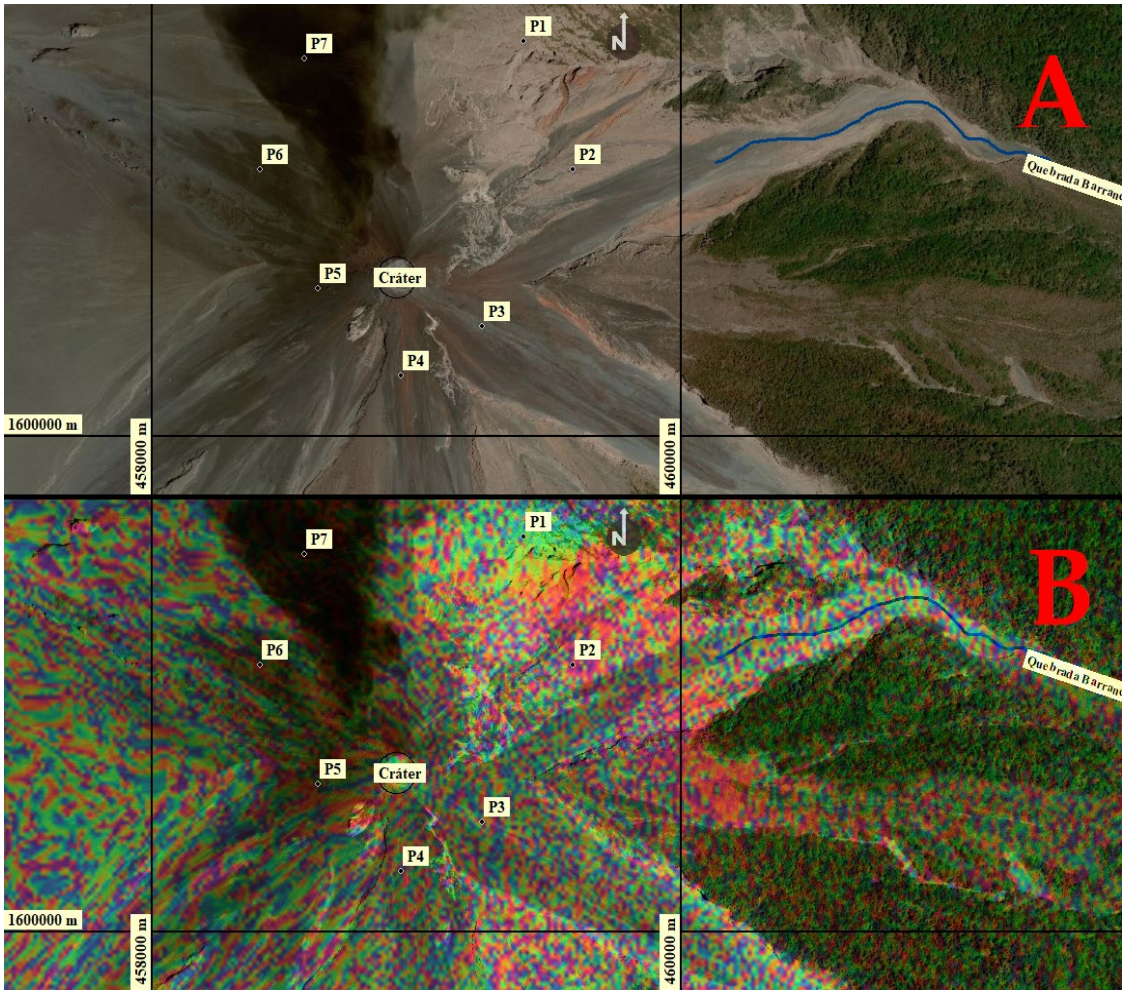


Figura 90. Deformaciones del terreno obtenidas por análisis DINSAR. Posibles orígenes de lahares actuales en deformaciones recientes del relieve. En (A) los puntos de inicio de lahares secundarios desde P1 por la quebrada Barranca Honda. al P7 en todas las direcciones. En (B) las deformaciones que dieron origen a los lahares secundarios desde el 3 de junio de 2018.

El análisis de estabilidad en las laderas del volcán con SHALSTAB, determinó que las zonas cerca del volcán fueron los más inestables con una calificación de inestabilidad cuasi estable a crónica, con la ocurrencia de canales de erosión por donde fluyeron los lahares y donde hubo mayor destrucción como es el caso de El Rodeo, San Miguel, Monte María y sectores cercanos al río Guacalate (Figura 91A).

El relieve en los flancos del volcán es muy irregular, posiblemente con áreas levantadas y hundidas debido al cambio morfológico permanente resultante de las erupciones y flujos de lahares que han ocurrido. En (B), se presenta un detalle de las áreas cercanas al volcán que son las más inestables, con una calificación de casi estable a inestabilidad crónica (Muy Alta a Alta inestabilidad). Inestabilidad debido a la erosión de los canales en los que los lahares fluyeron, se desbordaron y causaron inundaciones con la destrucción de la infraestructura civil principalmente en La Reunión, Santa Clara de las Lajas, Monte María, y sectores cercanos al río Guacalate.

Los colores rojos negativos y la tendencia hacia –10 son áreas inestables y las zonas positivas son estables con colores hacia el azul y valores con tendencia hacia 10. El valor es adimensional.

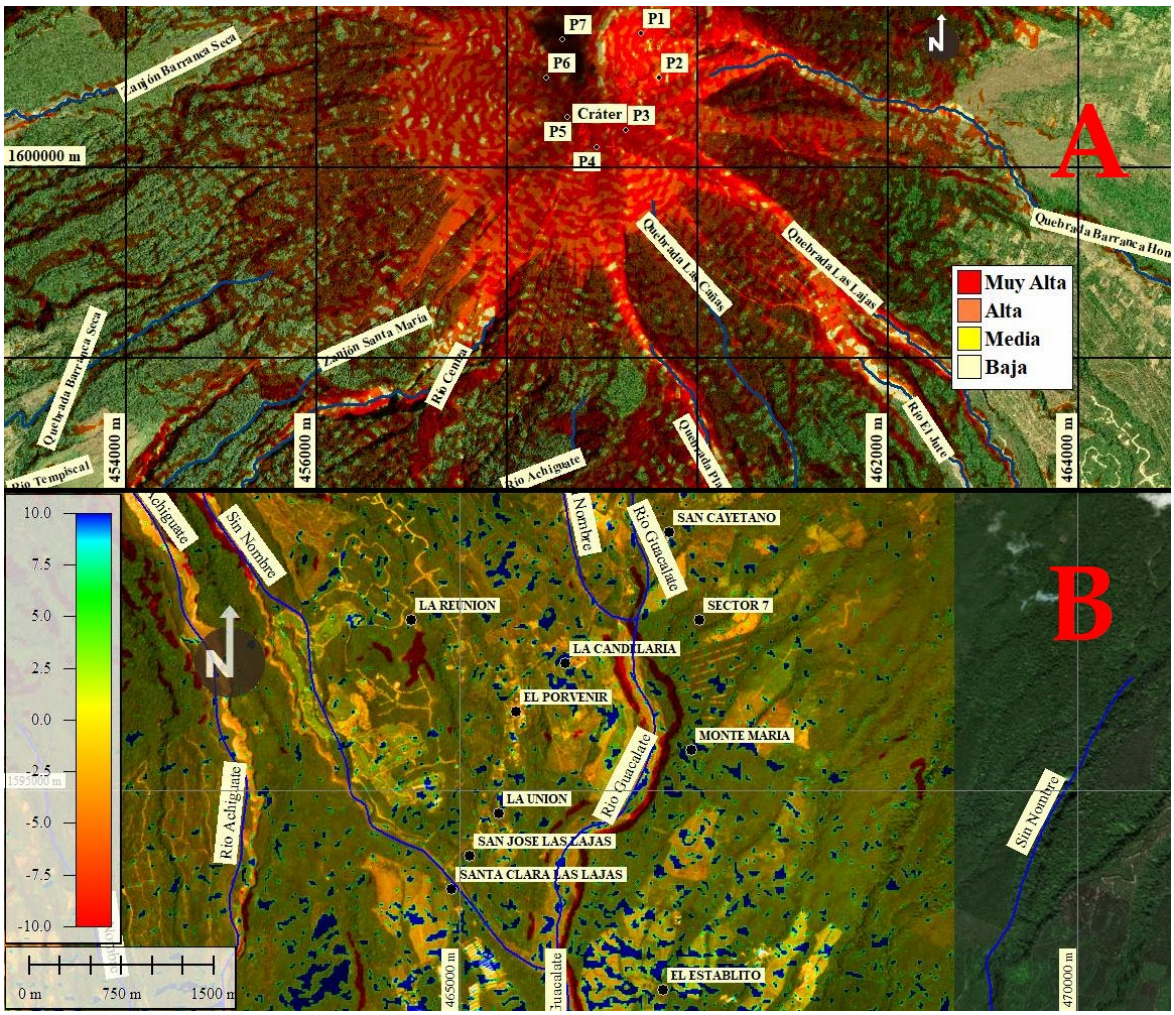


Figura 91. Análisis de estabilidad con SHALSTAB, áreas inestables y erosivas. En (A) Flancos del volcán muy irregulares debido al cambio morfológico permanente resultante de las erupciones que han ocurrido. En (B), detalle de las áreas cercanas al volcán que son las más inestables.

Las ubicaciones actuales de los lahares producidas por la erupción del 3 de junio de 2018 y posteriores fueron delimitados con las imágenes Sentinel 2 y su poder destructivo fue verificado con datos de campo principalmente en los sectores de La Reunión, San José Las Lajas, Santa Clara Las Lajas, San Miguel

y El Rodeo, entre otras poblaciones.La Figura 92A muestra los sectores antes de la erupción y en la Figura 92B, se presenta la ubicación final de los lahares con áreas de flujo de color plomo a esa fecha. En línea de color rojo, se han representado los límites del lahares obtenidos con LAHAR Z.

Del análisis de los parámetros morfométricos LS, TWI y FlowAcc, se obtuvieron las áreas con mayor peligro a la erosión, así como aquellas con la mayor concentración y acumulación de flujo superficial de agua de lluvia que estaban directamente relacionada con las rutas de flujos de lahares primarios y secundarios.

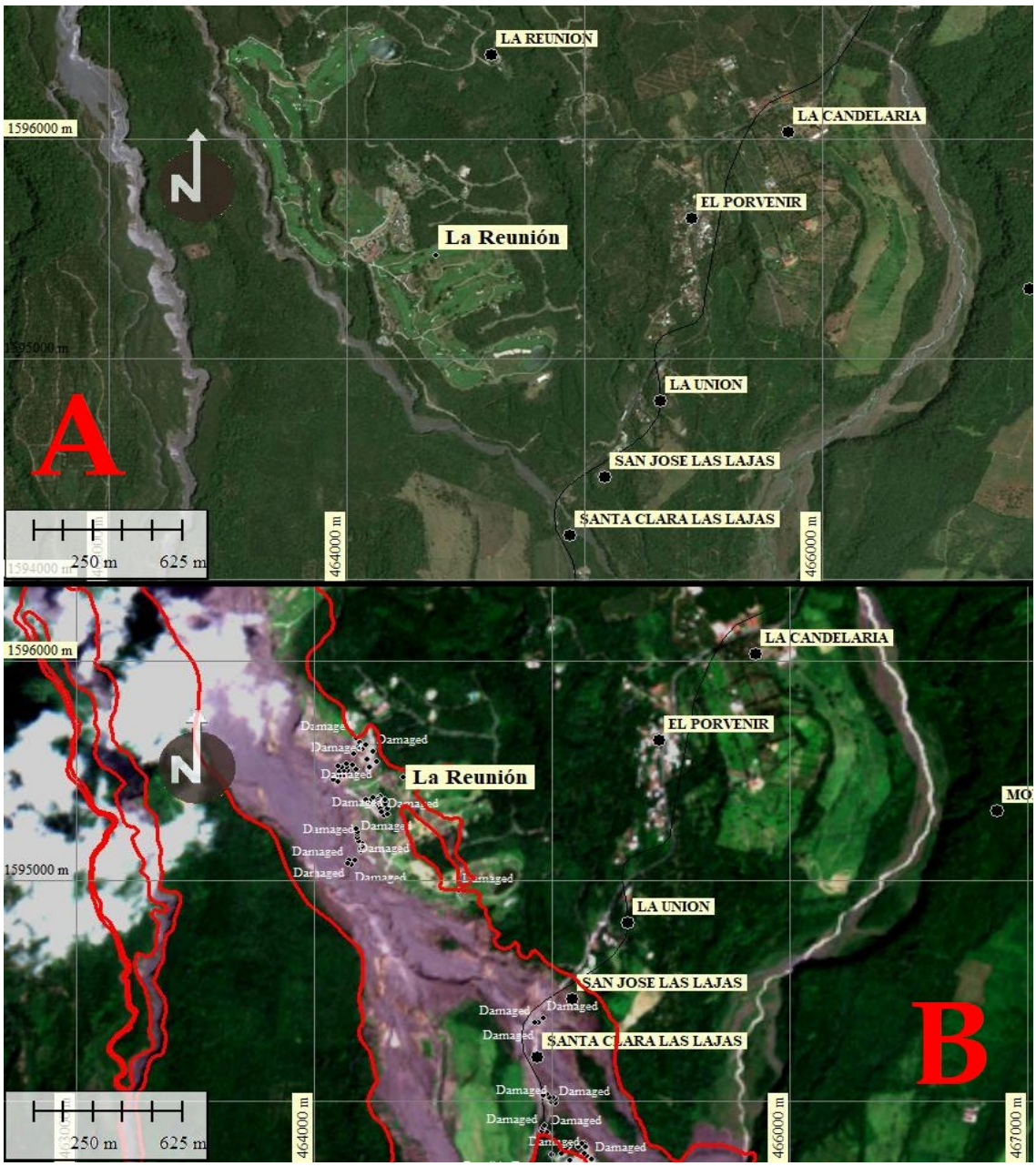


Figura 92. Ubicación de los lahares secundarios posterior a la erupción del 3 de junio de 2018, delimitados con las imágenes Sentinel 2. En (A) Los sectores desde la Reunión, San José Las Lajas, Santa Clara Las Lajas, San Miguel, El Rodeo, entre otros sectores. En (B) la disposición final del los lahares y sitio destruidos que fueron comprobados en campo. En líneas de color rojo, el límite del lahar obtenido con Lahar-Z.

En la Figura 93A se puede ver el emplazamiento del los lahares con color plomo a esa fecha y en Figura 93B esos mismos lahares con el Método de flujo obtenido con los parámetros e índices morfométricos mencionados, representado con aéreas de flujo de color azul desde San José de Las Lajas hasta San Jacínto de Miramar. Estas áreas de color azul fueron las rutas por donde los lahares transitaron, rellenaron las quebradas y guías de agua menores, rebosaron los cauces, inundaron y destruyeron las zonas pobladas. Estos tres índices morfométricos, fueron los parámetros más importantes para determinar las rutas de flujo de los lahares primarios y secundarios en este caso.

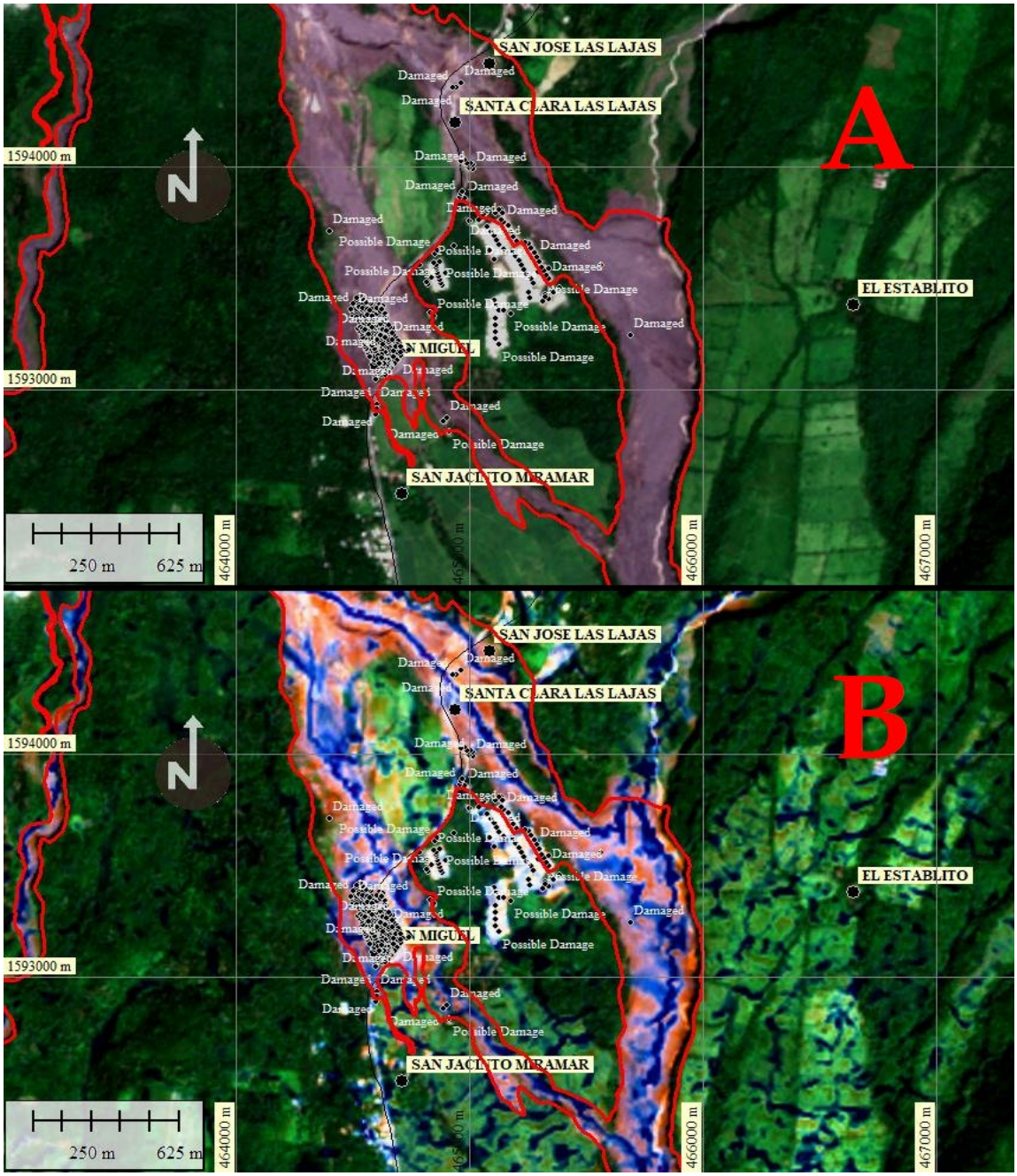


Figura 93. En (A) Los lahares obtenidos de las imágenes Sentinel 2 y en (B) la respuesta del Método morfométrico. En color azul barrancos y canales por donde fluyeron los lahares primarios y secundarios. El control de campo de los sitios destruidos, están representados por puntos de color negro.

Las áreas con altos valores de estos índices, son áreas de alta concentración de humedad en las pendientes, en donde se han generado rutas de flujo y concentración de sedimentos que se han movido desde las partes altas por lluvias intensas y gravedad para generar estos tipos lahares secundarios.

En la Figura 94, se ve un detalle del emplazamiento de los lahares obtenidos de las imágenes Sentinel 2 y la respuesta del Método Morfométrico en el sector desde del Campo de Golf del complejo turístico La Reunión en (A), hasta San Miguel en (B), destruidos totalmente. Igualmente, en flujos de color azul están los barrancos y canales por donde fluyeron los lahares primarios y secundarios que inundaron los sectores, y en color verde-amarillo-ocre las áreas de divisorias y crestas morfológicas. El control de campo de los sitios destruidos, están representados por puntos de color negro y etiquetas de color blanco.

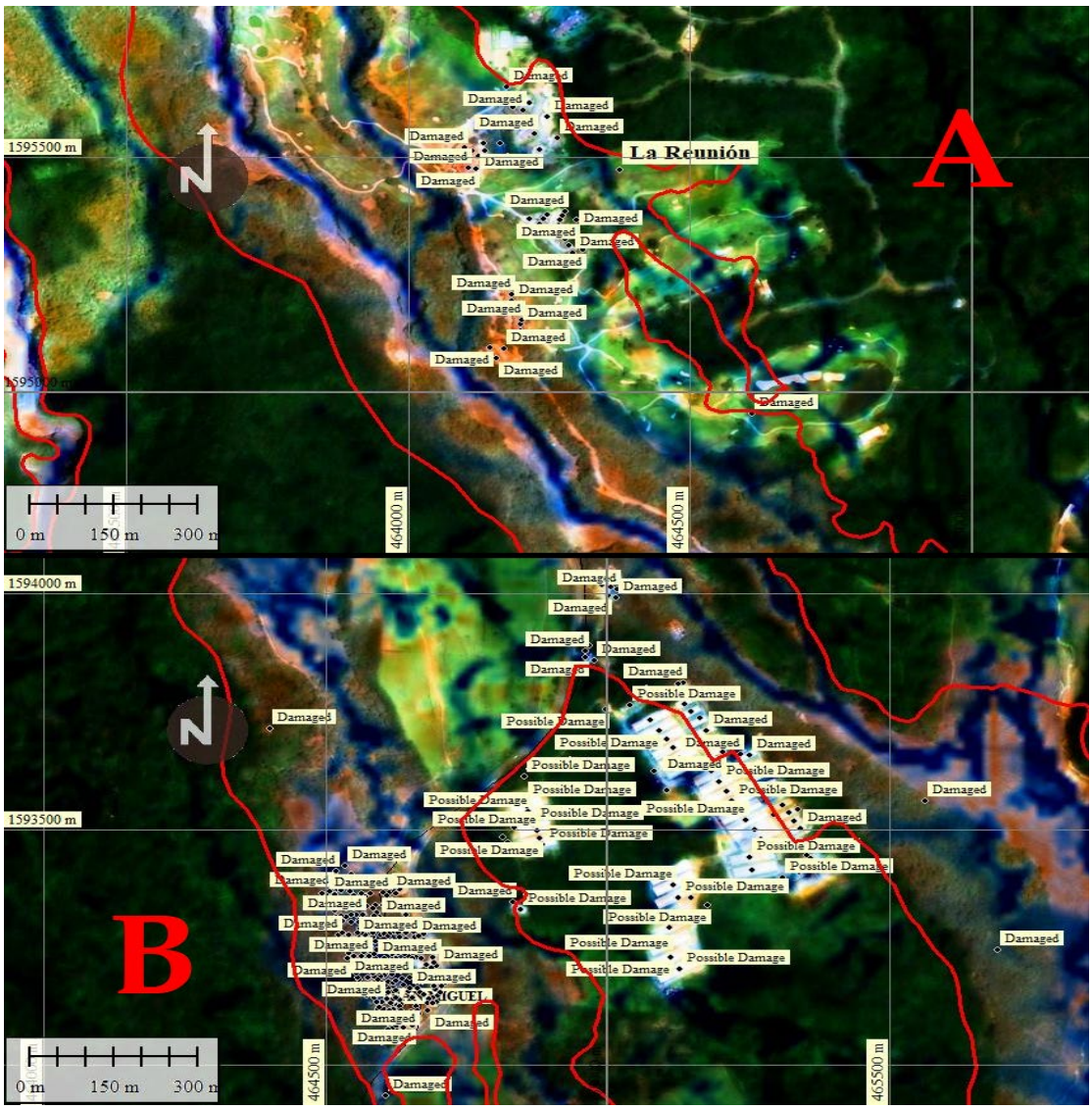


Figura 94. Detalle de la modelación de lahares utilizando parámetros e índices morfométricos. En (A) Los lahares destructivos en el campo de golf La Reunión y en (B) en el sector de San Miguel de los Bancos. En color azul barrancos y canales por donde fluyeron los lahares primarios y secundarios. El control de campo de los sitios destruidos, están representados por puntos de color negro. La zona de lahares obtenidas de lahar-Z se representa con las líneas de color rojo.

3.2.1. Discusión del trazado de rutas de flujo de lahares primarios y secundarios utilizando parámetros morfométricos.

A diferencia del Modelo numérico LAHARZ, este segundo método combinado, utilizó la morfometría como un valor que cambia la trayectoria de los lahares primarios y secundarios, lo que nos permitió obtener las rutas de flujo más reales de estos fenómenos y sus efectos.

La coincidencia de la aplicación de ambos métodos es que mantuvieron un camino del eje central de los lahares principales, debido al hecho de que transitan por desagües o ríos principales. Sin embargo, LAHARZ no separó los lahares secundarios, a diferencia del método morfológico que puede determinar las rutas de flujo de este tipo de lahares.

El mapa de peligros por lahares, creado para el volcán Fuego, basado en el programa LAHARZ, publicado en el año 2018 por CONRED, estableció zonas de alto riesgo (marcadas en color rojo). Posteriormente al 3 de junio de 2018 ocurrieron intensas lluvias torrenciales que generaron lahares secundarios que han afectado a los alrededores del volcán, incluso aquellas de bajo riesgo. Las zonas de peligro medio se vieron afectadas por el lahares que siguieron rutas de flujo desde el sitio de La Reunión al sitio de Santa Clara de Las Lajas, como se puede evidenciar en la Figura 92.

En el presente trabajo, con el método 2 propuesto, se mejoró la ubicación espacial de las rutas de flujo de lahares secundarios, siendo las principales áreas de estudio los valles de de las quebradas Barranca Seca, Ceniza, Guacalate, Playa Trinidad, Las Cañas, El Jute y Las Lajas. Las lluvias generaron lahares originados en las zonas de deformación del terreno que fueron erosionadas y sus materiales de detritos-cenizas-agua fueron componentes sólidos de estos lahares. El eje de los caminos de lahares primarios estudiados con el método 2 propuesto son similares a los obtenidos para delimitar zonas de alto riesgo en el mapa de peligro del CONRED mencionado.

Por otro lado, la aplicación del método 2, demostró que los lahar secundarios modelados, sohuieron rutas que no fueron cartografiadas enteriormente y aportaron para la destrucción de las estructuras civiles en La Reunión, San José de Las Lajas, Santa Clara de Las Lajas, San Miguel y otras áreas. Estos laheres se encuentran posicionados dentro de los límites de ubicación de acuerdo con lo otenido con LAHARZ y el emplazamiento a esa época de los mismos determinados con las imágenes de Sentinel 2A, pero con un elemento agregado que es las rutas de los caminos de flujo de lahares secundarios, como contribuyentes de los lahares primarios y otros como elementos independientes sin conexión con estos.

El rango de influencia de los lahares secundarios y su eje central modelado, es similar y mayor a los lahares de junio y noviembre de 2018, observados en las imágenes de Sentinel 2. Esto probablemente se debe a la mejor resolución del Modelo Digital de Elevaciones y los datos obtenidos por los parámetro e índices morfométrico analizados.

Finalmente, se realizó una comparación de las áreas afectadas y su alcance en las zonas de tránsito de los lahares, obtenido con el Método 2 propuesto y LAHARZ, observandose que el Método 2 mejoró la zonificación de toda el área afectada por lahares secundarios que se puede categorizar como zona de alto peligro. El Modelo 2 mejoró las rutas de tránsito de los lahares secundarios correspondientes a los ríos Las Lajas y Guacalate, obteniéndose áreas de inundación con mayores límites de las áreas afectadas. Estas áreas fueron las de mayor infraestructura civil destruida, convirtiendose en zonas de máximo peligro. Las deformaciones superficiales del terreno, obtenidas de Sentinel 1B, ubicaron las zonas de erosión y de peligrosidad por movimientos en masa cuyos materiales posiblemente son o pueden ser parte de lahares secundarios que se generaron desde sitios topográficos altos. Esto es una contribución cuando se utiliza el análisis DINSAR.

Además de este trabajo, otros estudios de investigación pueden mejorar la ubicación de las rutas de flujo lahares utilizando las áreas deformadas del relieve obtenido con el análisis DINSAR, el criterio de estabilidad de taludes y análisis de parámetros morfométricos en Modelos Digitales de Elevación de alta resolución espacial. obtenido de imágenes Lidar e integrándolas en programas especializados en lahares e inundaciones análisis como LAHAR Z, Titán 2D, Ash3D, Flo-2D, IRIC, Iber, entre otros. Los resultados de la aplicación de esta segunda metodología, pueden servir a las Autoridades municipales y a la comunidad en general, para mejorar los sistemas de alerta temprana y mecanismos de reducción de peligros por lahares en base de los mapas de peligrosidad obtenidos.

3.2.2. Conclusiones del trazado de rutas de flujo de lahares primarios y secundarios utilizando parámetros morfométricos.

Esta metodología implementa la integración de la metodología DINSAR para determinar las deformaciones superficiales del terreno, con el método Morfométrico utilizando el software morfométrico SAGA, para analizar las rutas de los flujos de lahares primarios y secundarios, más el análisis de estabilidad-erosión de taludes con ma metodología SHALSTAB, es un método que puede ayudar a prevenir los efectos destructivos que causan los lahares, mejorando sus límites de influencia durante el tiempo en que estos actúan, dando la posibilidad a la comunidad de mejorar sus mapas de peligros y de mejorar sus mecanismos de emergencia y respuestacomo.

La aplicación de esta Metodología, demostró que las localidades y su infraestructura destruída no fueron cartografiadas en los mapas de peligros existentes por CONRED, y si estaban cartografiadas, no estaban marcadas las rutas de flujo de este tipo de lahares hasta su llegada a estas poblaciones, como si se ha conseuido con el método propuesto.

Las observaciones de campo realizadas por técnicos de CONRED y enviadas en formato de puntos en shp formato, ayudó a calibrar y verificar los resultados obtenidos por este método, así como para comprender cuál de los tres parámetros morfológicos utilizados tuvo mayor peso según al escenario en el que se desarrollaron los lahares. Este parámetro corresponde al TWI, el mismo que determinó que las áreas más bajas de los arroyos y quebradillas, se humedezcan y rellenen rápidamente desbordándose e inundando áreas cercanas.

Este segundo método y su componente morfológico, puede obtener las rutas lahar primarios y secundarios en todos los sectores cercanos el volcán en muy poco tiempo, a diferencia de los modelos numéricos como el LAHAR Z, que se aplicó en un solo eje de una corriente o drenaje. En este caso, las rutas de flujo de los lahares obtenidos son suficientes para producir mapas de peligrosidad y de reducción de estos peligros que pueden poner de manifiesto los sectores con alta vulnerabilidad a las estructuras civiles y los sistemas socioeconómicos, incluida la preservación de la vida humana. Esta combinación de procedimientos se puede aplicar en cualquier paisaje volcánico basado en Modelos de Elevación Digital de alta resolución espacial, obteniendose muy buena concordancia con los caminos de los flujos reales.

La contribución de la aplicación de este segundo método, en la determinación de la peligrosidad por lahares, fue la de mejorar el modelo numérico de flujo como LAHAR-Z, para mejorar rutas de flujo de los lahares primarios y secundarios que han causado destrucción en las proximidades del volcán.Este método profundizó el estudio de estas rutas, basado en el análisis de parámetros morfométricos, lo que nos permitió tener un mejor conocimiento de los posibles caminos antes de una nueva erupción volcánica. Para complementar los resultados obtenidos con el análisis DINSAR y el Método Morfológico, para el trazado del origen y rutas potenciales de los lahares primarios y secundarios durante las erupciones y lluvias torrenciales, se aplicó SHALSTAB para determiar zonas inestables fácilmente erosionables y que pueden producir movimientos en masa.

Este método se está aplicando actualmente en el volcán Fuego por técnicos de INSIVUMEH con el objetivo de elaborar mapas multitemporales de peligrosidad por lahares secundarios y ponerlos en manos de las Autoridades municipales y la comunidad en general, lo que permitirá implementar medidas estructurales y no estructurales para reducir este peligro.

El desarrollo metodológico se ha sintetizado en el artículo 2: Determination of Primary and Secondary Lahar Flow Paths of the Fuego Volcano (Guatemala) UsingMorphometric Parameter, en donde se recogen todas las ideas y aplicaciones en territorio para determinar las rutas de lahares primarios y secundarios aplicables en cualquier región y puede ser un complemento importante de modelos numéricos especializados como ASH-3D, para determinar la dispersión, caída y deposito de ceniza volcánica en zonas proximales y distales que pueden afectar la infraestructura económica de una región.

3.3 Resultados del análisis de la deformación del terreno por Interferometría diferencial y concentración de lineamientos geológicos-estructurales apoyados por investigación geofísica-geotécnica.

Resultados del Análisis DINSAR y concentración de lineamientos geológicos-estructurales: en este caso, la deformación máxima local, obtenidas con el análisis DINSAR (Figura 95A), coincidió con la deformación máxima obtenida por análisis de líneas de flujo de la escorrentía superficial del agua y líneas de rotura morfológica obtenidas con el Modelo Hidrológico Básico D8 desarrollado en el primer método, (Figura 95B). En ambos casos el resultado es un ráster de desplazamientos del relieve, densidades de concentración de lineamientos estructurales, fracturas y líneas de rotura, que se puede interpretar como la tendencia de continuidad de deformación de la Zona Cero de la ciudad de Manta, en especial en el sitio donde se encontraban construidos el Centro Comercial Felipe Navarrete, el Banco del Pichincha y el Mercado Central.

Resultados de las Tomografías Eléctricas y Radargramas: la tomografía eléctrica y los radargramas se relacionaron con factores de resistividad, valores litológicos de 17 perforaciones (compacidad-rigidez), pruebas de SPT (licuefacción, esfuerzo cortante, condiciones del subsuelo), CPT (resistencia y elasticidad de su subsuelo del suelo), pruebas de análisis de ondas de superficie en arreglos multicanal-MASW y análisis de microtrepidación en arreglos multicanal-MAM para encontrar velocidades de corte Vs30 (Fig. 93). Se ha puesto mayor énfasis en las tomografías y radargramas en los sitios en que estaban construidos el Centro Comercial Felipe Navarrete y edificios cercanos.

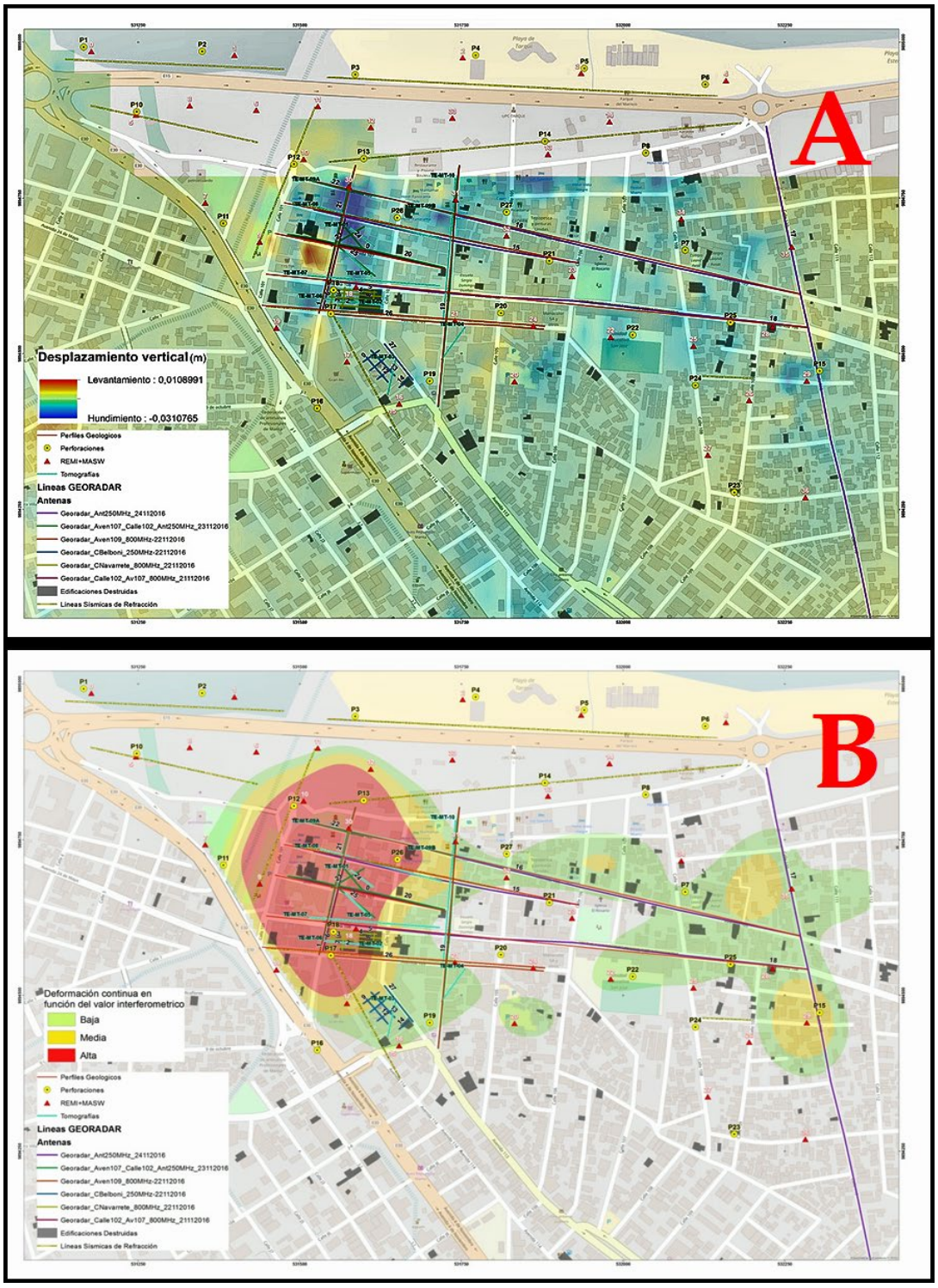


Figura 95. En (A) Mapa de desplazamiento vertical del terreno y deformación continua en función del valor interferométrico obtenido con el análisis DINSAR. En (B) Mapa de deformación del terreno obtenido mediante la concentración de líneas de flujo de la escorrentía superficial del agua de precipitación y líneas de rotura morfológica. Coincidencia de los resultados para definir la zona de deformación máxima en la Zona Cero.

En general en la zona de Tarqui, se encontraron valores de resistividad relativamente bajos (0.3 a 60 ohm.m), que reflejan la naturaleza del subsuelo, el mismo que está constituido por arenas no consolidadas, arenas limosas y limo-arenosos que se comportan como suelos blandos a semi-rígidos que en el sitio de estudio y ante la crecida de los ríos Burro y Manta más el sismo del 16 de abril de 2016, estos se licuaron y las edificaciones más antiguas colapsaron ya que se construyeron sin tomar las normas constructivas vigentes en esa época. La mayoría de suelos de la Zona 0 en Tarqui, se encuentran dentro de los grupos ML (limos inorgánicos de plasticidad baja), MH (limos inorgánicos mezcla de limo, arcilla y arenas finas) y CH (arcillas expansivas elásticas).

Durante el sismo muchas estructuras civiles de la Zona Cero, se hundimientos y se desplazaron. A mayor profundidad, se encontró una zona de muy baja resistividad, probablemente debido a que los sedimentos arenosos se encontraban saturados de agua por la presencia de niveles freáticos altos.

Los radargramas tuvieron una profundidad de investigación entre 5 y 60 m. En general se encontraron valores de conductividad relativamente altos (0.1 a 10 n/s) en los primeros 5 metros de profundidad, corroborando la naturaleza del subsuelo, que como se mencionó, está constituido por arenas no consolidadas, arenas limosas y limos-arenosos que se comportan como suelos con velocidades de corte Vs30 bajos.

A continuación, se describen las principales líneas de tomografías y radargramas del subsuelo obtenidas en la Zona Cero de la parroquia de Tarqui.

- Tomografía Eléctrica TE-MT-01 y Radargrama entre la calle 102 y esquina Av. 107 (Fig. 96).

Línea tomográfica con longitud de 40m y profundidad de penetración hasta 7m. Se encontraron tres capas subhorizontales con resistividades entre 6.29 y 15.96 ohm.m con promedio de 9,35 ohm.m. Radargrama con longitud de 35 m y profundidad de penetración hasta 30 m.

Figura 96. Ubicación de la línea para la Tomografía Eléctrica TE-MT-01 y Radargrama entre la calle 102 y esquina Av. 107.

Interpretación: Desde los 0 m hasta los 19m de longitud de la tomografía, se determinó un estrato superficial subhorizontal que llega hasta 1m de potencia, que se interpretó como suelo arenoso blando. Subyacente al estrato anterior, existe un estrato subparalelo, con una profundidad de 5m, con resistividades moderadas, interpretadas como arenas-arcillosas semi-rígidas. En este estrato, en la posición longitudinal L=24 m, se evidenció un cambio de espesores, lo que sugiere la presencia de una zona de deformación importante. Bajo esta capa se determinó una zona de baja resistividad (Fig. 97A).

En el Radargrama, de 0 a 8 m de profundidad corresponden a suelos muy conductivos homogéneos y poco consolidados tal como lo indica la respuesta del Vs30. De 8 m a 12 m se presentan suelos poco conductivos con alto grado de deformación. A partir de los 12 m se presentan suelos con una conductividad media a baja y consolidados (Fig. 97B).

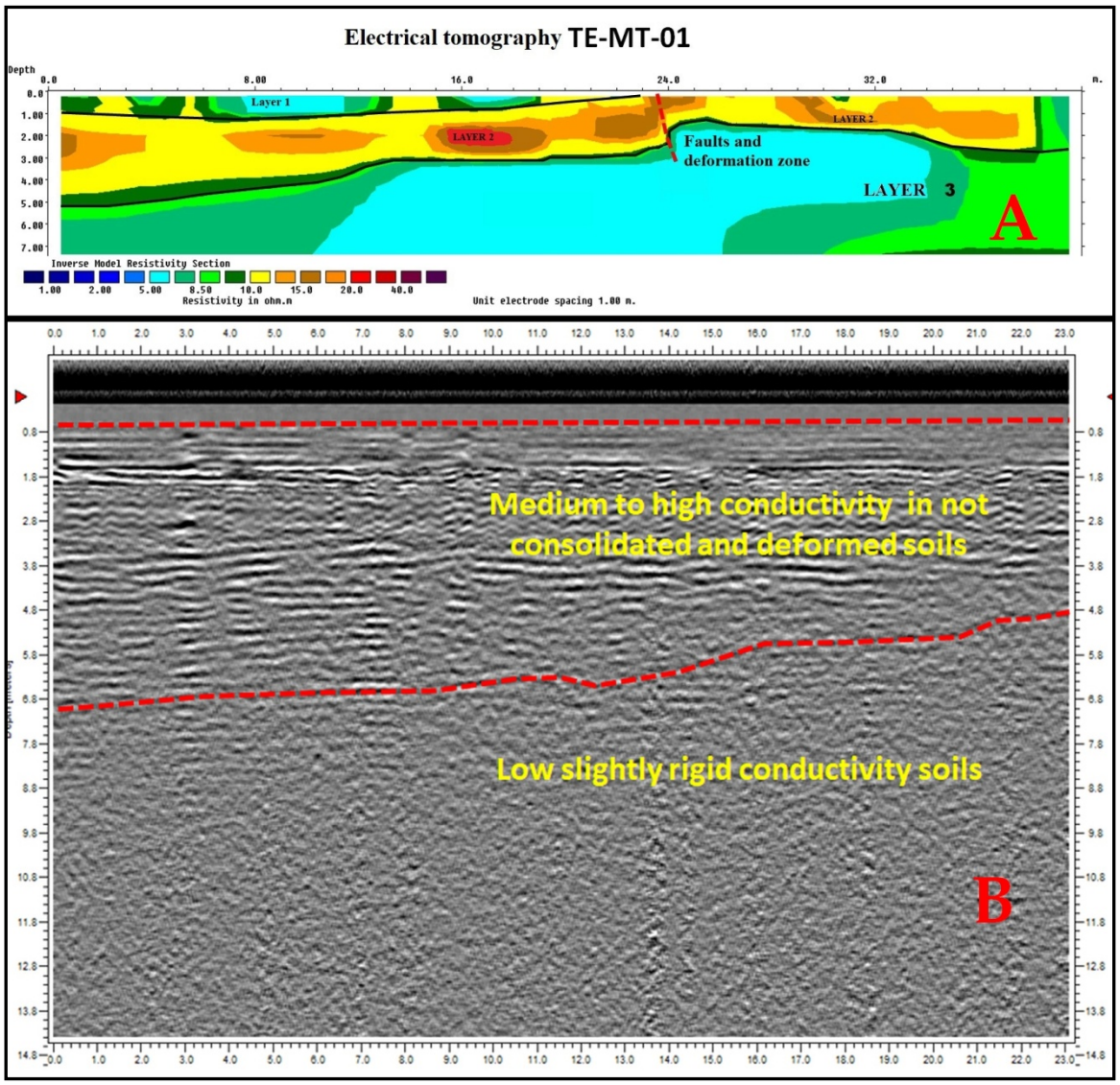


Figura 97. Resultados de la Tomografía Eléctrica TE-MT-01 y Radargrama entre la calle 102 y esquina Av. 107.

- Tomografía Eléctrica TE-MT-02 y Radargrama entre la calle 102 entre Av. 108 y 109 (Fig. 98).

Línea tomográfica con longitud de 90m y profundidad de penetración hasta 18m. Se encontraron resistividades entre 3.54 y 19.83 ohm.m con promedio de 7,70 ohm.m. Radargrama con longitud de 70 m y profundidad de penetración de 3 m.

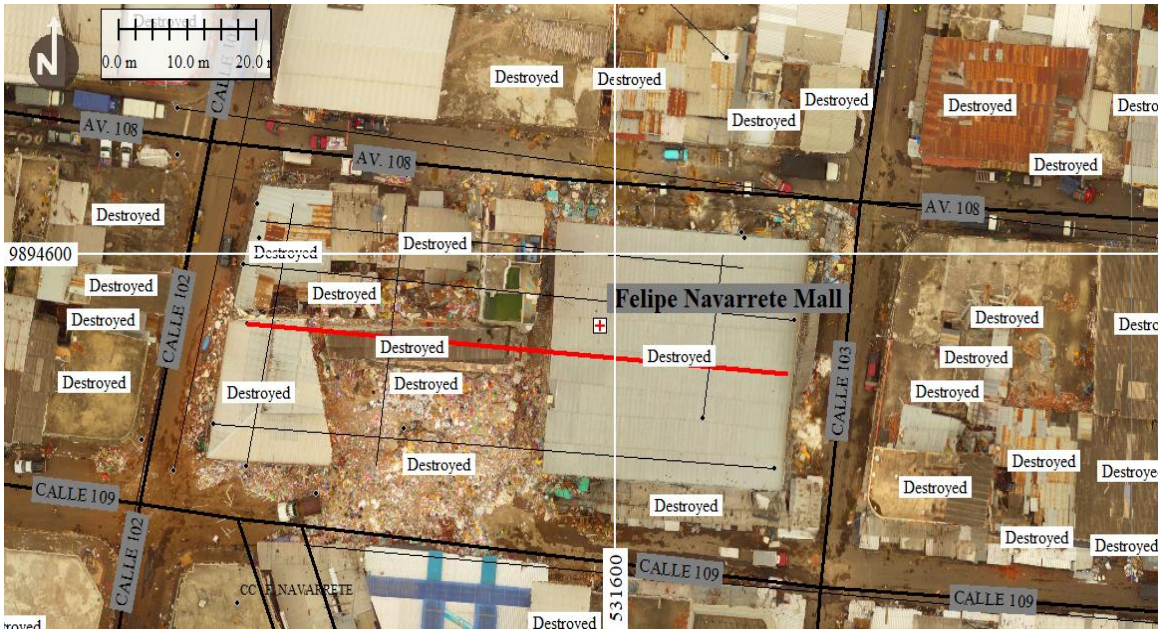


Figura 98. Ubicación de la Tomografía Eléctrica TE-MT-02 y Radargrama entre la calle 102 entre Av. 108 y 109.

Interpretación: a lo largo de toda la línea tomográfica, se determinó una capa superficial horizontal que llega hasta 3m de profundidad, con resistividades moderadamente altas interpretada como arenas-limosas semi-rígido. En esta capa en la posición L=25 se evidenció un cambio abrupto de espesores que sugiere la presencia de una zona de deformación intensa sobre la que se ubicaba el Centro Comercial Felipe Navarrete y edificios cercanos que colapsaron. Bajo esta capa se determinó una zona de baja resistividad (Fig. 99A). En el Radargrama de 0 a 30 cm se puede observar el pavimento, desde 30 hasta 50 cm se tiene la carpeta asfáltica con refuerzo de hormigón el mismo que se encuentra fracturado, bajo los 50 cm hasta los 100 cm existen horizontes de sedimentos un poco más consolidados, sin embargo, existen zonas o ventanas que fueron deformadas intensamente posiblemente por el sismo del 16A, a lo largo de esta manzana se ubicaban el Comercial Navarrete, Banco de Pichincha y el Mercado Central.

A partir de los 100 cm se observan los sedimentos marinos posiblemente de transgresión marina deformados en contacto con las partes superficiales de la subbase y base de la vía, por donde las ondas sísmicas deformaron las vías. Esta línea se puede correlacionar con el radargrama anterior (Calle 102 y Av. 107), en la que se puede observar más claramente las deformaciones obtenidas con la antena de 250 MHz (Fig. 99B).

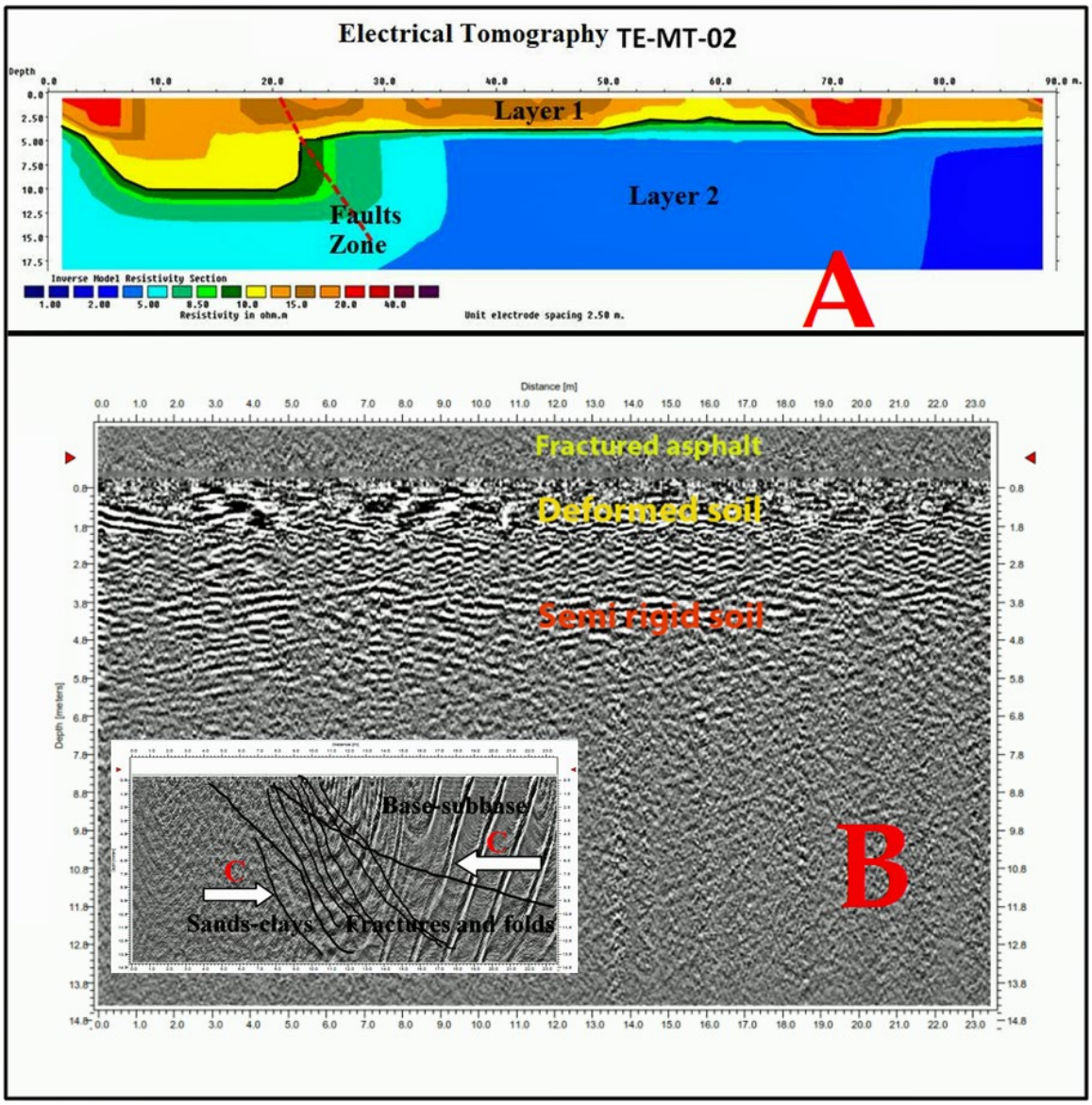


Figura 99. (A) Resultados de la Tomografía Eléctrica TE-MT-02 y (B) Radargrama entre la calle 102 entre Av. 108 y 109.

- Tomografía Eléctrica TE-MT-03 y Radargrama en el Comercial Velboni (Fig. 100).

Línea tomográfica con longitud de 65m y profundidad de penetración hasta 12.5 m. Se encontraron resistividades entre 4.06 y 31.43 ohm.m con promedio de 11.62 ohm.m. Radargrama con longitud de 44 m y profundidad de penetración de 30 m.

Figura 100. Ubicación de la Tomografía Eléctrica TE-MT-03 y Radargrama entre la calle 113, Centro Comercial Velboni.

Interpretación: a lo largo de toda la línea se determinó una capa superficial horizontal que llega hasta 5m de profundidad, con resistividades moderadamente altas interpretada como una capa arenolimosa semirígida. Subyacente se encontró una zona de baja resistividad. A lo largo de la línea no se observan zonas de deformación importante (Fig. 101A).

En el Radargrama de 0 a 8 m de profundidad corresponden a suelos muy conductivos homogéneos y pocos consolidados (posiblemente rellenos) tal como lo indica la respuesta del Vs30. De 8 m a 15 m se presentan suelos con una conductividad media y con alto grado de deformación, posiblemente provocados por efecto cosísmico. A partir de los 15 m nuevamente se presentan suelos muy conductivos y consolidados, posiblemente como respuesta a transgresiones y regresiones marinas (Fig. 101B).

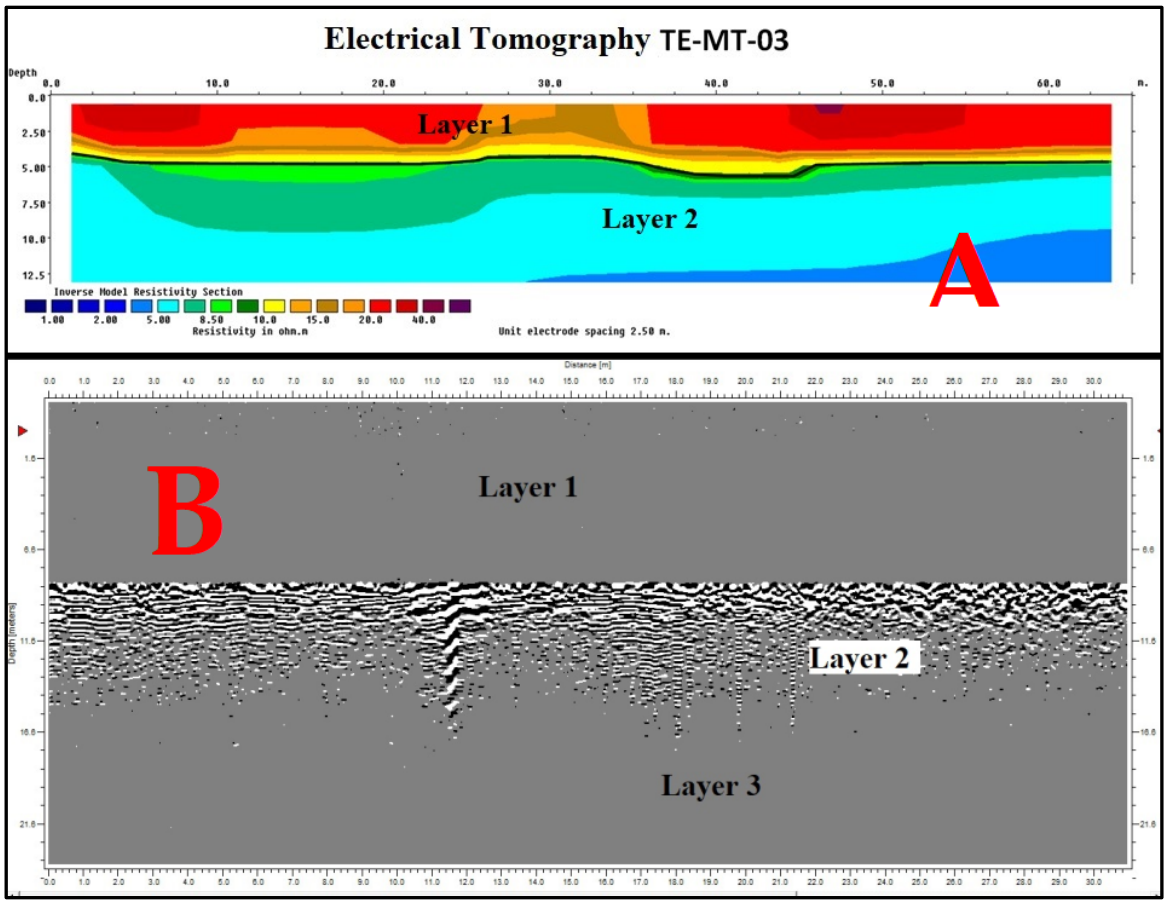


Figura 101. Resultados de la Tomografía Eléctrica TE-MT-03 y Radargrama en el Comercial Velboni, calle 113.

- Tomografía Eléctrica TE-MT-04 entre la calle 104 y Av. 109 (Fig.102).

Línea tomográfica con longitud de 55m y profundidad de penetración hasta 11m. Se encontraron resistividades entre 1.74 y 44.13 ohm.m con promedio de 10.29 ohm.m. Radargrama con longitud de 192 m y profundidad de penetración de 30 m.

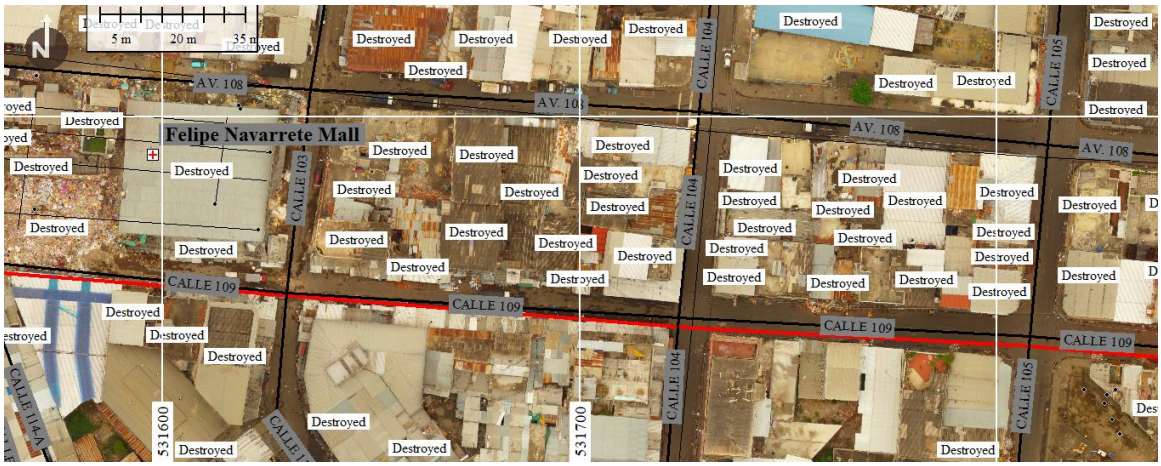


Figura 102. Tomografía Eléctrica TE-MT-04 y Radargrama entre la calle 104 y Av. 109.

Interpretación: a lo largo de toda la línea se determinó una capa superficial horizontal que llega hasta 4m de profundidad, con resistividades moderadamente altas, y que es interpretada como arenaslimosas semirígido. Subyaciente se encontró una zona de baja resistividad. A lo largo de la línea no se observan zonas de deformación importante, excepto una leve anomalía de disminución del espesor entre las posiciones L=16 y L=37 (Fig. 103A).

En el Radargrama de 0 a 8 m de profundidad corresponden a suelos muy conductivos homogéneos y pocos consolidados (posiblemente rellenos) tal como lo indica la respuesta del Vs30. De 8 m a 14, 15, 16, 17 m se presentan suelos con una conductividad media y con alto grado de deformación como se observa en las distancias de 4 a 60 m, 75 a 85 m, 110 a 113 m, 170 a 172 m, posiblemente provocados por efecto cosísmico. A partir de los 17 m nuevamente se presentan suelos muy conductivos y consolidados, posiblemente como respuesta a continuos episodios de transgresión y regresión marinas (Fig. 103B).

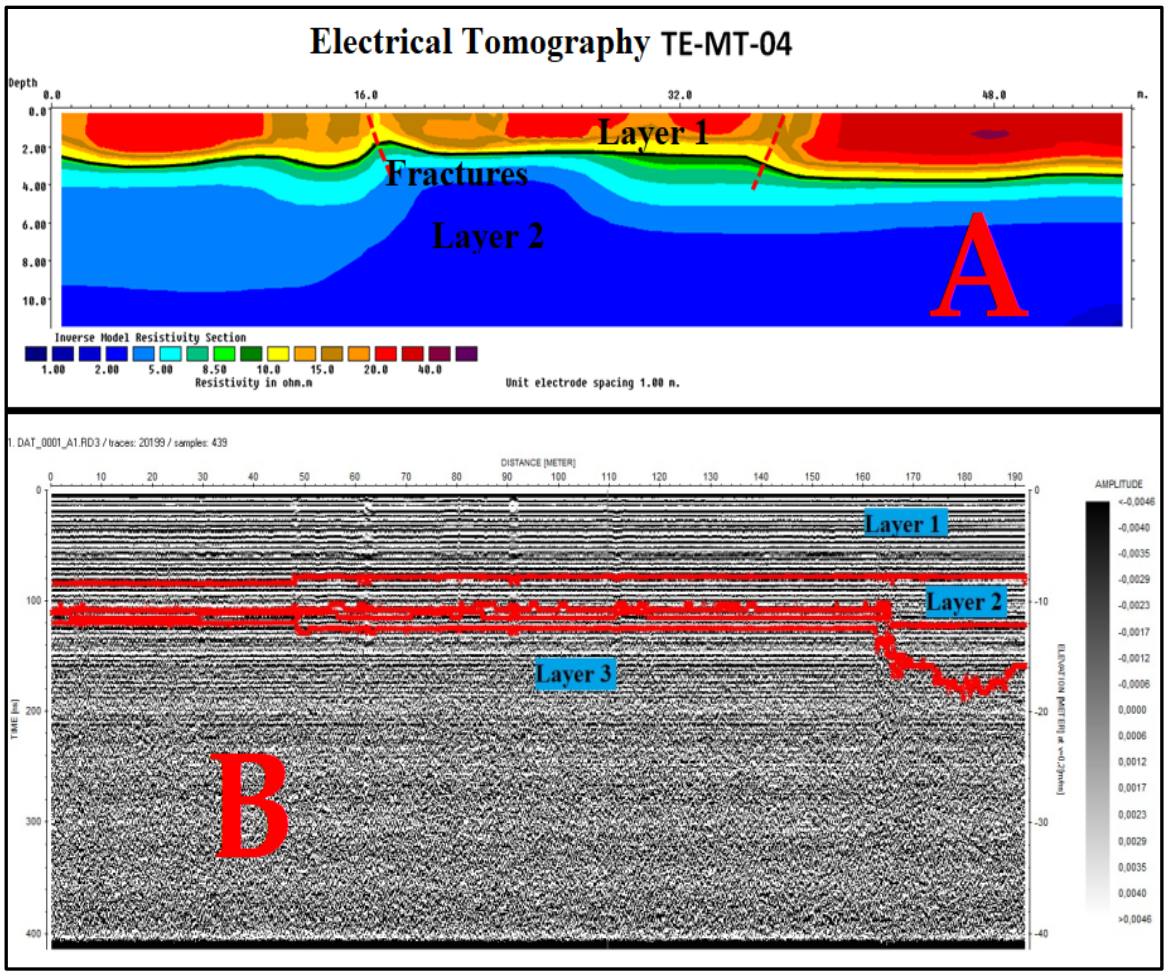


Figura 103. (A) Resultados de la Tomografía Eléctrica TE-MT-04 y (B) Radargrama entre la calle 104 y Av. 109.

- Tomografía Eléctrica TE-MT-06 calle 102 (Fig.104).

Línea tomográfica con longitud de 200m y profundidad de penetración hasta 35m. Radargrama con longitud de 139 m y profundidad de penetración hasta 30 m.

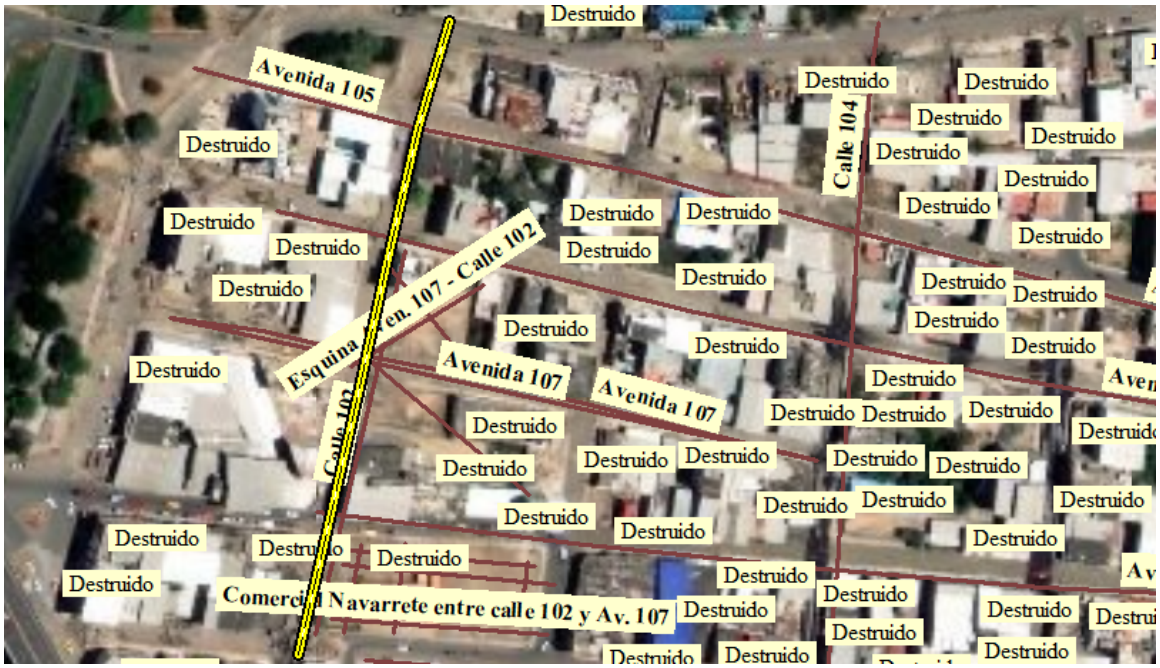


Figura 104. Ubicación de la Tomografía Eléctrica TE-MT-06 calle 102,

Interpretación: se encontraron resistividades entre 0.7 y 46.23 ohm.m con promedio de 4.67 ohm.m. Entre las posiciones L=85 a L=200 se encontró una capa superficial sub-horizontal que llega hasta 15 m de profundidad, con resistividades moderadamente altas que es interpretada como arenas-limosas semi-rígidas. Desde el inicio de la línea (L=0) hasta la posición L=85 y hasta los 35m de profundidad se encontró una zona de resistividades moderadamente bajas que se interpretó como suelo arenoso blando y arenas no consolidadas. Subyaciendo a esta capa se encontró una zona de baja resistividad (Fig.105).

En el Radargrama de 0 a 8 m de profundidad corresponden a suelos muy conductivos homogéneos y poco consolidados tal como lo indica la respuesta del Vs30. De 8 m a 14 m se presentan suelos con una conductividad media a baja con un alto grado de deformación. A partir de los 14 m nuevamente se presentan suelos de baja a media conductividad posiblemente relacionados a depósitos con procesos de transgresión y regresión marina.

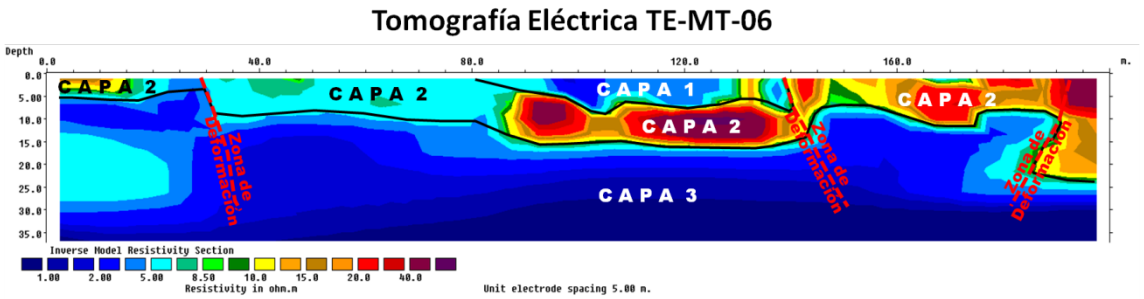


Figura 105. Ubicación de la Tomografía Eléctrica TE-MT-06 calle 102.

- Tomografía Eléctrica TE-MT-07 Av. 108 (Fig.106).

Línea tomográfica con longitud de 200m y profundidad de penetración hasta 35m. Radargrama con longitud de 289 m y profundidad de penetración hasta 39 m.

Figura 106. Ubicación de la Tomografía Eléctrica TE-MT-07 Av. 108.

Interpretación: se encontraron resistividades entre 0.35 y 15.2 ohm.m con promedio de 4.64 ohm.m. Entre las posiciones L=35 a L=200 se encontró una capa superficial sub-horizontal que llega hasta 20 m de profundidad, con resistividades moderadamente altas que es interpretada como arenas-limosas semi-rígidas. Desde el inicio de la línea (L=0) hasta la posición L=35 y hasta los 35m de profundidad se encontró una zona de resistividades moderadamente bajas que se interpretó como suelo arenoso blando y arenas no consolidadas. Subyaciendo a esta capa se encontró una zona de baja resistividad (Fig. 107). En el Radargrama de 0 a 7 m de profundidad corresponden a suelos muy conductivos, poco consolidados y deformados tal como lo indica la respuesta del Vs30. A partir de los 7 m se presentan suelos con una conductividad media a baja, ligeramente rígidos con presencia de fracturas diagonales en dirección NW-SE y que se relacionan a procesos de transgresión y regresión marina.

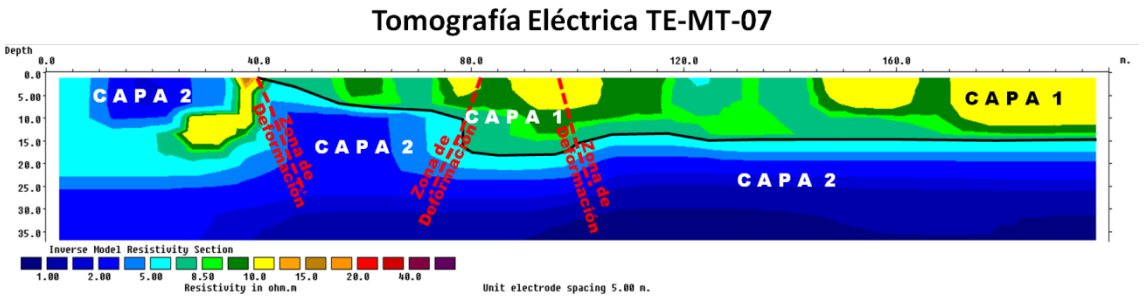


Figura 107. Resultados de la Tomografía Eléctrica TE-MT-07 Av. 108.

- Tomografía Eléctrica TE-MT-08 Av. 106 (Fig.108).

Línea tomográfica con longitud de 200m y profundidad de penetración hasta 35m. Radargrama con longitud de 270 m y profundidad de penetración hasta 10 m.

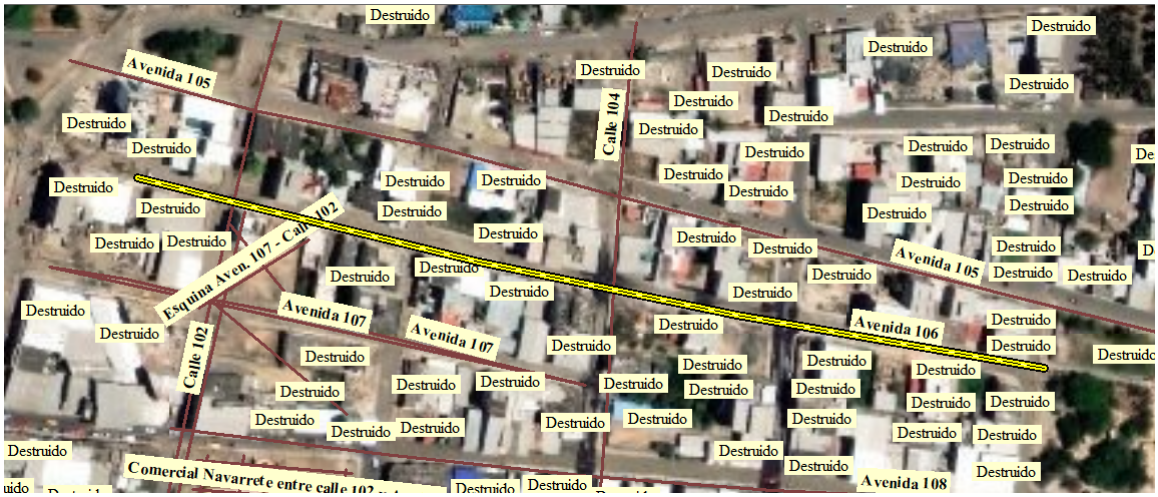


Figura 108. Ubicación de la Tomografía Eléctrica TE-MT-08 Av. 106.

Interpretación: se encontraron resistividades entre 0.96 y 20.84 ohm.m con promedio de 5.67 ohm.m. Entre las posiciones L=115 a L=170 se encontró una capa superficial sub-horizontal que llega hasta los 6 m de profundidad, con resistividades moderadamente bajas que es interpretada como suelos arenosos semi-blando y arenas no consolidadas. Se determinó una segunda capa sub-horizontal que se encuentra desde la superficie hasta los 20m, con resistividades moderadamente altas que se interpreta como arenas-limosas semi-rígidas. En esta capa en la posición L=25 a L=35 y L=80 se evidencia un cambio abrupto de espesores que sugieren la presencia de dos zonas de deformación importante. Subyaciendo a esta capa se encontró una zona de baja resistividad, Figura 109.

En el Radargrama de 0.7 m a 7 m representan a suelos de media a alta conductividad, poco consolidados (blandos) y deformados tal como lo indica la respuesta del Vs30. A partir de los 7 m se presentan suelos con una conductividad baja, ligeramente rígidos y que se relacionan a procesos de transgresión y regresión marina.

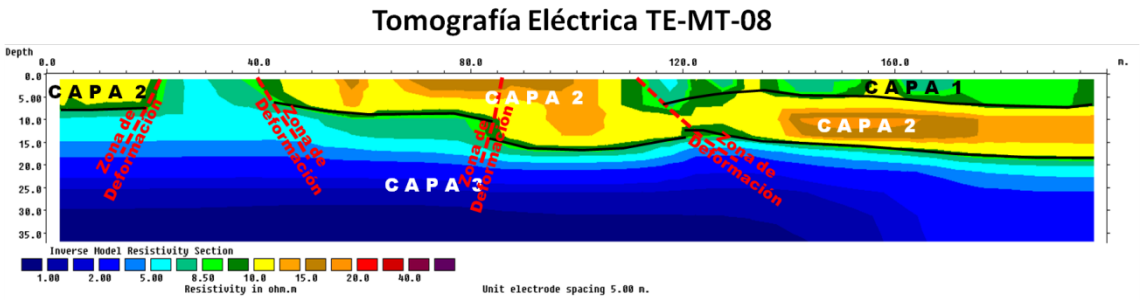


Figura 109. Resultados de la Tomografía Eléctrica TE-MT-08 Av. 106.

- Tomografía Eléctrica TE-MT-09A Av. 105 (Fig.110).

Línea tomográfica con longitud de 200m y profundidad de penetración hasta 35m. Se encontraron resistividades entre 0.05 y 61 ohm.m con promedio de 9.06 ohm.m. Radargrama con longitud de 211 m y profundidad de penetración hasta 15 m.

Figura 110. Ubicación de la Tomografía Eléctrica TE-MT-09A, Av. 105.

Interpretación: entre las posiciones L=45 a L=200 se encontró una capa superficial irregular que varía entre 7 y 10 m de profundidad, con resistividades moderadamente bajas que es interpretada como suelos arenosos semi-blando y arenas no consolidadas. Se determinó una segunda capa que se encuentra desde la superficie hasta los 25m, con resistividades moderadamente altas que se interpreta como arenas-limosas semi-rígidas. En esta capa en la posición L=35, L=85 y L=125se evidencia cambios abruptos de espesores que sugieren la presencia de zonas de deformación importante. Subyaciendo a esta capa se encontró una zona de baja resistividad (Fig.111). En el Radargrama de 0 a 0.7 m de profundidad corresponde a la capa del pavimento. De 0.7 m a 7 m representan a suelos de media a alta conductividad, poco consolidados (blandos) y deformados tal como lo indica la respuesta del Vs30. A partir de los 7 m se presentan suelos con una conductividad baja, ligeramente rígidos y que se relacionan a procesos de transgresión y regresión marina.

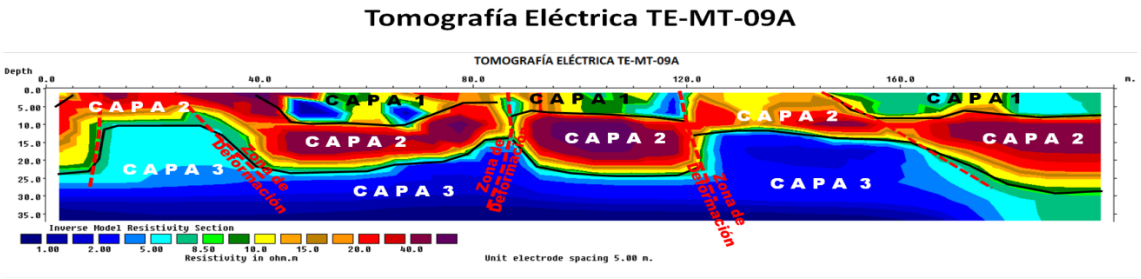


Figura 111. Resultado de la Tomografía Eléctrica TE-MT-09A, Av. 105.

- Tomografía Eléctrica TE-MT-10 calle 104 (Fig.112).

Línea tomográfica con longitud de 200m y profundidad de penetración hasta 35m. Se encontraron resistividades entre 0.94 y 39.62 ohm.m con promedio de 5.57 ohm.m. Radargrama con longitud de 128 m y profundidad de penetración hasta 30 m.

Figura 112. Ubicación de la Tomografía Eléctrica TE-MT-10 y Radargrama calle 104.

Interpretación: entre las posiciones L=80 a L_125 y L=140 a L=200 se encontró una capa superficial irregular que varía entre 5 y 8 m de profundidad, con resistividades moderadamente bajas que es interpretada como suelos arenosos semiblando y arenas no consolidadas. Se determinó una segunda capa que se encuentra desde la superficie hasta una profundidad que varía entre 10 a 17m, con resistividades moderadamente altas que se interpreta como arenas-limosas semi-rígidas. En esta capa en la posición L=60, L=80 y L=130 se evidencia cambios abruptos de espesores que sugieren la presencia de zonas

de deformación importante. Subyaciendo a esta capa se encontró una zona de baja resistividad (Fig. 113). En el radargrama de 0 a 7 m de profundidad corresponden a suelos de baja conductividad, poco consolidados (zona de relleno) y deformados tal como lo indica la respuesta del Vs30. De 7 m a 13 m se presentan suelos con una conductividad media a alta, correspondiente a una zona de depositación que se relacionan a procesos de transgresión y regresión marina. A partir de los 13 m se encuentran suelos con una baja conductividad y ligeramente rígidos.

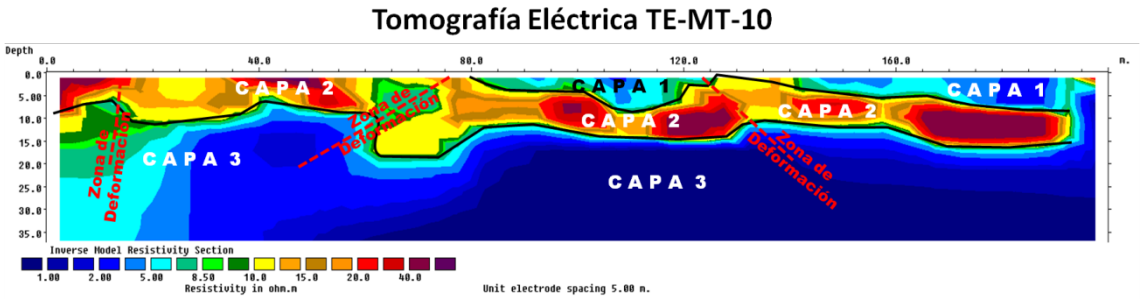


Figura 113. Resultado de la Tomografía Eléctrica TE-MT-10 y Radargrama calle 104.

3.3.1. Discusión del análisis de la deformación del terreno por Interferometría diferencial y concentración de lineamientos geológicos-estructurales apoyados por investigación geofísica-geotécnica.

El Centro Comercial Felipe Navarrete y sus alrededores que se pueden ver en la Figura 114A, es el área de máxima deformación determinada en el subsuelo y basada en tomografías y radargramas eléctricos. Esta zona se alinea siguiendo la tendencia superficial de la deformación obtenida con el análisis interferométrico y la concentración de lineamientos estructurales (Fig.114B). Esta deformación en relieve coincidió con resultados geotécnicos desfavorables, principalmente con los índices de licuefacción del subsuelo y especialmente el Índice de Desplazamiento Lateral-LDI que en la Zona Cero, debido a los efectos del terremoto, en la superficie aparecieron patrones de desplazamientos laterales del subsuelo, deformaciones laterales y la formación de volcanes de arena, fracturas, desplazamientos verticales y asentamiento de las estructuras (Fig.114C y D). El centro comercial Felipe Navarrete y sus alrededores se encuentran en un lugar de máxima deformación del suelo (Fig. 114E). En el perfil topográfico se puede observar el deslizamiento de tierra causado por el colapso del Centro Comercial y el Banco Pichincha (Fig. 114F). Esta coincidencia de suelos intensamente deformados, baja conductividad, resistividad-peligro a licuefacción y baja velocidad de onda de corte Vs30 implicaba que desde el punto de vista geológico, los suelos de depósitos aluviales y playas jóvenes están saturados y tienen mayor peligro a la degradación que los depósitos más antiguos porque tienen un comportamiento más líquido que sólido, un comportamiento que predice el potencial de licuefacción que ha causado daños intensos y severos a los cimientos de las estructuras civiles.

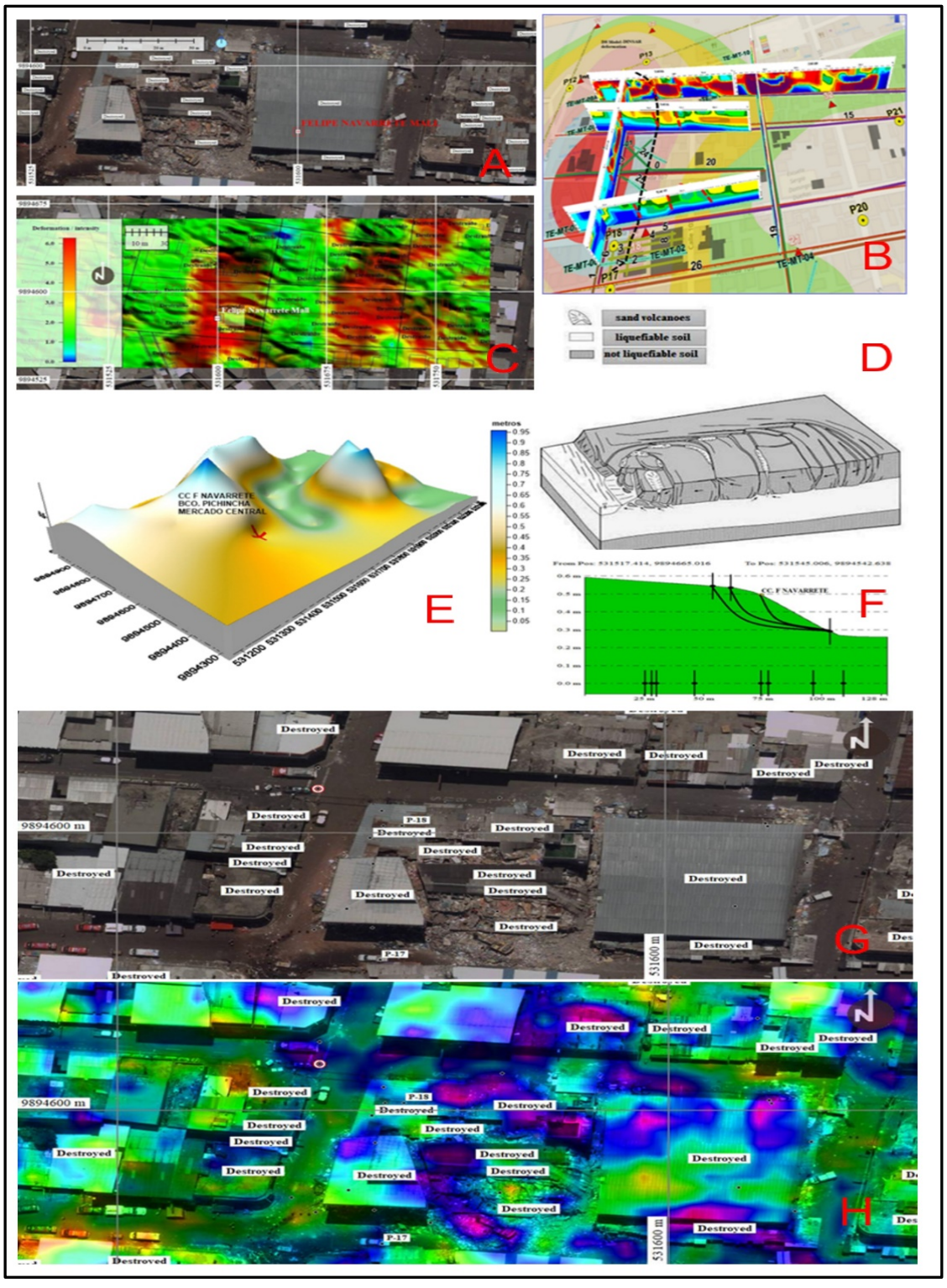


Figura 114. (A) Ubicación del centro comercial F. Navarrete, Banco Pichincha, Mercado Central y sitios cercanos y lugares cercanos. (B) Máxima deformación obtenida de la interrelación del método DINSAR y direcciones de flujo de la escorrentía y líneas de rotura morfológica y la densidad de los lineamientos estructurales. (C) Deformaciones del suelo por licuefacción. (D) Método de generación de volcanes de arena, fracturas y desplazamientos basado en el índice de desplazamiento lateral IDL. (E) Deformación del terreno en el área de máxima deformación y (F) perfil topográfico que demuestra el deslizamiento de tierra causado por el colapso del Centro Comercial y el Banco Pichincha. (G y H) Coincidencia entre la destrucción de infraestructura y la concentración de lineamientos estructurales.

En la Figura 114G se presenta la infraestructura destruida en el centro comercial Felipe Navarrete y cercana después del terremoto y en la Figura 114H se presenta la concentración de fracturas modelizadas antes de la ocurrencia del terremoto y viviendas destruidas después del mismo.

3.3.2. Conclusiones del análisis de la deformación del terreno por Interferometría diferencial y concentración de lineamientos geológicos-estructurales apoyados por investigación geofísica-geotécnica.

A partir del análisis DINSAR se concluyó que la Zona Cero de la ciudad de Manta, presenta un valor máximo de hundimiento de 3 cm y levantamientos de 1 cm en la zona de Tarqui. El resultado del análisis de la tendencia de deformación local permitió observar la concentración de las deformaciones en el área de estudio y su continuidad morfológica sobre la que construyeron las edificaciones, esta deformación obtenida de la combinación de la técnica DINSAR y Modelo Hidrológico Básico D8, se puede der en la Figura 95B, en donde se puede ver la intensidad de la deformación del relieve, con color verde de baja deformación, amarillo de deformación media y color rojo de alta deformación del relieve. La mayor concentración de deformaciones se observó entre las calles 101 y 104, Av. 105 y 109 de la Zona Cero, en donde se ubicaban el Mercado Central de la ciudad y el Centro Comercial Felipe Navarrete que colapsaron en su totalidad.

En base de la correlación entre el la Velocidad de Corte Vs30, los registros de perforación, georadar y tomografía eléctrica dentro de la zona de máxima deformación en sector de Tarqui se concluyó que, en general los suelos de 0 a 1 metro y hasta los 5 m de profundidad, son altamente conductivos, blandos, con velocidades de corte de 50-115 m/s que corresponde a arenas limosas poco consolidadas, presentes en la zona de máxima deformación de color rojo de la Figura 112. Dentro de la clasificación de la tipología de suelos de NEC 2015 corresponde a la categoría E y F (rellenos no consolidados).

En referencia a la zona de deformación, correspondiente a las Calle 102 y 103 y las avenidas desde las 105 a 109, los suelos son altamente conductivos, blandos, con velocidades de corte de 120 - 150 m/s que corresponde a arenas – limosas poco consolidadas, y dentro de la clasificación la tipología de suelos de NEC 2015 corresponde a la categoría E. Fuera de la zona de máxima deformación de color rojo, se encuentran valores de Vs30 mayores a profundidades más someras, es decir relacionados a suelos semirrígidos que corresponde a suelos tipo D (entre 7 a 14m de profundidad). Los ensayos MAM+MASW realizados por la empresa GEOESTUDIOS S.A corroboran con los resultados del análisis geofísico, por lo que se puede afirmar que en el área de estudio se tienen suelos Tipo D, E y F según la NEC2015, con valores de Vs30 entre 50m/s a 360m/s.

Lo anteriormente indicado permitió diferenciar tres tipos de perfiles de suelo para el diseño sísmico:

- Perfil 1.- Constituido por 2 capas diferenciables: la primera capa desde la superficie hasta 7m de profundidad con Vs=50m/s a Vs=150m/s. La segunda capa llega hasta 30m de profundidad con Vs=200m/s a Vs=300m/s.

-Perfil 2.- Constituido por 3 capas diferenciables: la primera capa desde la superficie hasta 5m de profundidad con Vs=100m/s a Vs=160m/s. La segunda capa llega hasta 10m de profundidad con Vs=160m/s a Vs=200m/s. Una tercera capa llega hasta 30m de profundidad con Vs=210m/s a Vs=350m/s.

-Perfil 3.- Constituido por 3 capas diferenciables: la primera capa desde la superficie hasta 7m de profundidad con Vs=110m/s a Vs=155m/s. La segunda capa llega hasta 15m de profundidad con Vs=180m/s a Vs=250m/s. Una tercera capa llega hasta 30m de profundidad con Vs=230m/s a Vs=393m/s.

De forma general estos perfiles tienen una distribución areal que es correlacionable con las zonas de deformación determinadas en función del valor interferométrico, de tomografía eléctrica y de georadar.

El análisis geofísico determino una alta correlación entre los valores de resistividad obtenida por la tomografía eléctrica, los radargramas y la interferometría diferencial. Las zonas de deformación determinadas en subsuelo en base a las tomografías eléctricas se encuentran alineadas siguiendo la tendencia superficial de la deformación determinada mediante el análisis interferométrico (Fig. 115). El método de interferometría DINSAR, basada en las imágenes Sentinel 1A, sin costo, corroboró la existencia de deformaciones de la superficie del suelo obtenidas del análisis de la concentración de lineamientos estructurales en la Zona Cero de la ciudad de Manta. Ambos mecanismos coincidieron en la delimitación geográfica del área de mayor deformación en donde se construyeron el Centro Comercial Felipe Navarrete, el Banco Pichincha y el Mercado Central, sitio en donde murieron más de 96 personas debido al terremoto.

La correlación de los parámetros geotécnico-geofísicos y de la deformación de la superficie del relieve, como la velocidad de corte Vs30, registros litológicos, índices de licuefacción, geofísica como resistividad, conductividad, intensidad de las deformaciones en relieve y subsidencias, permitió analizar la respuesta del sitio para predecir su capacidad geotécnica debido a las vibraciones y fracturas superficiales ocurridas por el terremoto del 16 de abril de 2016. Esta capacidad predictiva podría haberse obtenido años antes de la ocurrencia del terremoto en función de la deformación del relieve.

El análisis geofísico determinó una alta correlación entre los valores de resistividad obtenidos por la tomografía eléctrica y los valores de conductividad de los radargramas y la tecnología DINSAR y la concentración de lineamientos estructurales. Especialmente en la Zona Cero, el Centro Comercial Felipe Navarrete, la zona de mayor deformación del relieve, el mayor estrés sísmico presentó con anterioridad rastros de deformación que posiblemente, en el sitio, se amplificaron las ondas de superficie de Rayleigh que afectaron las áreas entre el Centro Comercial Felipe Navarrete, el Banco del Pichincha y el Mercado Central. Esta zona continúa siendo la que tiene la mayor deformación tectónica y la que tiene el mayor peligro ante terremotos, como la que ocurrió el 16 de abril de 2016.

Las dos técnicas, de levantamiento y hundimiento del relieve por Interferometría-DINSAR y la determinación de lineamientos estructurales, fracturas-deformaciones del relieve utilizando el Modelo Hidrológico Básico D8, son métodos complementarios. Mientras que la tecnología DINSAR, que necesita mucho tiempo de cálculo para analizar la tasa de cambio de desplazamiento del relieve en un período de tiempo en pequeños espacios de movimiento (mm), el método de densidad de concentración de lineamientos estructurales, basado en Modelos de Elevación Digital de alta resolución (en este caso de 4 m), proporciona rápidamente, y a baja costo, áreas de deformación superficial máxima del terreno con alta precisión. La coincidencia entre la infraestructura destruida y la concentración de lineamientos estructurales se puede ver en la Figura 114G y H.

3.4 Resultados detección de deformaciones del terreno utilizando técnicas DINSAR en relación con los resultados del hundimiento del terreno.

El primer resultado de los interferogramas dentro del período 25-10-2016- a 22-10-2019, antes del hundimiento en la Escuela Fe y Alegria-La Immaculada, en 2016-26-10 se muestra en la Figura 115. En (A) la imagen actual de Google Earth con el sitio de la vieja escuela y el relleno creado para estabilizar el sitio. En (B) el desplazamiento vertical hasta octubre de 2016. Los valores de alivio de elevación y subsidencia estuvieron dentro de un rango entre -50 mm de subsidencia (color azul-cian) y 20 mm del levantamiento del suelo (color hacia el rojo). El área colapsó por completo en octubre y diciembre de 2016 (polígono rojo). El débil color azul dentro del polígono indica que en octubre 25-2016, el hundimiento del área estaba en proceso. En las áreas cercanas, se pueden ver los profundos sumideros de cian, guiados por las huellas azules profundas que posiblemente demuestran la presencia de galerías subterráneas de minería. El color blanco representa los edificios existentes en la escuela en ese momento. El año con el mayor hundimiento fue 2016, posiblemente asociado con el terremoto de Pedernales del 16 de abril de 2016.

Los resultados de los interferogramas obtenidos de la pila de imágenes entre 2016-10-25 a 2019-10-22, muestran que los procesos de subsidencia estaban en progreso produciendo una nueva subsidencia en la calle Gonzalo Pizarro (Fig. 116A) antes del hundimiento y en Figura 116B después del mismo. Los colores al rojo representan las zonas que sencuentran levantándose (+) y las con tendencia al color azul, las que se encuentran hundiéndose (-), las zonas con aparente estabilidad son las de color celeste. Otras áreas de subsidencia se presentan más adelante.

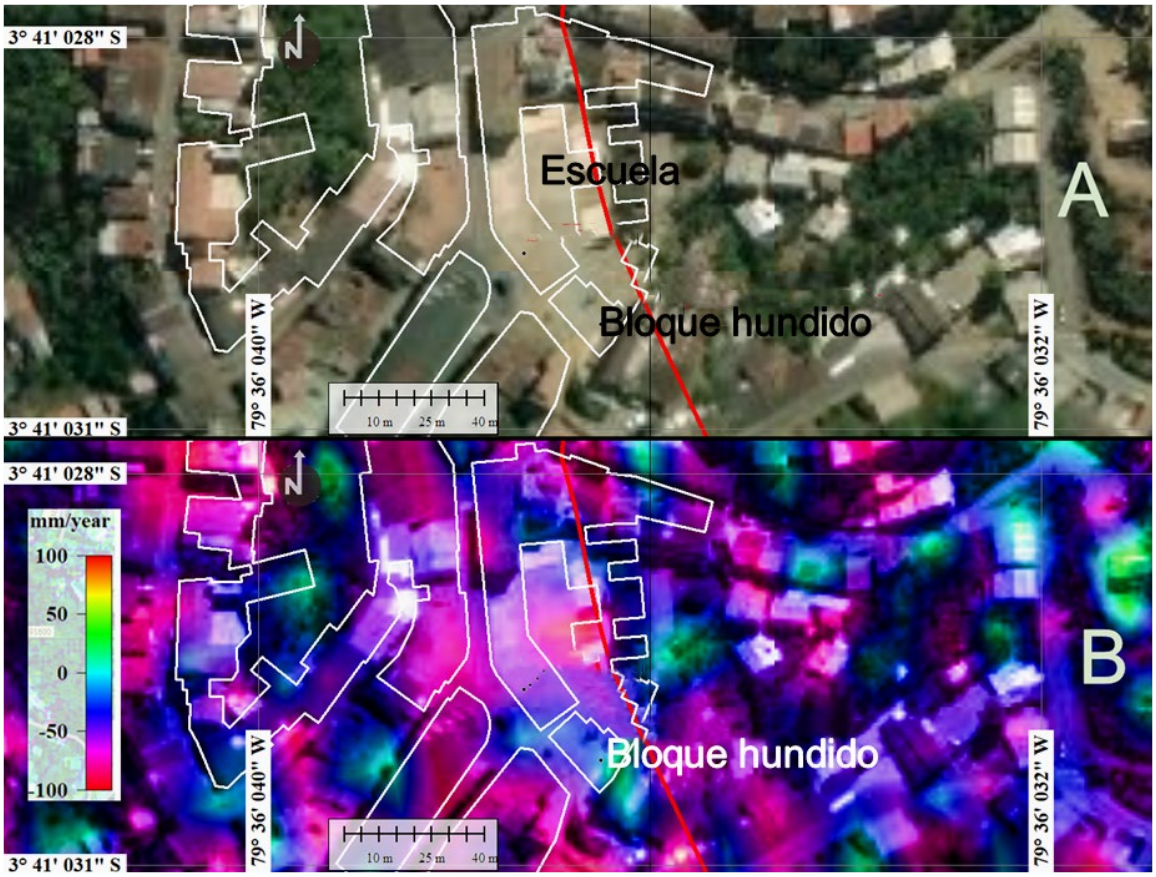


Figura 115. (A) Ubicación de la escuela Fe y Alegría-La Immaculada en el área de estudio antes del colapso del bloque de aulas escolares. (B) Bloque el colapso de las aulas escolares el 25 de octubre de un día antes del colapso que comenzó el 16 de octubre de 2016 y se derrumbó por completo en diciembre de 2016. El tenue color azul indica que antes del 25 de octubre de 2016 el hundimiento del área estaba en proceso. La galería minera la línea de color rojo y los bloques de casas son de color blanco.

Estos resultados se compararon con los datos de las investigaciones de subsidencia realizadas por el Instituto Nacional de Geología y Minería Metalúrgica-INIGEMM en marzo de 21017, un año después del hundimiento de 2016 y se presentaron en (Campoverde, 2017), como parte de los estudios para la estabilización del colapso de la escuela en octubre de 2016.

El estudio de los hundimientos del terreno que el Instituto Nacional de Geología y Minería Metalúrgica-INIGEMM llevó a cabo desde una red de monitoreo de 24 puntos entre los meses de marzo y abril de 2017, utilizando una estación Total TOPCON GTS-750, determinó que los desplazamientos promedio en la escuela, tienen un rango entre 1 a 15 mm en dos meses. Este rango de subsidencia está dentro del método INSAR presentado en este método.

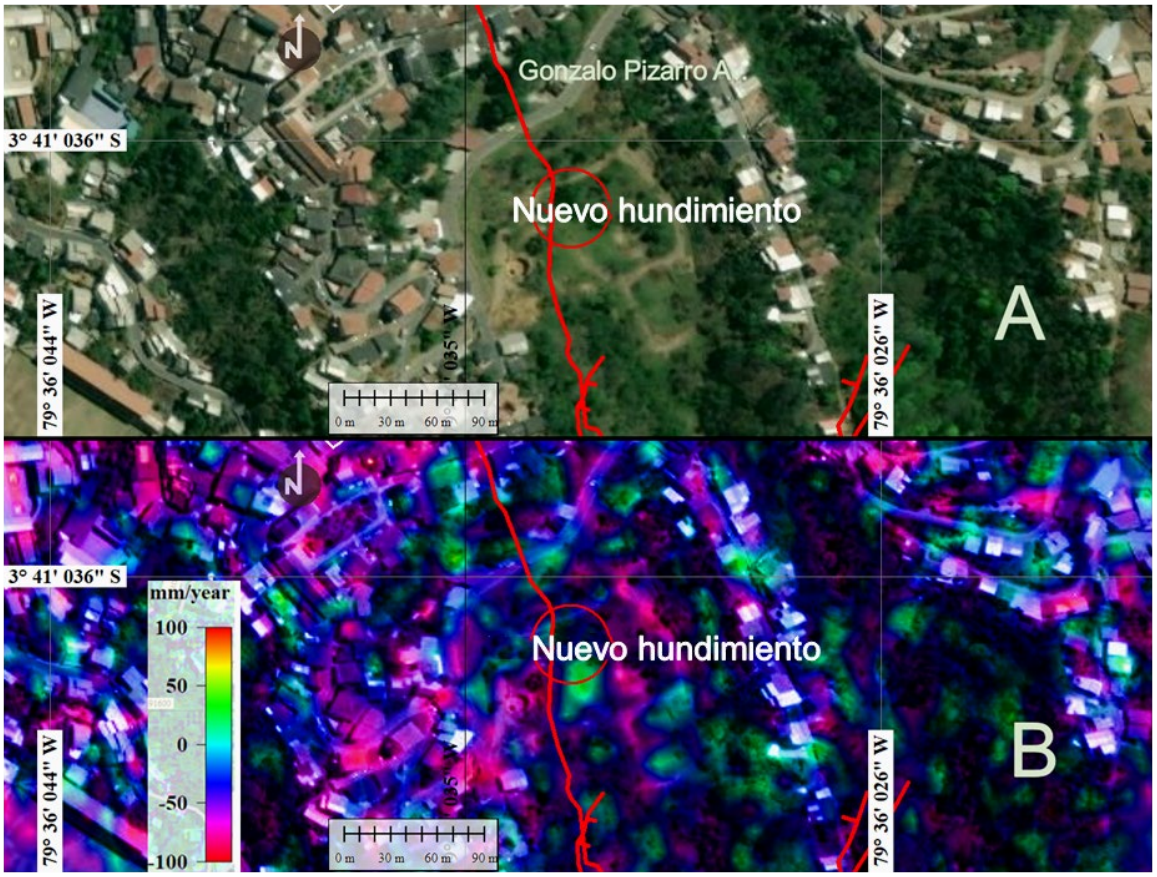


Figura 116. (A) Sitio de nueva subsidencia en el sector de la calle Gonzalo Pizarro en agosto-septiembre de 2019. (B) El azul intenso representa un rango de subsidencia alta.

El rango de subsidencia con INSAR tiene una mayor definición y va hasta desde los -50 mm/año en subsidencia hasta 20 mm / año en levantamiento del relieve, velocidad acumulada de 2016 a 2019, en todo momento. Esto significa que la metodología INSAR es más eficiente, gratuita y puede aplicarse en áreas grandes o regionales.

La Figura 117, muestra la velocidad de elevación y subsidencia del terreno dentro de un rango de -20 a -30 mm, para clasificar los niveles de rango más precisos en el sitio. (A) El nuevo colapso en la escuela Fe y Alegría, (B) el nuevo hundimiento en la calle Gonzalo Pizarro y en (C) el hundimiento que están ocurriendo en el hospital de la ciudad, entre otros lugares que fueron analizados por el Autor de esta Tesis en el año 2001 (Cando et al., 2001) y sirvió para verificar los resultados de este método.

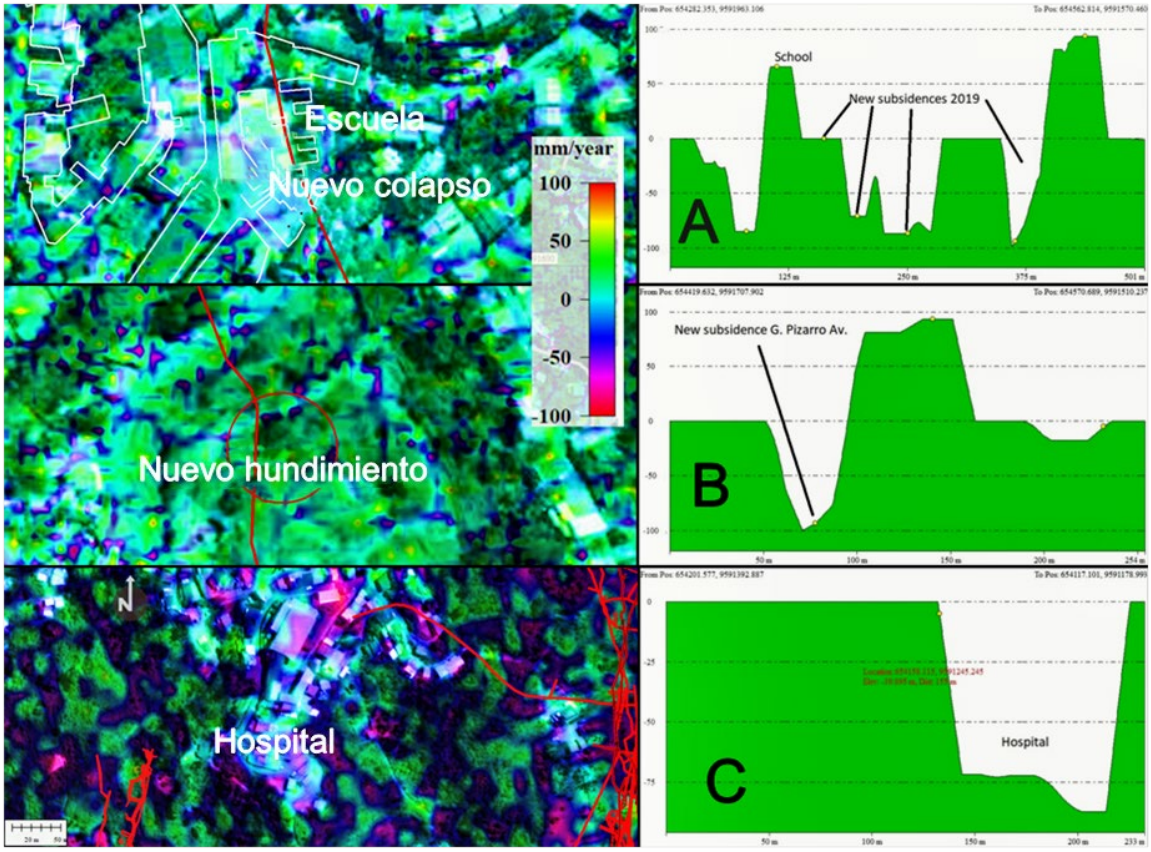


Figura 117. (A) Velocidad de elevación y hundimiento del suelo (mm / año) en la escuela La Inmaculada-Fe y Alegría (A), calle Gonzalo Pizarro (B), el hospital de la ciudad (C), obtenida del análisis interferométrico. Estos resultados corroboraron estudios previos y verificaron el análisis realizado con esta Metodología.

3.4.1. Discusión de la detección de deformaciones del terreno utilizando técnicas DINSAR en relación con los resultados del hundimiento del terreno.

El fundamento principal de la metodología DINSAR es la determinación de deformaciones del terreno por diferencia de fase de las tomas de radar realizada por los sensores de Sentinel 1, en dos periodos de tiempo distintas sobre un mismo punto de referencia. Una galería minera que es “ilegal”, no está catastrada o inventariada legalmente y no se conoce su ubicación espacial, tanto de su ingreso en superficie o bocamina, como de los ejes de las sus galerías subterráneas. Para detectar estas galerías en superficie, el análisis de “subsidencia por el método DINSAR” detectó por microondas de radio (como es su principio de funcionamiento), hundimientos milimétricos en la superficie del terreno que producen estas galerías ilegales desde su posición subterránea (“huellas o trazas de hundimiento”) y de las galerías legales también. Por lo tanto, no es un conocimiento “a piori” con el que se conoce la ubicación de estas labores mineras, ya que no existe un catastro de localización de estas galerías ilegales subterráneas en la zona Oeste de la ciudad. La minería ilegal no se catastra.

En la Figura 118, se pueden ver estas trazas o huellas superficiales en la zona Occidental de la zona de exclusión minera (línea de color naranja) que es la parte de la ciudad en donde no hay catastro minero subterráneo y este mecanismo DINSAR las identificó como franjas de color gris-negro que cortan las galerías mineras legales de color rojo.

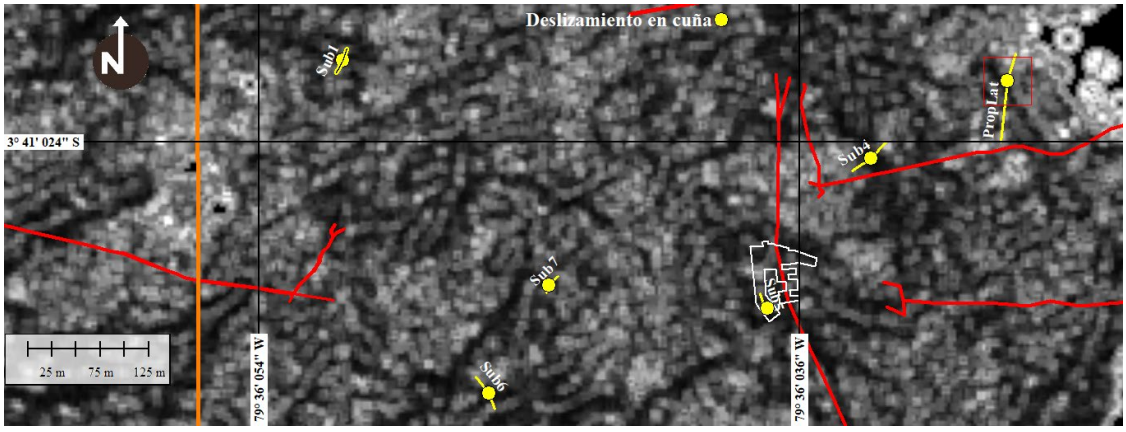


Figura 118. Trazas o huellas superficiales de las galerías subtarráneas en la zona occidental de la ciudad en donde no hay catastro minero. Los puntos de color amarillo son hundimientos y deslizamientos en la zona. Las galerpias mineras de color rojo y en anaranjado el límite de la zona de exclusión. La escuela representada con línea de color blanco.

En la Figura119, se presentan los perfiles de subsidencia sobre las trazas o huellas de hubdimiento que han dejado las galerías subtarráneas en esta zona occidental de la zona de exlusión.

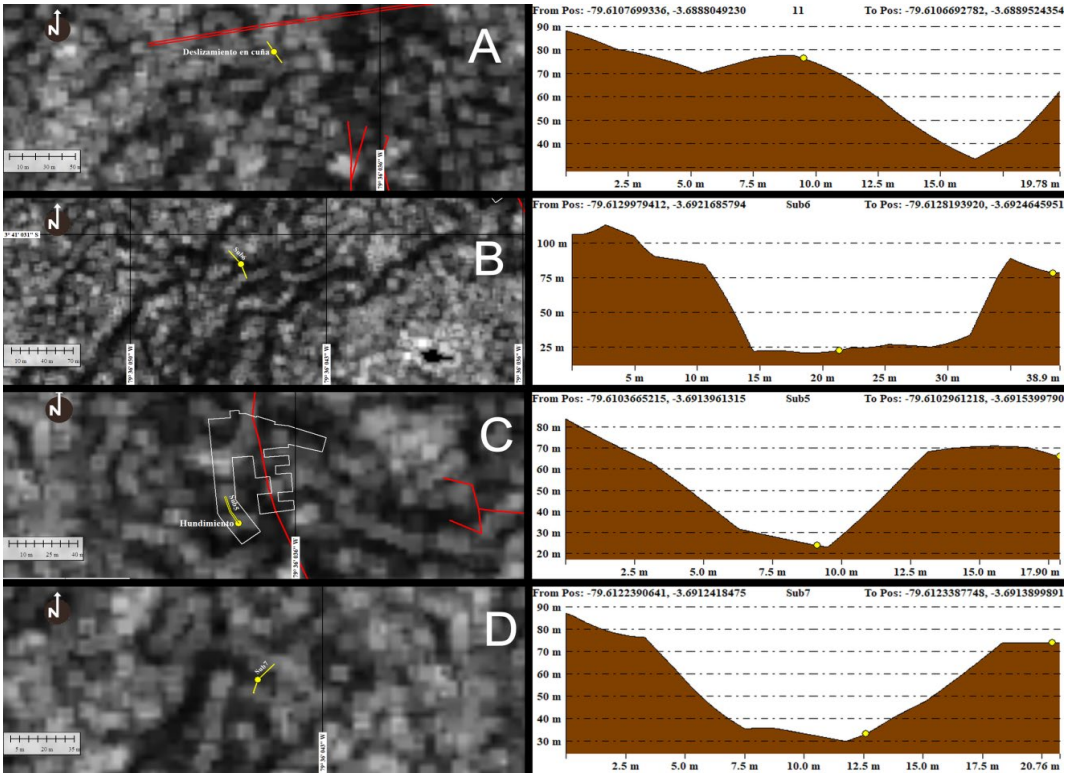


Figura 119. Perfiles de subsidencia sobre las trazas o huellas de hundimiento de galerías subterráneas. En (A) deslizamiento provocado. En (B y D) Subsidencias en viviendas. En (C) Subsidencia en el bloque de aulas de la escuela.

3.4.2. Conclusiones de la detección de deformaciones del terreno utilizando técnicas DINSAR en relación con los resultados del hundimiento del terreno.

A partir del procesado y la interpretación de las imágenes Sentinel 1, banda C, se obtuvieron interferogramas y áreas de deformación-subsidencia del relieve topográfico, relacionadas con galerías mineras subterráneas que se encuentran dentro del área de exclusión minera, con movimientos superficiales del relieve en algunos sitios con alta peligrosidad que requieren una investigación más profunda. en geología, geotecnia y geofísica.

Los 20 interferogramas analizados, muestran una alta coherencia espacial debido a la alta correlación temporal de cada interferograma.

La reducción del ruido atmosférico a través del proceso Sarproz APS ayudó a lograr una fuerte conexión entre los puntos dispersos con alta coherencia para que los valores de velocidad de desplazamiento sean confiables y correlacionables con los eventos reales que ocurrieron en los años 2016 y 2019.

Esta alta coherencia también puede deberse a que el área de estudio no tiene vegetación intensa que pueda causar ruido.

Antes del 25 de octubre de 2016, los interferogramas muestran deformaciones progresivas del suelo que se acumularon hasta el hundimiento del 26 de octubre de 2016 y diciembre de 2016 y agosto-septiembre de 2019, fechas en que ocurrió los hundimientos.

La mayoría de los interferogramas revelan movimientos continuos de la superficie en la parte central de la zona de exclusión de la ciudad de Zaruma, en sitios donde se ubicaron varias galerías mineras subterráneas.

La existencia de una capa de arcilla de 25 m de espesor promedio, con bajas características geotécnicas y fácilmente deformable, es la respuesta para la ocurrencia de hundimiento superficial del suelo obtenido con El método InSAR. Esto significa que la respuesta de esta capa de arcilla a las excavaciones mineras subterráneas en las capas de roca subyacentes (andesita erosionada y brecha volcánica) están directamente relacionadas con el hundimiento de esta suave capa por lo tanto del suelo y edificios y otras construcciones, en varios sectores de la ciudad.

El análisis del desplazamiento de la superficie por la técnica DInSAR, relacionado con aspectos históricos, de galerías subtarráneas legales e ilegales, corroboraron el estado de inestabilidad del centro colonial de la ciudad de Zaruma, donde más del 40% del área es inestable.

Esta técnica multitemporal para datos en la banda C también sirvió para extraer información sobre los rastros o huellas superficiales de hundimiento que han provocdos por los túneles de las galerías subterráneas en el sector

occidental del área de exclusión de la ciudad. Sector donde no hay minería subterránea catastral que de información de las galerías mineras.

Los sectores que actualmente presentan subsidencia según el estudio de interferometría SAR, pueden ser visto en la Figura 120 y son los siguientes: el mercado municipal, la escuela Fe y Alegría-La Inmaculada (1), coliseo deportivo (2), piscina municipal y cárcel (3), calle Gonzalo Pizarro (4), Iglesia (5), Centro Parque y Municipio (6), Estadio de la Ciudad (7), Avenida El Oro, (8), Hospital de la Ciudad, Escuela San Juan Bosco (9), Calle Gil Gilbert (10), Hotel Roland (11), El Sexmo (12), Escuela 26 de noviembre (13), Reinaldo Calle Espinosa (14), entre otros sectores.

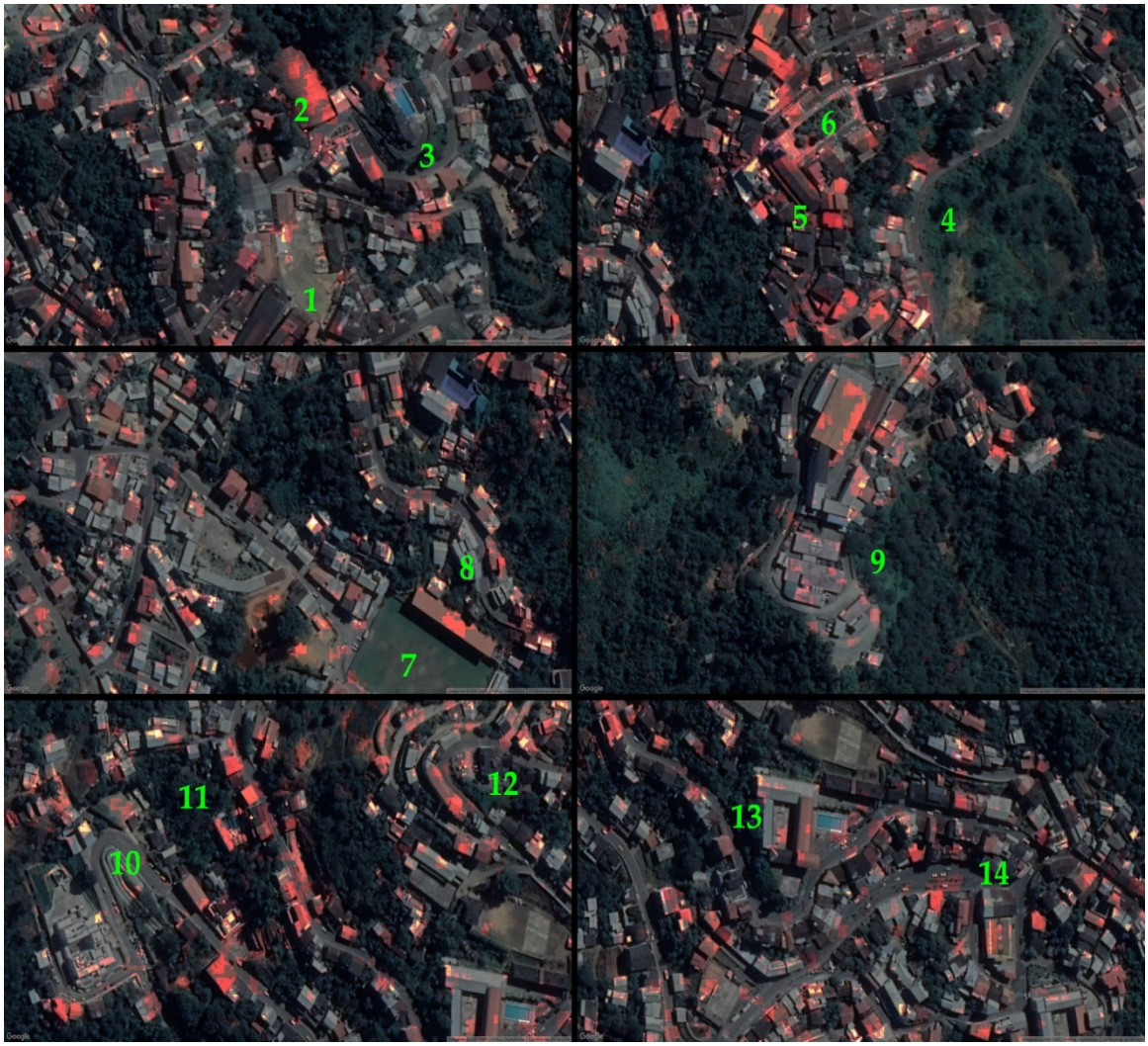


Figura 120. Sitios potenciales de subsidencias en la ciudad de Zaruma obtenidos de la aplicación de la técnica DINSAR.

3.5 Resultados de la prevención de desastres relacionados con eventos extremos de deformación natural del suelo mediante la aplicación de métodos espaciales en áreas urbanas.

Los resultados de este método, permitieron aplicar la prevención en la reducción del Riesgo Geológico que puede provocar la relación entre las deformaciones del relieve, el tránsito-concentración de la población y un sismo mayor a 7.2 Mw en el barrio La Mariscal de la ciudad de Quito. Los resultados del desplazamiento acumulado obtenido de PS-DINSAR en milímetros/año, para el período del 2 de septiembre de 2015 al 28 de noviembre de 2019, se pueden ver en la Figura 121A y tiene un rango de proceso simétrico total entre -20 y 60 mm.

Los datos ajustados de la serie multitemporal muestran un rango de movimiento en el área de La Mariscal entre 4 y 15 mm por año, un rango compatible con el sistema de fallas geológicas ciegas, del sistema de la falla de Quito con orientación NS, que tiene una elevación máxima estimada tasa de 0,8 mm / año (Soulas el al., 1991).

En la Figura 121B, se presenta la integración visual desde varios puntos de vista del tránsito y concentración de la población dentro del área de estudio en el barrio La Mariscal, utilizando los criterios de la Sintaxis del Espacio y el software de procesamiento DepthmapX.

En ambos casos, los colores con tendencia al rojo, representan el mayor desplazamiento acumulado y una mayor visibilidad que implica un mayor flujo de población y concentración. La integración de los procesos (I) en los diagramas de flujo de los dos métodos utilizó álgebra de mapas simple por intersección, adición y multiplicación de archivos interpolados en la misma escala de desplazamiento acumulado anual y concentración de visualización de densidad de población. Este proceso se realizó en QGis.

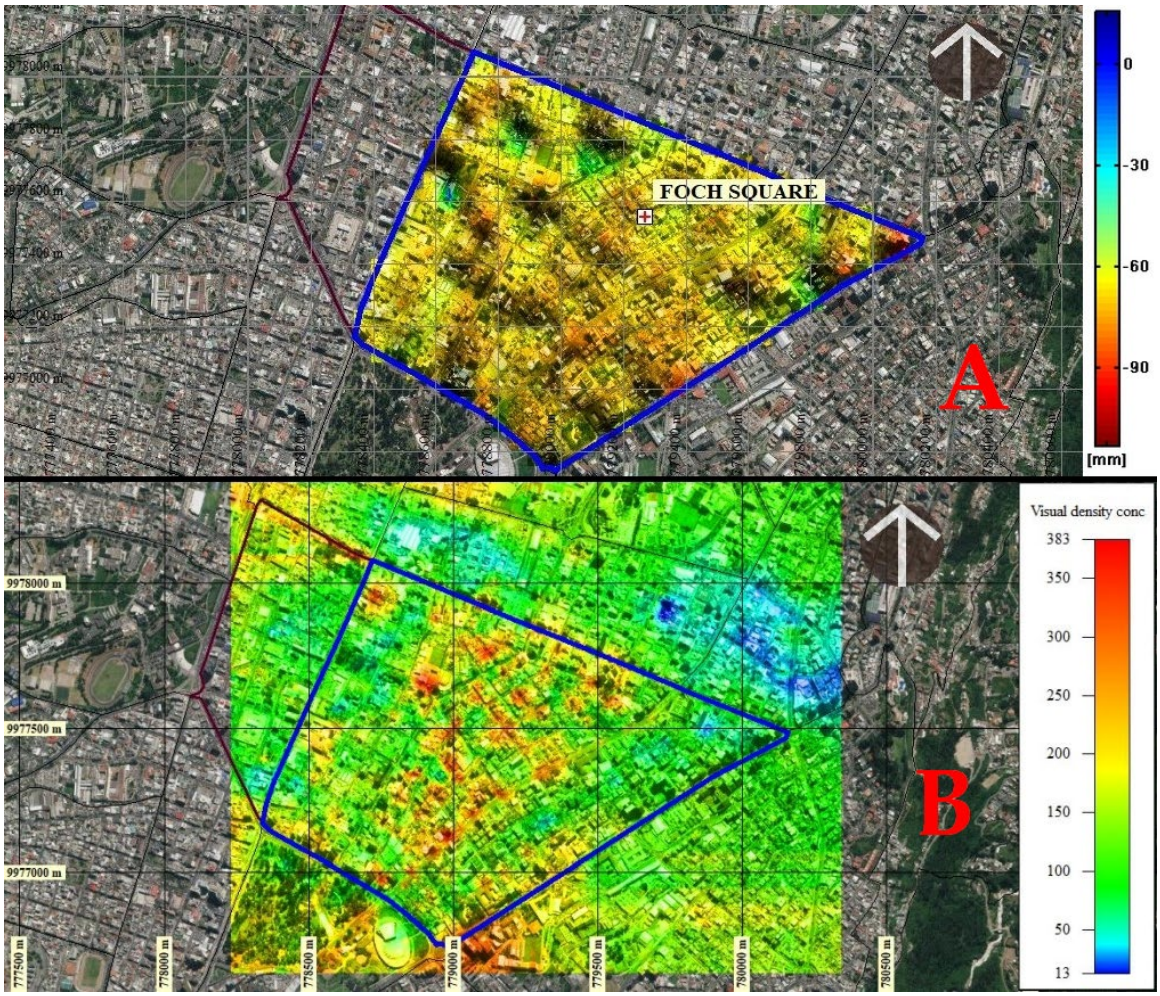


Figura 121. (A) Resultados del desplazamiento acumulado obtenido de DINSAR, período 2015-2019. Los colores hacia el rojo representan levantamientos del relieve y en color azul se ven las subsidencias del relieve que es el mapa de desplazamiento acumulado. En (B) resultados de la integración visual en el sector que determina la intensidad de tránsito concentración de la población el barrio. Los colores con tendencia al rojo representan una mayor visibilidad en el mapa de intensidad vsisibiity. Escala gráfica 1:10000.

Esta integración de resultados determinó que las áreas están expuestas a deformaciones de alta a muy alta intensidad debido al desplazamiento acumulado del suelo y la intensa densidad de concentración de la población (colores con tendencia al rojo), posiblemente pueden ser destruidos por un terremoto. Estas áreas corresponden a la parte central del vecindario con 59.712% del total de edificios y segmentos de calles vulnerables desde la Avenida Colón en el norte hasta la Avenida Patria hacia el sur y desde la Avenida 12 de octubre hacia el este, hasta la Avenida 10 de agosto hasta el oeste. La concentración del tráfico, la densidad y el flujo de peatones se encuentran generalmente en esta área y en la esquina superior noroeste hay un área de peligrosidad muy alta en la calle Luis Cordero Crespo y al sur en la avenida 6 de diciembre (Fig. 122).

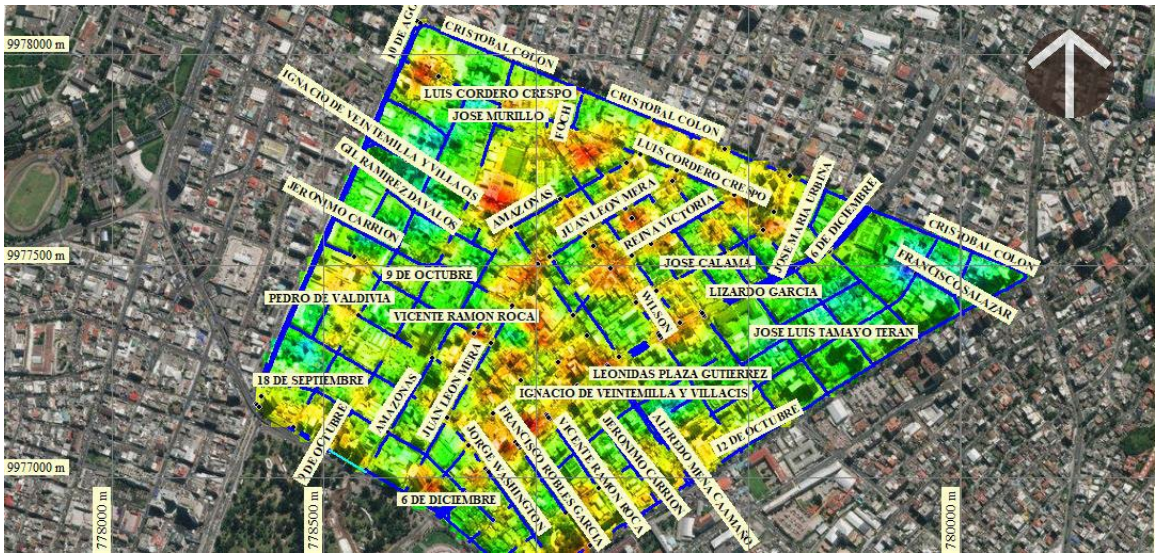


Figura 122. Integración de la información obtenida por PS-DINSAR y el Análisis de Sintaxis del Espacio. Se determinaron varias áreas construidas expuestas a una intensa desplaza del relieve con alta concentración del a población y muy susceptible a perecer ante la ocurrencia de un terremoto a 7.2 Mw (colores con tendencia al rojo).

Los resultados de esta integración se han transformado en intensidades de peligrosidad de edificios, calles según el desplazamiento acumulado (mm) para el período 2016-2019 y la densidad de concentración de la población en los mayores centros de concurrencia y tránsito del sector.

Este valor de intensidad de peligrosidad, se comparó con el estudio de vulnerabilidad del riesgo sísmico para estructuras de uso residencial ubicadas en la parroquia urbana de Mariscal Sucre (Parra, 2015).

Según este estudio, el mayor número de edificios que alcanzarían o superarían el daño extenso es del 27.8% al 39.1%, y se encuentra en el Distrito de La Mariscal (80% de sus estructuras sufrirían daño extenso). Este estudio se basó en la identificación de tipologías constructivas clave en el área, a la que el autor asignó un tipo de vulnerabilidad diferenciada por su estructura constructiva, altura (número de pisos) y calidad de diseño, además de una caracterización del escenario de peligro sísmico, identificación de curvas y el cálculo de las demandas de carga. Finalmente, el autor de ese estudio calculó los daños estructurales y no estructurales de los edificios, utilizando las curvas de fragilidad correspondientes a cada tipología en una clasificación HAZUS con los siguientes grados: ninguno, leve, moderado, extenso e integral.

Esta comparación determinó que el análisis de peligrosidad de las construcciones y de la población, considerando el método PSI-DINSAR-Análisis de la Sintaxis del Espacio y el estudio de Riesgo Sísmico realizado por este autor, son complementarios y existen coincidencias en laz zonas de peligrosidad por intensidad de deformación del relieve y de vulnerabilidad sísmica. Esta coincidencia se puede ver en la Figura 123 en la que (A) muestra el sector de la Plaza Foch y sus alrededores, que son los sectores con la mayor aglomeración

de actividades económico-productivas representadas en rojo y donde el método sísmico localizó áreas de muy alto a alta vulnerabilidad (B), coincidiendo con los resultados obtenidos en esta propuesta (C). Las zonas de intensidad y vulnerabilidad sísmica moderada (color verde) a completa (rojo), coincide con el grado de peligrosidad del promedio (amarillo-naranja) a muy alto (color con tendencia al rojo) obtenidos del Método propueto.

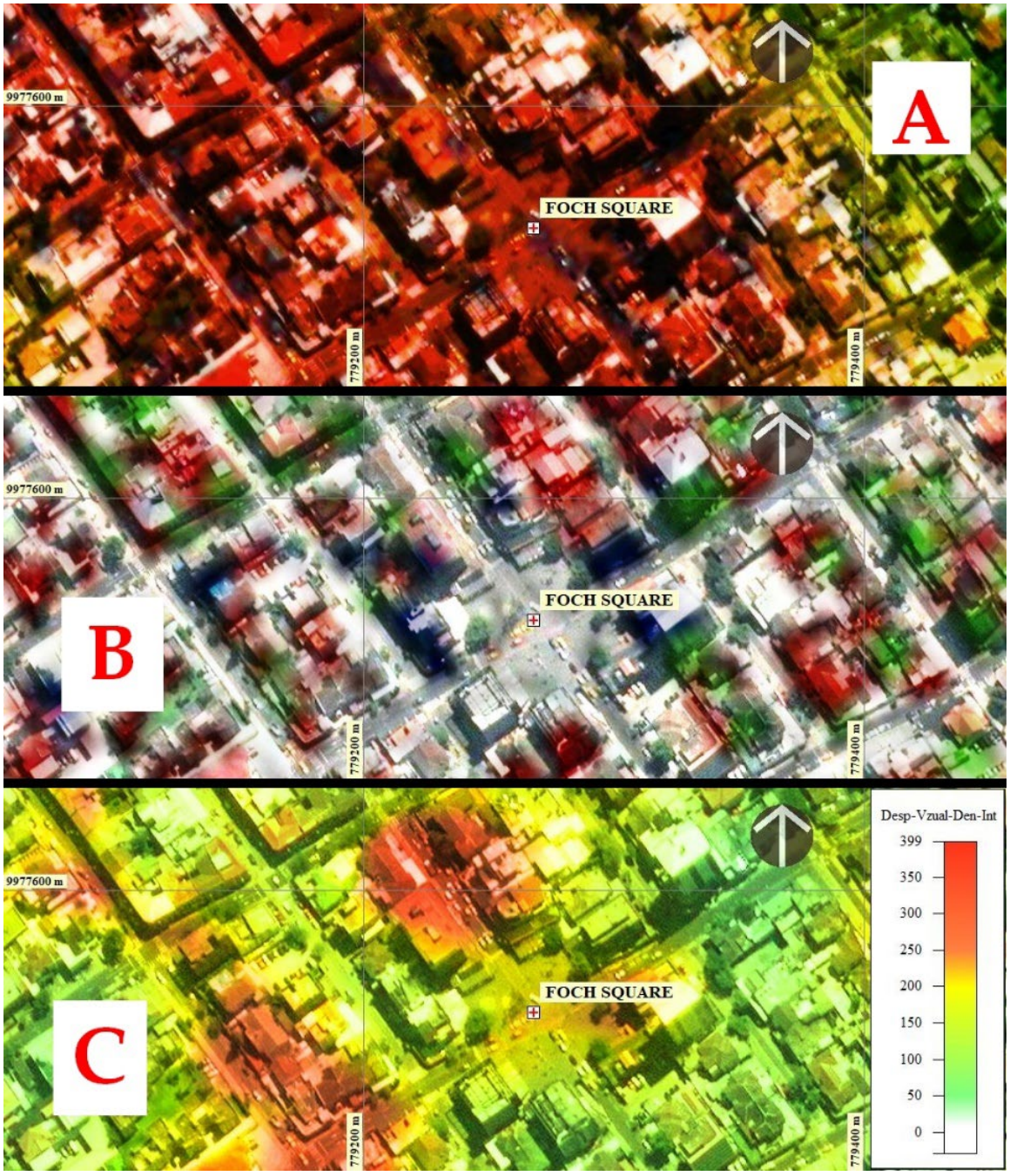


Figura 123. Concordancia entre los métodos aplicados para determinar la vulnerabilidad a la peligrosidad en Foch Square, considerando la sintaxis del espacio DINSAR y el estudio de riesgo sísmico preparado por (Parra, 2015). (A) Plaza Foch y sus alrededores. (B) Muy alta a alta vulnerabilidad sísmica. (C) Lugares más concurridos del sector.

Existe además un alto grado de coincidencia entre las intensidades de vulnerabilidad sísmica moderada (color verde) a completa (rojo), coincide con el grado de peligrosidad del promedio (amarillo-naranja) a muy alto (color con tendencia al rojo) presentado en este método. En la Figura 124A, el grado de peligrosidad de los edificios se ha representado en función del desplazamiento acumulado en mm/año para el período 2015-2019 y la concentración visual y la densidad de población. Las áreas expuestas a una peligrosidad alta a muy alta se representan con un color que tiende al rojo, las áreas de peligrosidad media con colores al amarillo y las áreas de baja peligrosidad o sin peligro se han representado con colores que tienden al verde-azul respectivamente. La Figura 124B muestra el histograma de la intensidad de peligrosidad estandarizada de los edificios donde 1 es ninguno, 2 bajo, 3 medio, 4 alto y 5 muy alto. El histograma representa la frecuencia de los edificios contra la peligrosidad.La Figura 124C muestra 16 edificios sin peligrosidad y 531 edificios con baja peligrosidad. En la Figura 124D, se representaron 2517 edificios con peligrosidad media. En la Figura 124E, se pueden ver 416 edificios con alta peligrosidad y 85 edificios con muy alta peligrosidad.

Según el análisis de peligrosidad de las construcciones del sector de la Figura 124, la peligrosidad con intensidades de media a muy alta implica que en caso de un terremoto de más de 7 Mw, las calles del vecindario pueden destruirse parcial o totalmente. Dependiendo de la intensidad de peligrosidad de las calles del sector, se han localizado las rutas más conocidas y menos expuestas a ser destruidas que la población usa diariamente y servirán como rutas de escape seguras para llegar a áreas de baja peligrosidad (áreas seguras verde-azul o valores 1-2). En (a, c, d, e) imágenes de la Plaza Foch, los lugares más concurridos del sector.

La peligrosidad de las calles en general se ve en la Figura 125A, en donde están todas las calles, con y sin peligro. En la Figura 125B, las calles con muy alt peligro que pueden ser destruidas por un gran terremoto. Estas se muestran en rojo con una longitud de 19.42 km que corresponde al 67.6% del total de calles. Las calles sin peligro, tienen una longuitud de 15.41 km, se las ha representado con color a azul y representan el 32.4% del total de calles. En la Figura 125C, los ejes de las calles más peligrosas se ven con intensidades de muy altas a muy altas. En Figura 125D se ven los ejes de las calles con peligrosidad media, alta y muy alta. Las áreas de construcción con mayor peligrosidad, están ubicadas a poca distancia en algunos casos, como en el sector entre las calles intermedias de áreas sin peligrosidad. Que pueden ser utilizadas como zonas de encuentro seguro ante la ocurrencia de un terremoto.

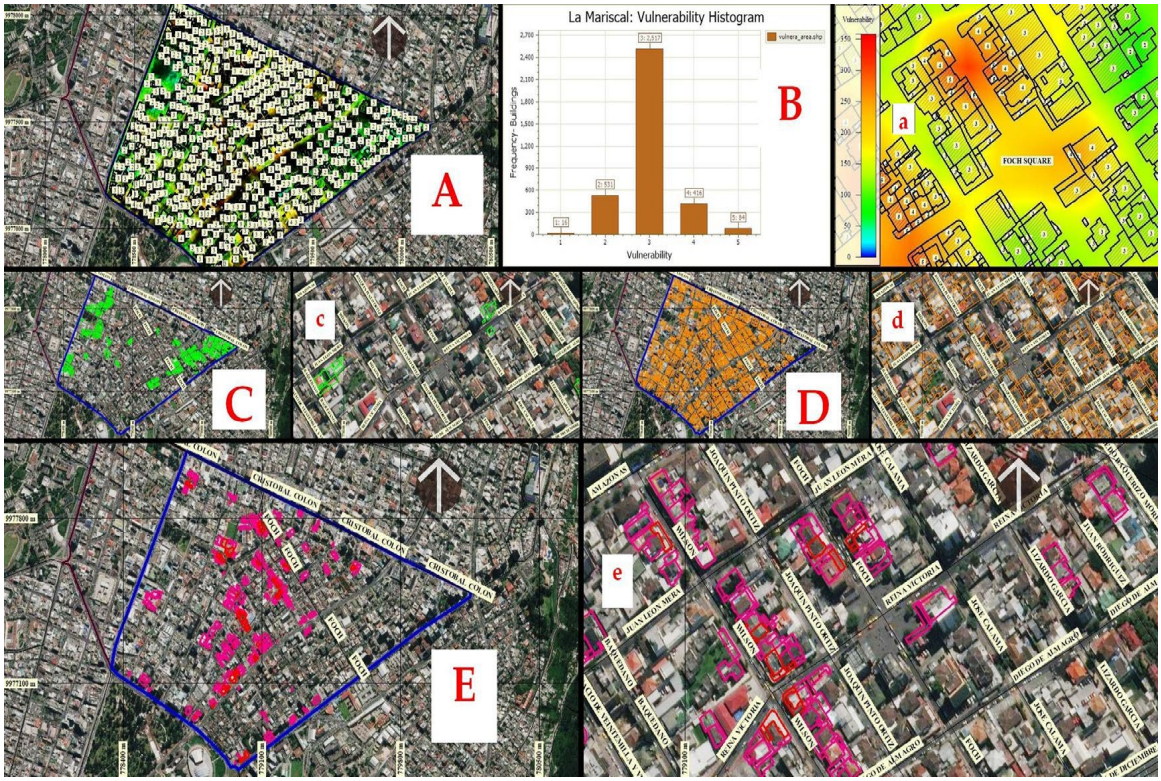


Figura 124. Peligrosidad de edificios basada en el desplazamiento acumulado para el período 2015–2019 y la densidad de concentración de la población. (A) Grado de peligrosidad de los edificios en función del desplazamiento acumulado. (B) Histograma de intensidad de peligrosidad estandarizada. (C) Plaza Foch, el lugar más concurrido del sector. (D) Edificios con peligrosidad media. (E) Edificios con peligrosidad alta y muy alta. En (a, c, d, e) la Plaza Foch.

La parte central de La Mariscal y Plaza Foch se encuentra la ruta de la quebrada Miraflores, quebrada que sfue rellenada hace décadas y sobre la que se construyeron los edificios y posiblemente el desplazamiento acumulado obtenido con PSI-DINSAR es el resultado del movimi|ento diferencial de este relleno. Este relleno afecta a todo el sector, colocando a Plaza Foch en muy alto grado de peligrosidad, por estar situada en uno de los flancos de la quebrada rellenada (Fig. 125E) (Moris et al., 2015).

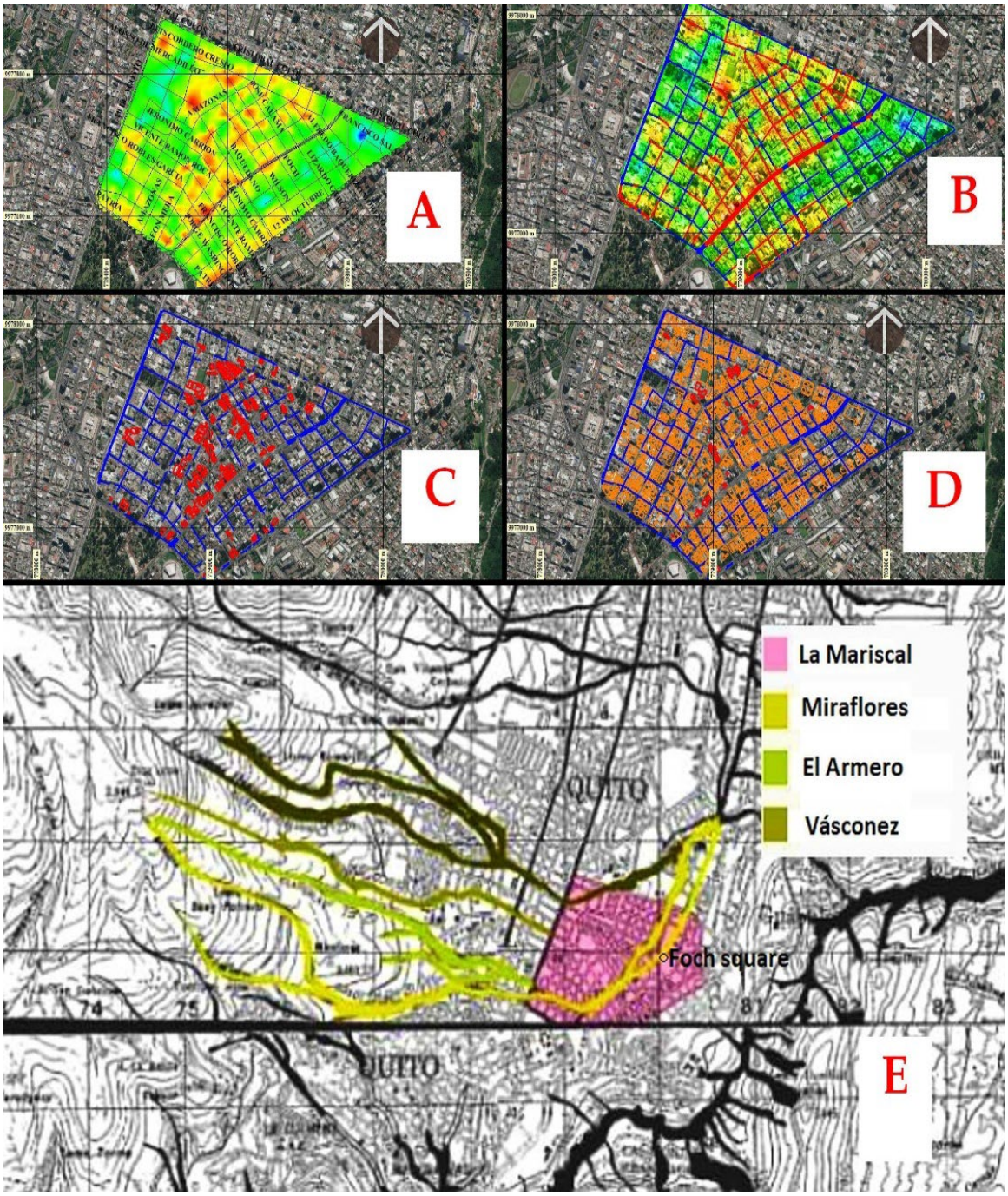


Figura 125. (A) Peligrosidad de todas las calles del sector. (B) Calles con intensidades de peligrosidad en colores rojos y sin peligrosidad en azul. (C) Vectores de calles con peligrosidad de alta a muy alta. (D) Vectores de calles de peligrosidad media, alta y muy alta. (E) Las quebradas completas y la posición de la Plaza Foch en un flanco de la quebrada Miraflores. La imagen es de baja resolución desde su origen.

3.5.1. Discusión de la prevención de desastres relacionados con eventos extremos de deformación natural del suelo mediante la aplicación de métodos espaciales en áreas urbanas.

El método propuesto para desarrollar el mapa de peligrosidad de los edificios y calles en el barrio de La Mariscal, basada en el desplazamiento acumulado calculado con PS-DINSAR y la Sintaxis del Espacio (intensidad de concentración visual-densidad de población) es una alternativa innovadora complementaria a los métodos que utilizan la variable sismológica tradicional, para mejorar el pronóstico del peligro sísmico y pueden servir como un sistema de alerta temprana en caso de un terremoto de más de 7.2 Mw.

Los desplazamientos acumulados en mm/año, más la intensidad de visualización-densidad de población en formato ráster, se integraron en mapas de peligrosidad de los edificios, en la misma escala de trabajo, sin tener problemas de correcciones espaciales geométricas. El detalle obtenido de los edificios en peligro es muy diferente de los mapas que se pueden obtener con métodos cartográficos tradicionales, debido a la resolución espacial de las imágenes, resolución del Modelo Digital de Elevación que en este caso fue de 5 m y de las ecuaciones de gobierno de los procesos pertenecientes a los programas empleados.

Este método utilizando PS-DINSAR y la Sintaxis del Espacio es una técnica que proporcionó una nueva visión de lo que sucedió y puede suceder con respecto a la peligrosidad de edificios y la población que se encuentra en áreas deformadas tectónicamente y en quebradas internas que se han rellenado.

Los parámetros obtenidos de desplazamientos en mm/año y concentración de la población en centros de diversión y servicios públicos en zonas de peligrosidad sísmica, pueden obtenerse con anterioridad a la ocurrencia de un terremoto intenso y pueden servir como parámetros de predicción rápidas en mapas de peligrosidad y pueden ser lavase de información para crear o mejorar Sistema de Alerta Temprana que servirán a las autoridades para implementar medidas de reducción del Riesgo Geológico por este tipo de peligros naturales.

Las posibles rutas de evacuación en algunos casos están rodeadas por rutas con alto hrado de peligrosidad, por lo que se han elegido otras alternativas, como las rutas de evacuación que no están asociadas con el movimiento de los patrones tránsito diario peatonal. Las áreas de construcción más expuestas están al alcance de rutas de escape seguras y en sectores entre las calles intermedias de áreas no expuestas. La ubicación de las rutas de escape seguras depende de la intensidad de las áreas expuestas altas y muy altas en el área de estudio.

En general, las rutas de escape están cerca de las áreas de mayor peligrosidad que la población puede alcanzar en muy poco tiempo entre 1 y 4 min. Estos tiempos se han calculado analizando la velocidad de una persona/distancia recorrida en QGis, para lo cual se midieron las distancias para llegar a todos los segmentos de las calles seguras designadas de la red, desde un área expuesta con una moderada velocidad humana de 2 m/s. Estas rutas de doble línea rojo-negro se pueden ver en la secuencia de imágenes A-F de la Figura 126.

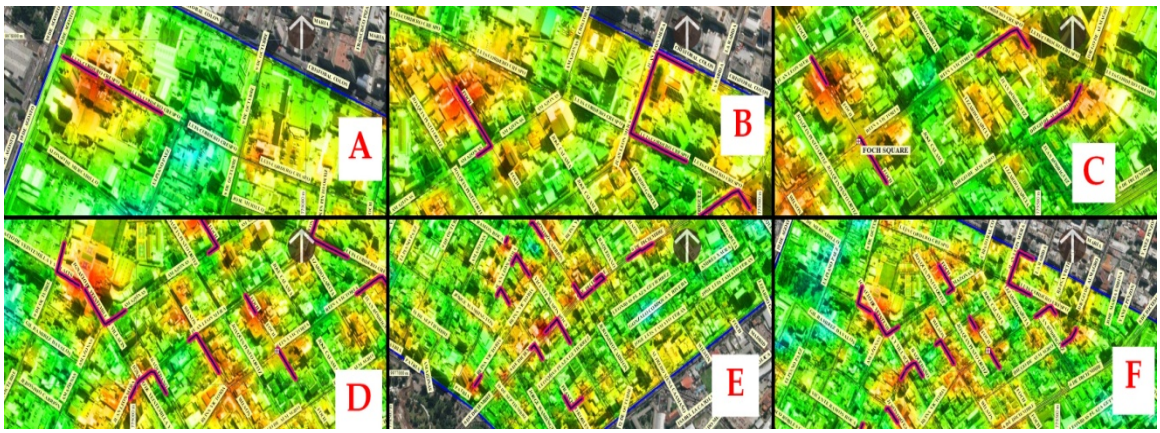


Figura 126. Rutas de escape cerca de las áreas de mayor peligrosidad que la población puede alcanzar en muy poco tiempo entre 1 y 4 min (rutas de doble línea rojo-negro en las figuras de la A a la F).

3.5.2. Conclusiones de la prevención de desastres relacionados con eventos extremos de deformación natural del suelo mediante la aplicación de métodos espaciales en áreas urbanas.

La facilidad de unificar estos dos conceptos del análisis PS-DINSAR y la Sintaxis del Espacio, permitió determinar previamente la peligrosidad de la red espacial urbana de La Mariscal en cualquiera de sus partes, debido a la ocurrencia de un terremoto mayor de 6-7 o Mw. El barrio de La Mariscal tiene áreas con peligrosidad alta a muy alta, que representan el 60% de su área total debido al desplazamiento acumulado del relieve y el flujo-concentración de la población. Esto implica que la población que viaja y asiste a centros de entretenimiento, recreación y servicios públicos está muy expuesta a perecer ante la ocurrencia de un gran terremoto mayor o igual a 7 Mw, como los que han ocurrido históricamente.

El polígono expuesto está delimitado desde la Avenida Colón, en el borde norte de la zona, hasta la Avenida Patria, en el borde sur y desde la Avenida 12 de octubre, en el borde oriental, hasta la Avenida 10 de agosto en el borde occidental.

Después de que se completó el análisis para identificar segmentos de calles que tienen dificultades para ser utilizadas como rutas seguras de evacuación (debido a su peligrosidad alta a muy alta), se identificaron calles que pueden usarse como rutas seguras válidas para la evacuación de la población a lugares seguros. Áreas de color verde-azul o intensidades 1-2.

El uso de información gratuita, como imágenes Sentinel 1A, Modelos de Elevación Digitaly software gratuito para análisis de sintaxis espacial, como DepthmapX, es un beneficio para la investigación de este y otros tipos de peligros naturales, como los movimientos de masas y las inundaciones.

El método propuesto en este apartado, permitió obtener rutas de escape seguras que pueden llevar a la población a áreas seguras en caso de un terremoto de más de 6–7 Mw.

Una coincidencia beneficiosa fue la concordancia de las respuestas entre la metodología propuesta y el método sísmico. Coincidencia que sirvió para mejorar la interpretación de la peligrosidad de los edificios y calles del área estudiada, en caso de un terremoto mayor a 7.2 Mw. Este método se puede proponer al municipio de la ciudad de Quito y a los municipios de otras provincias para reducir los tiempos de evacuación y simplificar el proceso de búsqueda de rutas seguras, además, para mejorar los procesos de respuesta después de la generación de un gran terremoto, esto se asocia con la respuesta efectiva en el proceso de evacuación.

Aunque el método utilizada su potencial para determinar las deformaciones del terreno y la velocidad de desplazamiento acumulado con PS-DINSAR, existen varias limitaciones que pueden determinar resultados erróneos en resultados relacionados principalmente con la tecnología debido a la imposibilidad de reducir las señales falsas en la adquisición de las imágenes de radar dependientes de error atmosférico y del error topográfico en zonas de alta montaña como en este caso, así se haya obtenido una alta coherencia en la red de cálculo para obtener los interferogramas. La coherencia fue mayor a 0.65.

Los cambios en la reflectividad del suelo causan la descorrelación del radar, lo que hace que la Fase DINSAR sea ilegible. Además, en regiones de litoral, el vapor de agua atmosférico retrasa las señales del radar, haciendo que las lecturas de fase sean inexactas.

En cuanto a el Método de la Sintaxis del Espacio, no hay limitaciones para su uso.

4. CONCLUSIONES GENERALES

En Tesis se han abordado distintos problemas relacionados con los Peligros Naturales y la Reducción del Riesgo Geológicos, mediante herramientas de Geomática Aplicada en 5 métodos que utilizaron información base de uso público como información planimétrica, imágenes de radar Sentinel 1 y 2, Modelos de Elevación Digital de varias resoluciones espaciales y tratados con software libre. Métodos para determinar patrones de movimientos en masa en base del Modelo Hidrológico Básico D8, Análisis Morfométrico, análisis de Flujos de Lahares y análisis de Redes Urbanas relacionadas con sismos intensos.

Cada método se ha tratado separadamente, y cada una de ellas se puede profundizar y constituir por si solos un objetivo de tesis doctorales, pero en este caso se ha pretendido realizar un acercamiento a la reducción del Riesgo Geológico generados por movimientos en masa, atraves de del desarrollo y aplicación de estos métodos.

El estudio en detalle del primer método mediante el Modelo Hidrológico Básico D8, fue la base para el desarrollo de los siguientes métodos para obtener las deformaciones del terreno por injerencia sismo-tectónica y su relación con los diferentes tipos de movimientos en masa activados por sismos intensos o fuertes precipitaciones. Los resultados de este método se manifiestan principalmente por la presencia de zonas de concentración intensa de lineamientos geológico-estructurales obtenidas de los patrones de flujo de acumulación de la escorrentía superficial del agua de precipitación identificadas en patrones experimentales que no aparecen trazados en los mapas de Riesgos Naturales de las instituciones relacionados con la Gestión de Riesgos, pudiendo observarse en los resultados rasgos escondidos de deformaciones del terreno que pueden ayudar a predecir catástrofes ocasionadas por deslizamientos, flujos de masa, caída de bloques, reptación y solifuxión principalmente. Así mismo, Este método que se considera como principal se combinó con software especializado para la detección temprana de lahares primarios y secundarios desde su origen proximal o distal, como también fue un factor importante en la detección temprana de deformaciones del terreno para alertar a las Autoridades sobre los peligros de las construcciones antes de la ocurrencia de un sismo mayor a 7 Mw. Las discrepancias identificadas entre los resultados experimentales y las simulaciones teóricas ponen de manifiesto la necesidad de profundizar aún más en el conocimiento de este tipo de métodos para obtener resultados eficientes y que puedan apoyar en la Reducción del Riesgo Geológico.

El segundo método aplicado a identificar el origen y rutas de los lahares primarios y secundarios en el volcán De Fuego (Guatemala), abordó principalmente el apoyo que dio este método para mejorar las rutas que recorren los lahares desde su origen proximal o distal, rutas que en primera instancia fueron obtenidas mediante Simulación Numérica con el software Lahar-Z, rutas que no marcaron el origen desde zonas deformadas tectónicamente y que fueron determinadas con el análisis interferométrico, parámetros e índices morfométricos y métodos de estabilidad de taludes. Este mejoramiento permitió

mejorar las rutas que fueron comprobadas con inspecciones de campo que ayudaron a calibrar el método.

Los dos métodos tercero y cuarto aplicados a deformaciones superficiales y subterráneas utilizando análisis DINSAR, concentración de lineamientos geológico-estructurales combinados con técnicas geofísicas como tomografía eléctrica del subsuelo, georadares, sísmica pasiva e investigación geotécnica, sirvieron para demostrar que los colapsos de los edificios de las Zonas Cero de las ciudades de Manta y las zonas de deformación ynhundimiento de la ciudad de Zaruma se podían predecir con años de anticipación, solamente con el Modelo Hidrológico Básico D8 para extraer acumulaciones de flujo de la escorrentía, líneas de rotura morfológica y lineaciones geológico estructurales era suficiente..

Una aplicación novedosa fue el desarrollo y aplicación del quinto método que combinó una herramienta para el análisis espacial urbano en las ciudades, la Sintaxis del Espacio, con la Interferometría Diferencial en sitios muy concurridos de la Zona Rosa del barrio la Mariscal en la ciudad de Quito. Es la primara ocasión que se combinan estas técnicas para predecir desastres como el ocurrido en las Zonas Cero de las ciudades de Manta por sismos intensos y las subsidencias antrópicas que ocurren en la cidad de Zaruma. Por primara vez, al menos en Ecuador, se relacionó el tránsito-concentración de la población con las edificaciones y con zonas deformadas del relieve, para predecir su peligrosidad ante un sismo de 7.2 Mw o mayor.

Cualquiera de los cinco métodos desarrollados se puede aplicar a cualquier sector territorial, en cualquier región y con escalas diferentes desde regionales hasta locales, de manera rápida, precisa y a bajo costo. No necesitan de muchas coberturas temáticas para su desarrollo y aplicación, al contrario de los Métodos Cartográficos que necesitan de varios niveles de información estáticas y dinámicas para determinar el Riesgo Geológico de un sector. Estos métodos permiten cartgrafías que en definitiva son gerramientas para la correcta prevención almostrar espacialmente los dferente sgrados de peligrosidad y determinar la probabilidad de activación de los agentes causantes del riesgo y su posible afectación a la infraestructura social económica de una región, así como la las personas. Desde este punto de vista, estas metodologías se convierten en instrumentos importantes para la reducción del Riesgo Geológico de cualquier región. Estos métodos muestran la importancia del uso de las imágenes de radar Sentinel y Modelos de Elevación Digitalde alta resolución espacial para el análisis y clasificación de las zonas de subsidencia, levantamiento del relieve y tipos de movimientos en masa. Ello posibilitará la elaboración de cartografía base de peligros a detalle, tanto como permitan la resolución espacial de las imágenes y los Modelos de Elevación Digital. Esta cartografía base, puede o no tener apoyo de métodos geofísicos-geotécnicos, ya que por sus principios de operación la respuesta que brinda es suficiente para entender las zonas deformadas, capaces de generar movimientos en masa.

GENERAL CONCLUSSIONS

Theses have addressed various problems related to Natural Hazards and Geological Risk Reduction, using Applied Geomatics tools in 5 methods that used basic information for public use such as planimetric information, Sentinel 1 and 2 radar images, Digital Elevation Models of various spatial resolutions and treated with free software. Methods to determine patterns of mass movements based on the Basic Hydrological Model D8, Morphometric Analysis, Lahare Flow analysis and Urban Network analysis related to intense earthquakes.

Each method has been treated separately, and each one of them can be deepened and constitute by itself a goal of doctoral theses, but in this case an attempt has been made to approach the reduction of Geological Risk generated by mass movements, through of the development and application of These Methods.

The study in detail of the first method by means of the Basic Hydrological Model D8, was the basis for the development of the following Methods to obtain the deformations of the ground by seismic-tectonic interference and its relationship with the different types of mass movements activated by earthquakes intense or heavy rainfall. The results of this method are mainly manifested by the presence of areas of intense concentration of geological-structural guidelines obtained from the accumulation flow patterns of the surface runoff of the precipitation water identified in experimental patterns that do not appear plotted in the Risk maps. Natural from the institutions related to Risk Management, being able to observe in the results hidden features of terrain deformations that can help to predict catastrophes caused by landslides, mass flows, block falls, creep and solifuxion mainly. Likewise, This method that is considered as the main one was combined with specialized software for the early detection of primary and secondary lahars from their proximal or distal origin, as well as being an important factor in the early detection of terrain deformations to alert the Authorities on the dangers of buildings before the occurrence of an earthquake greater than 7 Mw. The discrepancies identified between the experimental results and the theoretical simulations show the need to further deepen the knowledge of this type of Methods in order to obtain efficient results that can support Geological Risk Reduction.

The second method applied to identify the origin and routes of the primary and secondary lahars in the De Fuego volcano (Guatemala), mainly addressed the support given by this method to improve the routes that the lahars travel from their proximal or distal origin, routes that in the first instance, they were obtained by means of Numerical Simulation with the Lahar-Z software, routes that did not mark the origin from tectonically deformed areas and that were determined with interferometric analysis, parameters and morphometric indices, and slope stability methods. This improvement allowed to improve the routes that were verified with field inspections that helped to calibrate the method.

The third and fourth methods applied to surface and underground deformations using DINSAR analysis, concentration of geological-structural guidelines combined with geophysical techniques such as subsoil electrical tomography, georadars, passive seismic and geotechnical investigation, served to demonstrate that the collapses of the buildings of the Zero Zones of the cities of Manta and the deformation and subsidence zones of the city of Zaruma could be predicted years in advance, only with the Basic Hydrological Model D8 to extract runoff flow accumulations, morphological break lines and geological lines structural was enough ..

A novel application was the development and application of the fifth method that combined a tool for urban spatial analysis in cities, the Syntax of Space, with Differential Interferometry in very crowded places in the Zona Rosa of the La Mariscal neighborhood in the city of Quito. It is the first time that these techniques are combined to predict disasters such as the one that occurred in Ground Zero of the cities of Manta due to intense earthquakes and the anthropic subsidences that occur in the city of Zaruma. For the first time, at least in Ecuador, the transit-concentration of the population was related to buildings and deformed areas of the relief, to predict their danger in the event of an earthquake of 7.2 Mw or greater.

Any of the five developed methods can be applied to any territorial sector, in any region and with different scales from regional to local, quickly, accurately and at low cost. They do not need many thematic covers.

5. REFERENCIAS

Abdikan, S.; Arıkan, M., Sanli, F.B. (2014). Monitoring of coal mining subsidence in peri-urban area of Zonguldak city (NW Turkey) with persistent scatterer interferometry using ALOS-PALSAR. Environ Earth Sci., 71.

https://doi.org/10.1007/s12665-013-2793-1.

Aguiar, R. (2013). Seismic Microzonation of Quito. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, 14-26. ISBN 978-9978-301-02-9. https://www.researchgate.net/publication/277305703_Microzonificacion_Sismica_de_Quito (accessed on 5 November 2019).

Albert, Z.; Jaso, L; Jin-Woo, K. (2018). Deteción de la deformación del suelo inducida por la minería y los peligros asociados utilizando técnicas espaciales DINSAR espaciales, Geomática. Peligros y Riesgos Naturales, 9:1, 211-223.

Doi:10.1080 / 19475705.2017.1415229

Aobpaet, A.; Caro, M.; Hooper, A.; Trisirisatayawong, I. (2009). Land subsidence evaluation using dinsar time series analysis in Bangkok metropolitan área. Fringe 2009, Proceedings of the workshop Held 30 November - 4 December, in Frascati, Italy. Edited by H. Lacoste. ESA-SP Vol. 677. ISBN: 978-92-9221-241-4.

https://www.researchgate.net/publication/228820037_land_subsidence_evaluation_using_dinsar_time_series_analysis_in_bangkok_metropolitan_area/citation/download

Batty, M. & Ranaô, S. (2003). The Automatic Definition and Generation of Axial Lines and Axial Maps Centre for Advanced Spatial Analysis; University College London: London, UK. 1-19.

https://pdfs.semanticscholar.org/75f6/2fee454772c4bbb37cf4c9eedff80a101fb1.pdf

Bostenaru, M. & Armas, I. (2015). Earthquake impact on settlements: the role of urban and structural morphology. Natural Hazards and Earth System Sciences, 15, 2283-2297. https://doi.org/10.5194/nhess-15-2283-2015,2015.

Brenning, A. (2008). Statistical geocomputing combining R and SAGA: The example of landslide susceptibility analysis with generalized additive models. Hambg. Beitr. Phys. Geogr. Landsch. 2008, 410, 23–32.

https://sourceforge.net/p/saga-gis/discussion/790705/thread/4add3f52c3/

Encabo, C; Cala, V; Rivero, A. (1997). Evaluación de la dispersión de metales pesados en suelos del entorno de una mina, mediante el método de especiación secuencial química. Boletín geológico y minero. ISSN: 0366-0176, Vol. 108, Nº 1, 57-68. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=135384

Campoverde, C. (2017). Subsidence analysis for Mining Activity in the Zaruma Urban Helmet. Case of study la Inmaculada School. Public Thesis prior to obtaining the Title of Mining Enginer. Faculty of Engineering in Earth Sciences Faculty. Littoral Polytech High School.

http://www.fict.espol.edu.ec/sites/fict.espol.edu.ec/files/CAMPOVERDE.pdf

Cando, M; Gordón, D.; Ibadango, E. (2001). Estudio de Deslizamientos en la carretera Quito-Tena, tramo La Virgen De Papallacta-Guacamayos, Canton Quijos-Provincia de Napo Convenio Dirección Nacional de Geología (Dinage)–Instituto para el Ecodesarrollo Regional Amazónico (Ecorae). Reporte interno.

Cando, M. (2002). MGE as Base of Support for the Construction of the Morphologic Breakage Model. In Proceedings of the Geospatial World 2002, Atlanta, GA, USA, 10–12.

Cando, M. Study of Landslides on the Quito-Tena highway, the virgin stretch of Papallacta-Sardinas. (2002). In Proceedings of the International Symposium of Environmental Geology for the Planning of the use of the Territory, Puerto Varas, Chile. Memory of the Symposium.

Cando, M. (2003). El Método de Rotura Morfologica y su aporte en el control de la Vulnerabilidad a la Contaminación de Acuíferos causados por un vertedero de residuos. Validación del área seleccionada. Facultad Ciencias Departamento de Quimica Agricola Geologia y Geoquimica. Universidad Autónoma de Madrid. Trabajo interno de investigación.190 pp.

Cando, M.; Aguilera, G. (2005). Informe Tecnico del Comité de Evaluacion de La Zona Minera Especial “La Josefina”. Dirección Nacional de Geología, Ministerio de Energía y Minas, Quito, Ecuador. Memorando Interno No. 001-VP-SPA–2005.

Cando, M. (2010). Factores y su valoración para el Método Preliminar de elaboración de Mapas de Peligros por Movimientos en Masa a Escala 1:50.000 y 1:25000. Dirección de Análisis de Riesgos. Secretaria Nacional de Gestión de Riesgos. Reporte interno.

Cando, M.; Arguello, C.; Yánez, D.; Paredes, A.; Díaz, G; Quiña, D.; Quiñonez, M.; Sarango, C.; Albarracín, I.; Hurtado, J.; Machado, O.; Naranjo, J.; Ortíz, C. (2015). Informe sobre el Análisis de Estabilidad Geológica en la Parroquia de San José de Alluriquín y del Recinto La Unión del Toachi, del Cantón Santo Domingo, Provincia de Santo Domingo de Los Tsáchilas-Poblaciones ubicadas dentro de la zona de riesgo delimitada mediante Resolución No. Sgr-028-2015. Sgr-Dar-02150453-Inf-N003. Dirección de Análisis de Riesgos, Secretaría de Gestión de Riesgos. Informe Interno.

Cando, M.; Serrano, M; Yánez, D.; Díaz, G. Cueva, M.; Solís, G. (2016). Informe TécnicoGeólogico-Geofísico para el Análisis de Estabilidad de la Escuela Inmaculada en la ciudad de Zaruma, provincia de El Oro, Ecuador. 2016, Secretaría de gestión de Riesgos. Informe interno, 250 pp.

Cando-Jácome, M. & Martínez-Graña, A. (2018). Numerical modeling of flow patterns applied to the analysis of the susceptibility to movements of the ground. Geosciences (Switzerland). 8:340.

https :// doi.org/10.3390/geosc ience s8090 340

Cando-Jácome, M. & Martínez-Graña, A. (2019). Determinación de las rutas de flujo lahar primario y secundario del volcán de Fuego (Guatemala) utilizando parámetros morfométricos. Remote Sensing, 11, 727.

https://www.mdpi.com/2072-4292/11/6/727

Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A; Valdés, V. (2020). Detection of terrain deformations by InSAR techniques and geophysical methods (Zaruma City, Ecuador). Remote Sensing, 12 (10), 1598.

DOI: https://doi.org/10.3390/rs12101598

Carlà, T.; Intrieri, E.; Raspini, F. (2019). Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite DINSAR. Sci Rep 9, 14137.

https://doi.org/10.1038/s41598-019-50792-y

Chatelain, J.; Tucker, B.; Guillier, B.; Kaneko, F.; Yepes, H.; Femandez, J.; Valverde, J.; Hoefer, G.; Souris, M.; Dupérier, E.; et al. (1999). Earthquake risk management pilot project in Quito, Ecuador. GeoJournal, 49, 185–196.

https://www.researchgate.net/publication/226524449_Earthquake_risk_management_pilot_project_in_Quito_Ecuador (accessed on 20 August 2019).

Chunga, K.; Aguiar, R.; Zambrano, S. (2018). Characterization of geological faults capable of generating cortical earthquakes in the Gulf of Guayaquil, south coast of Ecuador 2018. Geología Andina, versión en línea. ISSN 0718-7106. AndGeo vol.46 no.1 Santiago.

http://www.andea ngeology.cl/index .php/revis ta1/artic le/view/V46n1 -2991

CONRED. (2018). National Coordinator for Disaster Reduction. Situation Report No. 1 (as of 04 June 2018). Internal Report.

https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/2018-06 04%20GT%20SITREP%20-%20Volcanic%20Activity%20%28ENG%29.pdf

Crosetto, M.; Crippa, B.; Biescas, E.; Monserrat, O.; Agudo, M. (2005). State-of-the-Art of Land Deformation Monitoring Using Differential SAR Interferometry. https://www.researchgate.net/publication/228351503_State-of-the Art_of_Land_Deformation_Monitoring_Using_Differential_SAR_Interferometry

Cruden, D. & Varnes, D. (1996). “Landslides types and processes", in Turner, A. K. y R. L. Schuster (eds.), Landslides: Investigation and Mitigation. Trans~ortation Research Board. Special Report 247, Academy Press, washington D.C., pp. 36-75. https://www.researchgate.net/publication/269710331_CrudenDMVarnes_DJ1996_Landslide_Types_and_Processes_Transportation_Research_Board_US_National_Academy_of_Sciences_Special_Report_247_36-75

Colombo, P.; Farina, S.; Moretti, G. Nico; Prati, C. (2003). "Land subsidence in the Firenze-Prato-Pistoia basin measured by means of spaceborne SAR interferometry," IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477), Toulouse, pp. 2927-2929 vol.4. doi: 10.1109/IGARSS.2003.1294634.

http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1294634&isnumber=28604

Decentralized Autonomous Government of Zaruma. (2014). Development and Management Territorial Plan Update. Zaruma, El Oro province, Ecuador.

http://app.sni.gob.ec/snilink/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/0760001150001_PROPUESTA%20ACTUALIZACION%20PDyOT%20del%20CANT%C3%93N%20ZARUMA_19-04-2015_23-06-10.pdf

Dietrich, W.; Bellugi, D.; Real de Asua, R. (2001). Validation of the Shallow Landslide Model, SHALSTAB, for forest management. Land Use andWatersheds: Human Influence on Hydrology and Geomorphology in Urban and Forest Areas. Water Sci. Appl., 2, 195–227. https://www.researchgate.net/publication/

Ebmeier, S; Biggs, J.; Mather, T.; Amelung, F. (2013). Applicability of InSAR to tropical volcanoes: Insights from Central America. Geological Society of London Special Publications. 380. 15–37.

https://ww.researchgate.net/publication/259130455_Applicability_of_InSAR_to_tropical_volcanoes _Insights_from_Central_America

Fárová, K.; Jelének, J.; Kopačková-Strnadová, V.; Kycl, P. (2019). Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovičky Landslide, Czech Republic. Remote Sens. 11, 2670. https://www.mdpi.com/2072-4292/11/22/2670}

Felicísimo, A.M. (1994). Digital terrain models: Introduction and applications in environmental sciences. Ph.D. Thesis, Universidad de Extremadura, Badajoz, Spain, 1994. http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf

Foumelis, M.; Delgado, B.; Desnos, Y.; Engdahl, M.; Fernández, D.; Veci, L.; Lu, J.; Wong, C. (2018). ESA SNAP—StaMPS Integrated processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry. 2018.

https://www.researchgate.net/publication/327253039_ESA_SNAP_-_StaMPS_Integrated_processing_for_Sentinel-1_Persistent_Scatterer_Interferometry

Gens, R. & Logan, T. (2003). Alaska Satellite Facility software tools Manual. Published by Geophysical Institute, 2003. University of Alaska Fairbanks P.O. Box 7320 Fairbanks, AK-99775 U.S.A.

https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/02/asf_software_tools.pdf

Golden Software Surfer 12. (2012). User's Guide. Chapter 12: Vector Maps. http://downloads.goldensoftware.com/guides/Surfer12_Users_Guide_Preview.pdf

Govil, H.; Chatterjee, R.; Malik, K.; Diwan, P.; Tripathi, M.; Guha, S. (2018). Identification and Measurement of Deformation using Sentinel Data And PSDINSAR Technique In Coalmines Of Korba. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLII-5. 427-431. 10.5194/isprs-archives-XLII-5-427-2018.

Gutscher, M.; Malavieille, L; Lallemand, J; Collot, Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. Earth Planet Sci Lett 168:255–270.

http://www.gm.univ-montp 2.fr/spip/IMG/pdf/Gutsc her-EPSL9 9-Andes .pdf

Harrop, J. Rockworks version 7. (1996). Geological Software Collection, Rockware Inc., Golden, Colorado, Comput. Geosci. 22, 597–600.

https://www.semanticscholar.org/paper/Rockworks-version-7%3A-Geological-Software-Rockware-Harrop/6e5149068c100a690d598118e9bec36d3e278f3f

Hillier, B. & Hanson, J. (1984). Frontmatter. In The Social Logic of Space (pp. I-Vi). Cambridge: Cambridge University Press.

https://www.cambridge.org/core/books/social-logic-of space/6B0A078C79A74F0CC615ACD8B250A985

Hillier, B. (1999). The hidden geometry of deformed grids: Or, why Space Syntax works, when it looks as though it shouldn't. Environ. Plan. 26, 169–191.

https://journals.sagepub.com/doi/10.1068/

Hillier, B. & Vaughan, L. (2007). The city as one thing. Progress in Planning, 67 (3) 205-230.

DOI:10.1016/j.progress.2007.03.001

IASR (2016a). Secretary of Risk Management. Informe N° SGRIASR-08-009. Report of the study of analysis of Differential Radar Interferometry (DINSAR) for estimation of soil deformation in thearea affected by the earthquake on 04-16-2016. 13-07-2016. Internal document not published.

IASR (2016b). Undersecretary of Information Management and Risk Analysis. Report No. SGR-IASR-08-0045-2016. Geophysical prospecting in Zone 0-Tarqui Parish of the Manta, Manabí Province. Internal document not published.

INSIVUMEH. (2018). Department of Vulcanology, Preliminary Map of Hazard Scenarios by Pyroclastic Flows, after the Eruption of June 3.

http://www.insivumeh.gob.gt/?page_id=70

Instituto Geofísico Nacional. IGN. EH/AA/JS. (2016a). Geophysical Institute National Polytechnic School. Special Seismic Report No. 7 2016.

https ://www.igepn .edu.ec/eq201 60416 -infor mes-notic ias?start =20.

Instituto Geofísico Nacional. IGN. H/AA/SV/MR. (2016b). Geophysical Institute National Polytechnic School. Special Seismic Report No. 13 – 2016. Technical report of the Pedernales earthquake. 19h50 TL.

https ://www.igepn .edu. ec/servi cios/notic ias/1317-infor me-sismi co-espec ial-n-13-2016.

Aspden, J.; Harrison, H.; Rundle, C. (1992). New Geochronological Control for The Tectono-Magmatic Evolution of The Metamorphic Basement, Cordillera Real and El Oro Province of Ecuador. Journal of South American Earth Sciences. Published by ElsevierLtd.

https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet?publisherName=ELS&contentID=08959 8119290019U&orderBeanReset=true

Ramírez, J. (2002). Extracción Automática de redes de drenaje a partir de Modelos Digitales del Terreno. Trabajo Dirigido de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas Medellín septiembre.

Zhou, L.; Zhang, D.; Wang, J.; Huang, Z.; Pan, D. (2013). "Mapping land subsidence related to underground coal fires in the wuda coalfield (north- ern china) using a small stack of alos palsar differential interferograms," Remote Sensing, vol. 5, no. 3, 1152-1176.

https://www.semanticscholar.org/paper/Mapping-Land-Subsidence-Related-to-Underground-Coal-Zhou-Zhang/e47448a372084bdb0f1dfd0dd8ad7cf889d41e77

López-Bravo, M. (2016). Actividad minera y su impacto en la salud humana. Revista Ciencia UNEMI Volumen 9 - Número 17, 92 - 100.

https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5556797.pdf

Milan Lazecky. (2009). DINSAR used for subsidence monitoring of mining area okr, czech republic," Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry. Fringe.

https://www.semanticscholar.org/paper/DINSAR-USED-FOR-SUBSIDENCE-MONITORING-OF-MINING-AREA Lazecky/b18a7fa05756a494491d20694abb53637a1466c3

Montoya, S. (2017). Tutorial to Download Sentinel 2 Images (10 m Resolution) and Process Them in QGIS. GIDAHATARI, 2017.

http://gidahatari.com/ih-es/tutorial-para-descargar-imgenes-sentinel-2-resolucin-10-m-y-procesarlas-en-qgis

Mora C. & Vahrson, W. (1994). Macrozonation Method for Landslide Hazard Determination: Association of Engineering Geologists Bulletin, Vol XXXI, n.1, 49-58. Available online: https://pubs.geoscienceworld.org/aeg/eeg/article-abstract/xxxi/1/49/137530

Moris, R. & Walker, R. (2015). Reconstrucción de territorios vulnerables en un escenario de reconstrucción inequitativa. El caso de Pelluhue, Chile. In Learning from 27F: A Comparative Assessment of Urban Reconstruction Processes After the 2010 Earthquake in Chile; University y Santiago Research Cell: Santiago, Chile, 2015. https://www.researchgate.net/publication/322571214_Learning_from_27F_A_Comparative_Assessment_Of_Urban_Reconstruction_Processes_After_The_2010_Eathquake_In_Chile_coautor.

Mothes, P. & Vallance, J. (2015). Lahars at Cotopaxi and Tungurahua Volcanoes, Ecuador: Highlights from Stratigraphy and Observational Records and Related Downstream Hazards. En: Volcanic Hazards, Risks, and Disasters. Elsevier, 141-168. https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17194/1/CD-7707.pdf

Muñoz, E.; Chiriboga, F.; Caizaluisa, A.; Ramirez, M.; Estrella, C. (2015). Escenarios Climáticos en presencia del Fenómeno El Niño (FEN) en las Micro-cuencas Cristal, Potosí, Pechiche y Balsas del Ecuador. Revista de Climatologia. 15. 7-25.

https://www.researchgate.net/publication/279303370_Escenarios_Climaticos_en_presencia_del_Fenomeno_El_Nino_FEN_en_las_Micro-cuencas_Cristal_Potosi_Pechiche_y_Balsas_del_Ecuador

Murillo, R. (2000). Zaruma, Mining History, Identity in Portovelo. Edición Aby Ayala, Quito, Ecuador.

http://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1260&context=abya_yala

Naya, A. (2019). El Riesgo Sísmico en Quito: Análisis y Simulaciones. Master's Thesis, Nice Sophia Antipolis University, Nice, France. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-12/010053328.pdf (accessed on 25 September 2019).

NEC-11 (2011). Ministry of Urban Development and Housing. Ecuadorian Construction Standard NEC-11 Chapter 2 Seismic Hazard and Resistant Earthquake Design Requirements. Executive decree No. 705 April 2011.

https ://inmob iliar iadja.files.wordpress.com/2016/09/nec20 11-cap-02-pelig ro-sismi co-y-requisitos-de-disec 3b1o-sismo-resis tente -02141 2-vic.pdf

Norton M. (2010). Location of oceanic ridges and plate boundaries on the northwestern edge of South America based on a screenshot from NASA World Wind software.

https ://es.wikip edia.org/wiki/Archi vo:Carne gie_Ridge.png

O'Callaghan, J. & Mark, D. (1984). The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 28, 328-344. http://dx.doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0

O'Loughlin, E. (1986). Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. Water Resour. Res. 1986, 22, 794–804. https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=729751.

ODEPLAN (2001). Office of Planning of the Presidency (ODEPLAN). Cartography of the threats of natural origin by canton in Ecuador. Preliminary report.

http://horiz on.docum entat ion.ird.fr/exldoc/plein s_texte s/diver s16-03/01006 5702.pdf

Parra, H. (2015). Desarrollos Metodológicos y Aplicaciones hacia el Cálculo de la Peligrosidad Sísmica en el Ecuador Continental y Estudio de Riesgo Sísmico en la Ciudad de Quito. Ph.D. Thesis, E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía, Madrid, Spain.

http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/2465/1/T-SENESCYT-01317.pdf

Penchev, G. (2015). Using Space Syntax for Estimation of Potential Disaster Indirect Economic Losses. Comp. Econ. Res. 19, doi:10.1515/cer-2015-0041. https://www.researchgate.net/publication/

Piedra, J. (2012). Estudio de erupciones volcánicas a través de imágenes satelitales caso de estudio: erupción volcán Puyehue, Chile. Universidad de Cordoba. Facultad de Matemática, Astronomía y Física y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich.

https://www.coursehero.com/file/55967076/Tesis-FAMAF-AEARTE-JUAN-PIEDRApdf/

Proyecto Multinacional Andino. (2007). Geociencias para las Comunidades Andinas. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas (publicación geológica multinacional).

https://www.worldcat.org/search?qt=hotseries&q=se%3A%22Publicacio%CC%81n+geolo%CC%81gica+multinacional%22

Qin, Y. & Perissin. D. (2015). "Monitoring underground mining subsidence in South Indiana with C- and L-band DINSAR technique." 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 294-297.

https://www.semanticscholar.org/paper/Monitoring-underground-mining-subsidence-in-South-C-Qin-Perissin/08576df99bb5059e904e808f4502ef6a75e894ca

Quinn, P.; Chevallier, P.; Planchon, O. (1996). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. Centre for Research oit Environinental Systems, Lancaster University, Lancaster, LAI 4YQ, U.K. Hydrological Processes, Vol. 5,59-79.

https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_30-30/31676.pdf

Roccheggiani, M.; Piacentini, D.; Tirincanti, E.; Perissin, D.; Menichetti, M. (2019). Detección y monitoreo de movimientos de tierra inducidos en túneles usando la interferometría SAR Sentinel-1. Sens remotas. 11, 639.

https://www.mdpi.com/2072-4292/11/6/639

Sárközynce, F. (2018). Introduction to GIS and Hydrologic modelling using ArcView 3.x http://www.agt.bme.hu/public_e/ (accessed on 7 September 2018).

Schilling, S. (1998). TI-LAHARZ: GIS Programs for Automated Mapping of Lahar-Inundation Hazard Zones. USGS Publications Warehouse.

http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr98638 (accessed on 25 February 2019).

Sebastiano, T. & Cavalli, M. (2016). Topography-based flow-directional roughness: potential and challenges. Earth Surf. Dyn., 4, 343–358.

https://www.earth-surf-dynam.net/4/343/2016/esurf-4-343-2016.pdf (accessed on 26 February 2019).

Sillerico, E.; Marchamalo, M.; Rejas, J.; Martínez, R. (2010). La técnica DINSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción. Informes de la Construcción. 62.
https://www.researchgate.net/publication/46179345_La_tecnica_DINSAR_bases_y_aplicócion_a_la_medicion_de_subsidencias_del_terreno_en_la_construccion

Silva, P.; Elez, J.; Giner J.; Rodríguez, P.; Perez, R.; Roquero, E.; Bardají, T.; Martínez-Graña, A. (2017). ESI-07 ShakeMaps for instrumental and historical events in the Betic Cordillera (SE Spain): An approach based on geological data and applied to seismic hazard. Quaternary International, 451C, 185-208.

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1040618216302968

Soulas, J.; Egüez, A.; Yepes, H.; Perez, H. (1991). Tectónica activa y riesgo sismico en los Andes ecuatorianos y el extremo sur de Colombia. Bol. Geol. Ecuat., 2, 3–11.

https://www.researchgate.net/publication/263555294_The_Influence_of_Urban_Morphology_on_the_Resilience_of_Cities_Following_an_Earthquake

Sousa, J.; Ruiz, A; Hanssen, R.; Perski, Z.; Bastos, M.; Gil, A.; Galindo, J. (2008). PS-DINSAR measurement of ground subsidence in Granada area (Betic Cordillera, Spain). https://www.researchgate.net/publication/228765038_PS-DINSAR_measurement_of_ground_subsidence_in_Granada_area_Betic_Cordillera_Spain

Spencer, R.; Montenegro, J.; Gaibor, A.; Perez, E.; Viera, F.; Spencer, C. (2002). The Portovelo-Zaruma mining camp, SW Ecuador: porphyry and epithermal environments. SEG Newsletter. 49. 8-14.

https://www.researchgate.net/publication/285751271_The_PortoveloZaruma_mining_camp_SW_Ecuador_porphyry_and_epithermal_environments

Tarboton, D.; Schreuders, K.; Watson, D.; Baker, M. Generalized terrain-based flow analysis of digital elevation models. (2009). 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation: Interfacing Modelling and Simulation with Mathematical and Computational Sciences, Proceedings, pp. 2000-2006.

Thapa, S.;Chatterjee, R.; Singh, K.; Kumar, D. (2016). Land subsidence monitoring using PS-DINSAR technique for l-band sar data. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLI-B7. 995-997. 10.5194/isprs-archives-XLI-B7-995-2016.

https://www.researchgate.net/publication/309341322_LAND_SUBSIDENCE_MONITORING_USING_PS-DINSAR_TECHNIQUE_FOR_L-BAND_SAR_DATA

The Copernicus Open Access Hub. (2014-2020). The Open Access Hub Provides Complete, Free and Open Access to Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 and Sentinel-5P User Products. https://scihub.copernicus.eu/userguide/

Tofani, V.; Raspini, F.; Catani, F.; Casagli, N. (2013). Técnica de interferometría de dispersión persistente (PSI) para caracterización y monitoreo de deslizamientos de tierra. Teledetección, 5, 1045-1065.

https://www.semanticscholar.org/paper/Persistent-Scatterer-Interferometry-(PSI)-Technique-Tofani-Raspini/0f0ed27b2ccaad44e66fdc25c415e91f81b8f1ca

Torlai, T. & Saverio, G. (2010). Aplicaciones de interferometría de radar satelital para la generación de mapas de desplazamiento en el análisis de fenómenos dinámicos. Universidad de Bolonia, Curso de Ingeniería Ambiental y Territorial.

Torres, T. M., & Platzeck, G. (2014). Aplicación de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DINSAR) como una herramienta para detectar deslizamientos en una región de los Andes en Ecuador.Pyroclastic Flow. Journal of Geology, 4(1). http://pyflow.net/joomla30/index.php/archivo/9-all-issues/26-ms042014

Turner, A. (2001). Depthmapx: a program to perform visibility graph analysis. In Proceedings of the Third International Space Syntax Symposium, Atlanta, GA, USA, 7–11 May 2001.

https://pdfs.semanticscholar.org/d940/499fc935708b6d5f069c36a8b6a2069894c7.pdf (accessed on 15 October 2019).

Vallance, J. (2005). Volcanic debris flows. En: Jakob, M., Hungr, O. (Eds.), Debris Flow Hazards and Related Phenomena. Praxis-Springer, Berlin and Heidelberg, pp. 247-274. https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-27129-5_10

Vallance, J.; Iverson, R. (2015). Lahars and their deposits. En: Sigurdsson, H., Houghton, B.F., McNutt, S.R., Rymer, H., Stix, J. (Eds.), Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press, London, pp. 649-664.

https://pubs.er.usgs.gov/publication/70193636

Vera G. (2016). Estudio geotécnico y de riesgo sísmico para lotes ubicados en el barrio Tarqui de la ciudad de Manta de acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015. Geoestudios. Ministerio de Urbanismo y Vivienda. 2016. Reporte interno.

Vikentev, I.; Banda, R.; Tsepin, A.; Prokof'ev, V.; Vikenteva, O. (2005). Mineralogy and Formation Conditions of Portovelo-Zaruma Gold-Sulphide Vein Deposit, Ecuador. Geochem. Mineral. Petrol. 43.

https://www.researchgate.net/publication/237828662_Mineralogy_and_Formation_Conditions_of_Portovelo-Zaruma_Gold-Sulphide_Vein_Deposit_Ecuador

Wegmuller, U.; Werner, C.; Strozzi, T; Wiesmann, A. (2004). Monitoring mining induced surface deformation. In Geoscience and Remote Sensing Sym- posium, 2004. IGARSS'04. Proceedings. IEEE In- ternational. IEEE, vol. 3, 1933--1935.

https://www.researchgate.net/publication/282017903_Monitoring_Underground_Mining_Subsidence_In_South_Indiana_With_C-_And_L-Band_Insar_Technique

Winckell, A.; Zebrowsky C.; Sourdat, M. (1997). Los Paisajes Naturales del Ecuador. The regions and landscapes of Ecuador. Basic Geography of Ecuador, Volume IV, vol 2. Geographic Institute of Ecuador-IGM-ORSTOM-IPGH.

http://www.ecuad or.ird.fr/media teca/las-co-edici ones-enecuador/los-paisa jes-naturales-del-ecuad or-tomo-2

Yixia, Q. (2018). Demo: APS Estimation & Multitemporal analysis with Sarproz. Sarproz Tutorials. https://www.sarproz.com/publish/QYTutorial4.pdf

Zadeh, A. (2014). Extreme natural hazards and societal implications—The ENHANS project. In Extreme Natural Hazards, Disaster Risks and Societal Implications; Cambridge University Press: Cambridge, UK., 3–14.

https://www.cambridge.Ismail-org/core/books/extreme-natural-hazards-disaster-risks-and-societal implications/extreme-natural-hazards-and-societal-implications-the-enhans project/D7B17A560473839A6856E6D8C872360F

Instituto de Investigación Geológico y Energético-IIGE. (1980). Zaruma, Hoja Geológica. Escala 1:100000.

https://drive.google.com/file/d/1RfaPP_MbttvKoAgEO4xYagB9MFmQkE5P/view

Zeni, G.; Zhao, Q.; Bonano, M.; Gao, W.; Li, X.; Ding, X. (2014). A differential SAR interferometry (DINSAR) investigation of the deformation affecting the coastal reclaimed areas of the Shangai megacity. In Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Quebec City, QC, Canada, 482–485. https://ieeexplore.ieee.org/document/6946464]

6. ARTICULOS PUBLICADOS

geosciences

MDPI

Article

Numerical Modeling of Flow Patterns Applied to Analysis of Susceptibility to Movements of the Ground

Marcelo Cando Jácome and Antonio Martínez-Graña *

Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Salamanca, 37008 Salamanca, Spain; id00709713@usal.es

* Correspondence: amgranna@usal.es; Tel.: +34-923294400; Fax: +34-923294514

Received: 31 July 2018; Accepted: 7 September 2018; Published: 9 September 2018

Abstract: Mass movements in deformed areas of natural relief deformed by seismotectonic factors are one of the most destructive and recurrent natural hazards in the Republic of Ecuador, especially during intense rain periods, the El Niño phenomenon, or due to earthquakes such as the one that occurred on 16 April 2016 in the Ecuadorian coastline. This study proposes the application of Hydrological Model D8 and its derived morphometric parameters like slope, orientation of the slope, and curvatures, extracted from the high spatial resolution Digital Elevation Model (DEM), implemented in programs such as Rockworks 7 (gridzo), SURFER (downwards slope), ArcView (flowacc), and SAGA (curvatures) to obtain runoff flow, structural geological lineaments, and superficial deformations of the topographic relief that are the origin of erosion, superficial landslides, lateral propagation, of the rock–soil complex, mass flows, and deep gravitational deformations. This methodology has been validated in three locations with intense deformations: two in Ecuador and one in Spain. The DEM were obtained from the Ecuadorian Spatial Institute (ESI) (spatial resolution of 10 m), the Rural Technological Infrastructure and Information National System (SIGTIERRAS) (spatial resolution of 5 m), and the Council of Andalusia (spatial resolution of 5 m).

Keywords: runoff flow; superficial deformations; digital elevation map (DEM); hydrological model; mass flows

1. Introduction

Mass movements in Ecuador are one of the biggest threats that cause recurring disasters, especially during the periods of intense anomalous rains, the El Niño phenomenon, and earthquakes such as the one that occurred on April 16, 2016 in the Ecuadorian coastline.

In 2010, with the creation of the National Secretariat for Risk Management (SNGR), a standardized methodology was developed to elaborate mass movements' susceptibility maps at a municipal level in the entire country using a 1:50,000 scale. This methodology was based on heuristic techniques, taking in consideration a number of variables based on the experience of researchers that have studied these types of risks over a period of several years, and their respective support documents, such as: Generation of Geoinformation for the Valoration of Territory at a National Level, component 3 Geopedology and Geological Risks project developed by the National Secretariat of Planification (SENPLADES); Initial Methodology for the elaboration of preliminary susceptibility maps to mass movements at a 1:50,000 scale, prepared by SNGR-SUN MONTAIN; and Mass Movements in the Andean Region: A Guide for Risk Evaluation, from the Multinational Andean Project (2000–2008).

This cartography identified susceptibility areas as intensity spots in a range going from absence of susceptibility to very high susceptibility and related these susceptible areas as regional geological structures; however, it wasn't able to define structural lineaments, fractures, or topographic relief

deformations that are the origin of mass movements and their different types. Based on the need to find these origins in better detail, the methodologic proposal was developed in relation to the outline of flow lines belonging to the superficial runoff of precipitation water as a mass pusher, structural geological lineaments, fractures, and deformations of the topographic relief from high mountainous areas, intermediate, and lower topographic areas. The numerical method applied is based on the theoretical principles of the D8 Hydrological Model, using Digital Elevation Models (DEM). The model was implemented in mathematical algorithms in programs such as Rockworks 7 (gridzo), SURFER (downward slope), ArcView (flowacc), and SAGA (curvatures).

One of the most important databases on which procedures to calculate hydrological parameters are based is the DEM. It is a data structure that represents the spatial distribution of a quantitative and continuous variable, the topography. DEMs are very efficient in extracting a big part of the necessary morphometric parameters to create a hydrological analysis in algorithms that several authors have developed to obtain the flow direction where each DEM cell is headed, calculate flow accumulation, draw flow lines or drainage networks, delimit the hydrography basin from the identification of an exit point, divide hydrographic basins in sub-basins, and calculate the morphometric properties of these hydrographic basins and drainage networks. Since 1994, most of studies focused on determining the flow paths of the superficial runoff of precipitation water and other mentioned products based on the D8 Model, but didn't focus on the tracing lines of morphological fissures, nor structural geological lineaments and topographic deformation areas, despite models being integrated in slope stabilization computer programs with stabilization criteria such as SINMAP, ShalStab, and Tardem, among others.

The investigation of direction and flow-line tracing of the superficial runoff has its theoretical origins in various studies [1–3]. In this paper, the investigation about this topic started in 1996 and was based mainly on the investigation studies of several authors [2] about the application of digital-terrain models in natural sciences. Studies that served to understand the basic concepts of digital terrain models (DTM), emphasizing the definition, structure, and errors of the construction of the DEM, as well as its applications in the characterization of reliefs, preparation of topographic profiles, visualization and drainage of hydrographic basins, and elaborations of flow lines using the hydrological model D8 as a basic model.

The results of this investigation were presented in the First International Symposium of Mass Movements in Cuenca, Ecuador in 2001, at the conference 'Flow paths as mass-movement generators: a vectorial focus'[4]. Later, these results were presented at GeoSpatial World 2002 in Atlanta, Georgia, United States, in the conference 'MGE as a support base for the construction of the morphologic breakage model®' in the geographic information systems (GIS) and environmental management chapter, summary 186 [5].

Since 2001, this model has been presented in several countries such as Chile [6], Cuba [7], and Spain [8]. This method has since been applied in Ecuador [9]. In later years, several researchers have completed and published a number of studies about this topic [10–16]. In the last decade, authors have investigated the analysis of structural lineaments based on stereoscopic interpretation with airborne radar images and satellites used in the oil industry, aquifers, and mineral-deposit exploration. An example is the focus of the Analysis of Guidelines for the Exploration of Groundwater in Nicaragua based on the analysis of crossed fractured networks using images from four satellite sensors (ASTER, Landsat-e ETM, QuickBird, RADARSAT-1) and 20 m spatial resolution DEM [17].

This analysis required a large amount of processing and interpretation time of the 12 images to draw the structural guidelines. Unlike the methodology that uses satellite images, the present methodology to extract guidelines or structural geological lineaments and relief deformations has quick processing time, high precision, and it uses free digital elevation models. In the following images, the structural guidelines are shown with the two methodologies applied to the same area (Nicaragua) with the same 20 m spatial resolution digital elevation model. In Figure 1A, the results of the coincidence between the guidelines obtained by remote sensing are shown. Figure 1B presents the structural guidelines obtained by the proposed method of this investigation. Figure 1C shows the

coincidences and advantages of the proposed method; in addition to extracting structural guidelines and higher density fractures, relief deformations are also extracted by concentration of these lineaments, as can be evidenced in Figure 1D.

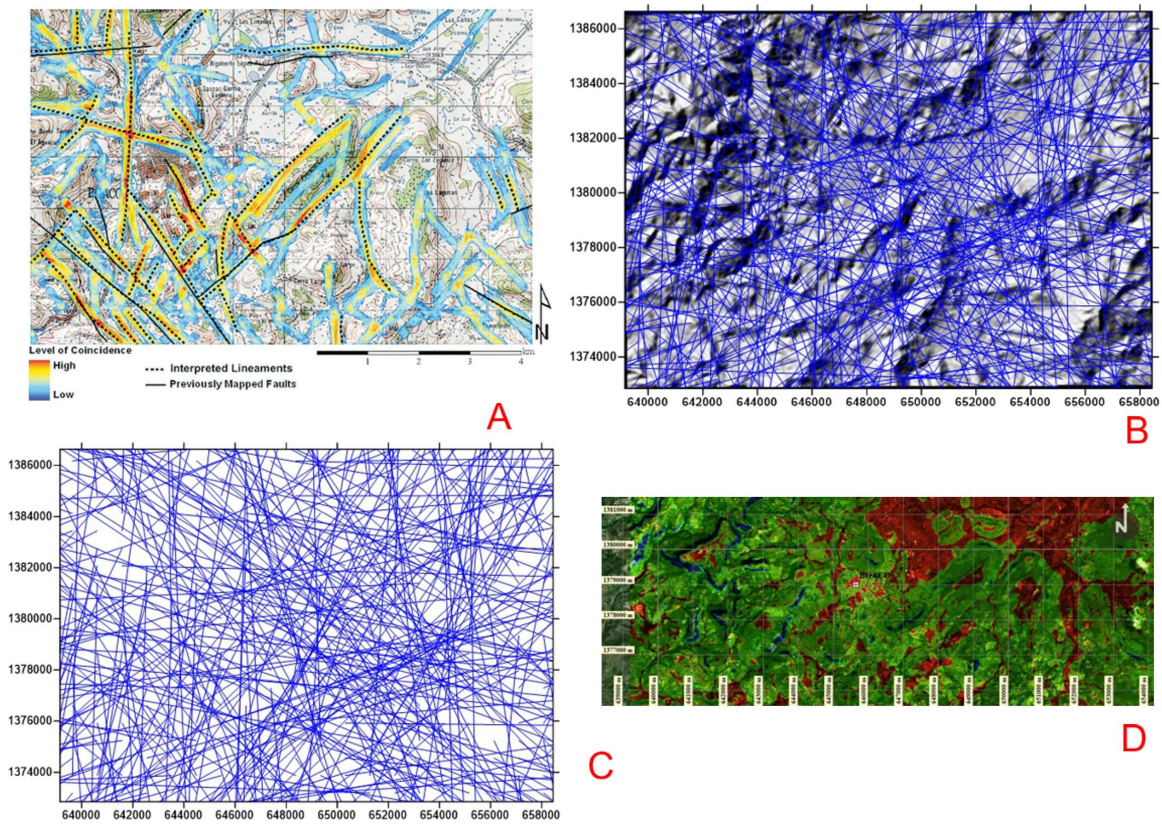


Figure 1. Comparison of structural guidelines obtained with remote-sensing methodology and the proposed methodology applied to the same area (Nicaragua) with the same 20 m spatial resolution digital elevation model. (**A**) Results of the coincidence between the lineaments obtained by remote sensing with stereoscopy. (**B**) Structural guidelines obtained with the proposed method. (**C**) Coincidences and advantages of the proposed methodology. (**D**) Deformed relief.

2. Materials and Methods

In order to extract the flow-path direction and its layout, structural geological guidelines, fractures, and superficial relief deformations, the theory of the basic Hydrological Model 8D was applied with high-resolution digital elevation models obtained from specialized institutions such as Telespazio (radar images), Cosmo SkyMed (10 m spatial resolution, Zone 1), Sigtierras (radar images, 3 m spatial resolution, Zone 2), and the Council of Andalusia (5 m spatial resolution, Zone 3). The used DEM were corrected before analysis. The used coordinate systems were UTM and WGS84-Zone 17S for the Ecuadorian studied areas, and UTM-Zone 30 and ETRS89 in Spain.

The used DEM were processed with public-use programs such as SAGA [18], ArcView [19] and commercial software like Rockworks 7 [20] and Surfer [21] to obtain the superficial water-runoff flow paths, structural geological lineaments, morphologic rupture lines, and deformations of the topographic relief. The realized fieldwork (300 control points) allowed us to verify the response of this methodology and collect data in susceptible sectors as well as types of associated mass movements. The operation of the basic Hydrological Model D8 and the determination of the direction and tracing of the surface runoff flows from precipitation are explained in the process diagram of Figure 2.

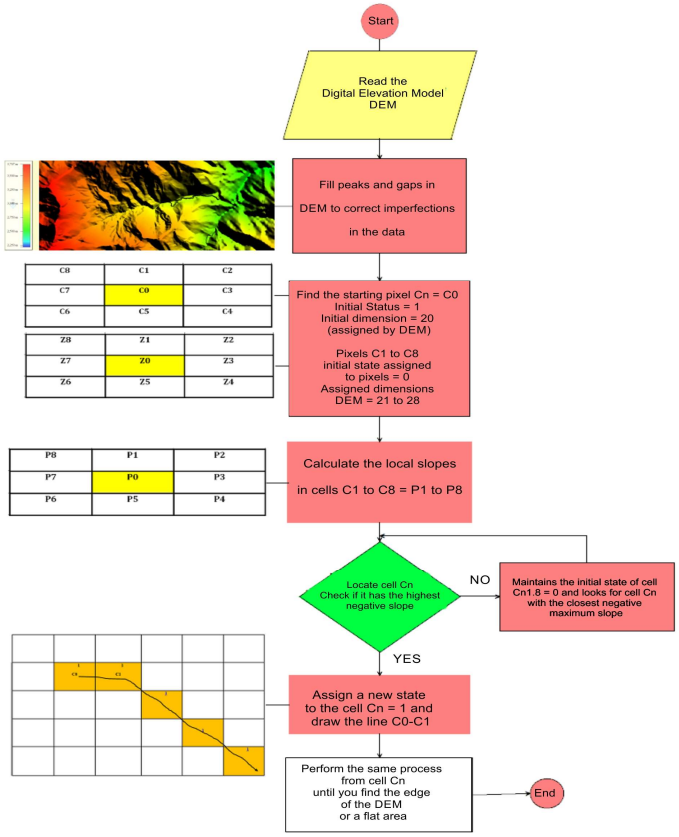


Figure 2. Process followed for the extraction of surface runoff flows from precipitation water in the D8 hydrological model.

The first derived products of the application of the D8 Model in the DEM were the direction and tracing of the runoff flow paths from the rain surface, which are the base of the information needed to obtain the following products: structural geological lineaments, fractures, and surface relief deformations of erosive and seismotectonic origin.

The calculation of flow directions and line tracing represents that each cell of the digital elevation model is the starting point to find hydrological characteristics in the topographic relief. From the topographic surface, a raster was generated that showed the flow directions and the exit direction of each line of each cell is drawn. Each valid exit direction is related with each adjacent cell where the flow can travel. This approach is commonly known as the eight-way flow (D8) [1–3].

Flow direction is determined by the steepest-descent direction or the maximum fall from each cell, and it is calculated as follows (Equation (1)):

$$P = (\text{Arctg}(Z0 - Z1)/d) \quad (1)$$

where P: maximum fall, Z0−Z1: change of elevation value, and d: distance between each cell center. As distance is calculated between cell centers, if the cell size is 1, the distance between two orthogonal cells is 1 (creating an isosceles triangle). The distance between these two diagonal cells if $\sqrt{2} = 1.414$. It may occur in this process that, when the maximum descent of various cells is the same, nearby sectors grow until the steepest descent and the flow direction of the cell are codified with the value that represents the mentioned direction. If all next elements are higher than the processing cell, it is considered a sink that fills with the lower value of the following elements and has a flow direction towards the mentioned cell. However, if a cell is next to the physical edge of the DEM or has at least a NoData cell as a neighbor, it doesn't fill or doesn't have value because the neighbor's data are

insufficient to be considered a true cell and a true flow and cell receptor. In order to be a receptor, the information around the cell has to be present to continue the process [22].

This procedure was applied to each cell of the DEM, Cn (I,j), with the exception of the borders and their 8 neighbors. Thus, water that enters a cell can exit through one of the 8 mentioned directions.

Workflow starts from a C0 cell (painted in yellow) with height starting point Z0. For each cell from C1 to C8 in a mesh, of designated heights by the DEM, slope P is calculated for each one of its neighbors to the north, northeast, east, southeast, south, southwest, west and northwest, as it is shown in Figure 3A. The objective of this process is to calculate the tangent of the angle formed by the horizontal with the line that joins the point under study with the neighbor that is the direction of the flow (Figure 3). The process is completed using Equation (2) (Figure 3B):

$$\begin{gathered} P1 = \text{Arctg}(Z0 - Z1)/\sqrt{2}(d); P2 = \text{Arctg}(Z0 - Z2)/\sqrt{2}(d); P3 = \text{Arctg}(ZO - Z3)/\sqrt{2}(d) \\ P4 = \text{Arctg}(Z0 - Z4)/\sqrt{2}(d); P5 = \text{Arctg}(Z0 - Z5)\sqrt{2}(d); P6 = \text{Arctg}(Z0 - Z6)/\sqrt{2}(d) \\ P7 = \text{Arctg}(Z0 - Z7)/\sqrt{2}(d); P8 = \text{Arctg}(Z0 - Z8)/\sqrt{2}(d) \end{gathered} \quad (2)$$

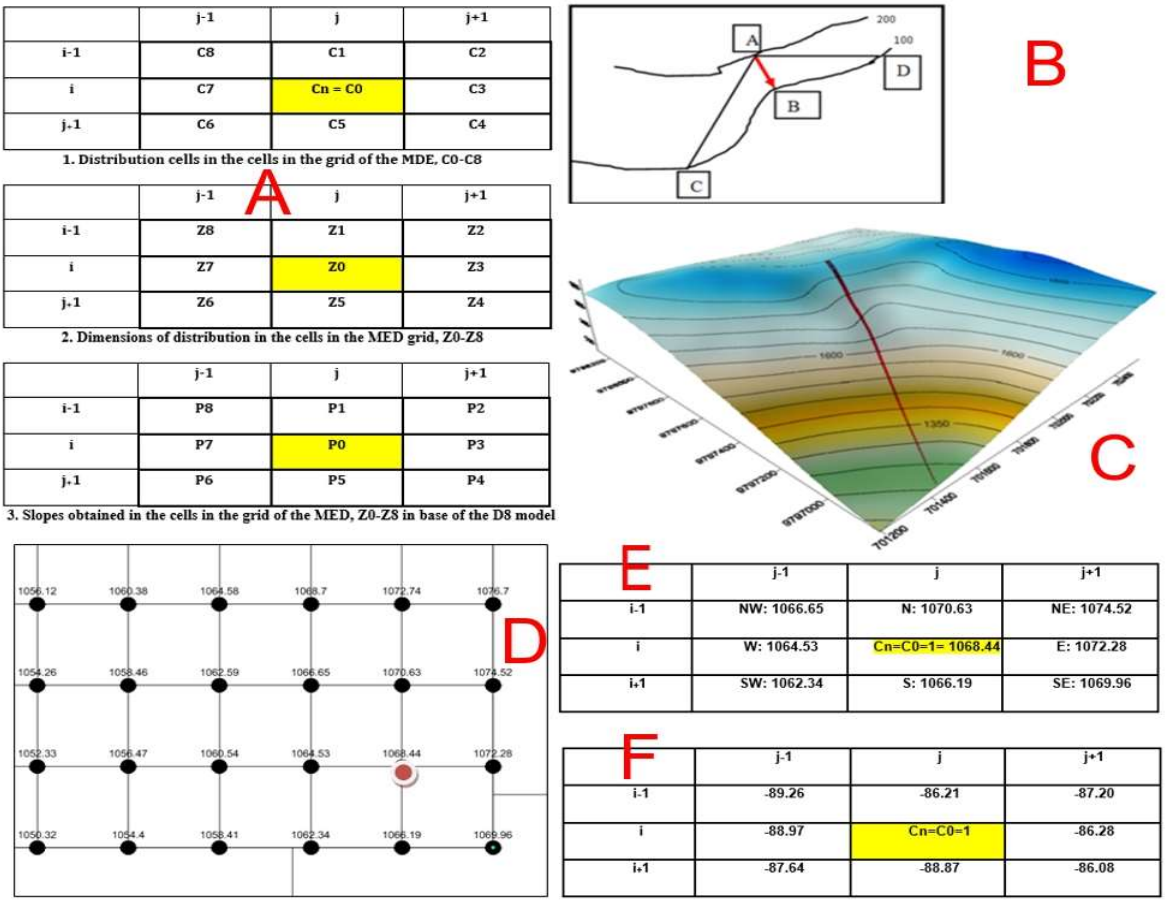


Figure 3. (**A**) Assignment of cells (C0–C8) and heights of the terrain (Z0–Z8) for the calculation of slopes (P0–P8) according to Model D8. (**B**) Determination of the Maximum Pending Line AB. Point A is the starting point on the 200 m level curve. Points B, C, and D define segments AB, AC, and AD, respectively. The line of the maximum slope corresponds to the shortest AB segment, which is generally the route through which water flows from the highest point A. (**C**) Tracing of the maximum-slope line in a digital elevation model and tracing of the maximum-slope line in a digital elevation model (DEM). (**D**) Initial point of the line at time $t = 0$, with initial state $C0 = 1$, and dimension assigned by the DEM = 1068.44. (**E**) Initial cell at the elevation of 1068.44 meter above sea level (masl) for the generation of flow lines of meteoric water-surface runoff according to the D8 Model and (**F**) final score.

In Figure 3C, you can see how the maximum-slope line is drawn (maximum fall) inside the DEM. In a 10 m spatial resolution DEM, represented by the grid in Figure 3D, the lowest point is 750 masl. The construction of a morphologic flow and a rupture line from an initial C0 cell is carried out in 4 phases:

In Phase 1, the initial point of the line is established in a time t = 0, with the initial state C0 = 1, and assigned height by the DEM = 1068.44 m. Figure 3E,F shows the configuration of the data and their spatial position in the E, SE, NE, N, NW, W, or SW directions from the starting cell C0 (i,j).

In Phase 2, the slopes are calculated towards the 8 nearest neighbors, from the C0 cell towards the C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 and C8 cells, according to the local slope obtained from the slope map calculated with Equation (1), where d is the horizontal distance between the cells, which is 10 m in this study. This calculation was completed in the base of the previous equations. Orthogonal distance d from orthogonal cell centers is 1, and the distance between two diagonal cells is $\sqrt{2}$ = 1.414 (Equation (3)):

$$\begin{aligned}
P1 &= \mathrm{Atan}\left((\mathrm{Abs}(-Z0) - \mathrm{Abs}(Z1))/\left(\left(\sqrt{2}\right)d\right)\right) \rightarrow P1 = \mathrm{Atan}\left((1068.44 - 1070.63)/\sqrt{2} \times 10\right) = -86.21\\
P2 &= \mathrm{Atan}\left((\mathrm{Abs}(-Z0) - \mathrm{Abs}(Z2))/\left(\left(\sqrt{2}\right)d\right)\right) \rightarrow P2 = \mathrm{Atan}((1068.44 - 1074.52)/\sqrt{2} \times 10 = -87.20\\
P3 &= \mathrm{Atan}\left((\mathrm{Abs}(-Z0) - \mathrm{Abs}(Z3))/\left(\left(\sqrt{2}\right)d\right)\right) \rightarrow P3 = \mathrm{Atan}((1068.44 - 1072.28)/\sqrt{2} \times 10 = -89.28\\
P4 &= \mathrm{Atan}\left((\mathrm{Abs}(-Z0) - \mathrm{Abs}(Z4))/\left(\left(\sqrt{2}\right)d\right)\right) \rightarrow P4 = \mathrm{Atan}((1068.44 - 1069.96)/\sqrt{2} \times 10 = -89.08\\
P5 &= \mathrm{Atan}\left((\mathrm{Abs}(-Z0) - \mathrm{Abs}(Z5))/\left(\left(\sqrt{2}\right)d\right)\right) \rightarrow P5 = \mathrm{Atan}((1068.44 - 1066.19)/\sqrt{2} \times 10 = -88.87\\
P6 &= \mathrm{Atan}\left((\mathrm{Abs}(-Z0) - \mathrm{Abs}(Z6))/\left(\left(\sqrt{2}\right)d\right)\right) \rightarrow P6 = \mathrm{Atan}((1068.44 - 1062.34)/\sqrt{2} \times 10 = -87.64\\
P7 &= \mathrm{Atan}\left((\mathrm{Abs}(-Z0) - \mathrm{Abs}(Z7))/\left(\left(\sqrt{2}\right)d\right)\right) \rightarrow P7 = \mathrm{Atan}((1068.44 - 1064.53)/\sqrt{2} \times 10 = -88.97\\
P8 &= \mathrm{Atan}\left((\mathrm{Abs}(-Z0) - \mathrm{Abs}(Z8))/\left(\left(\sqrt{2}\right)d\right)\right) \rightarrow P8 = \mathrm{Atan}((1068.44 - 1066.65)/\sqrt{2} \times 10 = -89.26
\end{aligned} \quad (3)$$

The spatial distribution of the slopes can be seen in Figure 3F.

Three cases are possible in the drawing of flow lines, flow patterns, or flow (Figure 4A–C). In Case 1, cell C1 is surrounded by 8 cells higher than it. In this case, Cell C0 is a "pit" in point B (Figure 4A). In Case 2, cell C1 is part of a group of cells with the same dimension that represents flat areas. In the event that the flat area is surrounded by higher cells, it is known as a sink (Figure 4B). In Case 3, more than one cell are adjacent to C1 with a slope equal to the maximum. This problem can be called an indeterminacy, and it occurs when C1 is on a coastal edge or DEM boundary. However, if the DEM has abrupt discontinuities or inflection zones, these "indeterminate edges" within the DEM can determine the presence of regional tectonic structural systems such as faults, fractures, and terrain deformations (Figure 4C).

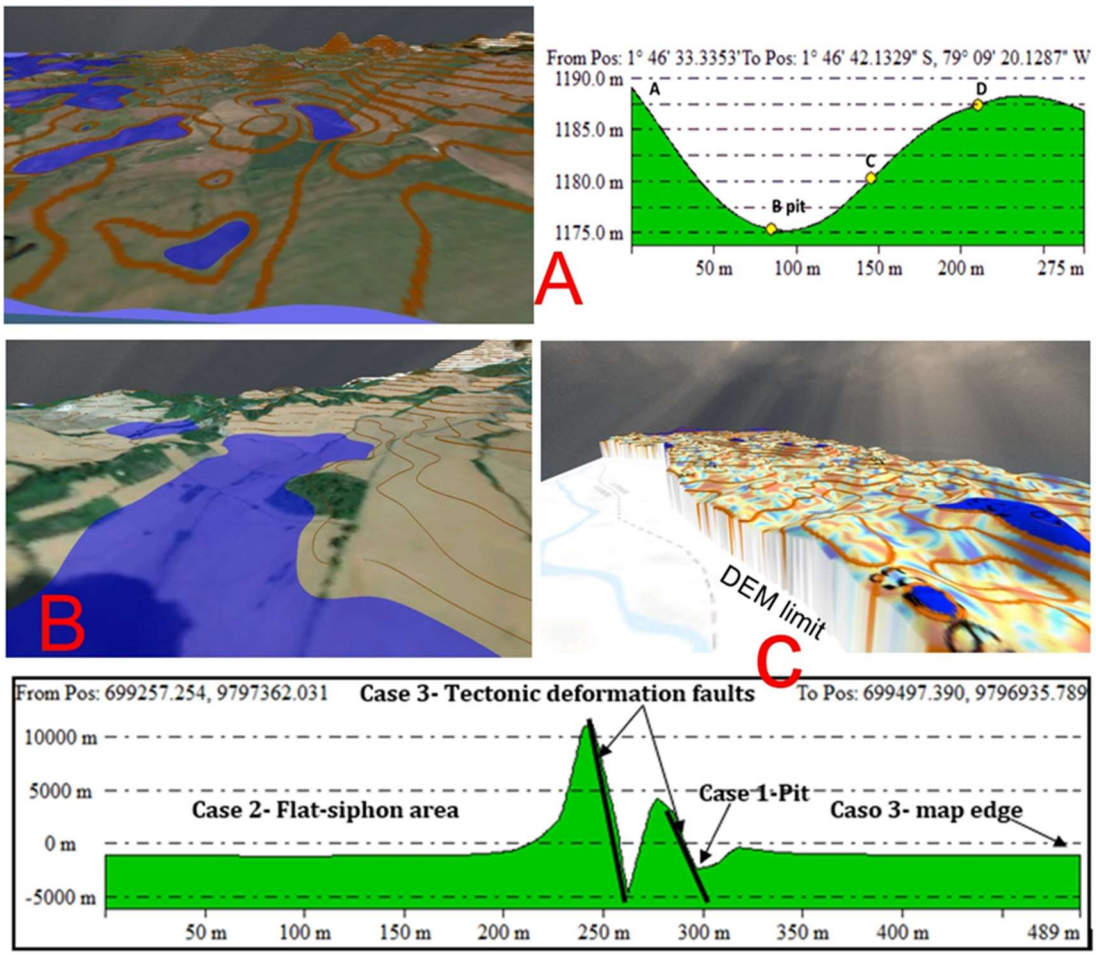


Figure 4. (**A**) Case 1, pit: cell C1 is surrounded by 8 cells higher than it. (**B**) Case 2: Cell C1 is part of a group of cells with the same dimension, which represent flat areas. If the flat area is surrounded by higher cells, it is as a sink. (**C**) Case 3, Indeterminacy: more than one cell is adjacent to C1 with slope equal to the maximum. This problem is called an indeterminacy and occurs when C1 is not on a coastal edge or DEM boundary.

In Phase 3, the propagation rule is applied. The cell with the maximum negative slope defines the cell that will change state. In our example, the cell is C8 = −89.28; therefore, C8 is the cell that will light up (yellow in Figure 3F), so that the path of the flow line grows on the matrix, and its length depends on the iterations necessary to reach some of the completion conditions, thus creating the system of flow paths. The process is repeated from the new cell state with a negative maximum slope in an iterative process throughout the study grid (Figure 5A1,A2).

The chosen point (maximum slope) was incorporated in the downstream flow line and used as a basis to return to Phase 2, with negative and positive lateral-flow transport zones, flow accumulation zones, and flat areas. In Figure 5B1, the center of cell C0 is the start of the flow lines. In Figure 5B2, the drawing of the flow "downstream" line is displayed; and in Figure 5B3, the final plot of the flow line upstream and downstream from the starting cell C0 is depicted. Figure 5C1,C2 demonstrate the concentration downstream of the runoff flows that form channels and drainage networks that collect the waters of the entire basin and pour them into a single river at the mouth of the basin.

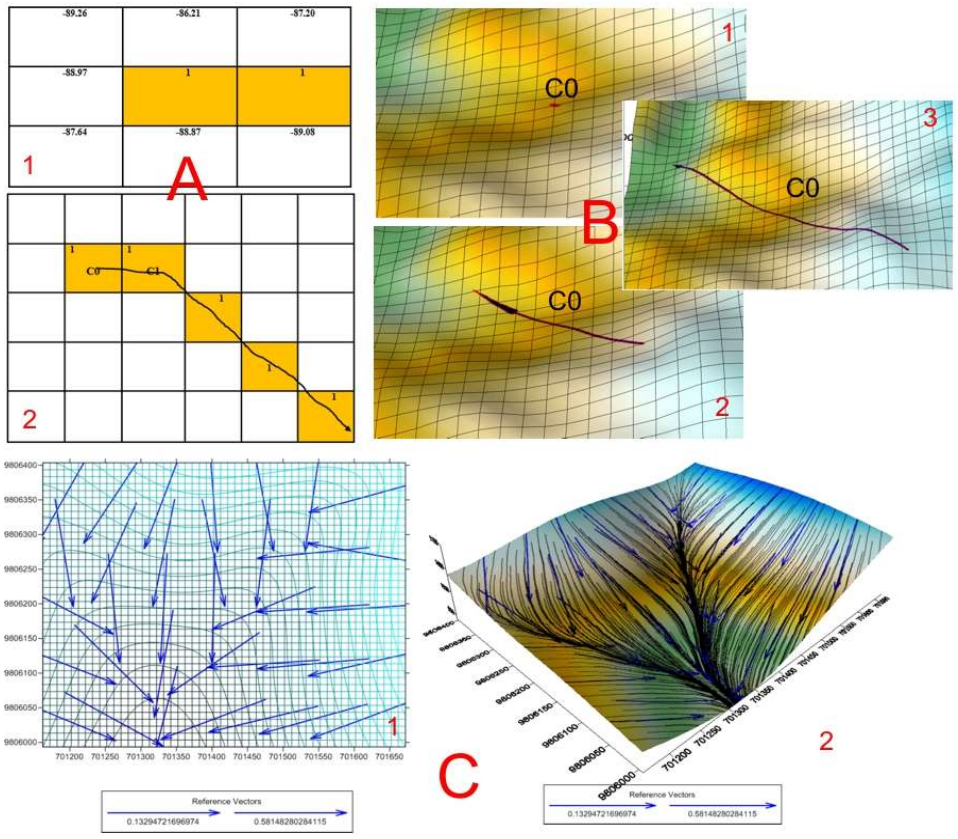


Figure 5. (**A1**, **A2**) Operation of the propagation rule. The cell with the maximum negative slope is the cell that will change status from 0 (off) to 1 (on) as shown in yellow. (**B1**) The center of cell C0 is the start of the drawing of the flow lines. (**B2**) Drawing the flow line "downstream". (**B3**) The final plot of the flow line upstream and downstream from starting cell C0. (**C1**) Plotting the flow lines of surface-water runoff from the elevation mesh of the DEM and (**C2**) concentration in drainage channels and erosion of geoforms.

In Phase 4, the plane and profile curvatures in the matrix of the slopes of Figure 3A are calculated with Equations (4)–(7) below [23]:

$$D = \frac{\left[\frac{P7+P4}{2} - P0\right]}{d^2}; E = \frac{\left[\frac{P1+P7}{2} - P0\right]}{d^2}; F = \frac{\left[\frac{P1+P7}{2} - P0\right]}{d^2}; \quad (4)$$

$$G = \frac{(P3 - P7)}{2d}; H = \frac{(P1 - P5)}{2d} \quad (5)$$

$$\text{Plan Curvature}: \ PC = \frac{2\left(DH^2 + EG^2 - FGH\right)}{G^2 + H^2} \quad (6)$$

$$\text{Profile Curvature}: \ PLC = \frac{2\left(DG^2 + EH^2 + FGH\right)}{G^2 + H^2} \quad (7)$$

In Phase 4, the flat and profile curvatures are calculated, which are one of the factors that contributes to relief deformation and instability. These curvatures were extracted directly from the DEM, apart from aspect and slope. The layouts of the flat curvature (concavity degree/convexity along an isoline perpendicular to the slope profile) and the profile curvature (concavity degree/convexity of the slope profile) were selected due to their influence over the water content that is stored in the soil

and is responsible for mass movements when intense precipitations occur. These traced curvatures, such as continuous isolines, brake slopes and orientation originating natural fractures processes [24].

For the flat curvature, negative values show that the surface is concave upwards and positive values show that the surface is convex upwards. For the profile curvature, negative values show that the surface is convex upwards and positive values show that the surface if convex upwards. A cero-curvature value shows that the surface is flat for both types of curvature. Additionally, for each DEM cell, from the C0 cell, if the line that represents flow direction or curvatures is infinitely grown until the DEM edge is located, the structural lineaments (parallel lines to the curvatures) can be found, and deformation zones of the topographic relief in the intersections of these lines with the runoff flow paths from superficial water can be also found. The intensity of these concentrations values the deformation and susceptibility degree to mass movements in the study area. The curvature values are calculated in all cells of the DEM and intermediate meshes of slope change are drawn, obtaining the curvature vector (inflection that indicates concavity or convexity from node to node in degrees. Through this second operation, continuous facets of similar orientation within the DEM are connected via a direction vector from the cell centers. Vectors are where surface runoff water enters from the upper parts and erodes the deformed and weathered geoforms (morphological break line) (Figure 6A).

Within the digital elevation model, when the runoff and rupture lines were concentrated, erosion channels and areas of subsidence and breakage of the geoform were generated. Climate and topographic relief influence the pattern of a network, but the underlying geological structure is usually the most influential factor for the generation of this type of line and erosive processes. Hydrographic patterns are closely related to geology, which can help identify faults and structural lineaments [23,25–27].

The final active surface deformation of a region (for example, any DEM) with internal mass flows, can be spatially determined by the intersection of a set of morphological break lines that define critical points and regions of movement susceptibility (Figure 6B1–6B3). By applying a density filter to these lines, we obtained Morphological Sliding Plates (Figure 6C1–6C3), which relate morphology and geological structures, within which can be found fault escarpments, triangular facets of erosion, closing hills, pressure hills, deformation of alluvial cones, inversions of river beds, and other morphotectonic aspects associated with types of mass movements, such as rotational, translational, lateral expansion, falling blocks, flows in general, solifluction, and creep.

This methodology was validated in two areas of Ecuador (Figure 6D1) and one in Spain (Figure 6D2). Zone 1 is located between the towns of El Cadial, Chilcaloma, and Angas in the province of Bolívar, Ecuador. Zone 2 is located in the town of Pedernales, province of Manabí [28], Ecuador, and Zone 3 is in Arenas Del Rey in Granada, Andalusia, Spain [29].

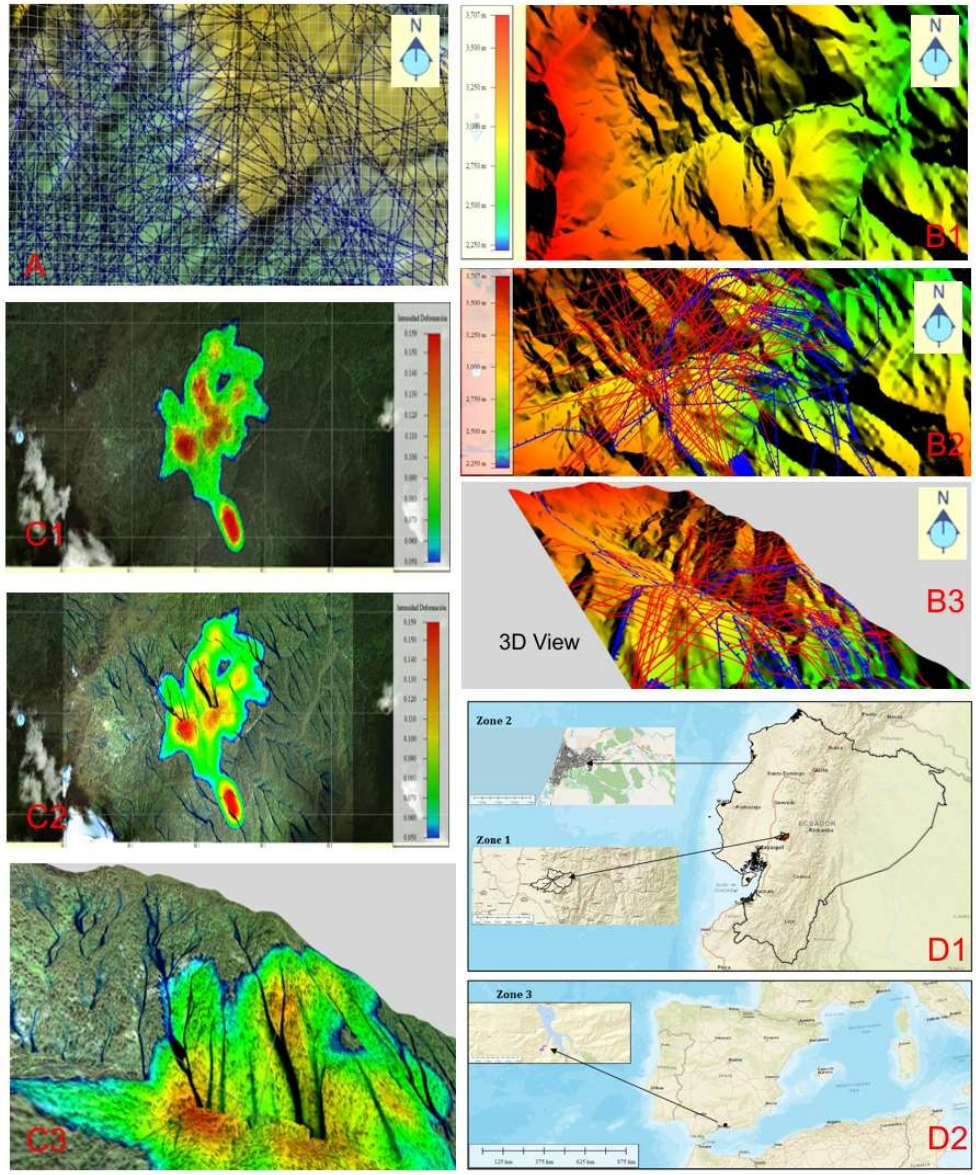


Figure 6. (**A**) Phase 4: Tracing of curvature vectors created by the trace of intermediate meshes of change in slope and inflection that indicates concavity or convexity surfaces. (**B1**) Final state of active surface deformation of a region. (**B2 and B3**) with internal mass flows determined by the intersection of a set of morphological break lines (blue lines-morphological rupture and red lines-runoff flows) that define critical points and regions of susceptibility to movement. (**C**) Formation of the Morphological Sliding Plates in a function of flow lines and rupture lines. (**C1**) Sliding mantles without internal flow, (**C2**) sliding mantles with internal flows, and (**C3**) 3D model with sliding mantles obtained. (**D**) Study areas. Zone 1 (**D1**): Located between the towns of El Cadial, Chilcaloma, and Angas, in the province of Bolivar, Ecuador. Zone 2 (**D1**): Town of Pedernales, province of Manabí, Ecuador. Zone 3 (**D2**): Arenas Del Rey in Granada, Andalusia, Spain.

3. Results

Zone 1: in all of Zone 1, structural guidelines, fractures, surface deformations and their type of associated mass movements, verified with field work, were found in three great plates of intense deformation, framed in red-colored polygons, (Figure 7A). Zone 1 in El Cadial–La Chorrera–La Chorrera de Arriba (340 ha); Zone 2 in Chiriyacu (262 ha); and Zone 3 in Agas–Saltuco–Chilcaloma–El Salto (370 ha). Besides that, other smaller deformation plates were found in Las Juntas and Santa Lucia. The lower zones of the river valleys, such as in Balzapamba, with an intense deformation with blue

tendencies, represent mass-flow areas that generally affect these zones during intense precipitation times. For this zone, the digital elevation model of 10 m of spatial resolution was enough to obtain in detail the surface-relief deformations, structural lineaments and their relation with mass flow such as debris flow in ravines, eroded hillsides, and translational landslides (Figure 7B).

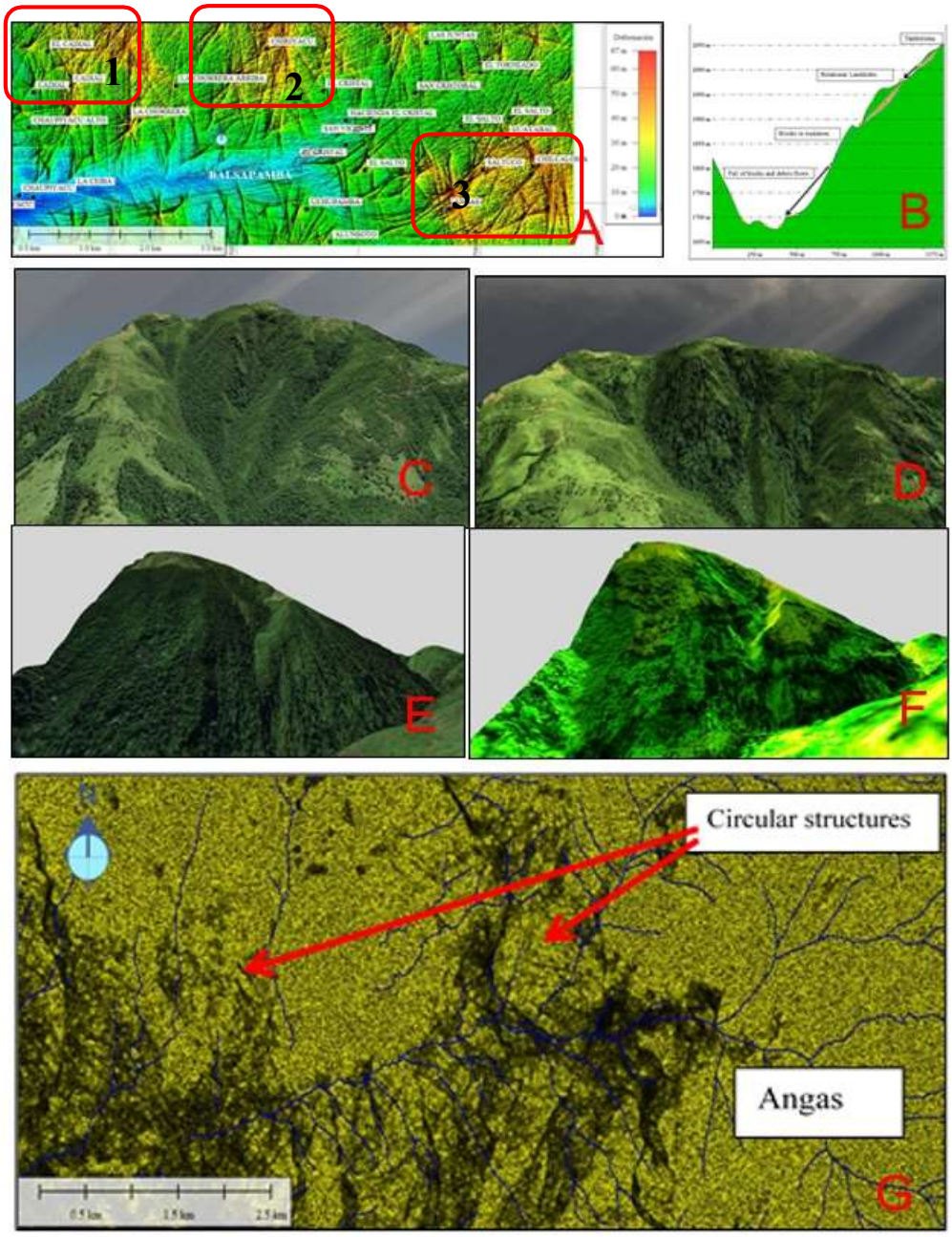


Figure 7. Zone 1: Located between the towns of El Cadial, Chilcaloma, and Angas, in the province of Bolívar. There are three morphological deformation plates. (**A1**) El Cadial-La Chorrera–La Chorrera de Arriba (340 ha), (**A2**) Chiriyacu (262 ha), (**A3**) Angas–Saltuco–Chilcaloma–El Salto (370 ha). In these areas, the mountains are possibly fractured by the Balzapamba Intrusive. (**B**). Detail the surface-relief deformations and structural lineaments. (**C**, **D**, **E**, **F**) Field check of the geoforms with real images without and with the application of the proposed methodology at scale 1/10,000. The response of the model was evidence in more than 300 control points. (**G**) Circular structures obtained with the proposed methodology of hidden geomorphological traits.

In Figure 7C–F, real photographs of the deformed hillsides were compared, without the application of the methodology proposed in Figure 7C,E, and with the application of the methodology proposed in Figure 7D,F, where intense deformations were obtained in these hillsides and their mass-movement systems associated with translational landslides, falling blocks, and mass flows. It also allowed for better comprehension of the relation between deformation of the topographic relief, mass movements, and the vulnerability of the population and its agroproductive systems to this kind of threat. An important characteristic of the obtained result with 10 m of spatial resolution is that the hidden geomorphological characteristics can be discovered as circular structures that can apparently be collapsed volcanoes, ancient megalandslides, and surface fractures caused by the location of intrusive locks (intrusive of Balsapamba). This circular structure, to the east of the Angas, is shown in a series of mass flows (Figure 7G).

Zone 2: This zone is located on the town of Pedernales, province of Manabi, in the Ecuadorean coast. Pedernales' population was the most affected by being near the epicenter of the earthquake of April 16, 2016, with a 7.8 score on the Richter Scale (Figure 8A). In Figure 8B we can observe the intensity of the concentration of structural geological lineaments and fractures (red-colored stripes) in the Zero Zone of Pedernales, obtained with a 3 m spatial resolution DEM before the earthquake. In the Zero Zone, the population suffered major destruction and building loss, as well as the loss of human lives (more than 183). In Figure 8C, we can observe destroyed buildings by the earthquakes, delimited by red-colored polygons. In Figure 8D, a detail of the structural lineaments that possibly amplified the superficial Rayleigh waves that destroyed houses and civil infrastructure is shown. In Figure 8E, we can observe a detail of the destroyed or severely damaged houses, marked with a red-colored cross and revised in the field after the earthquake. This infrastructure was raised (tendency to the yellowish-red color) or lowered (tendency to a violet-red color) as it is shown in the topographic relief image, obtained with an HSV saturation filter (saturation matrix). These houses were found near or on top of structural lineaments, surface fractures, and deformed zones obtained with the presented methodology. The houses with green colors show no destruction or cracks.

Zone 3: The third zone that theoretically validated this proposed methodology without field-work verification was in Arenas del Rey, Granada, Andalusia, España (Figure 9A). According to the chroniclers of the time, it was moved by an earthquake occurring on 25 December 1884, with its epicenter in Arenas del Rey, and a magnitude between 6.2 and 6.5 points in the Richter Scale, lasting for approximately 20 seconds, with a hypocenter between 40 and 50 km underground, causing between 1050 and 1200 deaths and approximately double that number in injuries. A total of 90% of civil structures were destroyed. Figure 9B and 9C shows surface structural geological lineaments that exist today in Arenas del Rey obtained using only the proposed methodology. Figure 9C shows the limits of the city (solid red-colored lines) and its location on top or near geological structural lineaments, with NS, NE–SW, and NW–SE directions, and surface fractures that possibly amplified the seismic waves of the 1884 earthquake and destroyed the city. This situation puts the population at high risk. Figure 9D shows the zoning of the seismic vulnerability of city plots in function of the actual terrain deformations that could raise or lower civil structures with a similar earthquake to the 1884 one. Figure 9E shows the concentrations (tendency to red color) of the lineaments and structural fractures in the Federico Garcia Lorca church, Alfonso XII plaza, and Jaen and Infanta Eulalia streets, which are one unified deformation train. These old deformations were possibly activated with the 1884 earthquake and destroyed the church, plazas, and other nearby buildings (90% of the population was killed). In the attached images (Figure 9F) of the document "The Earthquake of Alhama of Granada of 1884 and its Impact", the destruction of the church and the houses near the Alfonso XII plaza are represented. This evidence corroborates the actual deformation of those plots that place these buildings in danger.

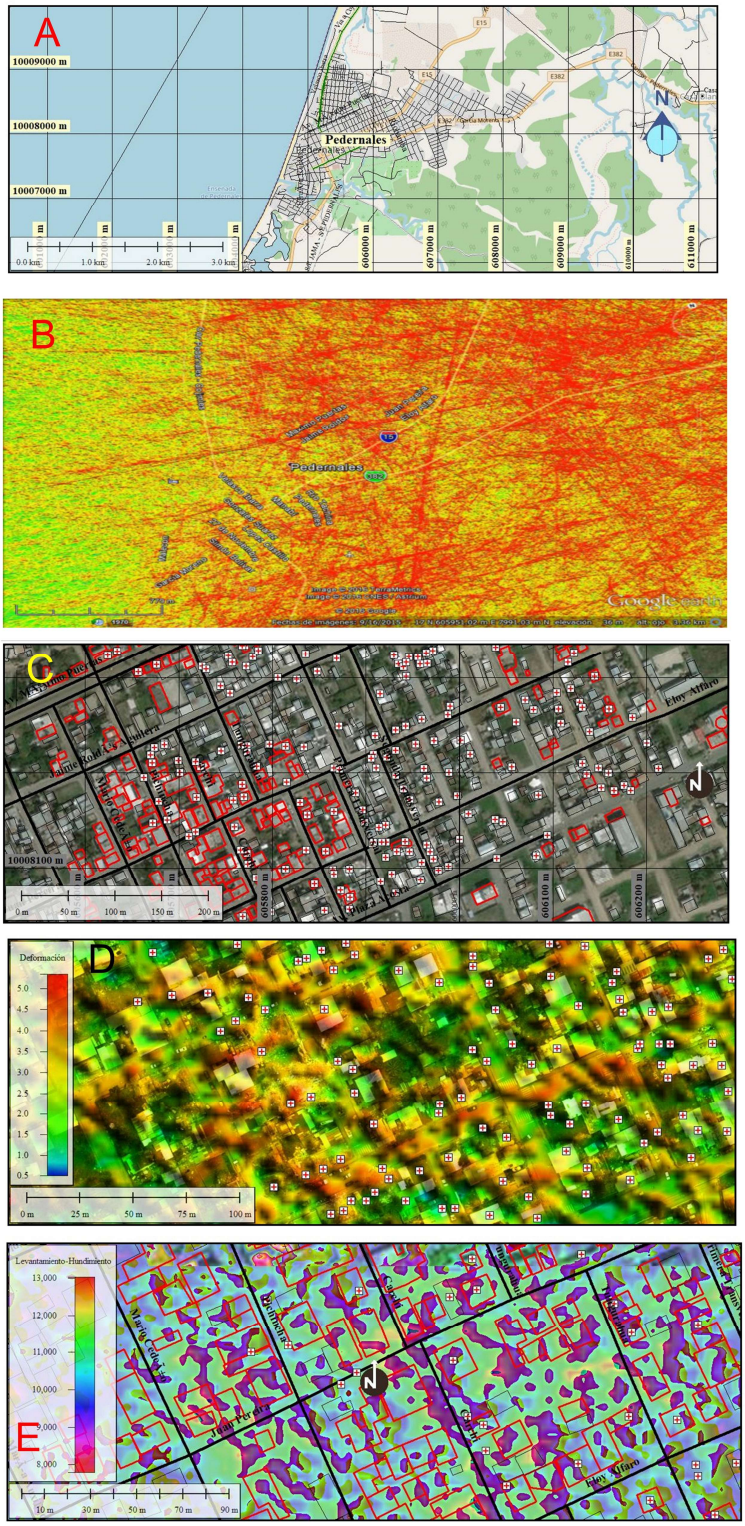


Figure 8. (**A**) Location of Zone 2 in Pedernales. (**B**) Structural lineaments obtained with the proposed methodology. (**C**) Orthophoto with the destroyed homes (red polygons) after the earthquake of 2016. (**D**) Location of the collapsed houses on top of the obtained structural lineaments. (**E**) Color-intensity filter and collapsed houses (red color).

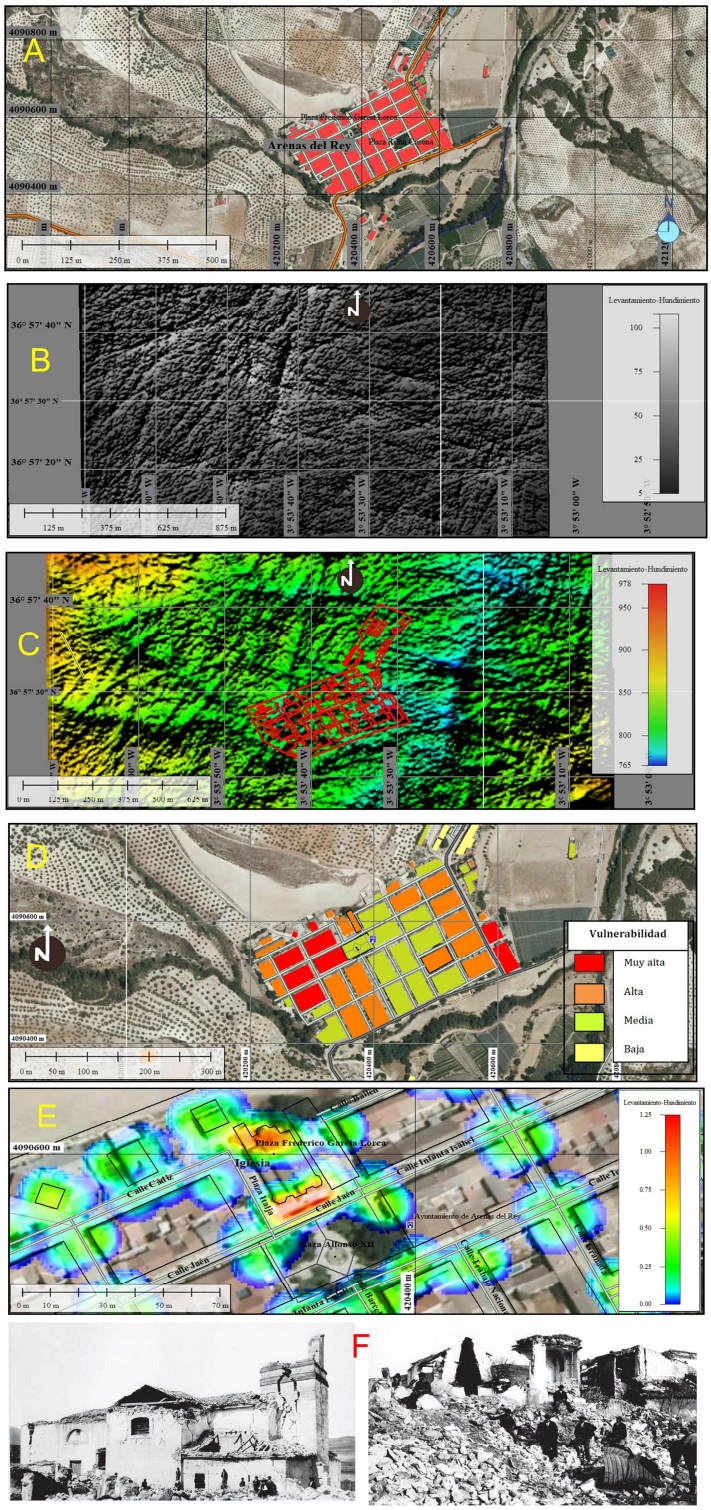


Figure 9. (**A**) Location of Zone 3 in Arenas del Rey, Granada, Andalusia, Spain. (**B**) Structural lineaments of the study area. (**C**) Positioning of the city outline on relief structural lineaments. (**D**) Vulnerability intensity by relief deformation in the city outline. (**E**) Punctual deformation in the Federico Garcia Lorca Church to Jaen Street. (**F**) Images of the 6.2 to 6.5 in the Richter scale earthquake in 1884.

4. Discussion

This standardized methodology by the SNGR, using heuristic and variable weighing to elaborate susceptibility to mass-movement maps, doesn't identify geological structural lineaments, morphological ruptures lines, fractures, and surface-relief deformations. It also does not identify different types of mass movements, subsidence, and specific subsidence in small areas. However, these maps are a base reference to incorporate in them the geomorphologic traces mentioned, obtained with the proposed methodology that uses flow directions and its vector line with magnitude and the direction it represents. It also traces morphologic rupture lines using slope values, orientation of the slope, and flat and longitudinal curvatures, in public-license software such as SAGA and Arcview, and in commercial software such as Surfer and Rockworks 7 used in this study. This geomorphological traces were obtained in a quick fashion, unlike with the heuristic methodology, weighted variables, and analog methodologies such as the Mora Varhson image analysis that need larger thematic coverage and a larger amount of time for their processing.

Digital elevation models of 10 m, 3 m, and 5 m of spatial resolution used were enough to obtain relief-deformation zones based on structural lineaments and relief fractures. These deformation zones possibly contain weak geomechanic characteristics, can weather easily, and generate mass movements by rain such as in Zone 1, or by earthquakes with more than 6 points in the Richter Scale, such as the ones that shook the Ecuadorean coastline (2016) and Arenas del Rey, Andalucia, Spain (1884).

This methodology can be used with DEM of different spatial resolutions with ranges from 1 m (Lidar) up to big resolutions obtained from SRTM, AsterGdem, ALOS-PALSAR, Open Topography, and GTOPO 30, among other servers.

The ease to obtain digital elevation models with their public application allowed for quick obtaining of results to delimit borders, instability borders, and safe areas that can be used to locate meeting points, space routes, and safe areas to mobilize the population in the event of this type of threat. The application of this methodology can strengthen the operation of early warning systems to this type of threat.

5. Conclusions

The zoning of susceptibility by mass movements based on flow directions with the basic D8 Hydrological Method uses digital elevation models processed in free and commercial software, facilitating the identification and quick localization of structural geological lineaments, fractures, relief-deformation areas, and different types of mass movements.

A special characteristic of the presented methodology to obtain structural lineaments, fractures, and surface-relief deformations is that, depending on the digital elevation model resolution, it is possible to extract hidden geomorphologic characteristics such as extinct volcanic calderas, relief deformation by intrusive rocks and fractured pressure mounts, and deformed hillsides, among other geomorphologic traits.

The location of deformed areas by concentration of structural lineaments and relief fractures obtained from this methodology, with the field verification done in Ecuador (300 field control points) and in the base of chroniclers in Spain, have corroborated what happened in the areas of study.

Finally we conclude that the proposed methodology, unlike the standardized and analog methods, is economic, with a high precision degree, and can be applied to any geographic region before a disaster occurs caused by natural risks, such as intense rains or earthquakes with a ranking higher than 6 on the Richter scale. Thus, this methodology can be used as a forecasting mechanism through which maps of structural lineaments, fractures, and quaternary deformations with their own associated mass-movement types can be created, so populations located on or near these geomorphologic traits can be evaluated by their vulnerability degree to subsidence, structural collapse, landslides, and other types of mass movements. This will allow the elaboration of prevision and reduction maps to this type of risk in very high susceptibility zones and will strengthen municipal planning of the territory as well as its risk-management units, improving response and reduction protocols.

Author Contributions: The research work presented in this paper is a collaborative development by both authors. Conceptualization, M.C. and A.M.; Methodology, M.C. and A.M.; Software, M.C.; Validation, M.C. and A.M.; Formal Analysis, M.C.; Investigation, M.C. and A.M.; Resources, M.C.; Data Curation, M.C.; Writing-Original Draft Preparation, M.C. and A.M.; Writing-Review & Editing, A.M.; Visualization, Supervision: A.M.; Project Administration, A.M.; Funding Acquisition, A.M.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: This research was funded by projects Junta Castilla y León J420/463AC03 and projects from the Ministry of Economy and Competitiveness CGL2015-67169-P and CGL2015-69919-R.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Moore, I.D.; Grayson, R.B.; Ladson, A.R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrol. Process.* **1991**, *5*, 3–30. [CrossRef]
2. Felicísimo, A.M. Digital terrain models: Introduction and applications in environmental sciences. Ph.D. Thesis, Universidad de Extremadura, Badajoz, Spain, 1994.
3. Tarboton, D.G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resour. Res.* **1997**, *33*, 309–319. [CrossRef]
4. Cando, M. Memories of the First International Symposium of Mass Movements. The Flow Paths of runoff as generators of mass movements. A vector approach Cuenca, Ecuador. Confidential report.
5. Cando, M. MGE as Base of Support for the Construction of the Morphologic Breakage Model. In Proceedings of the Geospatial World 2002, Atlanta, GA, USA, 10–12 June 2002.
6. Cando, M. Study of Landslides on the QuitoTena highway, the virgin stretch of Papallacta-Sardinas. In Proceedings of the International Symposium of Environmental Geology for the Planning of the use of the Territory, Puerto Varas, Chile, 2002. Memory of the Symposium.
7. Cando, M. *Tectonic Evidences and Simulation for a Potential Future Submarine Sector Collapse at Volcano Roca Redonda, Northern Galapagos and Ecuador 2007*, 2nd ed.; Cuban Convention of Earth Sciences: La Habana, Cuba, 2007; Available online: http://catalogo.bnjm.cu/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=96896 (accessed on 9 September 2018).
8. Cando, M. The danger from flooding in the Lower Guayas River Basin 2010. Spanish Civil Guard: Memories of the VI National and IV International Conference on Nature and the Environment. Santander, Spain, 2010. Available online: http://jornadas.jabustillo.com/wp-content/uploads/2014/10/PROGRAMA-2010.pdf (accessed on 9 September 2018).
9. Cando, M. Methodological development for the study of gravitational movements in hillsides: Application to the case of the Quito-Tena highway, section Papallacta-Baeza (Republic of Ecuador). Research proficiency in External Faculty of Sciences, Autonomous University of Madrid, Madrid, Spain, 2004. Confidential report.
10. Cando, M. The Model of Morphological Break and its contribution in the prevention of mass movements. CIGMA 2004. Environmental Mining Geological Seminar, Cuenca, Ecuador. Unpublished report. 2004.
11. Glaze, L.S.; Balogadem, S.M. DEM Flow Path Prediction Algorithm for Geologic Mass Movements. *Environ. Eng. Geosci.* **2003**, *9*, 225–240. [CrossRef]
12. Kim, M.S.; Onda, Y.; Uchida, T.; Kim, K.J.; Song, S.Y. Effect of seepage on shallow landslides in consideration of changes in topography: Case study including an experimental sandy slope with artificial rainfall. *Catena* **2018**, *161*, 50–62. [CrossRef]
13. Guinau Sellés, M.; Vilajosana Guillén, I.; Vilaplana, J.M. GIS-based debris flow source and runout susceptibility assessment from DEM data—A case study in NW Nicaragua. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2007**, *7*, 703–716. [CrossRef]
14. Han, S.; Yang, H.; Fan, T.; Xiao, D.; Moiwo, J.P. Precipitation-runoff processes in Shimen hillslope micro-catchment of Taihang Mountain, north China. *Hydrol. Process.* **2012**, *26*, 1332–1341. [CrossRef]
15. Kim, K.S.; Song, Y.S. Geometrical and geotechnical characteristics of landslides in Korea under various geological conditions. *J. Mount. Sci.* **2015**, *12*, 1267–1280. [CrossRef]
16. Lanni, C.; Borga, M.; Rigon, R.; Tarolli, P. Modelling shallow landslide susceptibility by means of a subsurface flow path connectivity index and estimates of soil depth spatial distribution. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2012**, *16*, 3959–3971. [CrossRef]

17. Bruning, J.N.; Gierke, J.S.; Maclean, A.L. An Approach to Lineament Analysis for Groundwater Exploration in Nicaragua. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **2011**, *77*, 509–519. [CrossRef]
18. Brenning, A. Statistical geocomputing combining R and SAGA: The example of landslide susceptibility analysis with generalized additive models. *Hambg. Beitr. Phys. Geogr. Landsch.* **2008**, *410*, 23–32.
19. Sárközynce, F. Introduction to GIS and Hydrologic modelling using ArcView 3.x. Available online: http://www.agt.bme.hu/public_e/ (accessed on 7 September 2018).
20. Harrop, J. Rockworks version 7. Geological Software Collection, Rockware Inc., Golden, Colorado, US $495. *Comput. Geosci.* **1996**, *22*, 597–600. [CrossRef]
21. Golden Software Surfer 12 User's Guide. Chapter 12: Vector Maps. Available online: http://downloads.goldensoftware.com/guides/Surfer12_Users_Guide_Preview.pdf (accessed on 7 September 2018).
22. Ahmad, T.; Sinha, K.; Chakraborty, P.P. GIS Surface Models and Terrain Analysis. RS and GIS XXVI. Available online: http://epgp.inflibnet.ac.in/epgpdata/uploads/epgp_content/S000448GO/P000602/M022483/ET/1505382131E-TextGISSurfaceModelsandTerrainAnalysis.pdf (accessed on 7 September 2018).
23. Martínez-Graña, A.M.; Goy, J.L.; Zazo, C.; Yenes, M. Engineering Geology Maps for Planning and Management of Natural Parks: "Las Batuecas-Sierra de Francia" and "Quilamas" (Central Spanish System, Salamanca, Spain). *Geosciences* **2013**, *3*, 46–62. [CrossRef]
24. Dai, F.C.; Lee, C.F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* **2002**, *42*, 213–228. [CrossRef]
25. Silva, P.G.; López, M.; Roquero, E.; Huerta, P.; Martínez-Graña, A.M. Chronology of fluvial terrace sequences for Large Atlantic Rivers in the Iberian Peninsula (Upper Tagus and Duero drainage basins, Central Spain). *Q. Sci. Rev.* **2017**, *166*, 188–203. [CrossRef]
26. Martínez-Graña, A.M.; Goy, J.L.; Zazo, C. Geomorphological applications for susceptibility mapping of landslides in natural parks. *Environ. Eng. Manag. J.* **2016**, *15*, 1–12. [CrossRef]
27. Vidal Montes, R.; Martínez-Graña, A.M.; Martínez Catalán, J.R.; Ayarza, P.; Sánchez San Román, F.J. Vulnerability to groundwater contamination, SW Salamanca, Spain. *J. Maps* **2016**, *12*, 147–155. [CrossRef]
28. Noji, E. Equador Struck by Magnitude 7.8 Earthquajke 16 April 2016. Available online: https://es.slideshare.net/enoji/16-april-2016-magnitude-78-earthquake-strikes-ecuador (accessed on 9 September 2018).
29. Francisco, V.S. The Earthquake of Alhama de Granada of 1884 and its impact. Instituto Andaluz de Geofísica/Department de Física Teórica y del Cosmos, Universidad de Granada: Grananda, Spain, 2011. Available online: https://www.raco.cat/index.php/AnuariVerdaguer/article/viewFile/262467/349631 (accessed on 9 September 2018).

© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

remote sensing

MDPI

Article

Determination of Primary and Secondary Lahar Flow Paths of the Fuego Volcano (Guatemala) Using Morphometric Parameters

Marcelo Cando-Jácome and Antonio Martínez-Graña *

Geology Department, External Geodynamics Area, Faculty of Sciences, University of Salamanca, Plaza Merced s/n, 37008 Salamanca, Spain; id00709713@usal.es

* Correspondence: amgranna@usal.es; Tel.: +34-923-294496; Fax: +34-923-923294514

Received: 2 February 2019; Accepted: 25 March 2019; Published: 26 March 2019

Abstract: On 3 June 2018, a strong eruption of the Fuego volcano in Guatemala produced a dense cloud of 10-km-high volcanic ash and destructive pyroclastic flows that caused nearly 200 deaths and huge economic losses in the region. Subsequently, due to heavy rains, destructive secondary lahars were produced, which were not plotted on the hazard maps using the LAHAR Z software. In this work we propose to complement the mapping of this type of lahars using remote-sensing (Differential Interferometry, DINSAR) in Sentinel images 1A and 2A, to locate areas of deformation of the relief on the flanks of the volcano, areas that are possibly origin of these lahars. To determine the trajectory of the lahars, parameters and morphological indices were analyzed with the software System for Automated Geoscientific Analysis (SAGA). The parameters and morphological indices used were the accumulation of flow (FCC), the topographic wetness index (TWI), the length-magnitude factor of the slope (LS). Finally, a slope stability analysis was performed using the Shallow Landslide Susceptibility software (SHALSTAB) based on the Mohr–Coulomb theory and its parameters: internal soil saturation degree and effective precipitation, parameters required to destabilize a hillside. In this case, the application of this complementary methodology provided a more accurate response of the areas destroyed by primary and secondary lahars in the vicinity of the volcano.

Keywords: volcano deformation; lahars hazard; magma accumulation; pyroclastic flows; ash plumes

1. Introduction

Primary lahars are flows which are formed as a direct result of a volcanic eruption. They tend to be bulky (107–109 m^3) and record high speeds (>20 m/s). Their maximum flows are commonly between 103–105 m^3/s. These features provide the ability to flow long distances, even hundreds of kilometers downstream. They occur primarily when during an eruptive event incandescent material causes the fast melting of large volumes of ice and snow of the glaciers that cover some volcanic edifices and flows by descent gullies. Secondary lahars mainly include lahars caused by the rains. The unbound, by previous eruptions, pyroclastic material can be easily removed by the rains. In general, these are at lower speed, volume and they travel shorter distances as compared to primary lahars, however, they are most frequent during periods of rain [1].

Guatemala is the only country in the Central American region that has trained local observers to generate reports on volcanic activity, who then transmit the information via radio and/or telephone three times a day. The information is transmitted to the National Institute of Seismology, Volcanology, Meteorology and Hydrology (INSIVUMEH) plant when the following characteristics are present: changes in the release of energy, increase in the number of explosions, increase in the expulsion of ash, increase in seismic activity, rumblings, shock waves, and the manifestation of block avalanches that descend through the ravines in the volcanic perimeter.

On 3 June 2018, a strong eruption of the Fuego volcano in Guatemala produced a dense volcanic ash cloud rising to 10 km high. Following the collapse of the volcanic column, pyroclastic flows and descending lahars caused significant damage and a high number of fatalities around the mountain [2]. After the eruption, INSIVUMEH, with support from the Volcano Disaster Assistance Program (VDAP) of the United States Geological Survey (USGS), the University of Edinburgh, and Michigan Technological University, elaborated 2 scenarios of lahars for medium and heavy rains based on the numerical models obtained from the program LAHAR Z (Figure 1). These scenarios can be seen on the MapAction page [3].

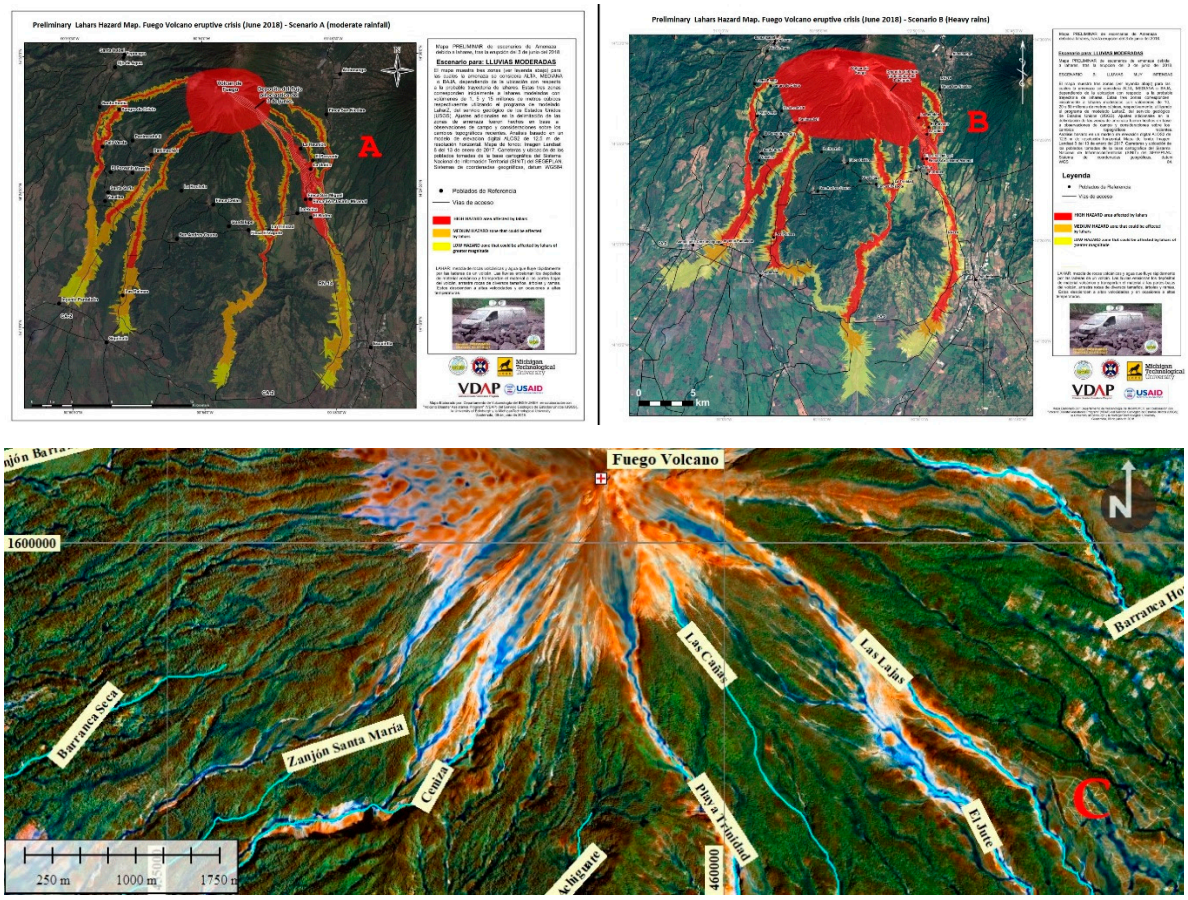


Figure 1. Web Map prepared by MapAction as a collaborator on the HazMap project and in support of National Institute of Seismology, Volcanology, Meteorology and Hydrology (INSIVUMEH). Data from preliminary maps of the hazard of pyroclastic flows and lahars for scenario A (moderate rainfall) and scenario B (very heavy rainfall). Prepared in June 2018 by INSIVUMEH, Volcano Disaster Assistance Program (VDAP), United States Geological Survey (USGS), the University of Edinburgh, and Michigan Technological University. In C, location of Las Lajas, El Jute, Ceniza and Seca ravines.

On 19 November and for the fifth time during 2018, the Fuego volcano erupted, with a 1200-m long lava flow that descended into the Ceniza canyon. This volcanic flow with fragments of rock producws by erosion on the slopes of the volcano moved downhill, incorporating enough water, so that they formed mud flows and volcanic debris or lahars that descended the slopes of the volcano, affecting sectors such as Las Lajas, El Jute, besides the Ceniza and Seca ravines, according to INSIVUMEH in its last special volcanological bulletins (Nos. 157-2018 and 158-2018) [4,5].

The theory of LAHAR Z's operation will not be studied in this article, since it is not the objective of this study. Its operation is reviewed briefly. In this article, reference is made to the LAHAR Z program and its results as a basis for superimposing the results obtained by the Differential Interferometry

Synthetic Aperture Radar Differential (DINSAR) analysis, the morphometric indices and the unstable areas near the volcano.

LAHAR Z was written to delimit areas of potential lahar inundation from one or more user-specified lahar volumes. LAHAR Z is a code that is executed within a geographic information system (GIS), which was created by the USGS [4] and is based on a semi-empirical model that delimits flood risk zones by lahar (that is, areas drawn to represent the probable floods during a lahar event) in a digital elevation model (DEM).

The program uses two semi-empirical equations calibrated by statistical analysis in the cross section of an area flooded by a lahar (A) and the flooded planimetric area (B) measured in 27 lahars deposits of 9 volcanoes in the United States of America, Mexico, Colombia, Canada and Philippines [6] (Figure 2).

The equations are:

$$A = \alpha_1 V^{2/3} \quad (1)$$

$$B = \alpha_2 V^{2/3} \quad (2)$$

where A is the maximum section area flooded, B is the total area flooded and V is the volume of the lahar, $\alpha_1 = 0.05$ and $\alpha_2 = 200$, are constant values.

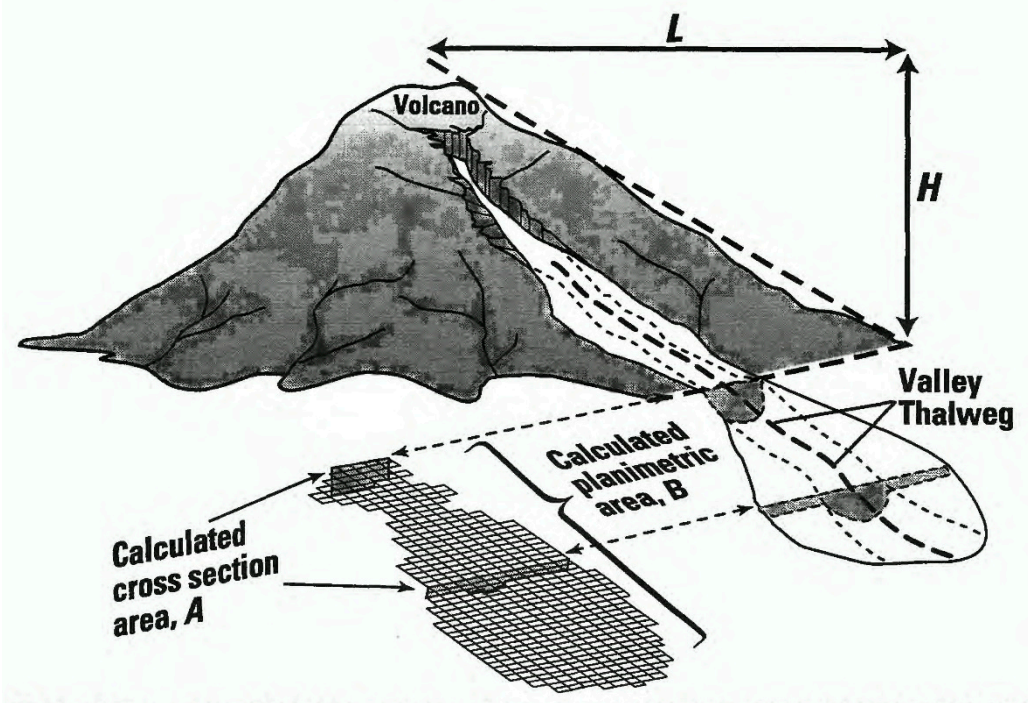


Figure 2. Diagram of association between dimensions of an idealized lahar and cross-sectional (A) and planimetric (B) areas calculated by LAHAR Z for a hypothetical volcano. The ratio of vertical drop (H) to horizontal runout distance (L) describes the extent of proximal volcano hazard. LAHAR Z begins calculations of lahar-inundation hazard zones where a user-specified stream and the proximal-hazard zone boundary intersect [6].

The LAHAR Z model works under assumptions such as:

1. Floods from past lahars can provide the information basis to predict possible future floods.
2. Distant hazard zones are confined to the valleys and are directed to the slopes of the volcano.
3. The volume of the proximal lahar controls the extent of the distal flood forming downstream.
4. Very voluminous lahars occur less frequently.
5. No one can predict the size of the next lahar that will descend by a river.

6. The volume selection for the lahar and the origin site thereof control the flow range.

As a complementary mechanism to the results obtained by DINSAR and Lahar-Z, the morphometric model has been used to determine the trajectories of the destructive lahars with greater precision by combining morphometric parameters obtained from the digital elevation model of 12 m of spatial resolution such as the flow accumulation (FCC), the topographic wetness index (TWI), the length-magnitude factor of slope (LS), the degree of internal saturation of the soil (h/z), where z is soil depth, h is water level above the failure plane and the effective precipitation (q/T) required to destabilize a slope, where h is the height of the water table and z is the thickness of the colluvium that slides above the failure plane. All these parameters are obtained from the shallow landslide slope stability model (SHALSTAB) to complement the mapping of this type of lahars using remote sensing (differential interferometry, DINSAR) in Sentinel images 1A and 2A, to locate areas of deformation of the relief on the flanks of the volcano, areas that are possibly origin of these lahars. To determine the trajectory of the lahars, parameters and morphological indices were analyzed with the software System for Automated Geoscientific Analysis (SAGA). The parameters and morphological indices used were the accumulation of flow (FCC), the TWI, the length-magnitude factor of the slope (LS). Finally, a slope stability analysis was performed using the Shallow Landslide Susceptibility software (SHALSTAB) based on the Mohr–Coulomb theory and its parameters: internal soil saturation degree (h/z) and effective precipitation (q/T), parameters required to destabilize a hillside. In this case, the application of this complementary methodology provided a more accurate response of the areas destroyed by primary and secondary lahars in the vicinity of the volcano [6] (Figure 3). These parameters are described in more detail in the Materials and Methods chapter.

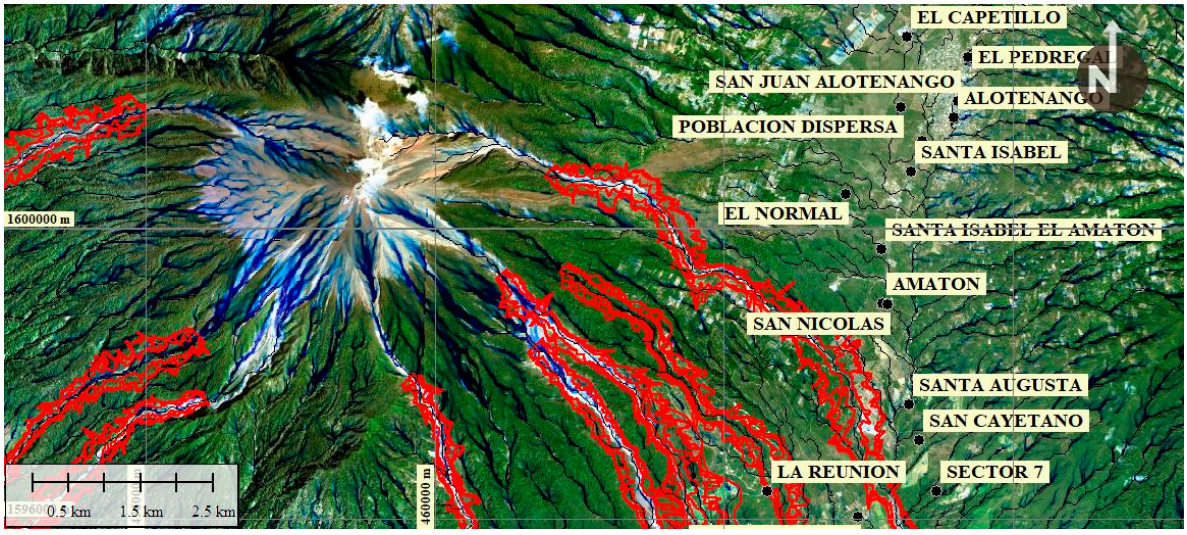


Figure 3. LAHAR Z Model (red lines) and the poor tracing of possible secondary lahars and analysis of their distal trajectories originating from proximal sources. The morphometric model combines parameters such as the flow accumulation (FCC), the topographical humidity index (TWI), and slope-length factor of the slope to more accurately determine the trajectories of the destructive lahars.

Although the limits of the areas delimited by the numerical modeling of lahars must be taken with caution and are considered as references and not as absolutes, the comparison between the limits of hazards by flows of lahars obtained from modeling with LAHAR Z and the morphometric model is mainly differentiated by their theoretical conceptualization.

Based on the damage caused by the pyroclastic flows, it was found that the volcanic hazard maps and physical vulnerability contained errors for two main reasons: a lack of field observation data to adjust the limits of the hazard map simulated with LAHAR Z, and the poor tracing of possible secondary lahars and the analysis of their distal trajectories originating in proximal sources [5].

2. Materials and Methods

The Sentinel 1 and 2 images obtained from the Alaska Satellite Facility [7], were used to determine the deformations of the terrain using the DINSAR technique [8] and those from Sentinel 2 were used to determine the changes in the morphology of the relief, which in this case was the delimitation of primary and secondary lahars, and compare them with the results obtained from the morphological model. The digital elevation model of 12 m of spatial resolution was obtained from the Copernico Project [9]. The planimetric information such as the results of the LAHAR Z software application was provided by the National Coordinator for Disaster Reduction (CONRED).

To complement the results obtained with the DINSAR analysis and the morphological method, in this study, the spatial distribution of potential sources of primary and secondary lahars during eruptions and torrential rains was analyzed using the slope stability model of shallow landslides. SHALSTAB is a plugin of the SAGA GIS.

The general flow of processes used in this study can be seen in Figure 4.

The processes A, B and C are described below:

Process (A): DINSAR analysis. The Sentinel 1 and 2 images were obtained from the Alaska Satellite Facility [9]. Sentinel 1 images were used to determine the deformations of the terrain using the differential SAR interferometry (DINSAR) technique [10] and those from Sentinel 2 were used to determine the changes in the morphology of the relief, which in this case was the delimitation of primary and secondary lahars and compare them with the results obtained from the morphological model. Process B: the planimetric information such as the results of the LAHAR Z software application was provided by CONRED. Process C: digital elevation model of 12 m of spatial resolution was obtained from the Copernico Project. The field observations carried out by CONRED technicians and sent in the format of points in shp format, helped to calibrate and verify the results obtained from the presented methodology, as well as to understand which of the three morphological parameters used had greater weight according to the scenario in the one that developed the lahars.

For the study of the primary and secondary trajectories of lahars using the DINSAR technique, the morphometric method and the stability analysis, the following parameters were analyzed:

The relief deformation analysis by the Sentinel Application Platform (SNAP) [11] followed the workflow indicated in Figure 4 from the Sentinel 1B images taken on May 21 and June 14, 2018.

This analysis was carried out to determine the possible zones of deformation of the ground where the possible secondary lahars start.

Brief synthesis of the processes to obtain the Interferogram:

Base images: Sentinel 1B

S1B_IW_SLC__1SDV_20180521T001317_20180521T001345_011012_0142C5_A797
S1B_IW_SLC__1SDV_20180614T001319_20180614T001347_011362_014DD5_D06F;

Mission: SENTINEL-1B
Pass: ASCENDING
Polarization: VV

Process diagram in ESA-SNAP [10] (Figure 5).

Step 1 Read-Topsar-Split-Orbit file: Open the products (Figure 5A).

S1B_IW_SLC__1SDV_20180521T001317_20180521T001345_011012_0142C5_A797
S1B_IW_SLC__1SDV_20180614T001319_20180614T001347_011362_014DD5_D06F;

View the products. (Figure 5B): In the Sentinel-1 IW SLC products, there are 3 subsets IW1, IW2, IW3. Each subset is for an adjacent strip of satellite data collection by TOPS mode. The Fuego volcano can be seen in IW3 (Figure 5C).

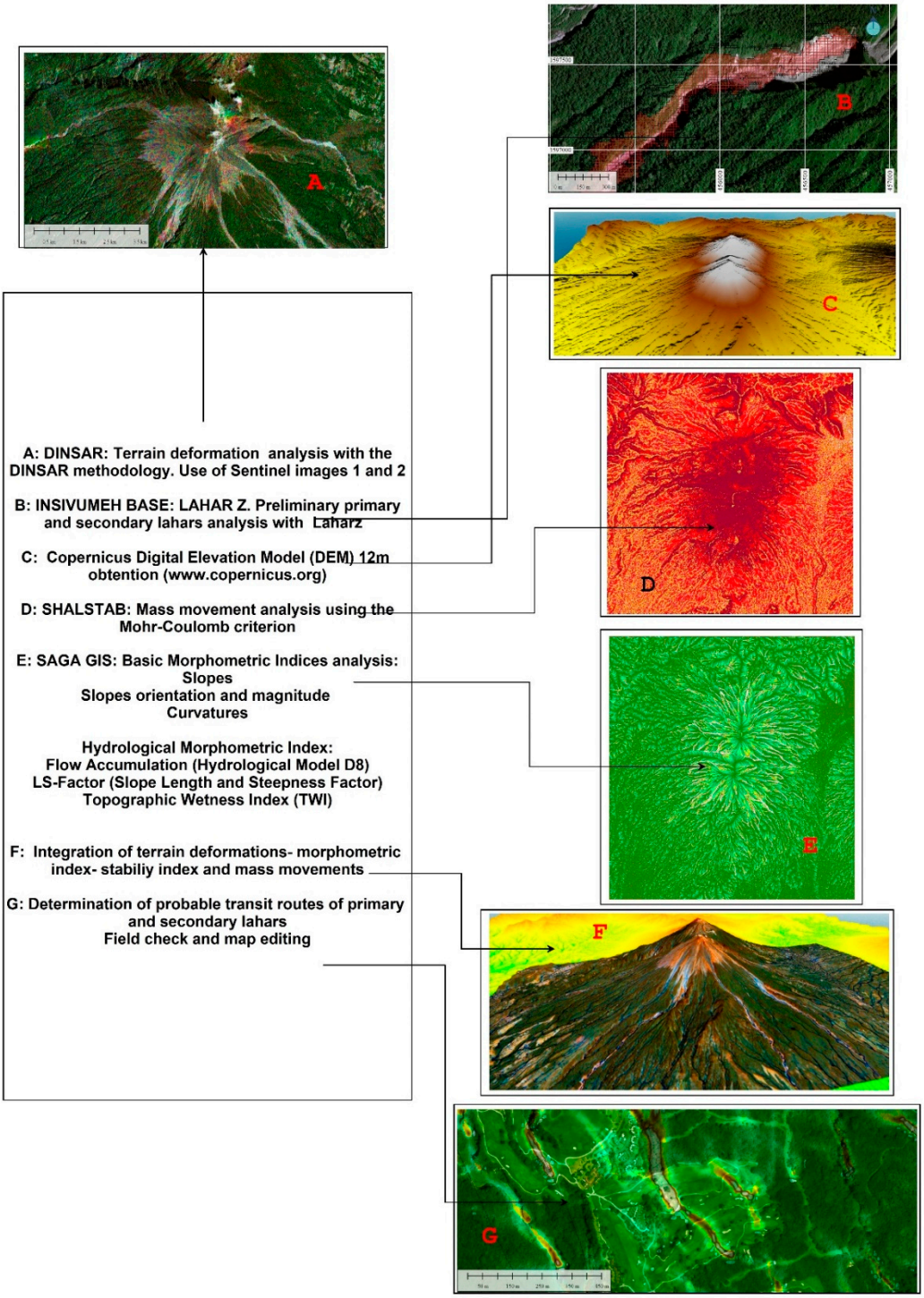


Figure 4. Flow methodological diagram for the determination of primary and secondary lahars flow paths from the following processes: (**A**) Analysis of terrain deformation with differential synthetic aperture radar interferometry DINSAR, (**B**) Use of base information of lahars routes obtained from LAHAR Z -National Institute of Seismology, Volcanology, Meteorology and Hydrology—INSIVUMEHIN. (**C**) Obtaining the digital elevation model of 12m of spatial resolution of Copernicus.org, (**D**) Analysis of Instability of the Relief with Shallow Landslide Susceptibility software (SHALSTAB), (**E**) Determination of Morphometric Indexes of the Relief with System for Automated Geoscientific Analyzes (SAGA), (**F**) Integration of information and determination of possible flow paths of primary and secondary lahars (**G**).

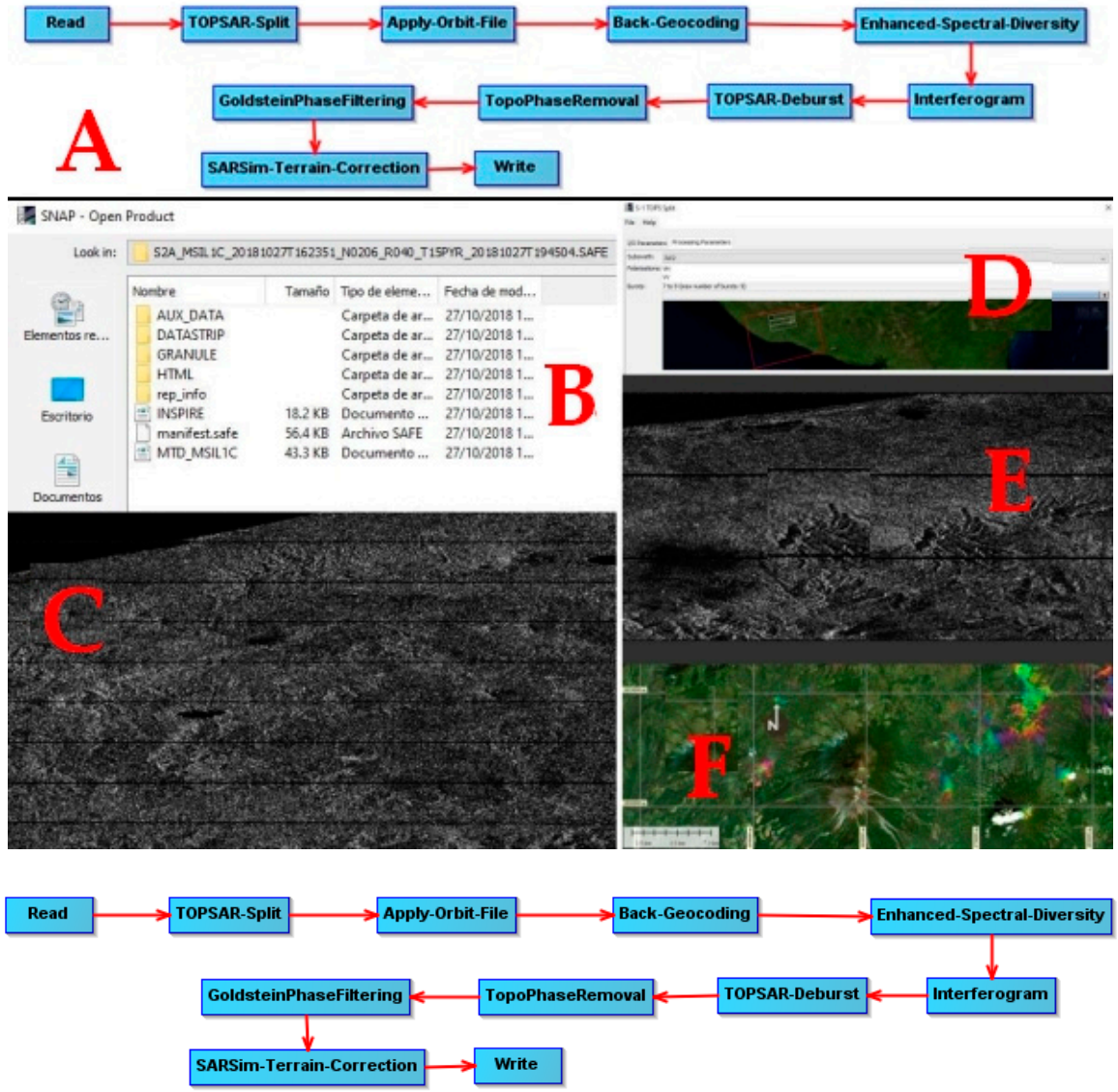


Figure 5. (**A**) The Sentinel Application Platform (SNAP) process used to obtain the deformations of the relief by DINSAR analysis. Steps (**B**–**F**). Sentinel Application Platform (SNAP) passages of each portion of the routine. See text for further explanation.

Step 2 View a band geocoding-enhanced spectral diversity. To view the data, Intensity_IW3_VV band.

Coregister the images into a stack: For interferometric processing, two or more images must be coregistered into a stack. One image is selected as the master and the other images are the slaves. The pixels in slave images will be moved to align with the master image to sub-pixel accuracy (Figure 5D).

Step 3 Form the Interferogram-Topsar Deburst-TopoPhase Removal-Filtering-Sarsim Terrain Corection-Write. (Figure 5E): Interferogram formation from the InSAR products menu.

The current location of the primary and secondary tabs after the eruption of 3 June 2018, were obtained with a Sentinel 2 image of 10 m of spatial resolution where bands 4, 3 and 2 were combined to obtain the current position of the lahars (Figure 6). A brief synthesis of the processes to obtain the real position of lahars is presented below:

Base Image: Sentinel-2B: 2018-10-22T16: 23: 19.024Z
Pass: DESCENDING

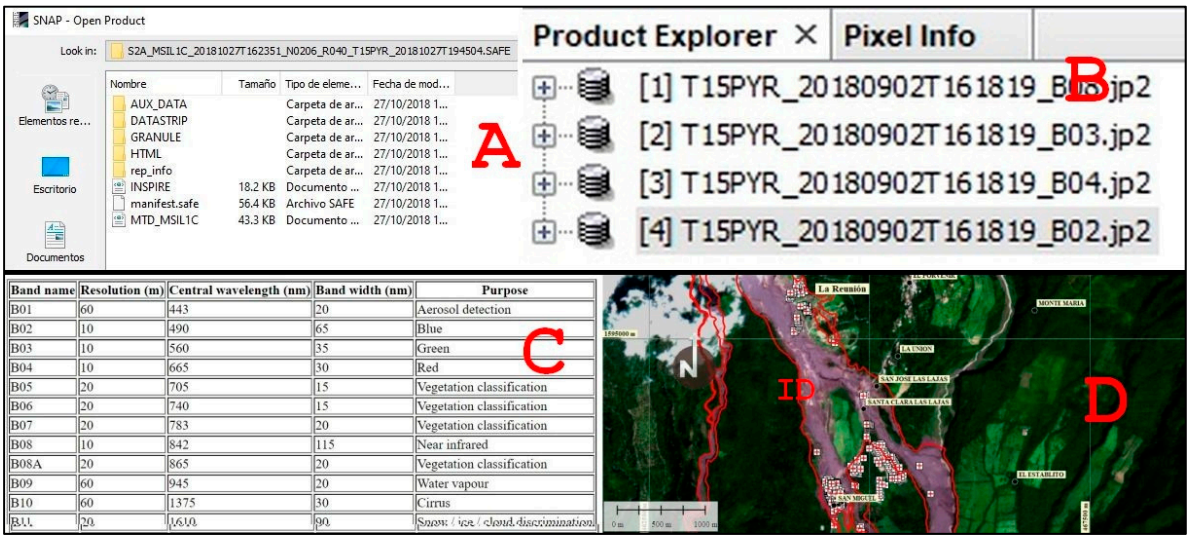
Bands: 4-3-2

Process diagram in ESA-SNAP

Step 1 Read-Open the products. Granule-img-bands (Figure 6A).

View the products. (Figure 6B): In the Sentine-2B-Granule-Img products, there are 13 spectral bands in the visible and near-infrared (VNIR) and short-wavelength infrared (SWIR) spectrum, as show in the below table (Figure 6C).

Step 2 Combine bands 4-3-2 RGB natural colors. Location of primary and secondary lahars (Figure 6D).



Band name	Resolution (m)	Central wavelength (nm)	Band width (nm)	Purpose
B01	60	443	20	Aerosol detection
B02	10	490	65	Blue
B03	10	560	35	Green
B04	10	665	30	Red
B05	20	705	15	Vegetation classification
B06	20	740	15	Vegetation classification
B07	20	783	20	Vegetation classification
B08	10	842	115	Near infrared
B08A	20	865	20	Vegetation classification
B09	60	945	20	Water vapour
B10	60	1375	30	Cirrus
B11	20	1610	90	Snow / ice / cloud discrimination

Figure 6. Process flow in SNAP. Spatial location of primary and secondary lahars from a Sentinel image 2. Combination of bands 4, 3 and 2. (**A**–**C**) SNAP passages of each portion of the routine in Sentinel 2A images. Location of primary and secondary lahars, (**D**) Synthesis of final product: limit of the model of lahar in red color obtained from LAHAR Z. In lead color the location to that date of the real lahar product of the eruption of June 3 and nearby places.

Process (D): mass movements analysis. To evaluate the susceptibility for landslides and define potential areas of sediment production through mass removal processes, the SHALSTAB program was used, which is a model to map potential shallow landslides. SHALSTAB combines the characteristics of the stationary subsurface flow (water flow that moves at shallow depths below the surface of the land with a constant velocity), considering the morphology-hydrology relationship [12]. SHALSTAB uses two types of numerical models: the slope stability model and the hydrologic model.

The slope stability model is based on an infinite slope form of the Mohr–Coulomb failure law in which the downslope component of the weight of the soil just at failure, τ, is equal to the strength of resistance caused by cohesion (soil cohesion and/or root strength), C, and by frictional resistance due to the effective normal stress on the failure plane Equation (3).

$$\tau = C + (\sigma - \mu) \tan \varphi \quad (3)$$

where σ is the normal stress, μ is the pore pressure opposing the normal load and tan φ is the angle of internal friction of the soil mass at the failure plane. This model assumes, therefore, that the resistances

to movement along the sides and ends of the landslide are not significant. As SHALSTAB's goal is the mapping of landslide hazards, then establishing zero cohesion maximizes the degree of instability possible at the study site. By eliminating cohesion, Equation (4) can be written as:

$$\rho_s g z \cos\theta \sin\theta = \left[\rho_s g z cos^2\theta - \rho_w g h cos^2\theta\right] \tan\varphi \quad (4)$$

where z is soil depth, h is water level above the failure plane, cρs and ρ_w is the soil and water bulk density, respectively; g is gravitational acceleration and θ is slope angle (Figure 7A). This Equation (5) can then be solved for h/z which is the proportion of the soil column that is saturated at instability:

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w}\left[1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi}\right] \quad (5)$$

h/z could vary from zero (when the slope is as steep as the friction angle) to $\frac{\rho_s}{\rho_w}$ when the slope is flat (tan θ = 0). An important assumption, however, will be used below which sets a limit on what h/z can be. It is assumed that the failure plane and the shallow subsurface flow is parallel to hillslope, in which case h/z can only be less than or equal to 1.0 and any site requiring h/z greater than 1 is unconditionally stable—no extreme rain can cause it to fail. Figure 7B illustrates the relationship between h/z and tan θ for an angle of internal friction φ of 45° and a bulk density ratio of 1.6. There may be 4 stability states: any slopes equal to or greater than the friction angle will cause the right-hand side of (3) go to zero, hence the site is unstable even if the site is dry (h/z = 0). This scenario is "unconditionally unstable", commonly corresponds to sites of bedrock outcrop. Because h/z cannot exceed 1.0 in this model, if tan θ is less than or equal to tanφ(1-(ρs-ρw) then the slope is "unconditionally stable". The two other stability states are "stable" and "unstable", with the former corresponding to the condition in which h/z is greater than or equal to that needed to cause instability (given by the right hand side of Equation (5)) and the latter corresponding to the case in which h/z is less than that needed to cause instability.

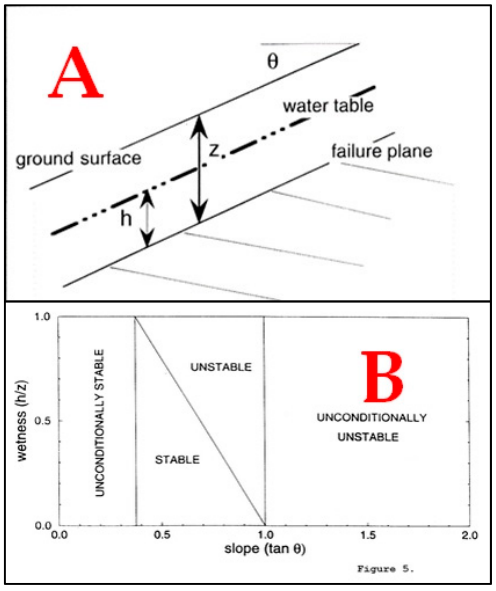


Figure 7. (**A**) The one-dimensional approximation used in the SHALSTAB slope stability model in which the failure plane, water table, and ground surface are assumed parallel. The slope is θ, the height of the water table is h, and the thickness of the colluvium that slides above the failure plane is z. Typically, the failure plane is at the colluvium-weathered bedrock or saprolite boundary. (**B**) Definition of stability fields. For this example, the angle of internal friction is 45 degrees, and the bulk density ratio is 1.6 [13].

Hydrologic model

To model the hydrologic controls on h/z. SHALSTAB use a steady state shallow subsurface flow based on the work by [14,15]. Assume that the steady state hydrologic response model mimics what the relative spatial pattern of wetness (h/z) would be during an intense natural storm which is not in steady state. This assumption would break down if precipitation events are sufficiently intense that thin soils on non-convergent sites can quickly reach destabilizing values of h/z before shallow subsurface flow can converge on unchanneled valleys.

Figure 8 illustrates the geometry and routing of water off the landscape used in the SHALSTAB hydrologic model. If we assume that there is no overland flow, no significant deep drainage, and no significant flow in the bedrock, then q, the effective precipitation (rainfall minus evapotranspiration) times the upslope drainage area, a, must be the amount of runoff that occurs through a grid cell of width b under steady state conditions. Using Darcy's law, we can write that (6):

$$qa = k_s h \cos\theta \sin\theta b \tag{6}$$

where $\sin\theta b$ is the head gradient, k_s is saturated hydraulic conductivity. At saturation the shallow subsurface flow will equal the transmissivity, T, (the vertical integral of the saturated conductivity) times the head gradient, sinq and the width of the outflow boundary, b and this we can approximate as follows (7):

$$\frac{h}{z} = \frac{q}{T} WI; WI = \frac{a}{b\ sen\ \theta} \tag{7}$$

where h represents the height of the water table on the sliding surface (m), z the depth of the soil (m), q effective precipitation [mm], T soil transmissivity [m^2·day-1], WI (Wetness Index) factor describes the effect of morphology on the subsurface flow (this is calculated in SAGA as the topogrraphic wetness index (TWI)).

In order to delimit areas of danger, new studies have applied a methodology with a geographical information system (GIS) base, identifying zones where flows start along the hydrographic network [12].

Morphologically, the triggering of a detritic or lahar flow depends on two factors: the slope of the channel and the critical flow. The speed of an elementary gravity wave is called the critical velocity. When the velocity of the surface water in a channel equals the critical velocity, the elementary gravity waves with upstream motion remain at the point where they were generated and the flow in the channel is called critical.

When the superficial velocity of the water in the channel is equal to the critical velocity, the elementary waves of gravity with movement upstream remain at the point where they were generated and the flow in the channel is called critical. Both factors can be obtained from the morphological characteristics of the basin. The first one is evaluated directly from the digital terrain model, while the liquid flow is evaluated indirectly through the drained area [12].

Studies conducted in the Swiss Alps found a relationship for the critical slope (S) that triggered detrital flows and the drained area of the basin (A) (Equation (8)).

$$S = c\ A^{-n} \tag{8}$$

The coefficients c and n have values of 0.32 and 0.20, respectively. The inverse relationship between S and A indicates that a greater slope of the channel will require a smaller liquid flow to trigger a debris flow (a smaller amount of liquid within the flow area).

Other authors have proposed classifying lahar flows into four categories: triggering, propagation, deceleration, and deposit [13].

Triggering occurs on slopes greater than the threshold proposed by other authors; 25° is known as a slope of minimum probable slope for the initiation of debris flow [13–15], but with a lower angle than the internal friction of the ground and a drained area smaller than 10 km^2. The maximum slope

corresponding to the internal friction angle of the deposit is such that, in areas with steeper slopes, the amount of detritus is generally modest or negligible, while for drained areas exceeding 10 km^2, the type of transport becomes fluvial in place of detrital. The model calculates the degree of the internal saturation of the soil with the relationships of the height h/soil depth of the groundwater level z; (h/z) (Equation (9)) is the necessary factors to destabilize the slopes.

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho s}{\rho w}\left(1 - \frac{tan\theta}{tan\varnothing}\right) \quad (9)$$

This formula allows two limit states to be defined. When h/z is negative, the slope is unstable for any degree of saturation and is called "unconditionally unstable".

On the other hand, when h/z is greater than one, it is called "unconditionally stable" because even in cases of saturation, the slope is stable. To define the intermediate situations, it is necessary to add the hydrological model.

The hydrological model considers a subsurface flow in a permanent regime.

Applying the law of Darcy, on the characteristics of the movement of water through a porous medium, it is possible to arrive at the following expression that links the degree of saturation (h/z) with effective precipitation (q), which is the rainwater that enters the soil and is assimilated by the plants (Equation (10)).

$$\frac{h}{z} = \frac{q}{T} WI; WI = \frac{a}{b\ sen\ \theta} \quad (10)$$

With

q = effective precipitation [mm];
T = soil transmissivity [m^2·day^{-1}];
θ = slope [°];
a = contribution area [m^2]; and
b = is the length of the contour through which the flow transits [m].

where T is the transmissivity of the soil; a is the drained area; and b is the dimension of the raster cell. The relation q/T represents the magnitude of the precipitation relative to the capacity of the soil to conduct the water. The WI (wetness index) factor describes the effect of ground morphology on the subsurface flow.

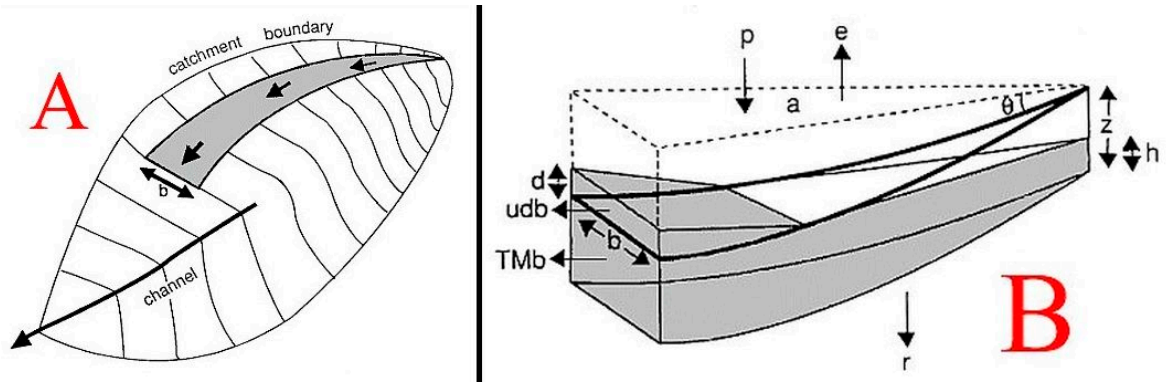


Figure 8. Sketch of hydrological model: (**A**) plan view and (**B**) cross section of a draining area a across a contour of length b. (**B**) The grey volume is the shallow sub-surface flow TMb and the saturation overland flow udb (not calculated by the model). p: precipitation; e: evapotranspiration; r: deep drainage; q: effective rainfall (q = p − e − r); h: vertical depth of the saturated sub-surface flow; z: vertical depth of the failure plane; T: transmissivity; M: sinθ; θ: slope angle. Mettma Ridge study site [13].

The analysis of the stability on the slopes of the volcano with SHALSTAB through the hydrological relationship q/T, the magnitude of precipitation, q, in relation to the capacity of the subsoil to transmit water along the T (transmissivity) slopes determined that the greater q was in relation to T, the more likely the soil would be saturated, and the greater the number of sites with unstable slopes. This relationship used the classification of pixels with stable positive values to quasi stable and chronically unstable values with negative values according to the stability classes (Table 1).

Table 1. Stability classes defined by SHALSTAB and modified from Montgomery and Dietrich [15].

Classes SHALSTAB	Interpretation of Class
Chronic instability	Unconditionally unstable and unsaturated
Log q·T -1 < -3,1	Unconditionally unstable and unsaturated
3,1 < Log q·T -1 < -2,8	Unstable and saturated
-2,8< Log q·T-1 < -2,5	Unstable and unsaturated
-2,5< Log q·T-1 < -2,2	Stable and unsaturated
Log q·T -1 > -2,2	Unconditionally stable and unsaturated
Stable	Unconditionally stable and saturated

Process E: The morphometric method with SAGA. Once the areas of surface deformation of the relief were found with DINSAR (Sentinel 1 images), the current location of the lahars (Sentinel 2 images), the superficial flow accumulators of the runoff and instability zones (SHALSTAB) were determined, the morphological method was applied to complement the location of trajectories of lahar flows with the analysis of the following morphological index.

2.1. LS-Factor (Slope Length and Steepness Factor)

This is a combination of the slope and the length of the slope as when combined, it is a useful attribute to predict erosion potential (Equation (11)). The length factor of the slope, L, calculates the effect of the length of the slope on the erosion, and the slope factor of the slope, S, calculates the effect of the slope on the erosion [16,17]. The higher values of brown color represent a greater susceptibility to erosion (Figure 9).

$$LS = L\hat{}(1/2)/100*(1.36 + 0.97 + 0.1385*S\hat{}2) \quad (11)$$

where L is the length of the slope in meters, and S is the gradient of the slope in %.

2.2. Topographic Wetness Index (TWI)

The topographic wetness index models the dynamics of surface and subsurface flows based on the topographic control of runoff, which offers a better perspective in relation to the prediction of sites where the saturation and high concentration of runoff can act as initial flow paths to processes greater than flood (Figure 10).

The TWI combines the contribution to runoff from a local area drained and the pending of it, and it is commonly used to quantify topographic control on hydrological processes and is defined as [6–10,18–20] (Equation (12):

$$TWI = Ln\ (af/\tan\ \beta) \quad (12)$$

where af is the local area drained for a calculation point, and tan β is the directional slope of the cell of interest (and of the eight neighbors in the case of using an algorithm D8. Ln is natural logarithm.

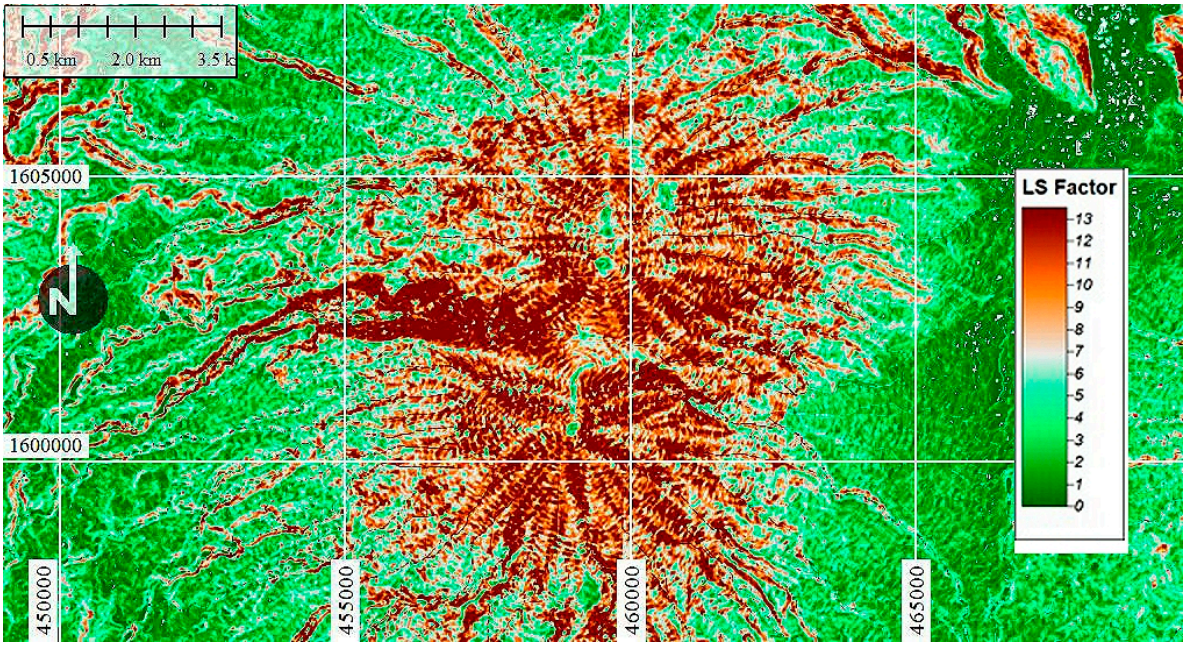


Figure 9. LS-factor (slope length and steepness factor) calculated in SAGA geographic information system (GIS). The low susceptibility to erosion is represented with green colors and the high with brown color.

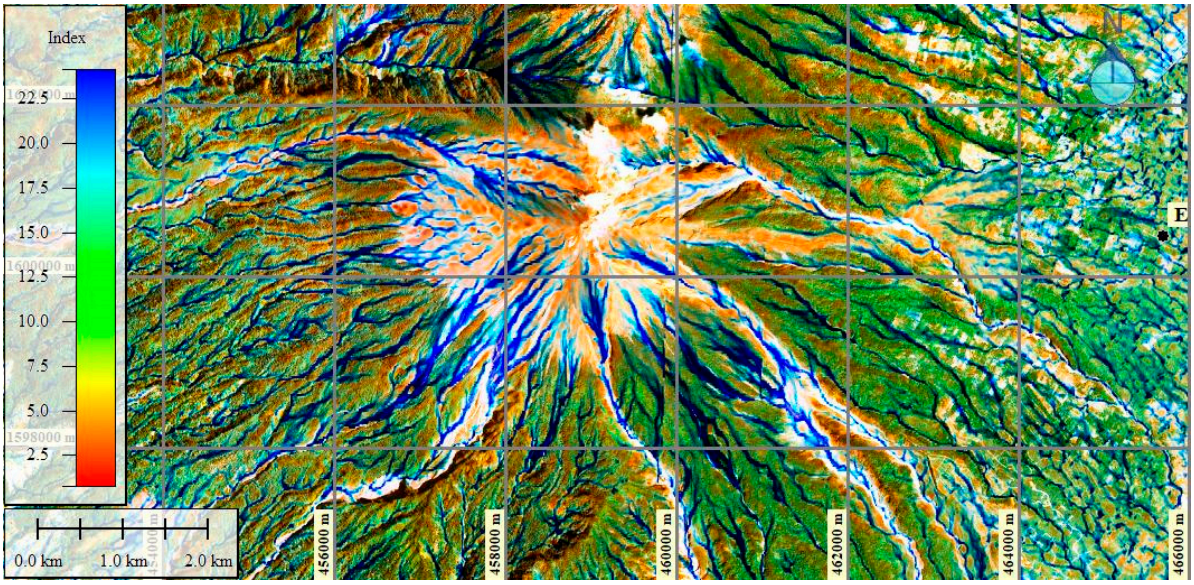


Figure 10. Topographic wetness index (TWI) calculated in SAGA GIS. Higher values of TWI (tendency to blue color) represent drainage depressions and lower values (tendency to red color) represent crests and ridges.

2.3. Flow Accumulation (FCC)

Flow accumulation is calculated as the upslope contributing (catchment) area using the D8 model or multiple flow direction approach [17–19]. The result is an accumulated flow raster for each cell, determined by the accumulation of the weight of all of the cells that flow into each cell of the descending slope. The accumulated flow is based on the total number of cells, or a fraction of them, flowing to each cell in the output raster.

The output cells with a high flow accumulation are areas of concentrated flow and can be used to identify watercourse channels (Figure 11).

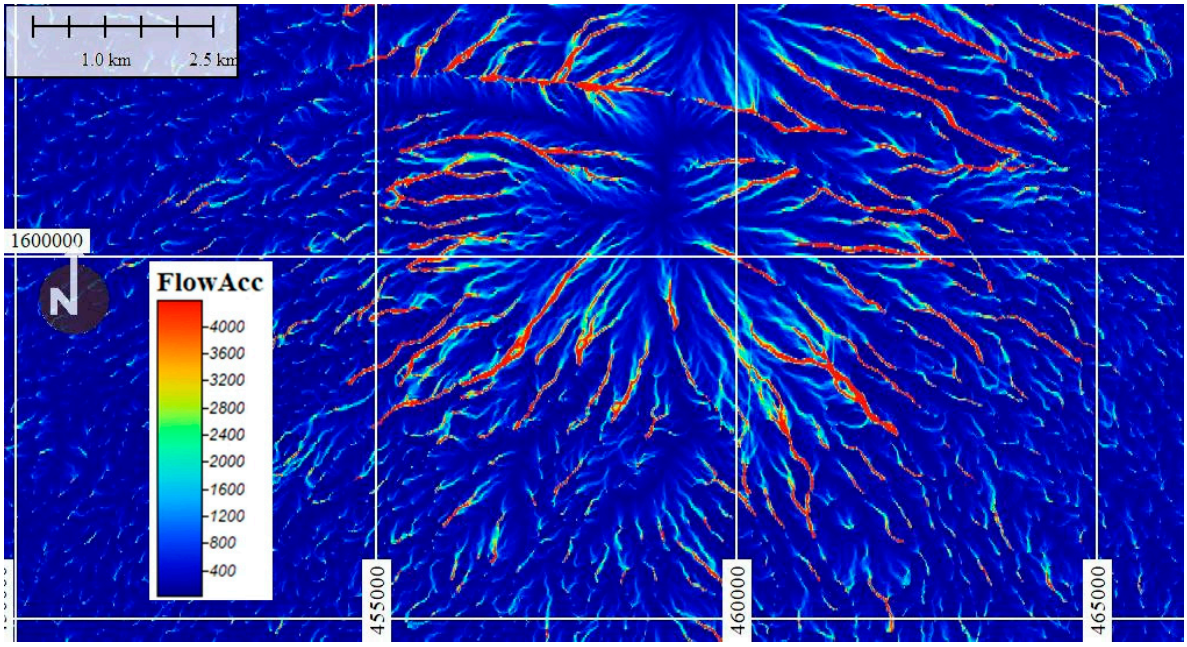


Figure 11. Cumulative flow calculated in SAGA GIS. The higher values (tendency to red color) represent greater accumulations of flow and areas of concentrated flow that can be used to identify watercourse channels.

3. Results

The differential synthetic aperture radar interferometry (DINSAR) analysis, based on the Sentinel 1 images, showed the lack of magmatic deformation before the eruption, but there were surface subsidences on the associated slopes due to the passage and deposits of lahars (Figure 12). This lack of magmatic deformation corroborates the studies undertaken by several researchers in the volcanoes of the area [20–22], which attribute the absence of deformation to differences in the storage of magma in relation to other continental arcs. The absence of magmatic deformation before the lahars can mean that the intrusion of magma is not the trigger of the lahars. Most likely, the rain is the cause.

The analysis of stability on the slopes of the volcano with SHALSTAB determined that the zones near the volcano were the most unstable with a qualification of quasi stable to chronic instability through the erosion of the channels where the lahars had flowed and where there had been greater destruction as is the case of El Rodeo, San Miguel, Monte María, and sectors near the Guacalate River (Figure 12B,C).

The current locations of the lahars produced by the eruption of 3 June 2018 and later were delimited with the Sentinel 2 images and their destructive power was verified with field data mainly from La Réunion, San José Las Lajas, Santa Clara Las Lajas, San Miguel, and El Rodeo, amongst other towns (Figure 12C). Figure 13A shows the sectors before the eruption. The implementation of lead-colored lahars on that date. In line of red color, the limits of the model of lahars obtained with LAHAR Z. In blue are the ravines and canals where the primary and secondary lahars flowed that flooded the sectors, and in green-yellow-ocher color the areas of ridges and crests. The field control points of the destroyed sites are represented by red crosses. In (B) Sectors close to La Réunion, in (C) sectors near San Miguel and in (D) close to Monte María.

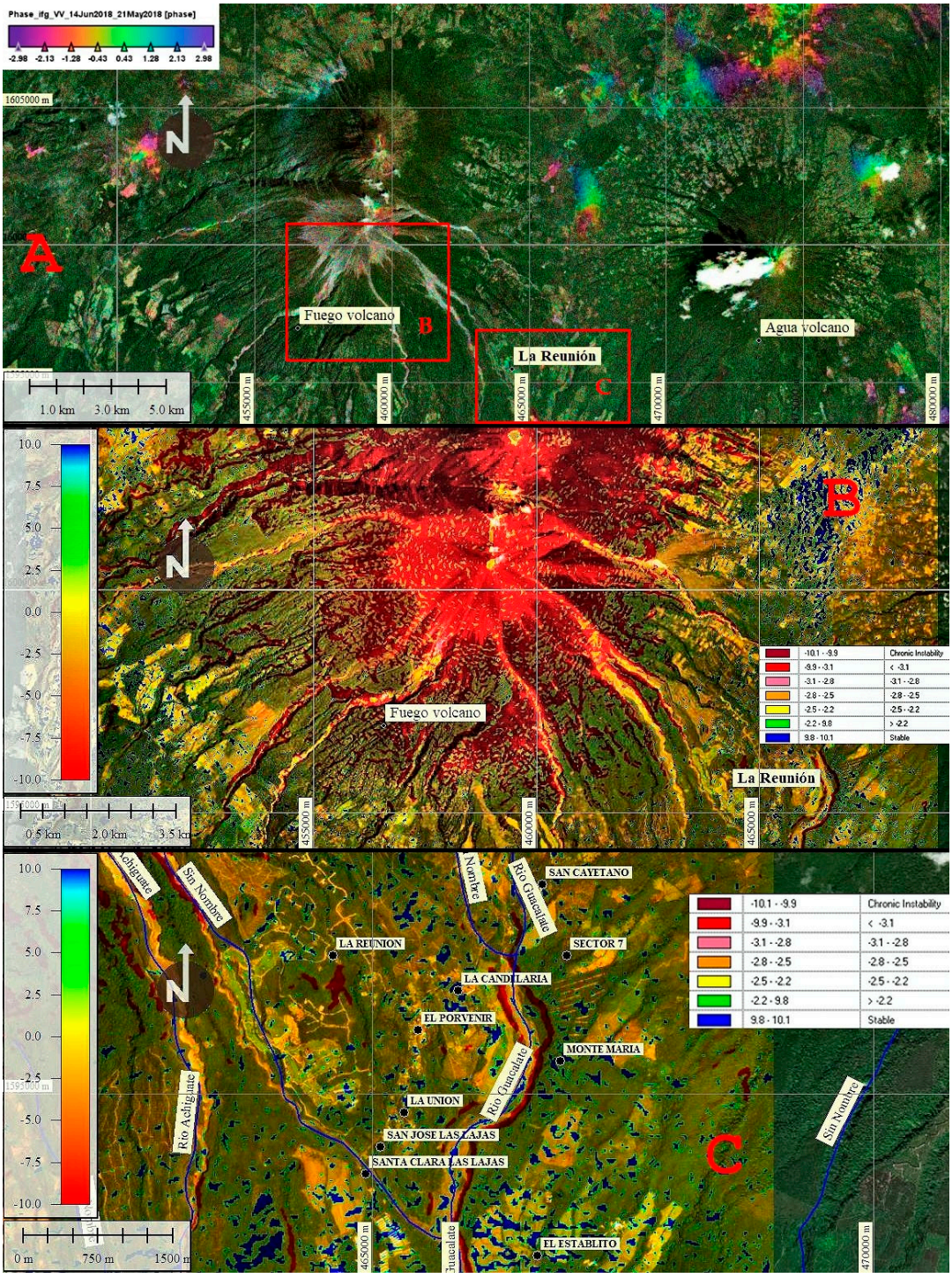


Figure 12. DINSAR analysis and SHALSTAB unstable and erosion areas. (**A**) Iridescent colors indicate the tendency of deformation in the region in cm. The positive values represent raised areas and the negative subsidence zones with minimal deformation in the volcano on the SE flank. (**B**) SHALSTAB results: the relief on the flanks of the volcano is very irregular with raised and sunken areas possibly due to the permanent morphological change resulting from the eruptions that have occurred. (**C**) Detail of the areas near the volcano that are the most unstable, with a rating of almost stable to chronic instability due to erosion of the channels that the lahars have flowed in, have overflowed and caused flooding with the destruction of the civil infrastructure mainly in El Rodeo, San Miguel, Monte María, and sectors near the Guacalate river. Negative red colors and trend towards –10 are unstable areas and stable positive zones with colors towards the blue and values with trend toward 10. The value is dimensionless.

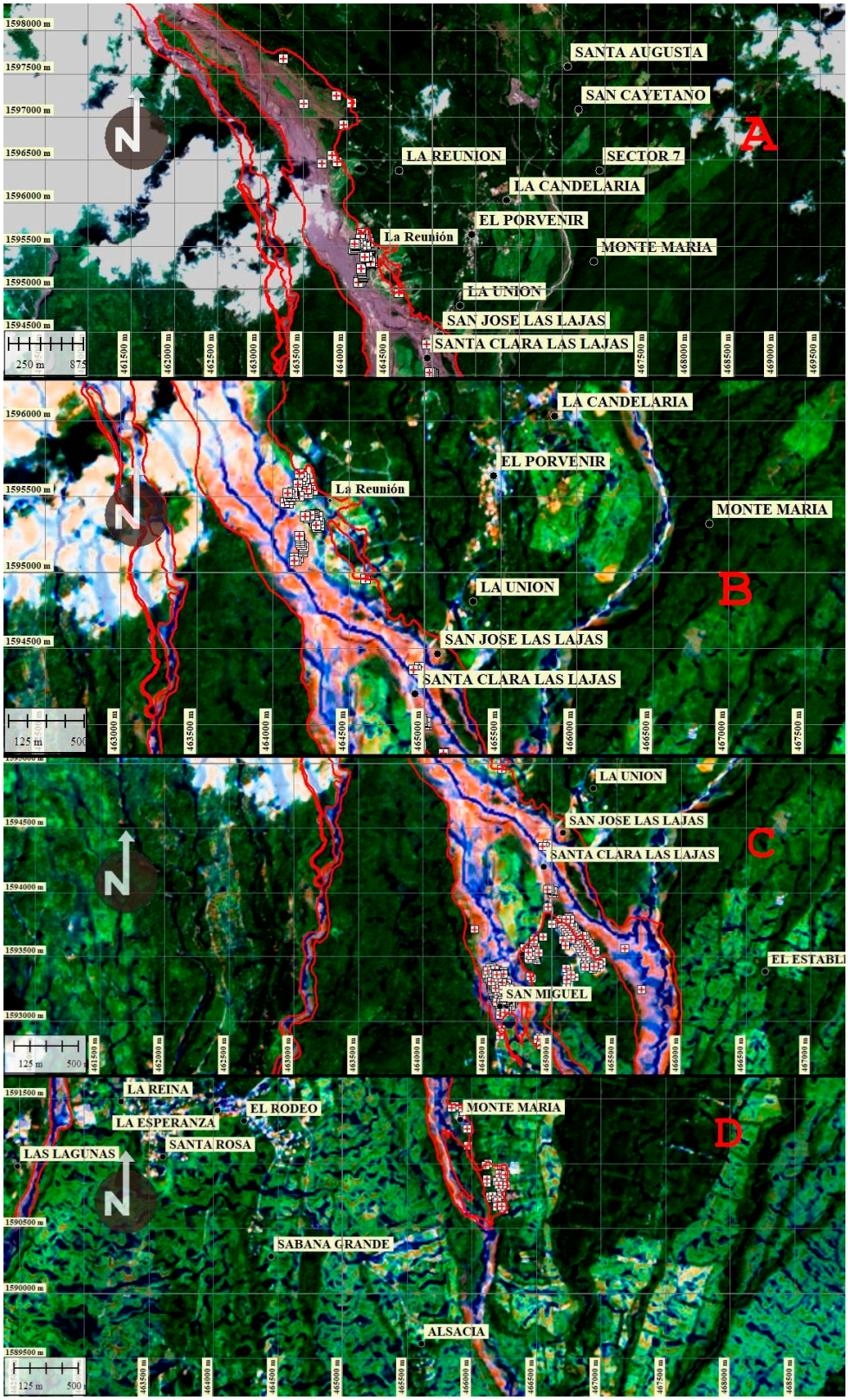


Figure 13. Sequence of images from the upper parts of the volcano of the areas destroyed by the lahars, erosion of channels and floods obtained from the combination of the response of the Sentinel 2A, morphometric index LS, TWI, FlowAcc(acronym of Flow Accumulation), and stabilized in the sectors the day of the eruption of Fuego volcano. (**A**) The implementation of lead colored lahars on that date. In line of red color, the limits of the model of lahars obtained with LAHAR Z. In blue the ravines and canals where the primary and secondary lahars flowed that flooded the sectors, and in green-yellow-ocher color the areas of ridges and crests. The field control points of the destroyed sites are represented by red crosses. In (**B**) Sectors close to La Reunion, in (**C**) sectors near San Miguel and in (**D**) close to Monte María.

From the analysis of the morphometric parameters LS, TWI, and FlowAcc, the areas with greater susceptibility to erosion were obtained as well as those with the highest concentration and accumulation of superficial flow of rainwater that were directly related to the primary and secondary lahars (Figure 14). These areas of blue color were observed to have been directed by the lahars that destroyed the populated areas. These three morphometric indices [23–26] are valid parameters to determine the flow paths of primary and secondary lahars. The areas with high values of these indices are areas of moisture concentration in the slopes, flow paths and concentration of sediments that can move from the high parts by intense rains and gravity generating secondary lahars, generally on the slopes.

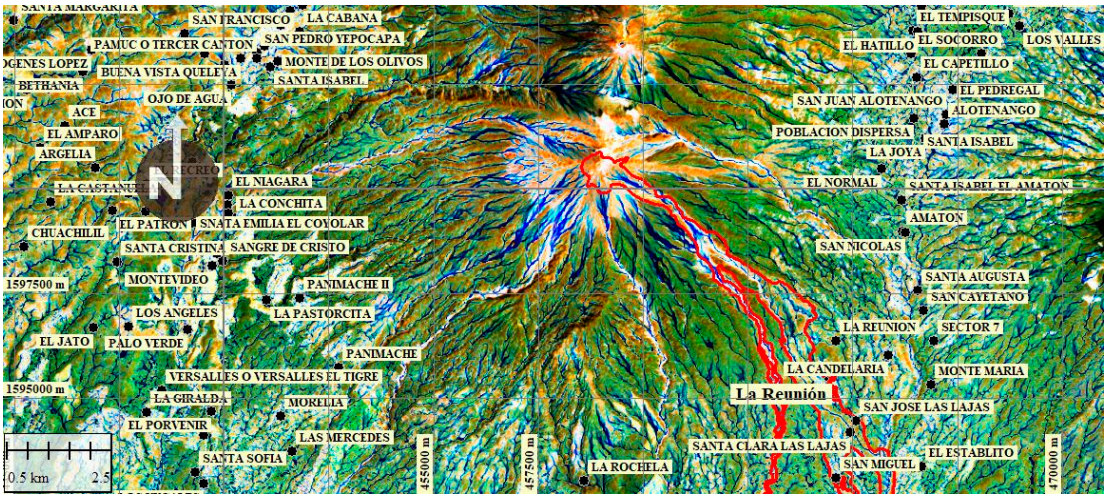


Figure 14. The flow paths, calculated by using the three morphometric indices TWI, LS, and FlowAcc in SAGA, determined the areas that were flooded by primary and secondary lahars.

The field control was carried out by technicians of CONRED.

4. Discussion

Unlike the LAHARZ model, the presented model uses morphometry as a value that changes the trajectory of the primary and secondary lahars, which allowed us to obtain the real flow paths of these phenomena and their effects. A beneficial coincidence of the application of both models is that they kept a central axis path of the main lahars, due to the fact that they were drains or main rivers. However, LAHARZ does not separate secondary lahars, due to this action; the morphological method can determine the flow paths of the mentioned phenomenon.

The lahar danger map, created for the Fuego volcano, based on the LAHARZ program, published in 2018 by CONRED, established high hazards zones (marked in red color) that can be affected by lahar flow paths. Torrential rains have generated secondary lahars that have affected the surrounding areas of the volcano, even those ones of low hazard. The medium hazard zones were affected by lahar flow paths from the La Reunión site to the Alsacia site, as can be evidenced in Figure 13.

In the current paper, with the proposed methodology, a study of the lahars flow paths has been carried out, being the main study areas the valleys of these Barranca Seca, Ceniza, Guacalate, Playa Trinidad, Las Cañas, El Jute and Las Lajas rivers. Lahars originated due to the erosion of the cause ways of detritus-ash-water deposited during the volcanic eruption and torrential rains. The axis of the primary lahar paths studied with the proposed methodology are like the ones obtained to delimit the high hazards zones in the mentioned hazard map.

On the other side, is has been proved that the modeled secondary lahar deposits with the proposed methodology destroyed civilian structures in La Reunión, San José de Las Lajas, Santa Clara de Las Lajas, San Miguel and other areas had location limits in accordance with the data obtained with LAHARZ and the location obtained with Sentinel 2A images, but with an added element that was not

obtained with LAHARZ which is the outline of the secondary lahars flow paths, some as contributors to primary lahars and others as independent elements with no connection to the main ones.

The range of the secondary lahars and its respective modeled central axis is similar and bigger to the June and November lahars of 2018, observed in the Sentinel images. This is probably due to the resolution of the digital elevation model and the data given by the analyzed morphometric index.

Finally, a comparison of the affected areas has been carried out and its reach on transit zones, obtained with the proposed methodology and LAHARZ, observing that the entire area affected by lahars is within the high danger zone. The lahars corresponding to the Las Lajas y Guacalate rivers, take the biggest amount of area of the affected areas, with most of the civilian infrastructure destroyed as a result, turning the mentioned areas to maximum danger zones.

The surface terrain deformations, obtained from Sentinel 1B, located in the high mass erosion and removal areas can be part of secondary lahars which were generated from high ground. This is a contribution when the DINSAR analysis is used.

In addition to this work, further research studies can improve the location of the lahars flow paths using the deformed areas of the relief obtained with the DINSAR analysis, the stability criterion of slopes and analysis of morphometric parameters in digital models of high elevation spatial resolution obtained from Lidar images and integrating them into specialized programs in lahars and floods analysis such as LAHAR Z, Titan 2D, Ash3D, Flo-2D, IRIC, Iber, among others. The final objective of these investigations is to put in the hands of government authorities and the community, vulnerability maps to this type of threats to reduce them.

5. Conclusions

As a contribution of the application of this methodology, based on a flow modeler such as LAHAR Z or another program, to know the Flow Paths of the primary and secondary lahars that have caused the destruction in the vicinity of the volcano, this methodology deepened the study of these trajectories based on the analysis of the morphometric parameters, which allowed us to have a better knowledge of the possible paths before a new volcanic eruption. This methodology is currently being applied in the Fuego volcano by INSIVUMEH technicians with the objective of putting it in the hands of the government authorities, as well as the institutions linked to the subject, which allows these conditions to be ascertained in advance thereby implementing structural measures and non-structural measures to reduce this danger.

To complement the results obtained with the DINSAR analysis and the morphological method, in this study, the spatial distribution of the sources and potential routes of primary and secondary lahars during the eruptions and torrential rains that can erode and produce mass movements in areas of critical instability was obtained from the stability model of shallow landslide slopes with SHALSTAB.

The integration of the DINSAR methodologies to determine the surface deformations of the ground, where the SHALSTAB model determines the stability-erosion of the slopes of the volcano, and the morphometric method to analyze the primary and secondary lahar currents, is a procedure that can help to prevent the destructive effects that they cause during these events as demonstrated in the same destroyed localities that were not mapped in the maps of existing hazards by CONRED.

The field observations carried out by CONRED technicians and sent in the format of points in shp format, helped to calibrate and verify the results obtained from the presented methodology, as well as in understanding which of the three morphological parameters used had greater weight according to the scenario in the one that developed the lahars. This parameter corresponds to the TWI, the same one that determined that the lower areas of the streams are the ones that get wet and fill quickly overflowing and flooding nearby areas.

The morphological model could obtain the primary and secondary lahar paths in all sectors near the volcano in a very short time, unlike the numerical models such as the LAHAR Z, which are applied in a single axis of a current or drainage. In this case, the paths of the lahars obtained are sufficient to

produce maps of the vulnerability reduction of civil structures and socio-economic systems including the preservation of human lives.

This combination of procedures can be applied in any volcanic landscape based on digital models of high-resolution elevation, obtaining very good agreement with the paths of the real flows.

Author Contributions: The research work presented in this paper is a collaborative development by both authors. Conceptualization, M.C. and A.M.; Methodology, M.C. and A.M.; Software, M.C.; Validation, M.C. and A.M.; Formal Analysis, M.C.; Investigation, M.C. and A.M.; Resources, M.C.; Data Curation, M.C.; Writing-Original Draft Preparation, M.C. and A.M.; Writing-Review and Editing, A.M.; Visualization, Supervision: A.M.; Project Administration, A.M.; Funding Acquisition, A.M.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: This research was funded by projects Junta Castilla y León SA044G18 and projects from the Ministry of Economy and Competitiveness CGL2015-67169-P and CGL2015-69919-R.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Almeida, S.; Daniel, S.; Daniel, A. Definition, Primary and Secondary Lahars, Flow Types, Behavior, afectation And Hazard Monitoring. Geophysical Institute National Polytechnic School, 2017. Available online: https://www.igepn.edu.ec/publicaciones-para-la-comunidad/comunidad-eng/19268-triptych-lahars-mud-flows/file (accessed on 21 February 2019).
2. National Coordinator for Disaster Reduction CONRED. Situation Report No. 1 (as of 04 June 2018). Internal Report. Available online: https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/2018-06-04%20GT%20SITREP%20-%20Volcanic%20Activity%20%28ENG%29.pdf (accessed on 21 February 2019).
3. Department of Vulcanology, INSIVUMEH. Preliminary Map of Hazard Scenarios by Pyroclastic Flows, after the Eruption of June 3, 2018. Available online: http://www.insivumeh.gob.gt/?page_id=70 (accessed on 21 February 2019).
4. National Coordinator for Disaster Reduction CONRED. Informative Bulletin No. 3162018—The Drop of Lahares Is Monitored on The Fuego Volcano. 2018. Available online: https://conred.gob.gt/site/Boletin-Informativo-3162018andhttps://conred.gob.gt/www/index.php?option=com_content&view=article&id=7076&catid=37&Itemid=1010 (accessed on 21 February 2019).
5. León, X. Vulnerability Assessment Associated with the Hazard of the Fuego Volcano. Internal Study. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2012. Available online: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/02/02_3433.pdf (accessed on 24 February 2019).
6. Schilling, S.P. TI-LAHARZ: GIS Programs for Automated Mapping of Lahar-Inundation Hazard Zones. USGS Publications Warehouse, 1998. Available online: http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr98638 (accessed on 25 February 2019). [CrossRef]
7. Dietrich, W.E.; Bellugi, D.; Real de Asua, R. Validation of the Shallow Landslide Model, SHALSTAB, for forest management. Land Use and Watersheds: Human Influence on Hydrology and Geomorphology in Urban and Forest Areas. *Water Sci. Appl.* **2001**, *2*, 195–227. Available online: https://www.researchgate.net/publication/284902139_Validation_of_the_Shallow_Landslide_Model_SHALSTAB_for_forest_management (accessed on 25 February 2019). [CrossRef]
8. Montoya, S. Tutorial to Download Sentinel 2 Images (10 m Resolution) and Process Them in QGIS. GIDAHATARI, 2017. Available online: http://gidahatari.com/ih-es/tutorial-para-descargar-imgenes-sentinel-2-resolucin-10-m-y-procesarlas-en-qgis (accessed on 25 February 2019).
9. Zeni, G.; Pepe, A.; Zhao, Q.; Bonano, M.; Gao, W.; Li, X.; Ding, X. A differential SAR interferometry (DInSAR) investigation of the deformation affecting the coastal reclaimed areas of the Shangai megacity. In Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Quebec City, QC, Canada, 13–18 July 2014; pp. 482–485. [CrossRef]
10. The Copernicus Open Access Hub. The Open Access Hub Provides Complete, Free and Open Access to Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 and Sentinel-5P User Products. Available online: https://scihub.copernicus.eu/userguide/ (accessed on 21 February 2019).

11. Foumelis, M.; Delgado Blasco, J.M.; Desnos, Y.-L.; Engdahl, M.; Fernández, D.; Veci, L.; Lu, J.; Wong, C. ESA SNAP—StaMPS Integrated processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry. 2018. Available online: https://www.researchgate.net/publication/327253039_ESA_SNAP_-_StaMPS_Integrated_processing_for_Sentinel-1_Persistent_Scatterer_Interferometry (accessed on 23 February 2019).
12. Martins, T.; Vieira, B.; Fernandes, N.; Oka-Fiori, C.; Montgomery, D.R. Application of the SHALSTAB model for the identification of areas susceptible to landslides: Brazilian case studies. *Revista de Geomorfologie* **2017**, *19*, 136–144.
13. Panagos, P.; Borrelli, P.; Meusburger, K. A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences* **2015**, *5*, 117–126. [CrossRef]
14. Zimmermann, M.; Mani, P.; Romang, H. Magnitude-frequency aspects of alpine debris flows. *Eclogae Geol. Helv.* **1997**, *90*, 415–420. Available online: https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=egh-001:1997:90::738 (accessed on 21 February 2019).
15. Carmona-Álvarez, J.E.; Ruge-Cárdenas, J.C. Análisis de las correlaciones existentes del ángulo de fricción efectivo para suelos del piedemonte oriental de Bogotá usando ensayos in situ. *Tecno Lógicas* **2015**, *18*, 93–104. Available online: http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v18n35/v18n35a09.pdf (accessed on 23 February 2019). [CrossRef]
16. Dietrich, W.E.; Montgomery, D.R. A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential. University of California-University of Washington, 1998. Published as a Technical Report by NCASI. Available online: http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/shalstab/index.htm (accessed on 23 February 2019).
17. O'Loughlin, E.M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resour. Res.* **1986**, *22*, 794–804. Available online: https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=729751 (accessed on 21 February 2019). [CrossRef]
18. Sebastiano, T.; Cavalli, M. Topography-based flow-directional roughness: potential and challenges. *Earth Surf. Dyn.* **2016**, *4*, 343–358. Available online: https://www.earth-surf-dynam.net/4/343/2016/esurf-4-343-2016.pdf (accessed on 26 February 2019).
19. Beven, K.J.; Kirkby, M.J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* **1979**, *24*, 43–69. Available online: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626667909491834 (accessed on 26 February 2019). [CrossRef]
20. Cando, M.; Martínez-Graña, A. Numerical modeling of flow patterns applied to the analysis of the susceptibility to movements of the ground. *Geosciences* **2018**, *8*, 340. Available online: https://www.mdpi.com/2076-3263/8/9/340 (accessed on 26 February 2019). [CrossRef]
21. Hojati, M.; Mokarram, M. Determination of a Topographic Wetness Index using high resolution Digital Elevation Models. *Eur. J. Geogr.* **2016**, *7*, 41–52. Available online: http://www.eurogeographyjournal.eu/articles/4.%20DETERMINATION%20OF%20A%20TOPOGRAPHIC%20WETNESS%20INDEX%20USING%20HIGH%20RESOLUTION%20DIGITAL%20ELEVATION%20MODELS.pdf (accessed on 25 February 2019).
22. Ebmeier, S.; Biggs, J.; Mather, T.; Amelung, F. Applicability of InSAR to tropical volcanoes: Insights from Central America. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* **2013**, *380*, 15–37. Available online: https://www.researchgate.net/publication/259130455_Applicability_of_InSAR_to_tropical_volcanoes_Insights_from_Central_America (accessed on 21 February 2019). [CrossRef]
23. Baumann, V.; Bonadonna, C.; Cuomo, S.; Moscariello, M.; Manzella, I. Slope stability models for rainfall-induced lahars during long-lasting eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **2018**. Available online: https://www.researchgate.net/publication/326139979_Slope_stability_models_for_rainfall-induced_lahars_during_long-lasting_eruptions (accessed on 25 February 2019). [CrossRef]
24. Vidal Montes, R.; Martínez-Graña, A.M.; Martínez Catalán, J.R.; Ayarza, P.; Sánchez San Román, F.J. Vulnerability to groundwater contamination, SW Salamanca, Spain. *J. Maps* **2016**, *12*, 147–155. [CrossRef]
25. Martínez-Graña, A.M.; Goy, J.L.; Zazo, C. Geomorphological applications for susceptibility mapping of landslides in natural parks. *Environ. Eng. Manag. J.* **2016**, *15*, 1–12. [CrossRef]
26. Santos-Francés, F.; Martínez-Graña, A.; Rojo, P.A.; Sánchez, A.G. Geochemical background and baseline values determination and spatial distribution of heavy metal pollution in soils of the Andes mountain range (Cajamarca-Huancavelica, Peru). *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2017**, *14*, 859. [CrossRef] [PubMed]

© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Environmental Earth Sciences (2019) 78:499
https://doi.org/10.1007/s12665-019-8517-4

ORIGINAL ARTICLE

Differential interferometry, structural lineaments and terrain deformation analysis applied in Zero Zone 2016 Earthquake (Manta, Ecuador)

M. Cando-Jácome[1] · **A. Martínez-Graña**[1]

Received: 5 April 2019 / Accepted: 29 July 2019
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

Abstract
The earthquake of April 16, 2016 caused huge economic losses and human lives in Ground Zero of the city of Manta, Ecuador. The present study delimited the affected areas by superficial deformation and vertical displacements of the relief in this zone by means of the differential interferometry analysis (DInSAR), with the support of geophysical techniques such as electrical tomography of the subsoil and of georadar in combination with the analysis of concentration of structural lineaments-tectonic deformation, seismicity and geotechnical parameters such as soil liquefaction indexes, cutting wave velocity Vs30, among others. This combination of techniques allowed the spatial location with greater certainty of areas susceptible to seismic risk for construction and related to the soils typology of the Ecuadorian Construction Standard-NEC 2015. This proposed methodology improved forecasting mechanisms for the reduction of seismic risk based on maps of its susceptibility to the possible occurrence of an earthquake of magnitude as that of 16 April 16, 2016. Forecast that can be done to protect engineering works and to the population, especially in tectonically deformed areas.

Keywords DINSAR · Zero Zone · Ground displacement · Electrical tomography · Radargram

Introduction

The earthquake of Saturday April 16, 2016 at 6:58 p.m. (local time), of magnitude 7.8 (Mw, moment magnitude), whose hypocenter was located in front of Pedernales city (Manabí, Ecuador), at 20 km depth, was the result of displacement between two tectonic plates: the Nazca Plate (oceanic plate) that is submerged under the South American (continental plate) (EH/AA/JS 2016a).

The Ground Zero of the city of Manta, which is located in the parish of Tarqui, before the earthquake was the largest commercial and touristically developed city and it is the area where 206 people died. The commercial and touristic infrastructure was reduced to 10%. The lack of microzonation maps made it difficult to implement efficient construction plans based on current construction standards.

Until 2001, out of the 22 municipalities of the Manabi Province, only 3 had microzonation maps. Manta was one of the municipalities that did not have maps of natural hazards at management scales and, like the remaining provinces, the seismic hazards were handled with maps at a scale of 1:1,000,000 elaborated by the National Geophysical Institute and published later in the Ecuadorian Construction Standards NEC11 and NEC15 (NEC-11 2011).

The seismic hazard maps of this time, located the Manta municipality in Zone 4 with peak ground acceleration > 0.5 g and critical seismic susceptibility for construction. Additionally, the National Planning Secretariat-SENPLADES located the municipality of Manta in high susceptibility due to seismic hazard (ODEPLAN 2001). The study zone is located in the Manta municipality, environmental unit Littoral and geographically to the west of Ecuador. It is in turn the municipal seat of the municipality of Manta, bounded on the west by the Pacific Ocean; to the

Electronic supplementary material The online version of this article (https://doi.org/10.1007/s12665-019-8517-4) contains supplementary material, which is available to authorized users.

✉ A. Martínez-Graña
amgranna@usal.es

M. Cando-Jácome
id00709713@usal.es

[1] Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Salamanca, Plaza de la Merced s/n, 37008 Salamanca, Spain

Published online: 06 August 2019

south with the Montecristi municipality; to the west with Montecristi and Jaramijó and to the north with the Pacific Ocean. From Zero Zone, the Tarqui parish is located, which suffered the biggest impact and destruction of the April 16, 2016 earthquake. The seismic hazard map of the National Geophysical Institute-IGN, regional location of Manta city and the Zero Zone are in Fig. 1.

Given the possibility of occurrence of a similar earthquake that caused economic loss around three billion dollars and more than 600 deaths throughout the area, we present a methodology to prevent these losses through the use of combined differential interferometry with opening radar synthetic—DInSAR, analysis of geological–structural lineaments-deformations of the ground (Cando-Jácome and Martínez-Graña 2018)], plus the results of geotechnical investigations that helped to locate spatially the susceptibility to this type of earthquakes in Zero Zone of Manta city.

Data and methods

The differential interferometry analysis (DINSAR), structural lineaments and terrain deformation with the support of geophysical–geotechnical methods followed the indicated processed in Fig. 2. The first processes consisted in performing a preliminary geological survey of the studied area through two subjects: regional–local seismo-tectonic framework (seismicity and peak ground acceleration—PGA) and geological–structural framework (regional geology, local geology and local geomorphology).

Regional–local seismo-tectonic framework

Ecuador is located in a subduction active margin where the Nazca Plate collides and subducts in the continental segments of the South American Plate and the North Andean block, at a velocity 6–7 cm per year (Marcaillou et al. 2016).

In this active margin, two seismic sources can be identified: (1) of subduction where moment magnitude—MW seism's higher or equal to 8 can be generated and (2) of cortical fault with seism generation at the interior of the continent with magnitudes of 6–7 Mw and macroseismic intensities of VIII–X. The seism analysis was conducted by the National Geophysical Institute, obtaining 8923 independent tectonic earthquakes of minimum magnitude completeness of 4.5 and a maximum of 8.8. Most of these earthquakes, with magnitude greater of 5 Mw have had their epicenter along the subduction slab.

In function of these seismic sources, the National Geophysical Institute has delimitated the coastal margin along the Ecuadorean tectonic trench in three structural seismogenic zones: structure South (Zone 3) corresponds to the Gulf of Guayaquil and the continental segment of Santa Elena, Guayas and El Oro. Central structure (Zone 2) is the central segment of the subduction zone, in the province of Manabí, activated on April 16, 2016 (Mw 7.8). North Structure (Zone 1) corresponds to the coastal area of the Esmeraldas Province (Chunga et al. 2018) (Fig. 3). The instrumental seismicity of 2016, determined a higher concentration of seismic lineaments than in Zone 2, due to the lack of thrust in the Nazca–South American plates border, where tectonic erosion is produced in the South American plate, which is above the Nazca Plate, resulting in a complex seismogenic

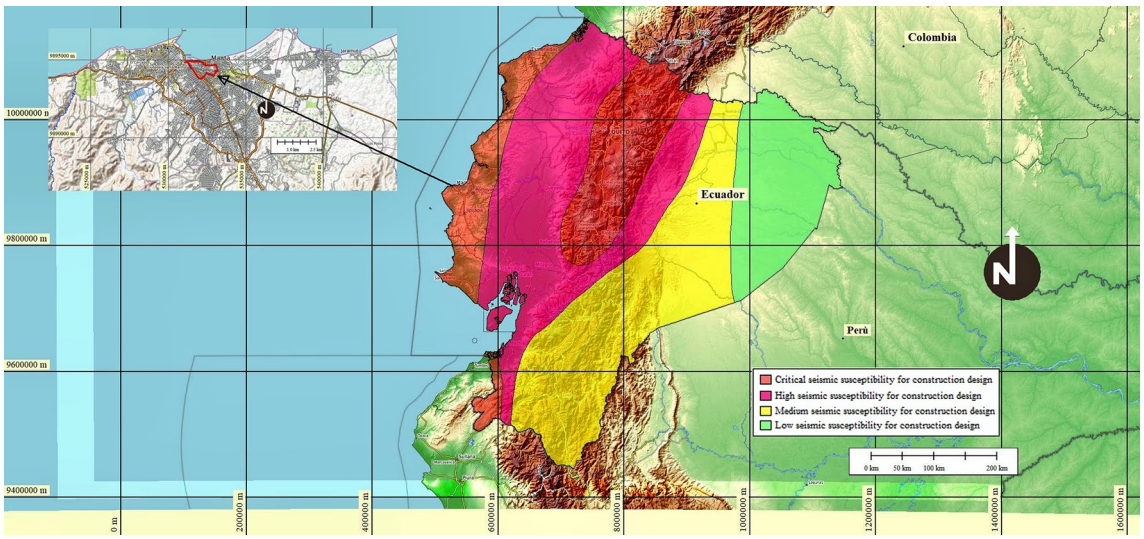


Fig. 1 2001 seismic hazard map of the National Geophysical Institute-IGN and located the Canton Manta in Zone 4 with acceleration of gravity greater than 0.5 g and degree of critical seismic susceptibility for construction design. Legend: seismic susceptibility for construction design (red: critical, pink: high, yellow: medium, green: low)

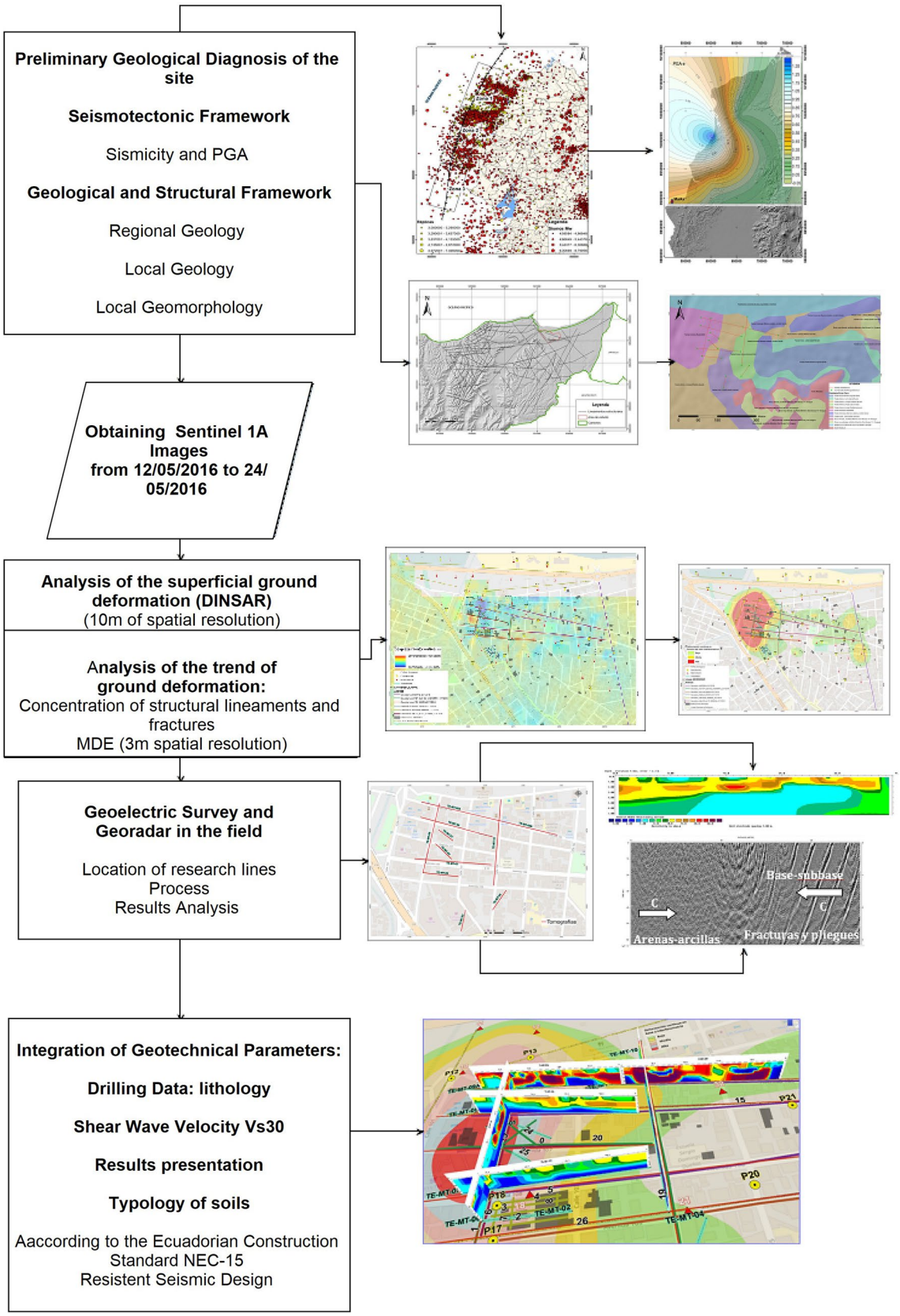


Fig. 2 Flow methodological process for the combined analysis of seismic risk susceptibility in Manta's Zero Zone

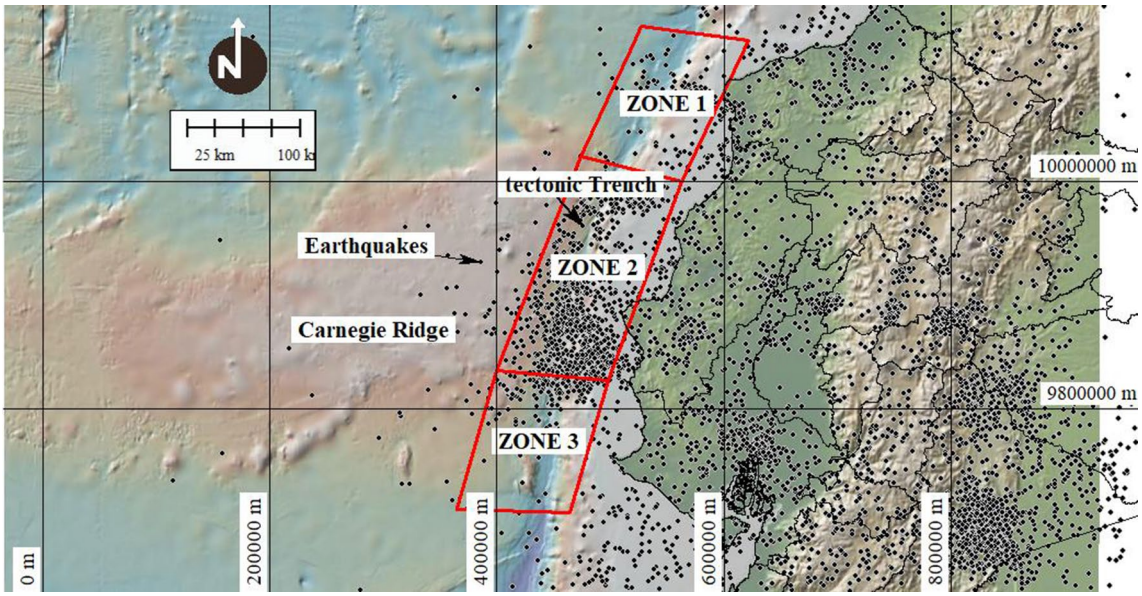


Fig. 3 Ecuador Seismogenetic Zones along the tectonic trench. (3) South Zone, Guayaquil Gulf and the continental segment of Santa Elena, Guayas and El Oro. (2) Central Zone activated on April 16, 2016 (MW 7.8). (1) Northern Zone, Esmeraldas province. Greater earthquakes concentration in Zone 2, in subduction zone due to the failure of thrust on the edge of the Nazca and Sudamericana, resulting in a complex seismogenic behavior of trust that is possibly generating large earthquakes such as that of April 16, 2016

behavior of thrust that can generate large earthquakes and surface deformations.

In the special seismic report No. 13 of April 17, 2016, the Nacional Geophysical Institute—IGN mentions that in Zone 2, higher levels of interseismic coupling (ISC), this is the reason why these segments were considered as in a process of crescent accumulation of energy, with higher probability of earthquakes occurrence (EH/AA/SV/MR 2016b). The zone where the earthquake of April 16, 2016 happened and its respective replicas coincide with the 1942 earthquake and with the norther border of the replica zone of the 1998 earthquake (Bahia de Caráquez). Historically, the subduction process originated the earthquakes of January 31, 1906 (MW 8.8), which is the largest recorded in Ecuador and the sixth largest at a global scale; and the one on May 14, 1942 (MW 7.8); January 19, 1958 (MW 7.8) and December 12, 1979 (MW 8.1). The closer cortical geological faults to Manda are the Barbasquillo-NE fault, located in the Northeast, at a distance of 4 km from Zero Zone, estimating a maximum magnitude of 6.3° and a PGA value of 0.33 g, and the Aromo Norte fault localized between 2 and 3 km of Zero Zone, faults that can possibly generate earthquakes about 6.8 MW and a PGA of 0.30 g.

Seismicity and PGA

The distribution of the regional deformation Jama-Pedernales, according to the PGA (m/s^2) has resulted in Manta city having high seismicity levels with ground acceleration factor of 0.35–0.55 g. These values related with the seismicity of the central segment (Zone 2). The population at 55 km of this deformation is very susceptible to being affected by the active seismicity of the mentioned deformation (Fig. 4a).

In Zero Zone, these seismogenic structures were possibly responsible for the earthquake of April 16, 2016 and the following aftershocks due to the subduction process and the displacement of the Carnegie Mountain Ridge under the continental zone in Central Zone 2 in front of the coastline of the Manabí Province (Gutscher et al. 1999). As a consequence, these earthquakes destroyed the engineered infrastructure with loss of human life. The silty, clayey and sandy soils underwent liquefaction processes with very shallow water levels in depths of 2 m which fractured by the displacement, possibly by compression and dilatation (Fig. 4b).

Regional and structural geology

Regionally, Manta municipality is located in a tectonic deformation in the Barbasquillo and El Aromo fault systems. Displacement faults headed in NE–SW and E–O directions go through the Coast Mountain Range with the presence of minor faults that appear from San Lorenzo, San Mateo Manta until Jaramijó.

This tectonic deformation is in the occidental margin of the Ecuadorean Pacific Ocean, between the borders of Colombia and Peru, very close to the Ecuadorian trench, directly in front of the Carnegie Mountain Ridge, oceanic mountain with a height of 2 km created from the same

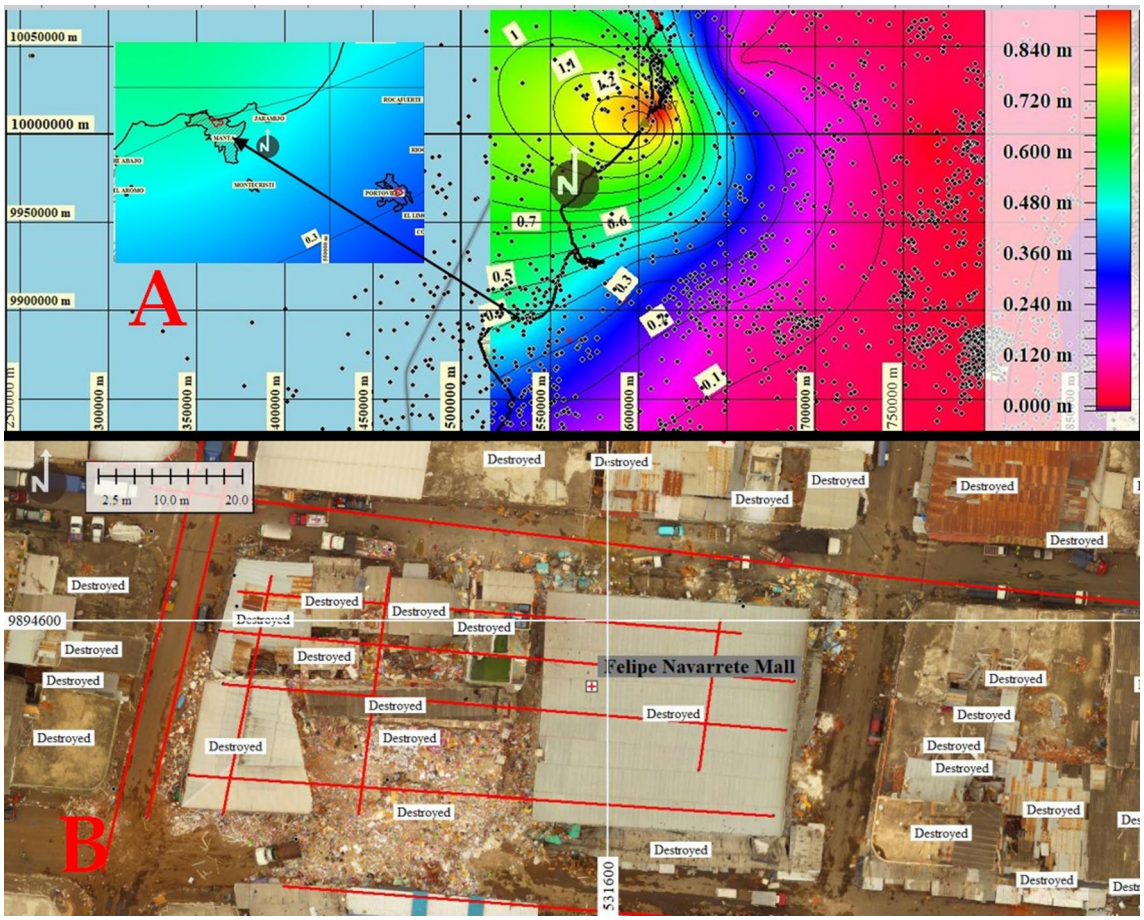


Fig. 4 Up: The regional map of isosista of PGA is observed, from the Jama-Pedernales regional deformation and its distribution, according to the data obtained of accelerograms of the IG-EPN, with visualization of maximum values of amplitude (m/s^2). In detail, the distribution of the PGA (m/s^2), in Manta city with high levels of seismicity and soil acceleration values between 0.35 and 0.55 g. Values related to the seismicity of the central segment (Zone 2). Down: Deformation of the soil in clay, silty and sandy soils on which houses and streets have collapsed in Zero Zone. Down center. Aerial view with drone of the destruction of a building.

hotspot which originated the Galapagos Island (Norton 2010). The coastline is located in the intern wall of the Ecuadorian Oceanic Trench, which is the main oceanic character in the Subduction Ecuadorian system. This is a dual Arc–Trench system of high complexity that represents the boundary between two cortical plates moving in opposed directions. In this case, the Nazca oceanic plate is moving to the East, while the South American continental plate is moving to the West. As result of this confrontation, the surface deformation of the Barbasquillo and El Aromo faults can be evidenced in Fig. 5a. In the area of study, structural lineaments that are controlling the drainage patterns in the coastal margin and have relation to the regional fault systems of great influence in the relief deformations as well as in civilian structures that settle on them. These geological lineaments in the Zero Zone, are directly related with the regional geological fault Barbasquillo-NE and move mainly in the E–W, NW–SE and NE–SW directions (Fig. 5b).

Lithology and local geomorphology

Information from Geotechnical investigation of Geosuelos S.A. and Geophysics obtained from the Secretariat of Risk Management (Tomography's and radargrams) has confirmed that the lithology in the municipality of Manta is made up of Quaternary sedimentary deposits, among these, modern alluviums of the Canoa Formation and deposits of the Tablazo Formation (Fig. 6a). The lithological materials in the Canoa Formation (Pc) are silty sands with the presence of clays, thin yellow sands, slightly compact sands and medium to coarse grains of gray color. Modern alluviums (Qt) of detrital material are transported and deposited as sand, gravel, clay and silt. The Tablazo Formation (Qt), which is areas in a process of elevation, is composed of three facies. The Tablazo Alto attributed to the Lower Pleistocene contains lumaquelas and calcareous sandstones, deposited on open beaches. The Tablazo

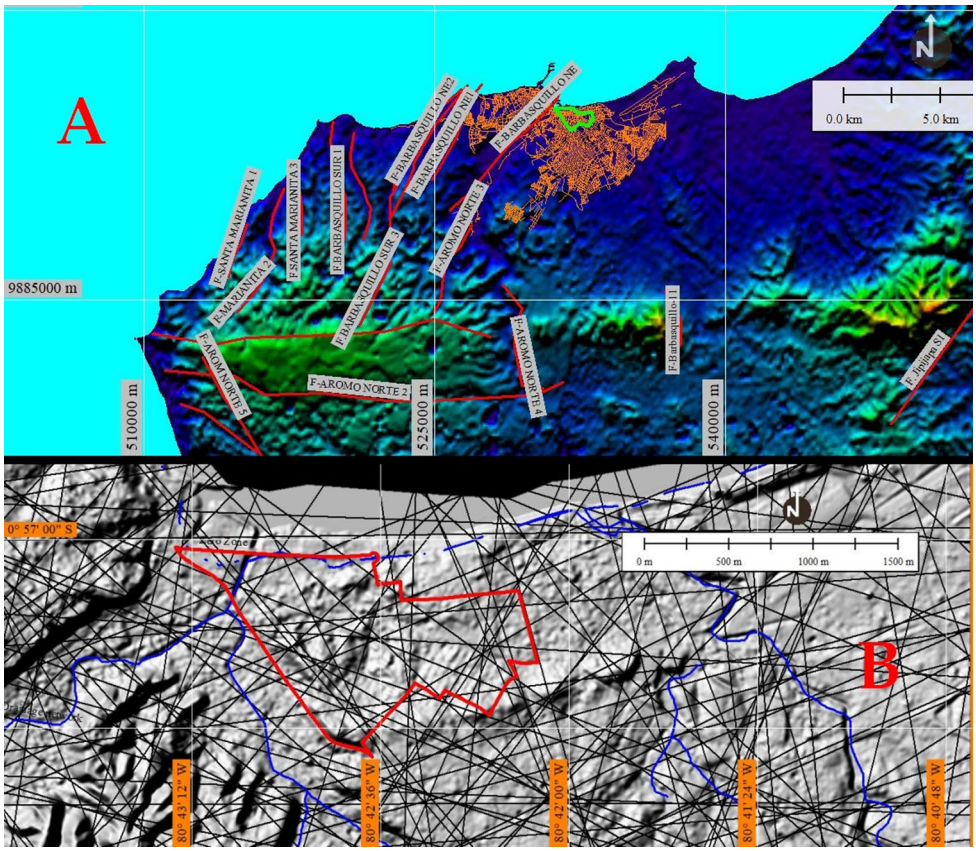


Fig. 5 **a** The shock of the Nazca and South American continental plates has deformed the earth's surface with the occurrence of the Barbasquillo and El Aromo fault systems that generate large earthquakes and deformations of the earth's surface as happened on April 16, 2016. **b** Concentration of geological lineaments in Zero Zone and nearby areas

Medio contains fossils that suggest a brackish facies and the Tablazo Bajo that corresponds to an open sea of the Upper Pleistocene. The peninsula of Manta is presented as a structure with East–West orientation, from the Cape of San Lorenzo to the Hill of Montecristi. The Dome or highest geoforms extend from El Aromo, with a height of 365 m, to Montecristi with 600 m. In Ground Zero there are different sedimentary facies, such as recent beach sand, sand barrier coastal, sand, sandy loam in tidal flats and sandy loam facies in soils of colluvial origin.

The regional units of the littoral landscape which dominate this sector correspond low hilly reliefs to mean reliefs with eroded springs on siltstones, clays and sands; Surfaces of surrounding mesas and abrupt panels on sandstones, conglomerates, lumachelles and sands; relief hills high to very High over volcanic rocks and ancient sedimentary volcanic; Quaternary sedimentary deposits, among these, modern alluviums of the Canoa Formation and deposits of the Tablazo Formation (Winckel 1997). The soils of the region are mainly clayey. The relief shapes present in the Manta municipality have their origin in the tectonic–erosive processed (mesas, very low, low, medium and high hilly reliefs), structural (chevron surfaces), denudative (ancient and recent colluviums, recent colluvium–alluvials, medium and low terraces and causes of rivers, fluvial valleys and cliffs) and depositional (marine tables, canyons, ancient and recent colluviums, coastal plains, littoral spits and beaches). The geomorphology of Zero Zone presents coastal and fluvio-marine sedimentary reliefs of depositional genesis, with geomorphological units well marked such as marine mesas in extensive terraces composed by very fine-grained sands, gravel, silt and clays, on very low slopes (Fig. 6b).

Terrain deformation analysis by differential interferometric synthetic aperture radar-DINSAR and structural lineaments

The following process consisted in performing a deformation analysis of the terrain through the differential interferometric synthetic aperture radar-DINSAR technique to determine sinking zones, subsidence, and terrain inversion and analyze the tendency of these surface deformations possibly generates by surface Rayleigh waves associated to concentration of structural lineaments extracted from a digital elevation model with a spatial resolution of 4 m. This process can be evidenced in Fig. 7.

Finally, this information was integrated with the results of the geotechnical and geophysical studies in order to define the typology of the soil in Zero Zone and its bearing capacity for construction according to the Ecuadorian Construction Norm NEC-15. The DINSAR analysis was elaborated based on two SAR SENTINEL images 1A of a

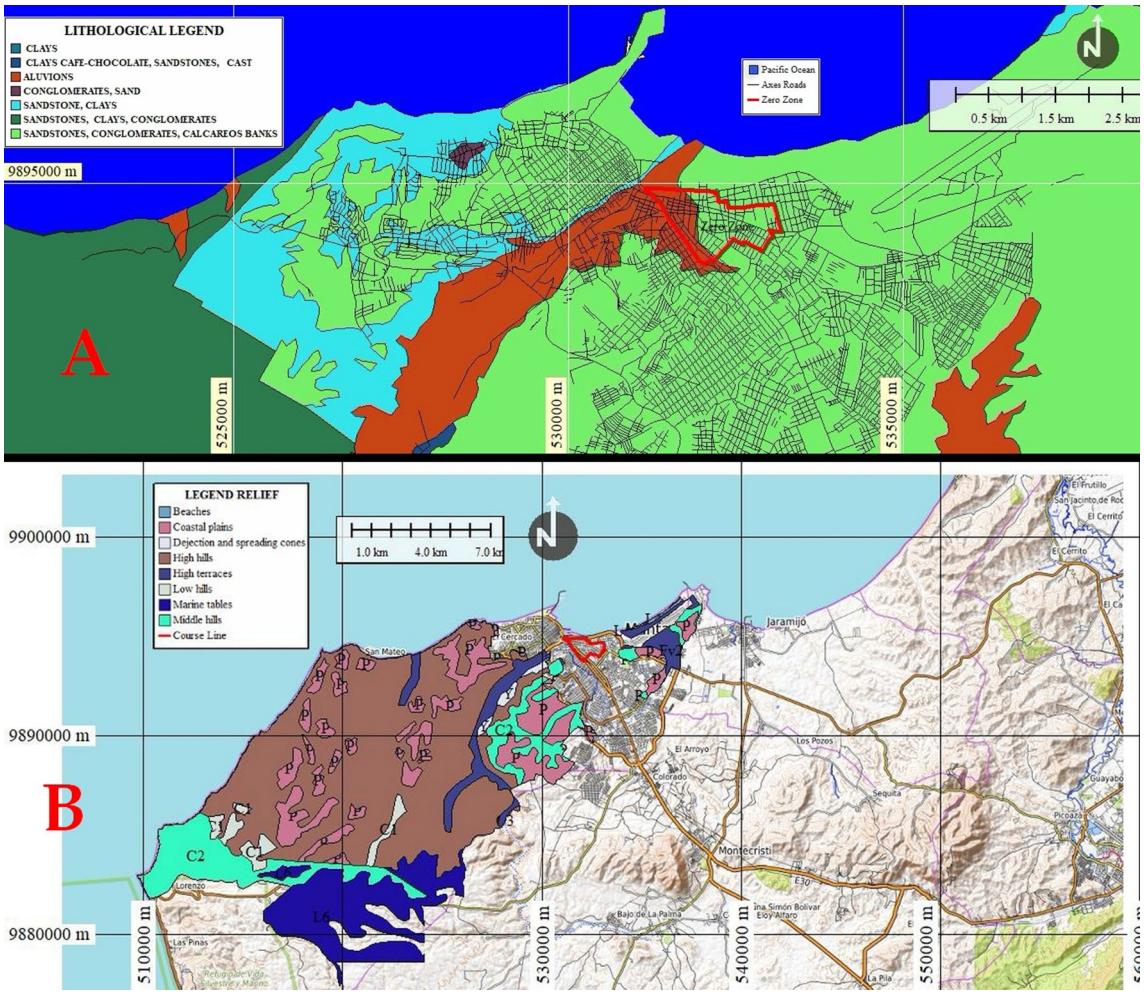


Fig. 6 **a** Local lithology in Zero Zone of Tarqui, is conformed by Quaternary sedimentary deposits, among these, modern alluviums of the Canoa formation and deposits of the Tablazo formation. **b** The Zero Zone geomorphology present coastal sedimentary and fluvial marine reliefs of depositional genesis, with morphological units well marked as surfaces of marine tables in extensive marine terraces composed of very fine grained sands, gravel, silt and clays, in very low slope

spatial resolution of 18 m, the SLC processing level (single look complex), an image of April 12, 2016 before the earthquake and another image of April 24, 2016 after de earthquake (IASR 2016a). The terrain deformations (sinking and lifting), were obtained through the SARScape module of ENVI software.

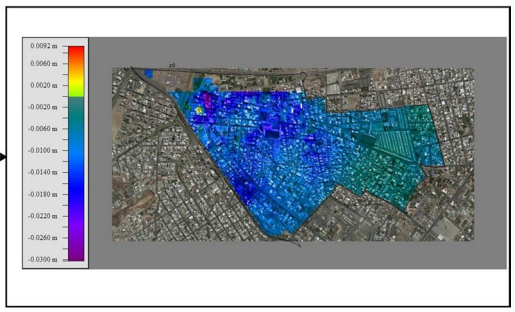
The steps taken to obtain the terrain sinking and lifting map by DINSAR interferometry were the following ones: (1) generation of the interferogram, apply an adaptation and generation filter; unroll phase, tuning and applanation phase (correction of orbit inaccuracies), height conversion and geocoding phase and displacement and geocoding phase. (2) The final product was obtaining an image of vertical displacement of the land after the earthquake (Fig. 8a). The analysis of the concentration of the structural lineaments was obtained from the application of Hydrological Model D8 (Cando-Jácome and Martínez-Graña 2018) (Fig. 8b).

Tomographies and georadar survey in the field

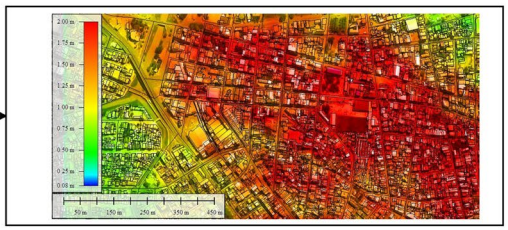
Depending on the zones of deformation of the terrain found in Zero Zone, taking the one with the bigger deformation and delimited by the Felipe Navarrete Mall, Banco del Pichincha and Central Market, the geophysical investigation network was delimited, electric tomography and georadar studies to carry out the subsoil investigation. In the same electric tomography traces, georadar techniques were applied to get coherence with the resistivity and conductivity results. This network is seen in Fig. 9. The combination of electrical and georadar tomography techniques has been applied in order to find deep objects with lower resolution and shallow objects with higher resolution, respectively. This combination was correlated with the geotechnical results obtained from Geoestudios S.A. (Antón and Avilés 2017), which improved the diagnosis of the equilibrium state of the subsoil.

Acquisition of Sentinel 1A images

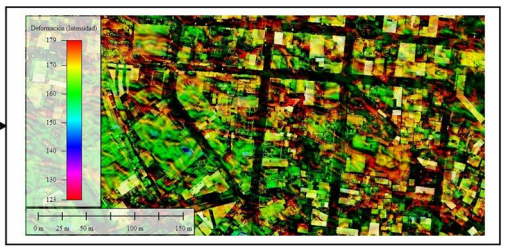
Analysis of subsidence and subsidence based on interferogram values DINSAR



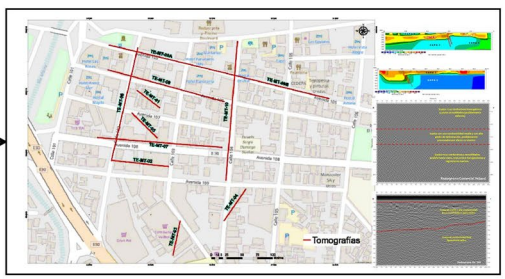
Spatial determination of the zones of surface deformation using the subsidence-subsidence values and structural lineaments obtained from the digital model of elevations of 4 m of spatial resolution.



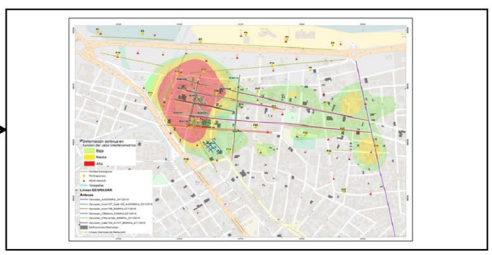
Integration of the results of the interferometry by DINSAR and of the terrain deformation traces



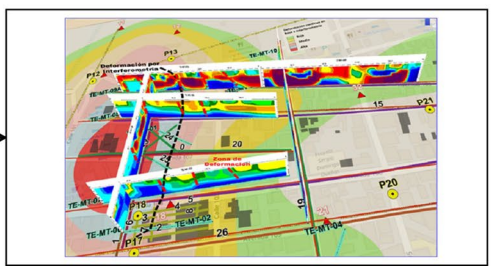
Spacial designation of geophysical research lines in the zones of maximum deformation of the terrain, geo-electric and georadar in the field



Corelation with cutting speeds Vs30, and lithology obtained from perforations: b electrical resistivity-electrical conductivity-cutting speed Vs30-lithology-soils.



Determination of soil types for earthquake-resistant design in relation to the current Ecuadorian Construction Standard NEC-15.



◂**Fig. 7** Flow of the process applied in the terrain deformation analysis using the Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar-DINSAR technique to determine subsidence, inversion of the relief zones and find the trend of these superficial deformations associated with tectonic traces possibly generated by waves superficial Rayleigh and Love, using a digital model of elevations of 3 m of spatial resolution of the affected areas due to the earthquake and integration of geotechnical field data

Electric tomography

Is a non-destructive geophysical technique used for subsoil study, which consists of introducing a voltage of continuous electrical current in the surface of the terrain through two electrodes that is measured by another pair of electrodes? From the obtained value of injected electrical current and the received voltage in response of the lithological materials

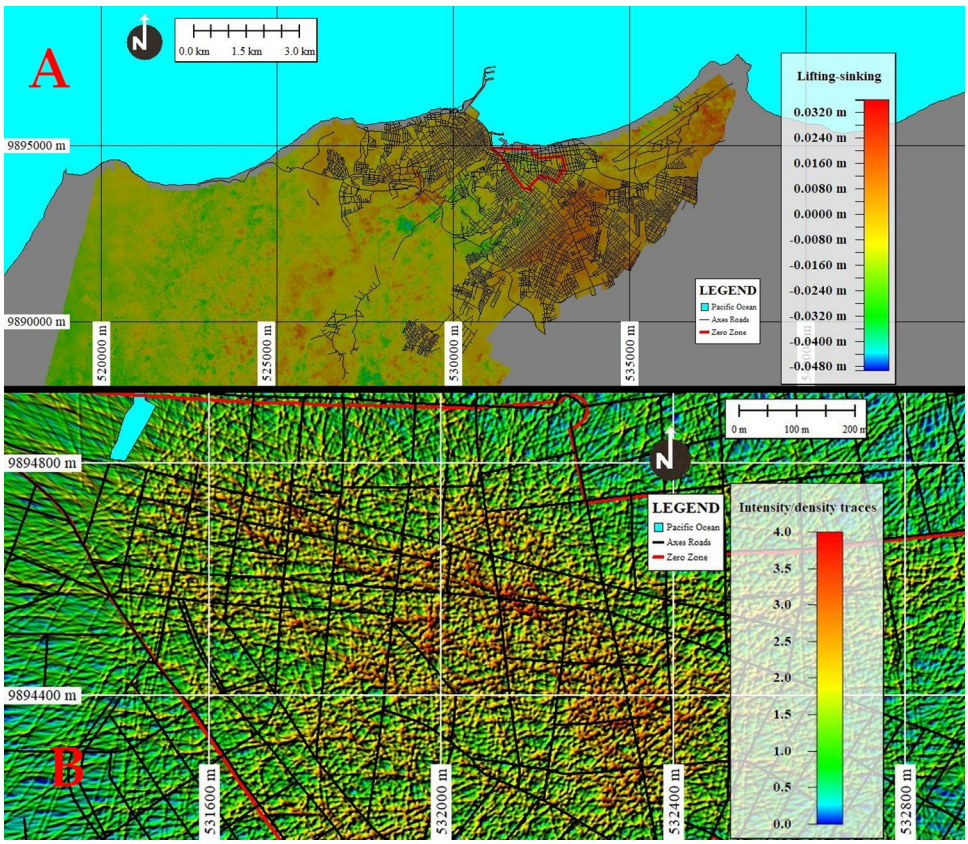


Fig. 8 **a** The deformations of the terrain (subsidence and uplift), were obtained from the processing of two images after and before the earthquake of April 16, 2016. The deformations cover ranges of 4 cm up to 8 cm of regional subsidence. **b** Zero Zone. Local maximum deformation trend obtained from the concentration of structural lineaments and fractures extracted from the Digital Model of Elevations of 4 m of spatial resolution

Fig. 9 Location of the network of geophysical research lines, electrical tomography and georadar in the areas of maximum deformation of the ground, for the investigation of the subsoil. In the same line of electrical tomography, the georadar was applied to obtain coherence in the resistivity and conductivity responses

through which it crosses, the "apparent resistivity" of the subsoil is obtained which the difficulty is found by the electric current when it crossed a determined material. Electric resistivity is a specific property of each material (it does not depend on its geometric characteristics), it is measured in ohm meters (Ω m), and it is inverse to the electric conductivity (Toprak et al. 1999; IASR 2016b; Vidal Montes et al. 2016; Antón and Avilés 2017). Each type of material presents a "real" resistivity range more or less characteristic/more or less characteristic. Empty cavities (filled with air) have an apparent resistivity that tends to infinity. Terrains saturated with saline solutions are higher conductive, thus having low resistivity. Most of the rock and soil components are considered as low conductive materials or with a high resistivity, excepting some cases such as some metallic minerals. The measurement consists in determining the resistivity distribution from a number of measurements made from the terrain surface with electrodes that are "nailed" in said surface. In this study, in accordance with the coastal sedimentary environment of the land, the gradient Schlumberger device was used with an electrode spacing from 1 to 5 m, with longitudes of 40–200 m and depths from 7 to 37 m. Eleven electrical tomography lines were erected in the areas of maximum deformation of the terrain, mainly in the Navarrete shopping center and nearby areas.

For the migration and inversion process of the field measured apparent resistivity, the finite differences method was used which generated a trustworthy interpretation method. Local optimization of the resistivity values with a vertical filter was used due to the nature of the subsoil (sedimentary layers), decreased damping of the signal in depth and the resistivity ranges for all sections were standardized (Fig. 10a).

Georadar

In the same maximum deformation zone, the georadar technique was applied (ground penetrating radar—GPR), which is a non-destructive geophysical method used for the exploration of the subsoil from the surface, through the emission and reception of electromagnetic waves, which vary in function of the electromagnetic properties of the material, as well as some parameters of the surrounding environment. The variations in the electromagnetic waves are caught by the receptor and later, sent to a registry unit where the data are processed in order to produce a high-resolution image (radargram). The deepness of the investigation, as well as the resolution depended on the type of the employed antenna

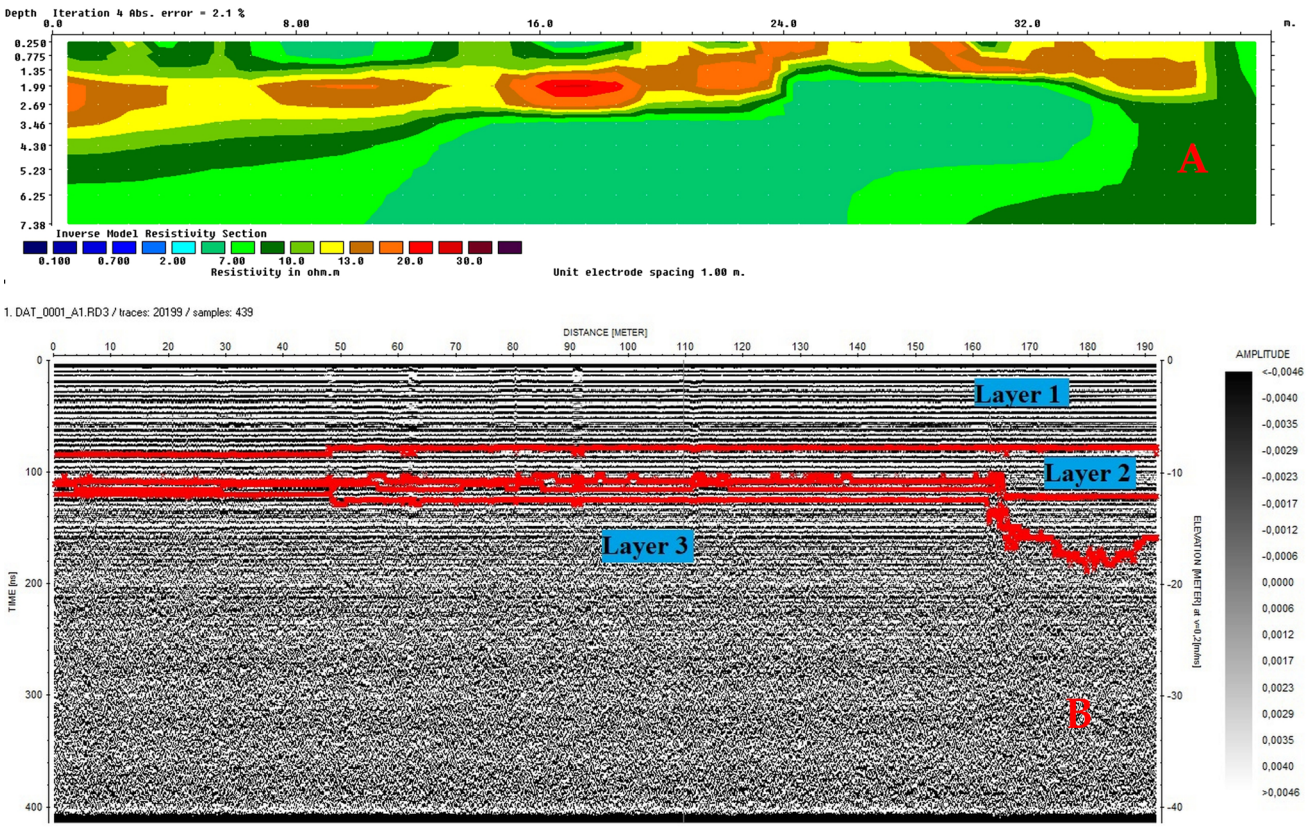


Fig. 10 **a** Migration and inversion of the apparent resistivity measured in the field done using the finite difference method, which generated a reliable model interpreted. Final radargram. The processing of the data was done with the Reflexw software with the following steps: **b** Elimination of zero time, background removal and linear gain smoothing applied

that in this case were Mala Proex armored antennas of 250 (with a depth of investigation of 30 m) and 800 MHz (depth of 2 m). The higher frequency antennas get higher resolution radargram, but with lower depth of investigation. Most of the rocks and subsoils in which the studies are carried out can be considered as insulators. In these mediums, the electrical conductivity exists due to the presence of saline flow in pores and fissures. It means that the greater the content of water and dissolved salts and the porosity of the medium, the greater its conductivity. The unit of measurement is Siemens/meters (S/m) and is the opposite of resistivity.

The data were processed with Reflex software from a raw image (Fig. 10b). Subsequently, a pass band filter was applied to eliminate the noise and highlight the signals that can represent an underground object. Zero time was eliminated to define the reference zero of the image, for the case of the definition of strata; it will be the current surface of the land to eliminate the environmental noise. Finally, a linear gain and gain filter were applied to improve the visualization of objects in the subsoil. Once obtained the electric tomographies and radargrams within the maximum continuous deformation areas in the Zero Zone, the resistivity and conductivity, were correlated with the obtained values from the geotechnical–geophysical information of Geosuelos S.A., and their spatial correlations were analyzed in the distribution of the types of soils for the seismic design.

Results

The electric tomography and radargrams were related with resistivity factors, lithological values of 17 perforations (compactness–rigidity), SPT testing (liquefaction, shear stress, subsurface conditions), CPT (resistance and elasticity of its soil–subsoil), surface wave analysis tests in multichannel-MASW arrays and microtrepidation analysis in multichannel-MAM arrays to find cutting speeds Vs30 (Antón and Avilés 2017) (Fig. 11).

Tomography and radargram

In general, in Zero Zone of Tarqui, relatively low resistivity values were found (0.3–60 Ω m), which reflect the nature of the subsoil, the same which is constituted by unconsolidated sands, silty sands and silty–sandy loams. Those behave like soft to semi-rigid soils that, at the study site due to the earthquake of April 16, 2016, liquefied and were conditioning factors for the collapse of the buildings that were built without standardized construction procedures. The majority of soils in Zero Zone are found within the ML groups (low plasticity inorganic silts), MH (inorganic silt mud, clay and fine sand mixture) and CH (elastic expansive clays).

During the earthquake, many civil structures in Zero Zone suffered subsidence and displacement. In the superior horizons of up to a depth of 5 m, the pavements of reinforced concrete and asphalt were deformed in its entirety. At greater depth, an area of very low resistivity was found, probably because the sandy sediments are currently saturated with water due to the presence of high water tables. The main lines of tomographies and radargrams of the subsoil obtained in Zero Zone of Tarqui are summarized below.

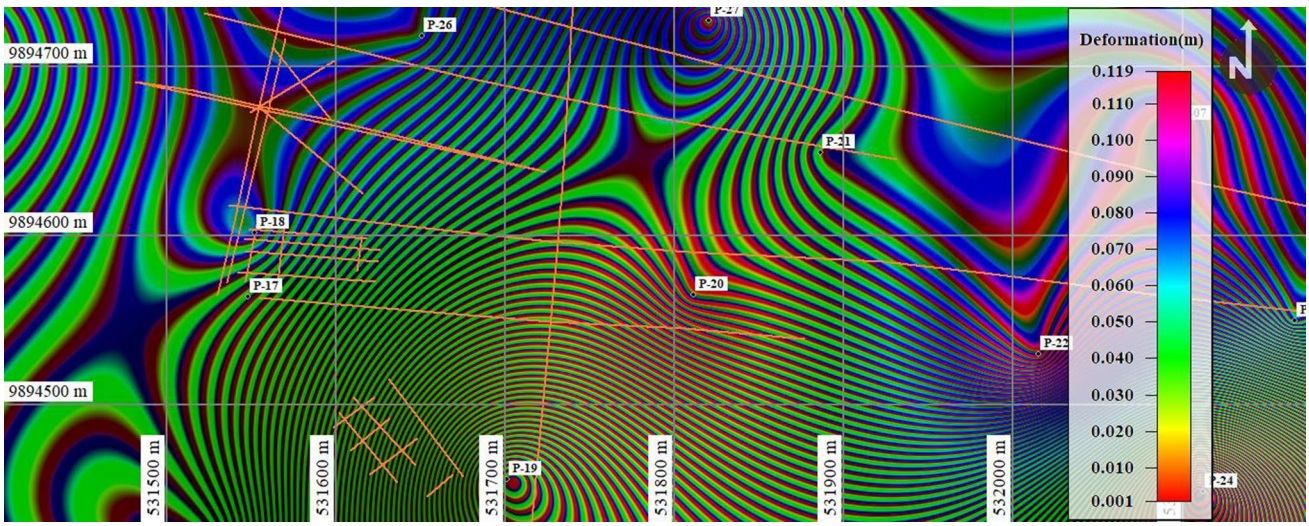


Fig. 11 Dinsar-Density deformations and distribution of electrical tomographies, georadar lines (orange color), points of perforations and values of REMI + MASW with the objective of classifying the terrain for seismic design (cutting speed Vs30) within the areas of maximum continuous deformation of the Zero Zone in Cental Market and the Felipe Navarrete Mall P17 and P18 points

Electrical tomography TE-MT-01 and radargram between 102 street and Av. 107, corner

Tomography length: 40 m. Depth of penetration: 12 m. Result: three subhorizontal layers with resistivities between 6.29 and 15.96 Ω m with an average of 9.35 Ω m. Radargram antenna: 250 MHz with length of 35 m and depth of penetration up to 30 m. *Interpretation*: the first surface layer corresponds to soft sandy–silty soils with a thickness of 1 m. A second semi-rigid layer composed of poorly classified sands that have a thickness of 5 m. In this layer in the position $L = 24$ m, a change in thickness was evidenced, which suggests the presence of a zone of significant deformation. Under this layer, an area of low resistivity was determined. In the radargram, 0–8 m depth corresponds to very homogeneous and poorly consolidated soils, as indicated by the response of Vs30. From 8 to 12 m there are little conductive soils with a high degree of deformation. After 12 m again, there are consolidated soils that present a medium-to-low conductivity.

Electrical tomography TE-MT-02 and radargram between 102 street between Av. 108 and 109. Felipe Navarrete Mall, Pichincha Bank and Central Market. Zone of maximum ground deformation

Tomography Length: 90 m. Depth of penetration: 18 m. Result: a horizontal surface layer of 3 m depth, with moderately high resistivities between 3.54 and 19.83 Ω m, with an average of 7.70 Ω m. Radargram antenna: 800 MHz. In the radargram, it was observed that from 0 to 30 cm pavement is located and from 30 cm to 50 cm begins the asphalt folder with concrete reinforcement which is deformed and fractured. Below the 50 cm to 100 cm, there are sediment horizons a little more consolidated. However, there are zones or "windows" that were intensely deformed, possibly due to the earthquake of April 16, 2016. Interpretation: semirigid sandy-silty soil. In this layer, there was an abrupt change in thickness that suggests the presence of a zone of significant deformation. Under this layer, an area of low resistivity was determined. Along this block were the Felipe Navarrete Shopping Center, Banco de Pichincha and the Central Market that totally collapsed with the largest number of human victims (96). From the 100 cm, marine sediments possibly of marine transgression deformed in contact with the superficial parts of the subbase and base of the deformed path are observed. This line can be correlated with the previous radargram (102 Street and Av. 107), which also showed maximum deformations of the terrain. This zone is the one of greater deformation obtained by interferometry and numerical modeling of structural lineaments and superficial deformations of the terrain based on the analysis of concentration of structural lineaments.

Electrical tomography TE-MT-03 and radargram in Velboni commercial

Tomography length: 65 m. Depth: 12.5 m. Results: a horizontal surface layer that reaches up to 5 m deep, with moderately high resistivities between 4.06 and 31.43 Ω m with an average of 11.62 Ω m. Radargram antenna: 250 MHz, with a length of 44 m and penetration depth of 30 m. Interpretation: semi-rigid sand–silty. Underlying an area of low resistivity was found. No areas of significant deformation were found. (C) In the radargram, 0–8 m depth corresponds to highly homogeneous conductive soils and a few consolidated (possibly filled) as indicated by the response of Vs30. From 8 to 15 m there are soils with a medium conductivity and high deformation degree, possibly caused by coseismic effect. After 15 m again, highly conductive and consolidated soils appear, possibly as a response to transgressions and marine regressions.

Electrical tomography TE-MT-04 and radargram between 104th street and Av. 109

Tomography length: 55 m. Depth: 11 m. Results: a horizontal surface layer of 4 m depth, with moderately high resistivities between 1.74 and 44.13 Ω m with an average of 10.29 Ω m. Interpretation: semi-rigid silty sands. Interpretation: Underlying an area of low resistivity was found. There are no significant deformation zones along the studied line, except for a slight thickness reduction anomaly between the positions $L = 16$ and $L = 37$. Radargram antenna: 250 MHz, with a length of 192 m and depth of penetration of 30 m, it was determined that from 0 to 10 m depth correspond to highly conductive soils homogeneous and few consolidated (possibly filled) as indicated by the answer of the Vs30. From 8 m to 17 m deep, there are soils with a medium conductivity and with a high degree of deformation as observed in the distances from 40 to 60 m, 75 to 85 m, 110 to 113 m, and 170 to 172 m, possibly caused by coseismic effects. From the depth of 17 m depth, highly conductive and consolidated soils are again present, possibly as a response to continuous episodes of marine transgression and regression. The images of the tomographies and radargrams: TE-EM-01, TE-EM-02, TE-EM-03 and TE-EM-04 can be seen in Online Appendix A.

The DINSAR interferometry methodology corroborated the existence of deformations of the ground surface in the

Zero Zone obtained through the analysis of the concentration of structural lineaments. Both mechanisms coincided in the geographical delimitation of the area of greatest deformation, the Felipe Navarrete Mall, the Banco del Pichincha and the Central Market, site where more than 96 people died due to the earthquake. The deformation zones determined in the subsoil based on electrical tomographies and radargrams are aligned following the superficial tendency of the deformation determined by the interferometric analysis and density analysis of structural lineaments.

It is concluded that in general, soils from 0 to 5 m deep are highly conductive, soft, with cutting speeds of 50–115 m/s, which corresponds to sandy soils on poorly consolidated sand–silt strata present in the maximum deformation zone. Within the classification of the soil typology of NEC 2015, the zone falls in categories E and F (unconsolidated fillings) of very bad seismic response. Outside the zone of maximum deformation are semi-rigid soils that correspond to type D soils (between 7 and 14 m deep). The MAM + MASW tests carried out by the company GEOESTUDIOS SA confirmed the results obtained by the geophysical analysis, so it can be stated that in the study area there are Type D, E and F soils according to the NEC-2015, with values of Vs30 between 50 and 360 m/s. The aforementioned results allowed differentiating three types of soil profiles for the seismic design in Zero Zone of Tarqui.

Profile 1 Consisting of 2 differentiable layers: the first layer from the surface to 7 m deep with Vs = 50 m/s at Vs = 150 m/s. The second layer reaches up to 30 m deep with Vs = 200 m/s at Vs = 300 m/s.

Profile 2 Constituted by 3 differentiable layers: the first layer from the surface to 5 m depth with Vs = 100 m/s at Vs = 160 m/s. The second layer reaches up to 10 m deep with Vs = 160 m/s at Vs = 200 m/s. A third layer reaches up to 30 m deep with Vs = 210 m/s at Vs = 350 m/s.

Profile 3 Consisting of 3 differentiable layers: the first layer from the surface to 7 m deep with Vs = 110 m/s at Vs = 155 m/s. The second layer reaches up to 15 m deep with Vs = 180 m/s at Vs = 250 m/s.

A third layer reaches up to 30 m depth with Vs = 230 m/s at Vs = 393 m/s.

The result of the analysis of the local deformation tendency allowed observing the concentration of the deformations that arose in the study area and its continuity. The greatest concentration of deformations was observed between streets 101 and 104 and avenues from 105 to 109 of the Tarqui zone, where the Felipe Navarrete Mall, the Banco del Pichincha and the Central Market were located, and the same ones that collapsed in its whole. The coincidence between the destroyed infrastructure and the concentration of structural lineaments can be seen in Fig. 12a.

Discussion and conclusions

The Felipe Navarrete Mall and its surroundings can be seen in Fig. 12a; it is the area of maximum deformation determined in the subsoil and based on electrical tomographies and radargrams. This zone is aligned following the superficial tendency of the deformation obtained with the interferometric analysis and concentration of structural lineaments (Fig. 12b). This deformation of the topographic relief coincided with the geotechnical results obtained by Geosuelos S.A. in the Lateral Displacement Index—LDI that at Ground Zero caused lateral displacements due to liquefaction in the subsoil, appearing on the surface cracks, fractures and sand volcanoes plus the displacements and settlements of the structures (Martínez-Graña et al. 2013; Montes et al. 2017) (Fig. 12c). The Felipe Navarrete Mall and its surroundings are in a place of maximum ground deformation,

The intense soil deformation, the high conductivity values, the liquefaction and the low-resistivity cutting wave velocity Vs30 implied that, from the geological point of view, alluvial soils and young beaches are saturated and have greater susceptibility to erode due to its more liquid than solid behavior. This behavior is an indicator of the liquefaction potential caused by the earthquake and is the one that has caused the intense and severe damage to the foundations of engineering structures.

The DINSAR interferometry methodology, based on the Sentinel 1A images, without cost, corroborated the existence of deformations of the ground surface obtained from the analysis of the concentration of structural lineaments in the Zero Zone. Both mechanisms coincided in the geographic delimitation of the area of greatest deformation where the Felipe Navarrete Shopping Center, the Pichincha Bank and the Central Market were built, a site where more than 96 people died due to the earthquake ground shaking.

The correlation of the geotechnical–geophysical parameters such as the average shear wave velocity of the upper 30 m–Vs30, lithological records, liquefaction indexes, geophysics such as resistivity, conductivity and the intensity of the topographic deformation allowed to analyze the response of the site to predict its geotechnical capacity due to the soil vibration caused by the earthquake of April 16, 2016. This predictive capacity could have been obtained years before the earthquake occurred based on the deformation of the relief.

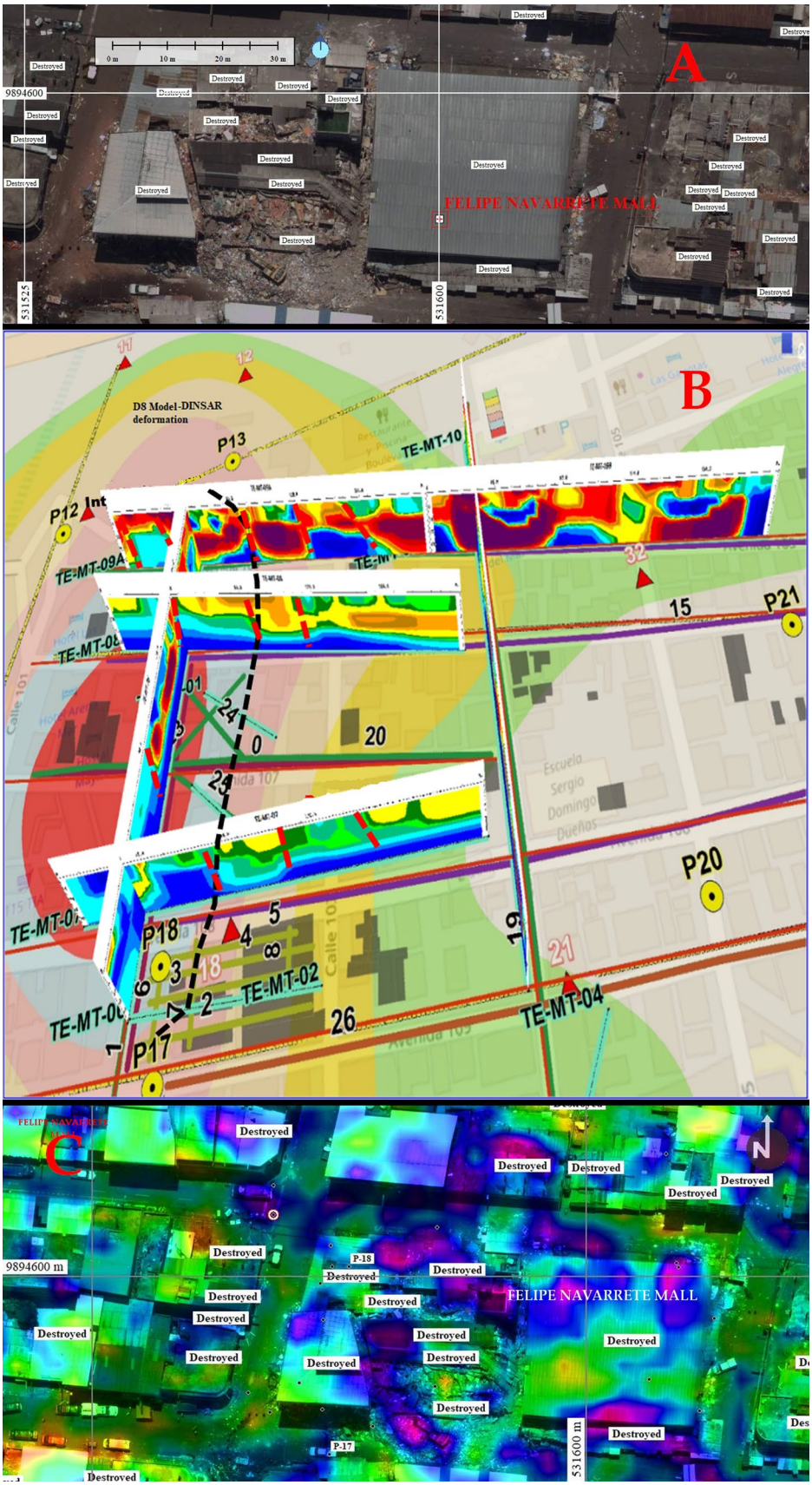


Fig. 12 **a** Location of the F. Navarrete Mall, Banco Pichincha, Central Market and nearby sites and nearby places. **b** Maximum deformation obtained from the interrelation of the DINSAR method and guidelines and density of structural lineaments. **c** Concentration of fractures analyzed before the earthquake and houses destroyed

The geophysical analysis determined a high correlation between the values of resistivity obtained by the electrical tomography and the conductivity values of the radargrams and the DINSAR methods and the concentration of structural lineaments.

Especially in Zero Zone, the Felipe Navarrete Mall where more than 96 people died, the greatest seismic stress represented the traces of deformation, possibly amplified the Rayleigh surface waves that affected the areas between the Felipe Navarrete Shopping Center, the Banco del Pichincha and the Central Market. This zone continues to be the one with the greatest tectonic deformation and the one with the highest susceptibility to earthquakes such as the one that occurred on April 16, 2016.

The two methods of sinking and subsidence analysis by Interferometry-DINSAR and determination of structural lineations, fractures and deformations obtained by concentration of structural lineaments, are complementary, while the DINSAR model, which needs a lot of calculation time to analyze the rate of change of the topographic gradient in a period of time in small spaces of movement (cm), the density model of concentration of structural lineaments, based on digital models of elevation of high resolution (in this case of 4 m), provides quickly, and at low cost, areas of maximum terrain surface deformation with high precision.

Acknowledgements This research was funded by the project: Junta Castilla y León SA044G18.

References

Antón A, Avilés A (2017) Analysis of seismic response and liquefaction potential in the Tarqui parish, after the 2016 earthquake (undergraduate thesis). Polytechnic School Faculty of Engineering Earth Sciences (ESPOL). Guayaquil-Ecuador. https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/100333/D-CD70229.pdf

Cando-Jácome M, Martínez-Graña A (2018) Numerical modeling of flow patterns applied to the analysis of the susceptibility to movements of the ground. Geosciences (Switzerland). 8:340. https://doi.org/10.3390/geosciences8090340

Chunga K, Aguiar R, Zambrano S (2018) Characterization of geological faults capable of generating cortical earthquakes in the Gulf of Guayaquil, south coast of Ecuador 2018. http://www.andeangeology.cl/index.php/revista1/article/view/V46n1-2991

EH/AA/JS (2016a) Geophysical Institute National Polytechnic School. SPECIAL SEISMIC REPORTN. 7 2016. https://www.igepn.edu.ec/eq20160416-informes-noticias?start=20. Accessed 17 Apr 2016

EH/AA/SV/MR (2016b) Geophysical Institute National Polytechnic School. Special Seismic Report No. 13 – 2016. Technical report of the Pedernales earthquake. 19h50 TL. https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1317-informe-sismico-especial-n-13-2016. Accessed 17 Apr 2016

Gutscher M, Malavieille L, Lallemand J, Collot Y (1999) Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. Earth Planet Sci Lett 168:255–270. http://www.gm.univ-montp2.fr/spip/IMG/pdf/Gutscher-EPSL99-Andes.pdf

IASR (2016a) Secretary of Risk Management. Informe N° SGR-IASR-08-009. Report of the study of analysis of Differential Radar Interferometry (INSAR) for estimation of soil deformation in the area affected by the earthquake on 04-16-2016. 13-07-2016. Internal document not published

IASR (2016b) Undersecretary of Information Management and Risk Analysis. Report No. SGR-IASR-08-0045-2016. Geophysical prospecting in Zone 0—Tarqui Parish of the Manta, Manabí Province. Internal document not published

Marcaillou B, Collot J-Y, Ribodetti A, d'Acremont E, Mahamat A-A, Alvarado A (2016) Seamount subduction at the North-Ecuadorian convergent margin: Effects on structures, inter-seismic coupling and seismogenesis. Earth Planet Sci Lett 433:146–158. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015. http://adsabs.harvard.edu/abs/2016E%26PSL.433.146M

Martínez-Graña A, Goy JL, Zazio C, Yenes M (2013) Engineering Geology Maps for Planning and Management of Natural Parks: "Las Batuecas-Sierra de Francia" and "Quilamas" (Central Spanish System, Salamanca, Spain). Geosciences 3(1):46–62

Montes RV, Martínez-Graña AM, Martínez Catalán JR, Arribas PA, Sánchez San Román FJ, Zazo C (2017) Integration of GIS, electromagnetic and electrical methods in the delimitation of groundwater polluted by effluent discharge (Salamanca, Spain): a case study. Int J Environ Res Public Health 14:1369

NEC-11 (2011) Ministry of Urban Development and Housing. Ecuadorian Construction Standard NEC-11 Chapter 2 Seismic Hazard and Resistant Earthquake Design Requirements. Executive decree No. 705 April 2011. https://inmobiliariadja.files.wordpress.com/2016/09/nec2011-cap-02-peligro-sismico-y-requisitos-de-disec3b1o-sismo-resistente-021412-vic.pdf

Norton M (2010) Location of oceanic ridges and plate boundaries on the northwestern edge of South America based on a screenshot from NASA World Wind software—outlines taken from Gutscher et al. 1999. https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Carnegie_Ridge.png

ODEPLAN (2001) Office of Planning of the Presidency (ODEPLAN). Cartography of the threats of natural origin by canton in Ecuador. Preliminary report. 2001. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-03/010065702.pdf

Toprak S, Holzer T, Bennett M, Tinsley J (1999) CPT-and SPT-based probabilistic assessment of liquefaction potential. https://www.researchgate.net/publication/277343077_CPT-and_SPTbased_probabilistic_assessment_of_liquefaction_potential

Vidal Montes R, Martinez-Graña AM, Martínez Catalán JR, Ayarza Arribas P, Sánchez San Román FJ (2016) Vulnerability to groundwater contamination, SW Salamanca, Spain. J Maps 12(sup 1):147–155. https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1172271

Winckel A (1997) Los Paisajes Naturales del Ecuador. The regions and landscapes of Ecuador. Basic Geography of Ecuador, Volume IV, vol 2. Geographic Institute of Ecuador-IGM-ORSTOM-IPGH. 1997. http://www.ecuador.ird.fr/mediateca/las-co-ediciones-en-ecuador/los-paisajes-naturales-del-ecuador-tomo-2

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

International Journal of
Environmental Research and Public Health

MDPI

Article

Prevention of Disasters Related to Extreme Natural Ground Deformation Events by Applying Spatial Modeling in Urban Areas (Quito, Ecuador)

Marcelo Cando-Jácome, Antonio Martínez-Graña * and Virginia Valdés

Geology Department, External Geodynamics Area, Faculty of Sciences, University of Salamanca, Plaza Merced s/n, 37008 Salamanca, Spain; id00709713@usal.es (M.C.-J.); vvaldes@usal.es (V.V.)
* Correspondence: amgranna@usal.es; Tel.: +34-923-294496; Fax: +34-923-92329-4514

Received: 18 November 2019; Accepted: 21 January 2020; Published: 24 January 2020

Abstract: Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) is a spatial technique based on obtaining the phase differences of two radar images, acquired by a satellite from separate orbits and at different times, to obtain a ground displacement image of a study area, This image is called interferogram. On the other hand, space syntax is a technique within architecture that is applied to quantify and describe the level of ease of population movement through any urban space in a city. It analyzes the flow, transit, displacement, accessibility and concentration of the population in areas of basic services, health, security, commerce and entertainment. What would happen if an earthquake greater than 6 or 7 Moment Magnitude-Mw occurs in these areas of intense concentration of the population that are in buildings constructed on intense deformations of the land? With respect to the seismic risk in the city of Quito, many studies related to seismic risks have been published, but there are no studies that relate the deformation of the land (INSAR) with the space syntax, so this article presents a new vision in the joint application of these tools, a useful vision for urban planners and designers, considering the occurrence of a major earthquake in areas of buildings that are located on intense land deformations and have high population concentrations. This study has been prepared in two phases: in the first phase, the built-up areas concentrated in the greatest terrain deformations by accumulated displacement obtained using the APS estimation & multitemporal analysis by PSI-InSAR time series analysis methodology and Sentinel 1A and 1B satellite images were categorized. In the second phase, through the space syntax's theory and the use of DepthmapX, the movement patterns and traffic flows of the population were determined by means of graphs of spaces interconnected by streets (axial maps), to predict the spatial behavior of humans and its concentration in the mentioned sites. Finally, the results were integrated, determining the degree of exposure of the population found in built areas with high to very high displacement and an intense population concentration.

Keywords: natural disasters; spatial modeling; ground deformation; INSAR; exposure urban

1. Introduction

The criterion of this study is from the point of view of the forecast, which means "having exposure maps to natural hazards" before they are activated and cause disasters such as the 7.8 Seismic Moment Magnitude-Mw earthquake, which occurred on the Ecuadorian coast on the 16th. April 2015, that in the area of greatest destruction of the city of Manta, the collapse of the Felipe Navarrete Shopping Center that was located in an intense land deformation zone caused more than 96 deaths.

Historically, the seismic risk of buildings has been analyzed by traditional methods like direct methods (by type of construction, mechanics); indirect methods (vulnerability index, seismic intensity, rapid selection from ATC-21); conventional methods (heuristics, vulnerability index) and hybrid

methods (combine the characteristics of the previous methods) [1]. The use of the INSAR methodology to analyze seismic risk also exists in much scientific literature.

No scientific research has been found that combines the INSAR methodology with the Syntax of Space to analyze the exposure of engineering constructions located in areas of deformation of the land and their relationship with the transit-concentration of the population in the event of an intense earthquake. There is not much scientific literature that mentions the use of space syntax and natural disasters such as earthquakes, floods and tsunamis. According to Stonor's presentation at the First Conference on Space Syntax, held in China, Beijing, 5 December, 2015 [2], the analysis of spatial syntax is increasingly used to advise government agencies on the impacts of devastating events, whether created by man or created by nature.

Before the earthquakes, the analysis showed that the central area had a strong "multi-scale" space core of pedestrian concentration. This means that the central area was simultaneously important for local and global population movement scales, a typical finding for central commercial areas, as they thrive by accessing multiple movement scales: people walking towards them locally and people driving or by bicycle as part of your transit larger trips. After the earthquakes the spatial hierarchy shifted with some important consequences. First, several local, peripheral centres became significantly more important. Many businesses relocated there from the city centre. Second, some new centres emerged when the spatial configuration shifted sufficiently to make these more strongly connected within the remaining network of the city than they had been previously. The centre on Stanmore road is one such example of a zone where businesses relocated to.

Other examples of disaster analysis include spatial modelling of the effects of flooding and terrorism incidents, when the spatial layout of an urban centre may be disrupted for hours, days or longer and when emergency services, as well as the general public, need to understand how the hierarchy of space has been affected so that they can replan their activities.

Finally, the future will see the construction of very large spatial network models in order to produce national and regional spatial strategies that are informed by space syntax analysis—bringing a new level of rigour to such activities.

This innovative study is considered because it is the first time it is used in the country as a forecast mechanism. The aim of the combination INSAR with the syntax of space to analyze the exposure of buildings located in areas of intense land deformation and with a high concentration of the population that can collapse, to predict economic and human life losses in the event of an intense earthquake such as the one that occurred in the city of Manta on the Ecuadorian coast, where an earthquake of 7.8 Mw caused the collapse of several buildings including the Felipe Navarrete shopping center.

According to world statistics, about three quarters of all earthquake-related deaths are due to the collapse of buildings [3]. In Ecuador this was evidenced in the 7.8 Seismic Moment Magnitude-Mw earthquake of April 16, 2015, with an epicenter in Pedernales city on the Ecuadorian coast. More than 96 people died due to the collapse of the Felipe Navarrete Shopping Center located in the zero zone of Manta city. This shopping center was located on an intense ground deformation area, which was of tectonic origin [4].

To avoid the possibility that an earthquake greater than 6 Mw can cause victims and destruction of the strategic infrastructure in the La Mariscal area, located in the central-east area of the city of Quito, in this study, a methodological proposal is presented with the objective of zoning the seismic exposure of buildings existing in this part of the city in three phases. In the first phase, the deformation and the accumulated displacement of the ground (total displacement value in mm of a ground point in reference to a relative starting point or known stable point measured in a series of times) were determined with atmospheric phase screen (APS) and doing PS-InSAR time series analysis methodology, based on Sentinel 1A and B images, in a period of time from 2 September 2015 to 28 November 2019. In the second phase, the concepts and tools of space syntax and the use of DepthmapX were applied, to determine the movement patterns and traffic flows of the population through graphs of spaces interconnected by streets and their intersections (axial maps), to predict human spatial behavior and

its concentration in places of intense commerce, entertainment and public services. Finally, the results were integrated, determining the exposure intensity of the population living in built areas with high to very high displacement and a high concentration of the population. This study has focused on exposure from the point of view of the susceptibility of buildings and the population to be affected by a specific seismic hazard and the probability of being exposed to intense deformations of the relief that can move with earthquakes of more than 6 or 7 Mw [5].

The city of Quito is exposed to a high seismic risk [6]. The capital has been affected by earthquakes occurring beneath it, in the Quito fault, and by large earthquakes that occurred in the Inter-Andean valley or in nearby mountain ranges. The last major earthquake that affected Quito was in 1868. At that time, the population of the city consisted of some 45,000 people living in an area of 4 km^2 [7]. Since that date, a rapid growth of the city has been evidenced, which gave way to a large number of low quality buildings and edifications in unstable sites such as ravines filled with loose soil and steep slopes, and the increase in population to more than two and a half million inhabitants, so if a large earthquake were to occur, the damage would be considerable [6]. Current seismicity studies show that every 50 years (on average), there have been earthquakes with epicenters located at distances close to the capital city, which have caused significant damage to it. As of 1541, at which time historical records started, seven earthquakes with intensity VI or higher were felt in the capital [8]. This intensity value of the Medvédev-Sponheuer-Kárník-MSK intensities scale corresponds to an earthquake in which people became frightened and left their homes, and the old mud, adobe or masonry walls were severely damaged, with the occurrence of small landslides. The two closest earthquakes that affected the city of Quito with greater intensity were that of Guayllabamba (6.4 Mw in 1587) and that of Quito (7.2 Mw in 1859). Both had an intensity of VIII of the MSK scale which according to reports of the time, caused difficulties for residents to stand and the collapse of old buildings occurred. In addition to the mentioned earthquakes, other distant earthquakes have caused damage to the city. Among them can be mentioned the ones of Ambato (7.6 Mw, 1698) and Riobamba (7.6 Mw, 1797) to the south of the capital city; Ibarra (7.2 Mw, 1868) to the north and Baeza (6.9 Mw, 1987) to the east of the city.

In recent times, and after the mega earthquake of 27 February 2010 in Chile, which had a magnitude of 8.8 and left a death toll of more than 500 citizens with economic losses estimated at 30 billion dollars [6], the authorities of the Ecuadorian government, focused on the reduction of seismic vulnerability in major cities located in the Ecuadorian coastal profile in the event of an earthquake of that magnitude, taking into account that in 1906 there was an earthquake of 8.8 on the coast of Esmeraldas province. According to specialized researchers [8], the losses caused by an event of this magnitude would duplicate or triplicate the ones of Chile. This approach involves the analysis of seismic vulnerability in inland cities located in the Highlands, Littoral Region and Galapagos Islands.

This concern in the Ecuadorian authorities led to the creation of the Ecuadorian Building Code of 2015 NEC-SE-DS, Seismic Loads and Resistant Earthquake Design, a code in which the elastic design spectrum (ground acceleration and displacement) was regulated.

With respect to La Mariscal area, according to the Geophysical Institute of the National Polytechnic School (EPN), this sector of the city of Quito is built on an important seismic-tectonic zone with a system of geological faults of approximately 50 km in length that crosses the city. This means that La Mariscal area is vulnerable to the occurrence of an earthquake greater than 6 Mw that can cause damage to the population and its public and private infrastructure as well as to the environment and the economy of the sector [9]. In this sector there were four earthquakes of 6 and 7 Mw indicated within the green rectangle of Figure 1.

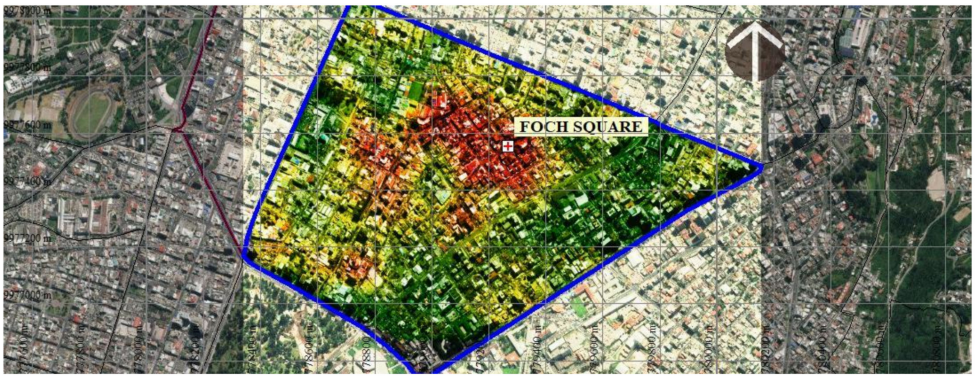


Figure 1. Concentration of economic activities in the La Mariscal neighborhood. The sectors with the largest agglomeration of productive economic activities (red). The sectors with the lowest agglomeration of these activities (green).

In addition to the loss of human lives, earthquakes cause serious impacts on residential areas and urban systems, including disruptions in the operations of the urban structure, damaging streets and roads that affect connectivity and accessibility to different areas and disable the normal use of the city. In this context, the urban structure of the city before and after an earthquake provides an important basis for the city's activities to continue to function in a minimal state and play a key role in the resistance of the urban system to such hazards [10]. Understanding what the state of previous seismic susceptibility is and how an earthquake affects the behavior of the city and its urban structure, becomes a basis for territorial planning, the design of strategies to reduce this hazard and plan the actions of immediate response during and after the earthquake.

From the point of view of space syntax, the built urban space structure is closely related to the operation of the city and the use given by its inhabitants [11]. There is a strong correlation between the spatial patterns of human movement and the socioeconomic processes that have an impact on the urban spatial configuration. These patterns influence the use of the land [12] and the distribution of commercial and residential functional areas [13]. From this perspective, the analysis based on the spatial configuration as a mean to understand the operation of the city, represents an important tool to evaluate the impact on the patterns of the urban structure caused by an earthquake.

After an earthquake, the process of evacuation of the population must begin automatically and be autonomous [14], from the location of meeting points, escape routes and safe places that generally, in situations of chaos during evacuation, people face problems in making decisions regarding the search for these routes and as a result, evacuees tend to use any type of recognizable routes as possible evacuation paths that must be specified as safe [15].

Because the evacuation behavior of people has been closely associated with normal or routine movement patterns that are used daily [16], the concept of guidance that directs people through physical environments and improves their understanding of space, focuses on the person and their abilities to know their daily physical space, especially the streets where they travel and the places where they usually attend. This daily knowledge can be used to develop a signaling network in emergency situations, with the purpose of developing a network of possible safe evacuation routes for the population.

Several researchers have demonstrated through experimental tests that individual spatial decisions in signaling behavior are strongly affected by the spatial configuration of the built urban environment [17]. In this context, the theories of space syntax have tried to understand the way in which pedestrians move around their environment, showing through "natural movement" that the configuration of the street network is the main pattern generator of pedestrian movement to and from the buildings where they carry out their daily activities [18]. This argument becomes a fundamental issue when analyzing the behavior of people during the emergency and the selection of factors that influence their orientation from a spatial perspective in vulnerable areas [19].

Given the strong correlation between the population movement flows observed in the concurrence centers of the study area and those determined with the space syntax, this work suggests that spatial structures located in areas with high seismic exposure in this part of the city, must be analyzed before a destructive earthquake occurs through the relationship: deformation of the land - transit-concentration of the population, including the road network and open spaces (parks and green areas). This analysis allowed to identify the meeting points and streets with low or no exposed that people use daily and that may be the most likely routes to be selected as a safe evacuation to guide people to safe areas in case of emergency.

2. Materials and Methods

The Mariscal area of the city of Quito, capital of the Republic of Ecuador, has been selected for this study. This neighborhood is one of the areas with the highest seismic susceptibility of the city and is an area with high diversity of economic activities, with high levels of population agglomeration. This activity is especially characterized by the presence of business, centers, and is considered as "Zona Rosa", where most of the bars, restaurants and entertainment sites are located. Figure 1 shows a graph presented by the Special Plan team "La Mariscal"-STHV-DMDU-2017 [20] in which the sectors with the largest agglomeration of productive economic activities represented in red are compared with the sectors of smaller agglomeration of these activities in green color. The concentration of establishments is located in economically strategic sectors or centralities. For example, the sector of Foch Square and its immediate environment that has the largest agglomeration of establishments, followed by Colon Avenue and the south-western administrative sector, close to Patria Avenue and August 10 Avenue.

This study does not focus the theories on atmospheric phase screen (APS) and PS-InSAR time series analysis methodology and spatial syntax analysis, but will briefly review its theoretical concepts. This study refers more to the results in the analysis of the surface deformation of the land (displacement of the land), the concentration of the urban spatial visibility of the constructed space network-population density and its exposure to the occurrence of an earthquake greater than 6 or 7 Mw.

The study in this part of the city was carried out to understand the role of the urban structure in relation to an earthquake before the seismic event occurs. In a first phase, soil deformation was analyzed using the atmospheric phase screen (APS) and PS-InSAR time series analysis methodology. In a second phase, the theory of space syntax was applied to understand the structure and functioning of La Mariscal before the earthquake, based on the analysis of spatial properties and the distribution of urban centers. To understand the syntax of space in socioeconomic development, this work focuses on determining the relationship between the population and the level of urban structural development of the neighborhood. In this case the level of urban structural development of La Mariscal, has a high degree since the population has at its disposal all municipal and private security, health, health, education, commerce and entertainment services, with buildings of reinforced concrete structures, with first class streets and avenues, which makes it more sustainable. This shows that the street network of this neighborhood and its accessibility, facilitates neighborhoods to have integrated socio-economic processes that lead to better environmental, social, economic and population welfare conditions. Unlike the peripheral districts of the city that are segregated and do not have integrated urban space structures and do not have basic sanitary, health, education, construction or trade services for their well-being.

Finally, these two phases were related to spatially delimit the surface deformation of the soil (soil lifting-subsidence-accumulated displacement) with the density/flow-transit of the population. Figure 2 shows La Mariscal area that is located in the central part of the Quito city (green polygon) and its relationship with geological faults (red lines), more intense earthquake epicenters (red crosses) that influence the stability of this sector. In La Mariscal there have been four earthquakes of 6 and 7 Mw.

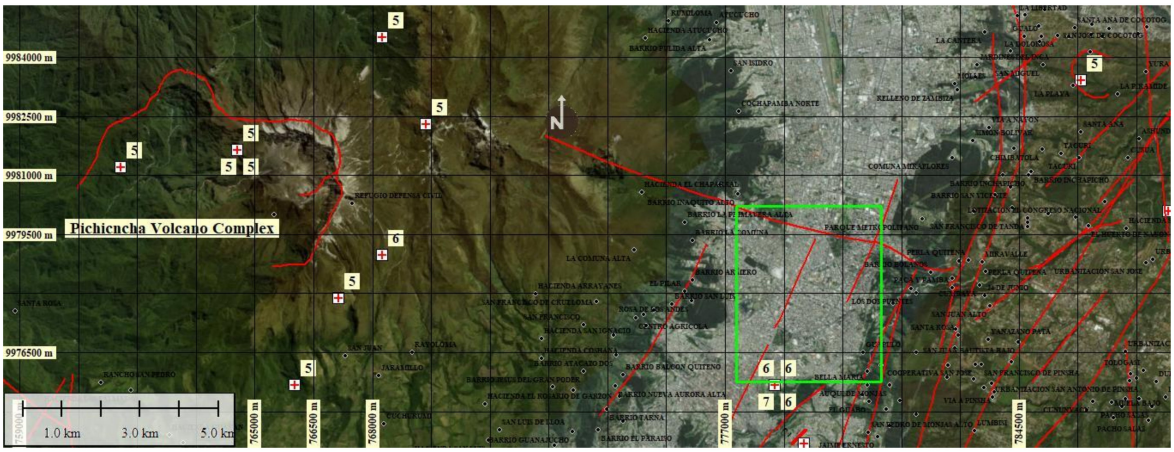


Figure 2. Location of La Mariscal in the Quito city (green polygon). Geological faults (red lines) and earthquake epicenters (red crosses). Base image source: Esri, DigitalGlobe, Google https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer.

2.1. Phase 1: Interferometry of Synthetic Aperture Radar. Brief Summary of the Atmospheric Phase Screen (APS) Estimation & Multi-Temporal Analysis Methodology

The relief deformation and the accumulated displacement were performed with SARPROZ software [21,22], which has a wide range of tools for multi temporal–PS-INSAR processing. The flowchart of the procedures of this phase can be seen in Figure 3, which shows Sentinel 1A and 1B images obtained from the Alaska Satellite Facility [23]. These images correspond to a stack of 32 scenes with Level-1 single look complex (SLC), from 2 September 2015 to 28 November 2019.

One of the main limitations in measuring ground deformation using synthetic aperture radar interferometry (InSAR) is atmospheric phase delay effects. In volcanic regions, as in this case, the atmospheric phase delay effects can cause serious problems in detecting volcanic unrest because atmospheric thickness is inversely related with the elevation of a volcanic mountain. It is commonly known that the atmospheric phase screen (APS) can be decomposed spatially into stratified and turbulent components.

In this study the APS to atmospheric noise reduction and persistent scatterer interferometry methodology is applied to time series analysis. SAR images, acquired by Sentinel 1 A and B, are used to derive ground displacement maps and deformation scenarios for La Mariscal area.

Regardless of the current occurrence of an intense earthquake, SAR images were used, covering the period between 2 September 2015 to 28 November 2019, to analyze using the PS-InSAR technique in a 32-cell stack. PS-InSAR images, the soil displacement characterized by long-term millimeter accuracy. Persistent scatterer PS-InSAR, also called coherent target monitoring (CTM), is an InSAR stack processing technique that uses multiple images taken at regular intervals to achieve improved measurement results. Stack processing allows surface movement to be determined by the temporal variation of phase for each pixel over time. The method focuses on stable and precise dispersers that do not suffer noise and provide a deterministic signal. These are the called persistent scatterers (PS) and they provide a stable phase history during the time period of image acquisition. The PS phases are stable over time and do not suffer from temporal decorrelation, allowing long-time observation and deformation monitoring.

Considering that the complete theory of this method is not the central theme of this document, the procedures followed are described:

Procedure 1: Prepare the SLC Data Processing (A). This is a standard procedure to import or update data extracted from Sentinel 1 images. Select data set: import single look complex (SLC) Sentinel 1A-1B stack images. Set orbits to read and set the orbits of the scene. Master and slave images extraction; Select master image: the software can automatically select master images, but the master image can also be selected manually In the stars graph of Figure 4A, the master image is near the middle of the

temporal and perpendicular baseline domain between Sentinel 1A images to the left and 1B to the right, to try to minimize the effects of normal and temporal baselines; Select slaves images. Coregistration parameters: with this procedure, it was possible to place the pixels of the master image with the slave images with the same corresponding pixels to perform interferograms correctly.

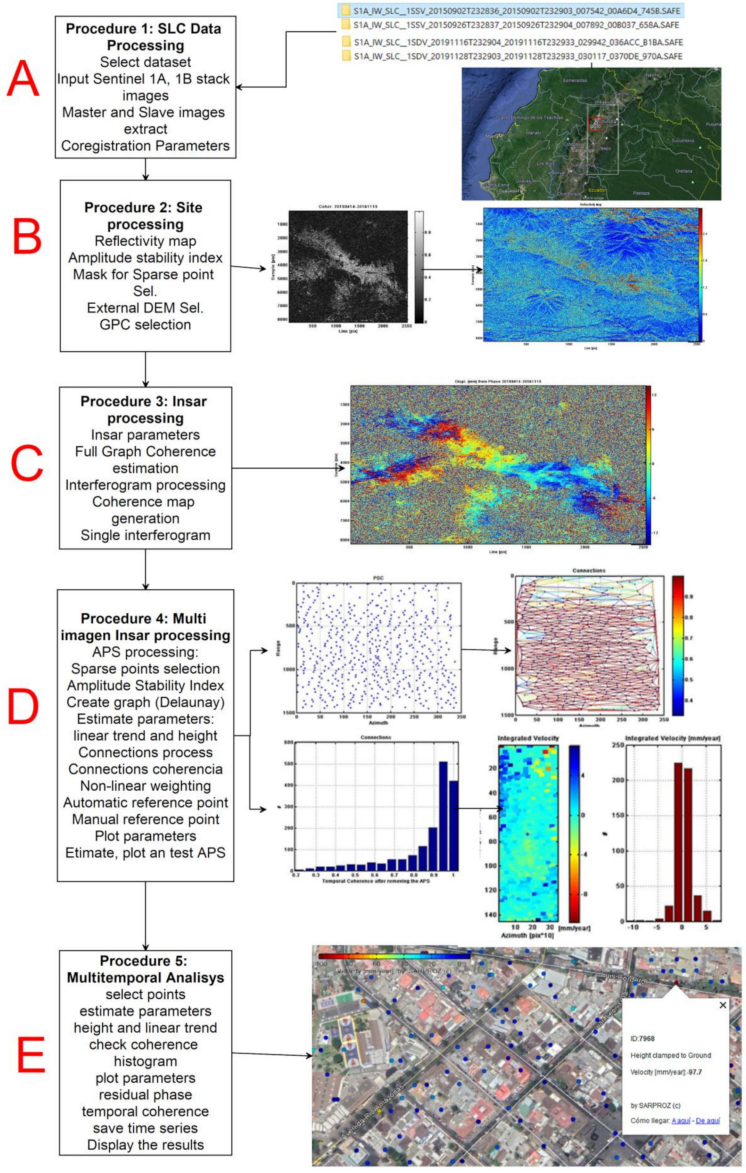


Figure 3. The SARPROZ software procedures used to obtain ground deformations by atmospheric phase screen (APS) estimation & multitemporal analysis. Description for (**A–E**) is given inside the figure.

Procedure 2: Site processing (B). Preliminary anlalysis. Reflectivity map: with this function the software generates the reflectivity map as the temporal average of all images of the dataset that have been chosen to process. Amplitude stability index: is a single number which gives a statistical property of the amplitude series. Mask for sparse point selection: a threshold of the amplitude stability index value will be inputted, with values greater than the threshold to be selected and the remaining will be masked. Figure 4B. External DEM selection: used to remove the topographic phase and geocoding images. Ground control point (GPC) selection: used to orbital correction, geocoding, nterferogram flattening, persistent scatterers. Full graph coherence: used to estimates the coherence of all possible connections (interferograms) in the images space.

Procedure 3: Insar processing (C). Insar parameters: with this option, the parameters for INSAR processing are chosen. Full graph coherence estimation: used to read the interferograms according to loaded images graph and calculates the spatial coherence map as the average coherence of the set of current interferograms. Interferogram processing: used to processes interferograms according to the loaded images graph. An interferogram is generated between the master image and each of the slave images. Coherence map generation: used to read the interferograms according to loaded images graph and calculates the spatial coherence map as the average coherence of the set of current interferograms. Single interferogram: used to choose freely one interferogram to process and visualize any of the slave images between the master image.

Procedure 4: Multi Imagen Insar processing (D). Atmospheric phase scree (APS) estimation. Sparse points selection: used to select PS candidates (the reference point is generally placed at a location that is stable in terms of deformation), create a graph, estimate the parameters and finally use the residuals to recover the atmospheric phase delay. The PS candidates in the urban area of La Mariscal, correspond to the constructions of the existing buildings which remain stable over time both in radiometry and in the interferometric phase [24]. The image stack used was the most important factor for the pixel coherence estimation, since it allowed identifying suitable PS for the ground displacement analysis. Insufficient use of images will produce an overestimation of coherence throughout the scene, resulting in an overestimation of the PS, therefore, in false displacements. PS identification is generally considered reliable when 20 or more images are used. Estimate APS: PS-InSAR processing is affected by different atmospheric conditions at the acquisition time. APS atmospheric noise reduction is important as it improves the response signal in coherence and phase of the images to obtain more accurate terrain displacement data. It is estimated using spatial temporal filters. The estimated APS was removed from the results. The remaining phases are used to estimate the topographic height error and linear deformation velocity.

Procedure 5: Multitemporal Analisys (E). From the previous atmospheric noise reduction procedure, the radar interferometry multi-temporary interferometry analysis was applied: MT-InSAR for persistent scatters (PS). This procedure allowed the identification of dispersers whose signal is dominant within the total dispersion of the observed cell. This is the last process in the generation of the deformation map. It consists of an estimation of the strain rate from the time series obtained. The time series deformation maps obtained are made up of thousands of PS. Each PS is associated with the value of the annual linear velocity (mm/year), estimated during the analyzed period and the accumulated displacement on each acquisition date of the sensor. Finally, to ensure the results of height, velocity and accumulated displacement, the process to reduce atmospheric noise that can cause false signals and interpretations is quickly detailed. This noise was reduced by applying the APS estimation tool.

A prerequisite in the analysis with PS-INSAR is that the signals along time series of SAR images must remain consistent for the extraction of PS points and analyze their dispersion. In this case, to measure the relative displacement and accumulated displacement based on a reference point, a stable point (an artificial construction anchored to the ground, for example) was selected whose peak in the histogram has a residual height of value 0 indicating that this reference point is on the ground (points that are not on the ground are more likely to be unstable).

PS-InSAR measures the movement relative to this reference point, therefore it is important to select a point that is more stable as a reference point.

The program chooses the Persistent Dispersion Candidates (PSC) points based on their location in a connection network based on a threshold value with coherence greater than >0.8. These points are generally parts of artificial civil structures to analyze the dispersion of amplitude stability around those points, drawing a coherent point connection network (Delaunay's spatial connection graph). This procedure estimated the coherence of the connections in the parameters analyzed at each point of the network with a linear trend such as height and travel speed. Finally, a high temporal coherence of the connections of points in the network was obtained.

After estimating the previous parameters with high coherence, the atmospheric noise was removed. The analysis performed in this article performs the INSAR analysis under the concept of estimating the APS to reduce atmospheric noise and time series multitemporal analysis, with a stack of 32 images (2015–2019) that allowed to determine the movement of the topographic surface according to the variation of the phase for each pixel in time. The number of images in the stack (32 images) were chosen which showed a coherence greater than or equal to 0.65. See Figure 4C. The APS atmospheric noise estimation with high coherence for the whole set of points through the use of inverted residuals (IR) and the analysis of noise from other sources was processed with a non-linear spatial distribution (few points, points too dispersed or orbital inaccuracies), ensuring that the final coherence is satisfactory.

The integrated velocity and integrated accumulated displacement were calculated taking into account that the accumulated displacement = speed × time. At the reference point, the peak of the integrated velocity histogram and integrated cumulative displacement is tending to zero. This means that most points have zero relative velocity when approached and compared with the reference point.

The histograms helped to verify that the connection velocity and the residual height of the connection, in checking the distribution of the residual velocity/height value, are consistent as seen in the Figure 5A–C, where a histogram is seen without jumps and high coherence (connection lines with a tendency to red), Figure 5D.

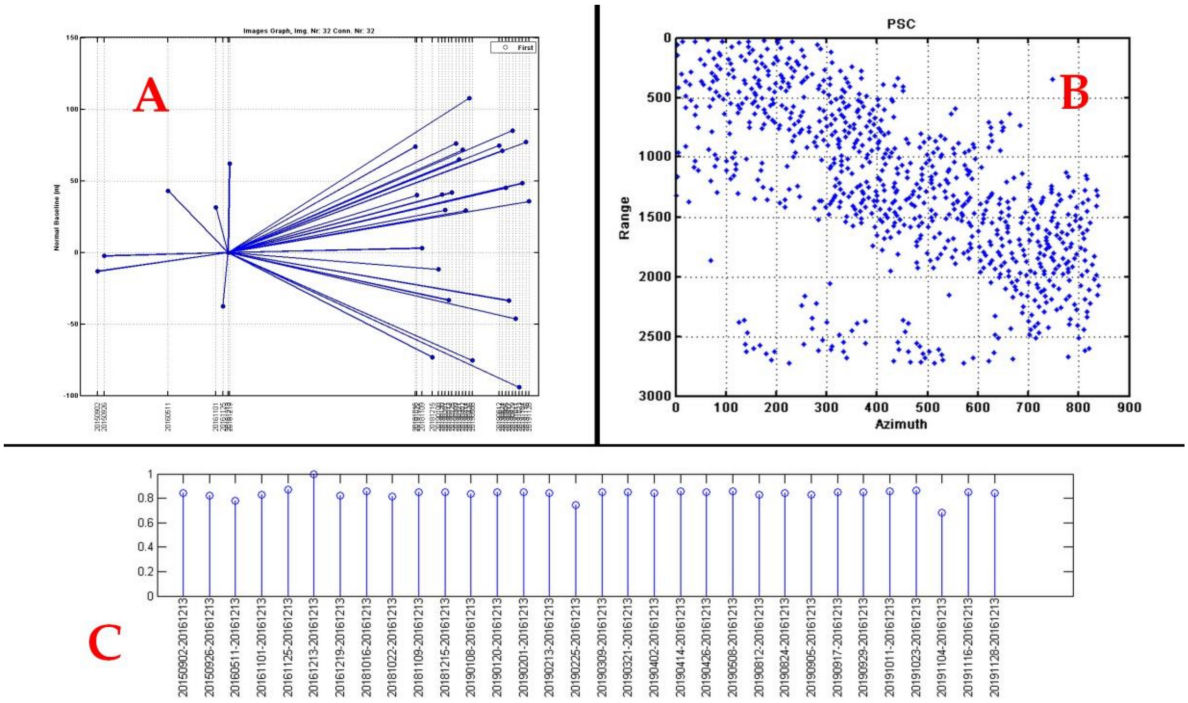


Figure 4. (**A**) Graph showing Sentinel 1 dataset analyzed in the normal baseline-temporal space, where each point and line represents an image and an interferogram, respectively. (**B**) Plot of sparse point selection. (**C**) The number of images in the stack with coherence greater or equal to 0.65.

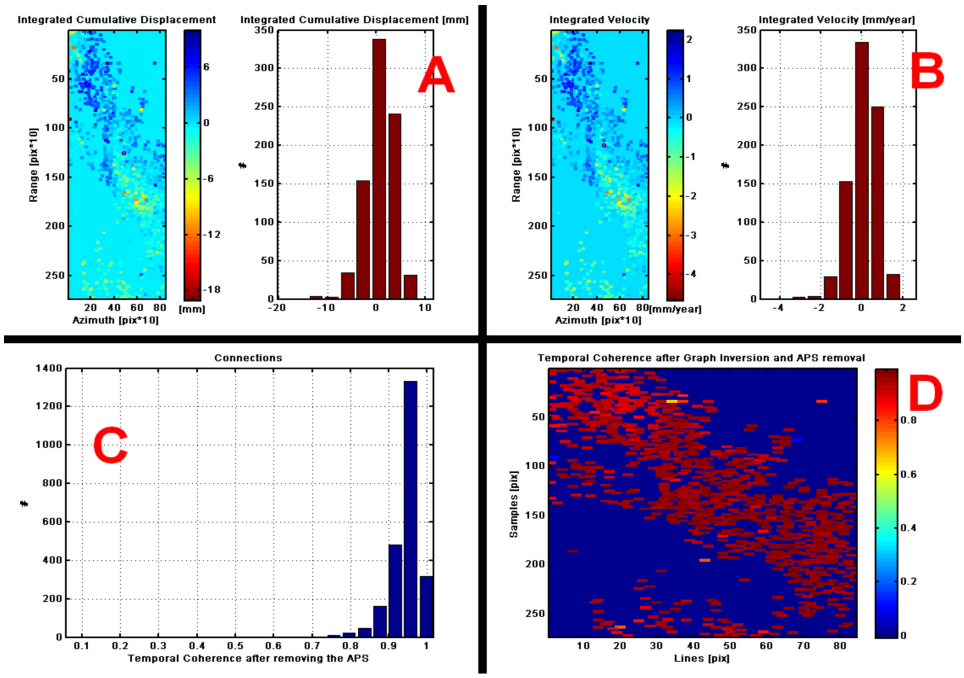


Figure 5. (**A**)The plot of integrated cumulative displacement histogram of connections, (**B**) Integrated velocity, (**C**) Histogram and (**D**) Temporal coherence after APS remove.

Subsequently, a multi-time analysis without atmospheric noise was performed based on the "amplitude stability index" and from a threshold from which a set of points of the connection network was chosen to calculate the time series (5277 points) (Figure 6A,B).

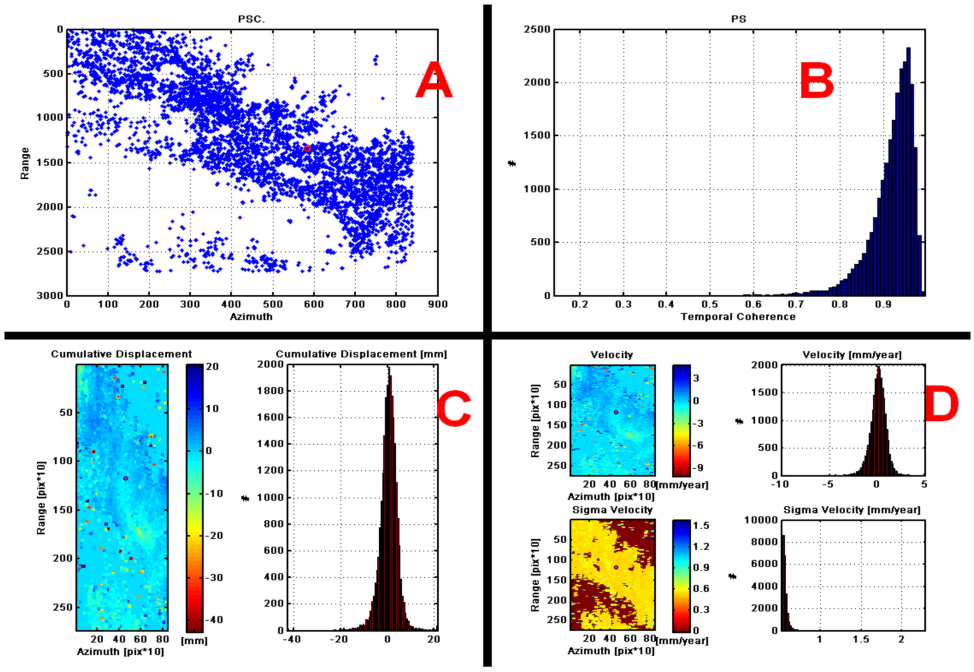


Figure 6. (**A**) 5,277 points for multi-time analisys without atmospheric noise. (**B**) Histogram of scattered points to check the multitemporal analysis of coherence for the estimation of accumulated displacement (**C**) and velocity (**D**).

The height and the linear trend were estimated between probable ranges of [−20, 60] and [−20, 60] respectively, to analyze the temporal consistency selected. In this case, the consistency was high, so the estimation of the estimated parameters (cumulative displacement, velocity) improved (Figure 6C,D).

Dispersion diagrams were used to verify the results that were previously processed based on the coherence and stability of the points dispersed in the time network calculated in relation to a threshold value of 0.8, obtaining velocity dispersion diagrams for each point in the area, Figure 7A and the displacement and speed in a series of time between 2015–2019, Figure 7B.

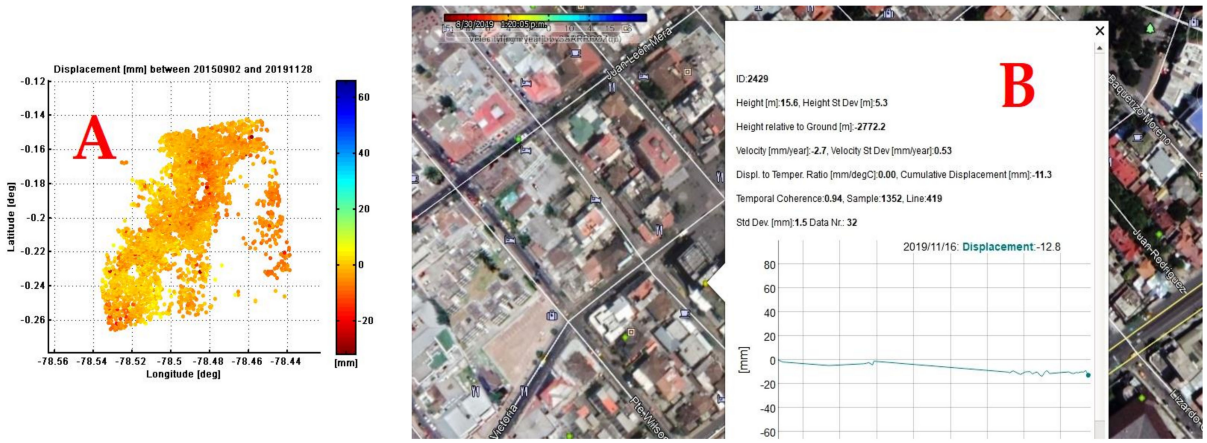


Figure 7. (**A**) Scatter plots of velocity for each point of the area. (**B**) Multi-time displacement and velocity analysis (2015–2019 series).

2.2. Phase 2: Analysis of the Space Syntax (Brief Review of the Method)

Space syntax is a set of techniques to analyze spatial designs and patterns of human activity behavior in buildings and urban areas. It is based on the idea that all spaces in an urban environment are interconnected and that their parts are linked together. This geographical approach was created as a tool to help architects simulate the possible social effects of their designs, by Hillier, Hanson and others in the late 70s and early 80s of the last century [25,26].

With this theory, human spatial behavior in urban environments can be predicted and urban morphology (the shape of cities) can be analyzed. In addition, the spaces can be broken down into components, which are analyzed as networks of choice in maps and graphs that describe the relationship of integrity and connectivity of those spaces [27]. The space syntax in this study has been applied based on two fundamental components [28]:

(1) Space representations: Spatial elements are represented through their geometric shapes and how people experience them. They can be derived geometrically (for example, point, axial line, segment, convex and isoview space) or defined functionally (for example, rooms in the building). Axial line, straight line (the longest straight line that represents the maximum extent of a spatial point. This axial line can chain two polygons or convex spaces). Segment (it is the section of the axial line or street or road that extends between two intersections). Isoview, visibility polygon or visible space (it is a set of all visible points from a given point of view in space with respect to an environment. The shape and size of an isoview can change with position). Convex space or polygon (is that space in which no straight line drawn between two points). Axial lines and convex polygons are known as axial maps or convex maps.

(2) Spatial relationships analysis: The relationships between spatial elements result from its configuration. These relationships can be objectively analyzed using various measures, including integration, choice and depth. These measures reflect the two fundamental elements in the human movement: first, the selection of a destination and, second, the selection of a route. One measures the ease of access (integration) and the other measures the step flow (choice).

Integration (measures how many turns must be done from one segment of the street to reach all other segments of the street in the network, using the shortest routes. If you analyze the number of turns required to reach all segments in the graph, it is said that the analysis measures the integration in the radius 'n'), the choice (which represents the number of intersections that must be crossed to reach a street), and depth distance (the linear distance from the central point of each street segment to the central points of all other segments).

In this study, space syntax was used to know where people are, how they move, concentrate and relate to each other, depending on the urban structure and land use. With these concepts, based on the intensity of the seismic exposure (accumulated displacement with INSAR), the transit-concentration of the population and the level of ease in the displacement from a vulnerable to a non-vulnerable space by safe routes were quantified.

To analyze the relationships of the basic spatial elements, the open source DepthmapX [29,30] program has been used. The objective of the software is to produce a map of open space elements, connect them through some relationship (for example, intervisibility or overlay) and then perform a graphical analysis of the resulting network. In Figure 8 can see the process flow used for spatial analysis with DepthmapX.

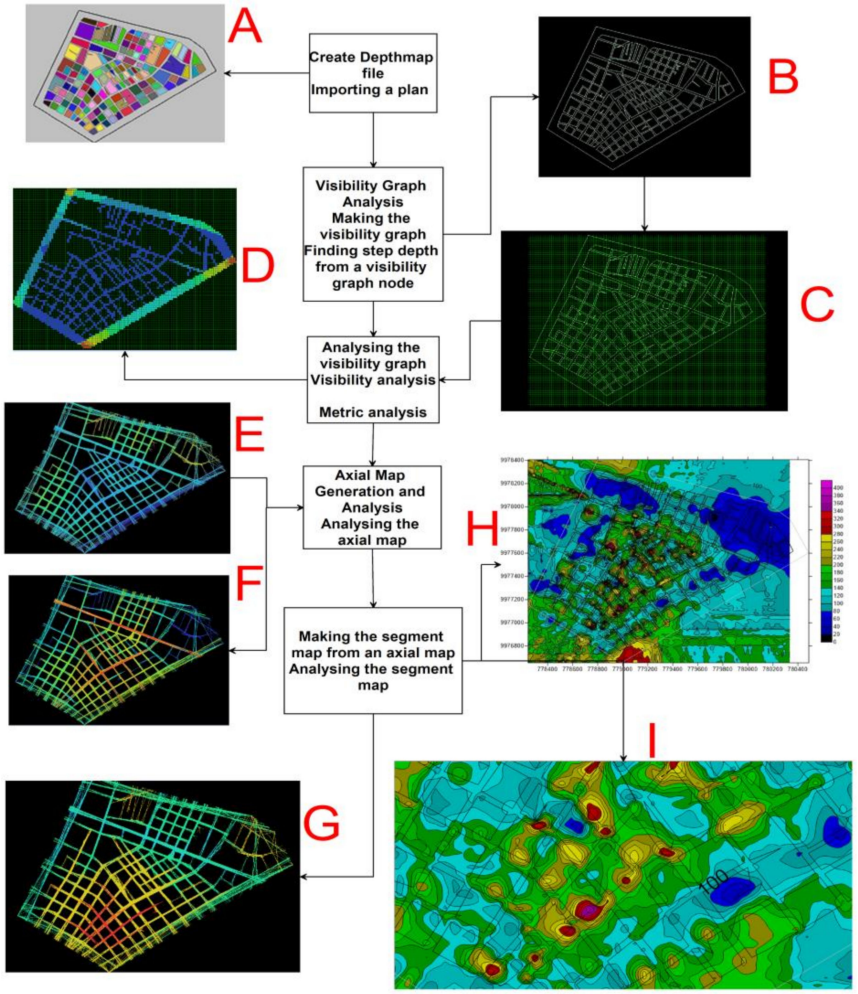


Figure 8. Flow process diagram with DepthmapX used to analyze the spatial relationships of the basic spatial elements, according to the theory of Space Syntax. The description of each process (**A**–**I**) is described in the text.

The process begins with the definition of population movement and land occupation, as the fundamental functions of an urban design, where the possibility of population transit (permeability) in all areas is the priority condition for a functional design structure [31].

A representation of the spatial structure of La Mariscal (A) has been drawn on a convex map of 2D houses and the structure of the open space of the building blocks (B). An axial map can be the minimum set of lines that pass through each convex space, lines that form the axial links. The urban space (A) can be represented by the set of smaller, longer and more passable axial lines. These axial lines are represented by a graph (C).

The different connectivity values (degrees) for each vertex are highlighted. The vertices that have more connections with their immediate neighbors will have greater connectivity (colors with a tendency towards red) (D), these connectivity values are illuminated on the axial map to reveal the local network structure of the street spaces (E). To make the axial map of a block, DepthmapX first found the longest straight line that can be drawn in continuous space. Then, the second longest line continues to draw all the lines that can be joined without repeating them [32]. This process was developed in the following depth map based on the topographic map in which the blocks and streets of the sector have been delimited. In a following process (D) based on the 2D topographic plane, the visualization integration graph was prepared, for which in DepthmapX a grid was activated in order to get the locations of visibility points from which this graph was drawn and finally the VGA visualization graphic within the boundaries of the neighborhood was analyzed, with display radios between 200 m, 400 m, 800 m and radius "n" that takes into account the entire urban network (D).

Accessibility to buildings is carried out through streets and open spaces, which are indicators to know how people move around these architectural elements. These connectivity values are then illuminated (tendency towards red) in the axial map to reveal the structure of the local network and the relationship between streets and spaces (G.), which are generally the ones that show the greatest movement of people and pedestrian density. Finally, the intensity maps of visualization and pedestrian flux-density were transformed to raster-grid (I) formats, to later integrate them with the accumulated displacement maps obtained with PSI-INSAR to predict the exposed of buildings where social activities are developed and daily economic conditions that may be affected by a major earthquake [33].

In this analysis, open spaces (parks, greenways, reserves, etc.) were integrated, including public open spaces (streets and squares) and private open spaces (gardens, playgrounds) [34]. In the event of an extreme earthquake, these open areas become a refuge for victims and a temporary home for thousands of people who need to adapt quickly to their new environment for days, months or even years after the earthquake.

This proposal also focuses on "the projection of the city after the earthquake", which is defined as a projection of the urban structural system that may be affected by its partial or total destruction and the creation of non-accessible areas (fractures in civil structures, subsidence and collapses) [35,36].

3. Results

The results of the accumulated displacement obtained from PS-INSAR in millimeters for the period 2 September 2015 to 28 November 2019, can be seen in Figure 9A and has a total symmetrical process range between −20 to 60 mm. The adjusted data of the multitemporal series show a range of movement in the La Mariscal area between 4 and 15 mm per year, a range compatible with the system of blind geological faults sections of the Quito fault with NS orientation, which has an estimated maximum lifting rate of 0.8 mm/year [37].

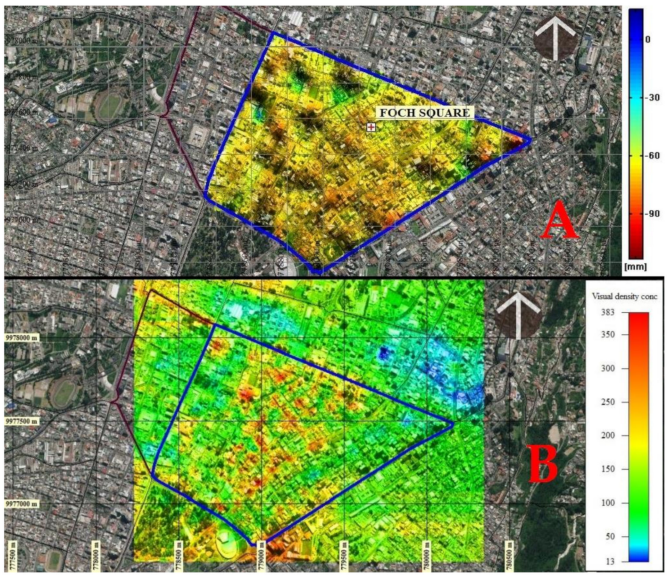


Figure 9. (**A**) Results of cumulative displacement obtained from INSAR, 2015–2019 period. In (**B**) Visual integration in the sector. The colors towards the red represent ground lift and in blue subsidence on the accumulated displacement map. Colors with a tendency towards red represent greater visibility on the vsisibiity intensity map. Graphical scale 1,10,000.

In (B) the visual integration from various points of view within the area of study is presented. In both cases the red colors represent the greatest accumulated displacement and greater visibility that implies greater population flow and concentration.

The integration of the processes (I) in the flowcharts of the two methodologies used simple map algebra by intersection, addition and multiplication of interpolated files on the same annual accumulated displacement scale and population density visualization concentration. This process was performed in QGis [38–40].

This integration of results determined that the areas are exposed to deformations of high to very high intensity due to the accumulated displacement of the soil and the intense density of population concentration (colors with a tendency to red) that can possibly be destroyed by an earthquake. These areas correspond to the central part of the neighborhood with 59.712% of total buildings and segments of vulnerable streets from Avenida Colón in the north to Avenida Patria to the south and from Avenida 12 de Octubre to the east, to the 10 de Agosto Avenue to the west. The concentration of traffic, density and flow of pedestrians are generally found in this area and in the upper northwest corner there is an area of very high exposure on Luis Cordero Crespo Street and south on 6 de Diciembre Avenue (Figure 10).

The exposure range value (low, medium, high and very high) was compared with the study of vulnerability of seismic risk for residential structures located in the urban parish of La Mariscal, prepared by Parra et al. [9]. According to this study, the largest number of buildings that would reach or exceed extensive structural damage is in the range of 27.8 to 39.1%, and is in the La Mariscal area. This study was based on the identification of constructive typologies in the area to which the author assigned a type of vulnerability differentiated by its constructive structure, in addition to a characterization of the seismic hazard scenario, identification of load capacity curves, mainly of typologies constructive Finally, the author of that study calculated the structural and non-structural damages of the buildings, using the fragility curves corresponding to each typology in a HAZUS classification [7] with the following degrees: none, mild, moderate, extensive and integral.

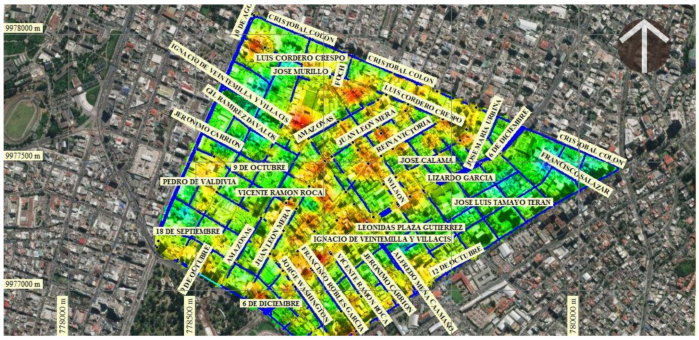


Figure 10. The integration of the information obtained by PS-INSAR and the Analysis of Spatial Syntax determined the existence of several constructed areas exposed to intense deformation-speed of displacement of the land very susceptible to an earthquake greater than 6–7 Mw (colors with tendency to red).

This comparison determined that the exposure analysis of the population concentration-instructions, considering the PSI-INSAR methodology-Analysis of spatial syntax and the study of Seismic Risk carried out by this author, are complementary since there are coincidences between the parameters of the maximum population concentration of accumulated displacements proposed in this study with the degrees of seismic vulnerability obtained in the mentioned study. This coincidence can be seen in Figure 11 in which (A) shows the sector of Foch Square and its surroundings, which are the sectors with the largest agglomeration of economic-productive activities represented in red and where the seismic model located areas of Very high to high vulnerability (B), coinciding with the results obtained in this proposal (C).

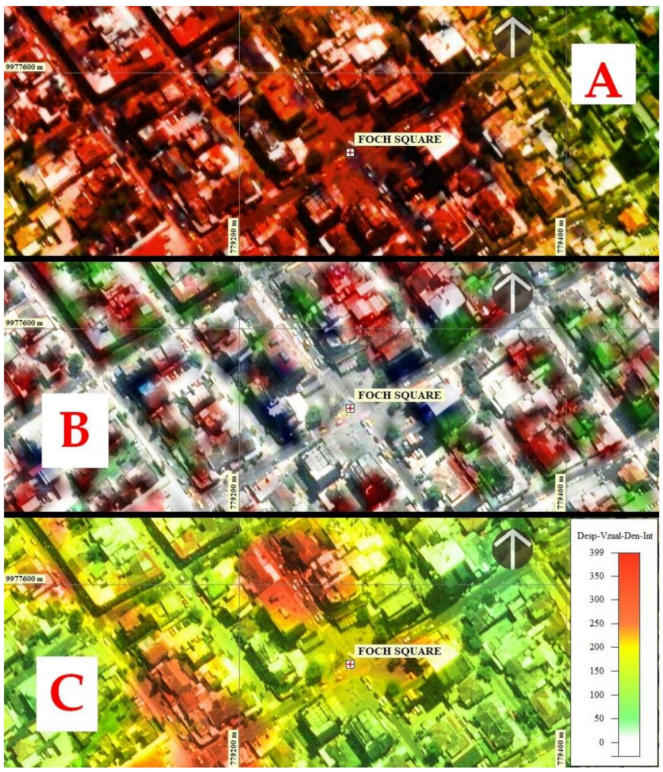


Figure 11. Concordance between the methods applied to determine exposure-vulnerability in Foch Square, considering INSAR-space syntax and the seismic risk study prepared by Parra [9]. (**A**) Foch Square and its surroundings. (**B**) Very high to high seismic vulnerability. (**C**) Busiest places in the sector.

There is a high degree of coincidence between the two methodologies in which the intensity of the degree of moderate seismic vulnerability (green color) to complete (red), coincides with the degree of exposure of the average (yellow-orange) to very high (color with a tendency to red) presented in this article.

In Figure 12A, the degree of exposure of buildings has been represented based on the accumulated displacement in mm for the 2015–2019 period and the visual concentration and population density. Areas exposed to high to very high exposure are represented with a color that tends to red, areas of medium exposure with colors to yellow and areas of low-no exposure has been represented with colors that tend to green-blue respectively. Figure 12B shows the histogram of the standardized exposure intensity of buildings where 1 is none, 2 low, 3 medium, 4 high and 5 very high. The histogram represents the frequency of buildings against exposure.

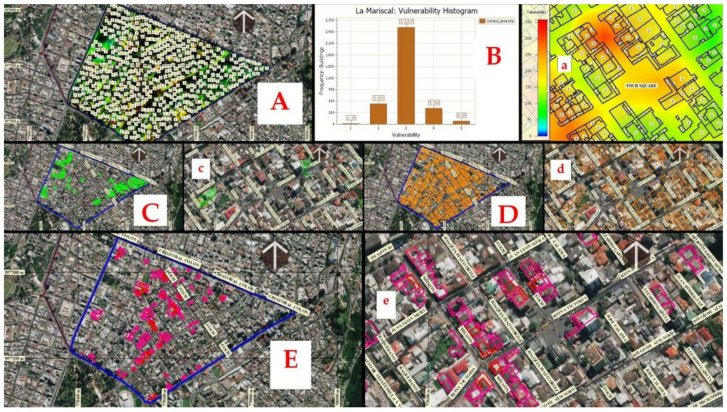


Figure 12. Buildings exposure based on accumulated displacement for the 2015–2019 period and density of population concentration. (**A**) Degree of exposure of buildings based on accumulated displacement. (**B**) Standardized exposure intensity histogram. (**C**) Foch Square, the busiest place in the sector. (**D**) Buildings with medium exposure. (**E**) Buildings with high and very high exposure. In (a, c, d, e) Foch Square, the busiest place in the sector.

Figure 12C shows 16 buildings without exposure and 531 buildings with low exposure. In Figure 12D, 2517 buildings with medium exposure were represented. In Figure 12E, 416 buildings with high exposure and 85 buildings with very high exposure can be seen. According to the exposure analysis of the constructions of the sector of Figure 8, the exposure of medium to very high degrees implies that in case of an earthquake of more than 6–7 Mw, the streets of the neighborhood can be partially or totally destroyed. Depending on the intensity of exposure of the streets of the sector, the best known and least exposed routes to be destroyed that the population uses daily have been located and will serve as safe escape routes to reach low exposure areas (green-blue safe areas). In (a,c,d,e) Foch Square images, the busiest places in the sector.

The exposure of the streets in general is seen in Figure 13A All streets, exposed and unexposed. In Figure 13B the streets exposed and capable of being destroyed before a major earthquake are shown in red with a length of 19.42 km corresponding to 67.6% of the total streets and those not exposed with 15.41 km of blue, with 32.4% of the total of streets. In (C), the vectors of the most exposed streets are seen with intensities from high to very high. In (D) the vectors of the streets of medium, high and very high exposure are seen. The most exposed construction areas are within walking distance in some cases, such as in the sector between the intermediate streets of areas without exposure. The central part of La Mariscal and Plaza Foch are in the path of the Miraflores filled ravine and possibly the accumulated displacement obtained with PSI-INSAR is the result of the differential collapse of this filling. This landfill affects the entire sector, placing Plaza Foch in one at a very high degree of exposure, especially on one of the flanks of the creek (E) [18].

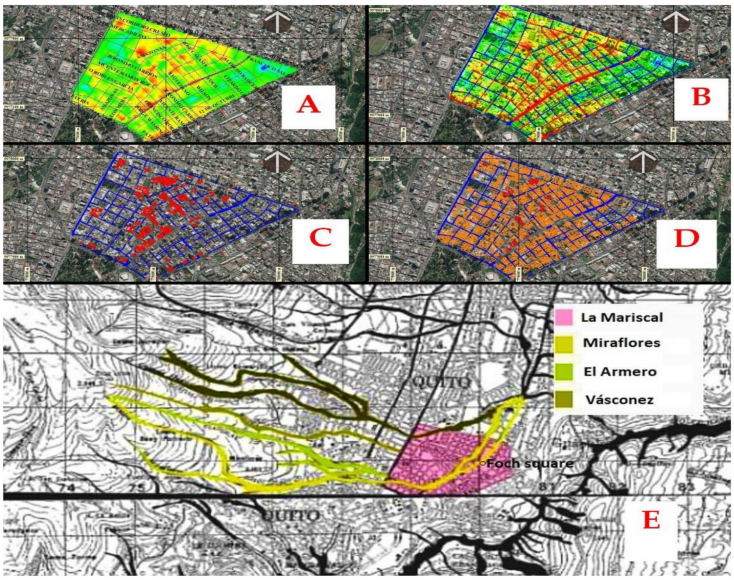


Figure 13. (**A**) All exposure of street. (**B**) Exposure streets with red and non-exposure streets in blue. (**C**) Street vectors with high to very high exposed. (**D**) Streets vectors of medium, high and very high exposure. (**E**) The full ravines and the position of the Foch square. The image is of low resolution from its origin [18].

4. Discussion

The proposed methodology to develop the exhibition map of the buildings in the neighborhood of La Mariscal, based on the accumulated displacement calculated with PS-INSAR and the spatial syntax (intensity of visual concentration-population density) is an innovative alternative complementary to the traditional seismological methods to improve the prognosis of the seismic threat and can serve as an early warning system in the event of an earthquake greater than 6–7 Mw.

The accumulated displacements, plus the intensity of visualization-density of population in raster format, were integrated into maps of exposed of the buildings in the same scale of work without having problems of geometric spatial corrections.

The detail obtained from exposed buildings is very different from the maps that can be obtained with methodologies that use traditional cartographic methods, due to the spatial resolution of the images, of the digital elevation model that in this case is 5 m and the equations of governance of the processes belonging to the employed programs.

The proposed methodology used by PS-INSAR and space syntax is a technique that provides a new vision of what happened and can happen with respect to the exposure of buildings and the population found in tectonically deformed areas and in landfills of filled ravines internal.

The parameters include displacements and the concentration of the population in amusement centers and public services in these filled ravines and can quickly determine and prepare forecast maps, creating alerts that will serve the authorities to take structural solutions to reduce these hazards.

The possible evacuation routes in some cases are surrounded by other exposed routes, so other alternatives have been chosen, such as evacuation routes that are not associated with the movement of the population's daily life patterns. The most exposed construction areas are within reach of safe escape routes and in sectors between the intermediate streets of unexposed areas. The location of safe escape routes depends on the intensity of the high and very high exposed areas in the study area.

In general, escape routes are close to the areas of greatest exposure that the population can reach in a very short time between 1 and 4 min. These times have been calculated by analyzing the speed of a person/distance traveled in QGis (complement of the road map), for which the distances are measured to reach all segments of the designated safe streets of the network from an exposed area

with a moderate speed of 2 m/s. These red-black double line routes can be seen in the sequence of A–F images in Figure 14.

Figure 14. Escape routes near the areas of greatest exposure that the population can reach in a very short time between 1 and 4 min (red-black double line routes in the figures from **A**–**F**).

5. Conclusions

The ease of unifying these two concepts of PS-INSAR analysis and spatial syntax allowed previously determining the exposure of the urban space network of La Mariscal in any of its parts, due to the occurrence of an earthquake greater than 6–7 or Mw.

The neighborhood of La Mariscal has areas with high to very high exposure, which represent 60% of its total area due to the accumulated displacement of the land and the population concentration flow. This implies that the population that travels and attends entertainment, recreation and public services centers are in very high exposure to a major earthquake between 6–7 Mw as those that have occurred historically.

The exposed polygon goes from Avenida Colón, on the northern edge, to Patria Avenue, on the southern edge and from 12 de Octubre Avenue, on the eastern edge, to 10 de Agosto Avenue on the western edge. After the analysis to identify segments of streets that have difficulty being used as safe evacuation routes (due to their high to very high exposure) was completed, streets have been identified that can be used as valid safe routes for the evacuation of the population to safe areas

The use of free information, such as Sentinel 1A images, digital elevation models and free software for spatial syntax analysis, such as DepthmapX, is a benefit for the investigation of this and other types of natural threats, such as mass movements and the floods.

The proposed methodology allowed us to obtain safe escape routes that can take the population to safe areas in case of an earthquake of more than 6–7 Mw. A beneficial coincidence was the concordance of the responses between the proposed methodology and the seismic model.

Coincidences that served to improve the interpretation of the exposure of the buildings and streets of the studied area, in case of an earthquake greater than 6–7 Mw.

This methodology can be proposed to the municipality of the city of Quito and to the municipalities of other provinces to reduce evacuation times and simplify the process of searching for safe routes. In addition, to improve response processes after the generation of a large earthquake, this is associated with the effective response in the evacuation process.

Although the methodology used and its potential to determine the deformations of the ground and the accumulated travel speed of PS-InSAR is very objective, there are several limitations that can determine erroneous results in results related mainly to technology due to the impossibility of reducing the signals false. Changes in the reflectivity of the ground cause radar de-correlation, which makes the InSAR phase illegible. In addition, atmospheric water vapor delays radar signals, making phase readings inaccurate. As for the spatial syntax methodology, there are no limitations for its use.

Author Contributions: Conceptualization, M.C.-J. and A.M.-G.; methodology, M.C.-J. and A.M.-G.; software, M.C.-J. and A.M.-G.; validation, M.C.-J. and A.M.-G.; formal analysis, A.M.-G.; investigation, M.C.-J.; resources, A.M.-G.; data curation, A.M.-G.; writing—original draft preparation, M.C.-J.; writing—review and editing, V.V.;

visualization, A.M.-G.; supervision, V.V.; project administration, M.C.-J. and A.M.-G.; funding acquisition, A.M.-G. All authors have read and agree to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by projects Junta Castilla y León SA044G18.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Herrera, G. State of knowledge on methodologies of seismic vulnerability assessment of buildings. *Rev. Ingeniería Soc.* **2013**, *8*. Available online: http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/IngenieriaySociedad/a8n1/art01.pdf (accessed on 10 November 2019).
2. Stornor, T. 2015 Past, present and future Space Syntax in practice. In Proceedings of the Conference on Space Syntax, Beijing, China, 5 December 2015; Available online: https://timstonor.wordpress.com/2015/01/11/past-present-future_space-syntax-in-practice/ (accessed on 10 December 2019).
3. Ismail-Zadeh, A. Extreme natural hazards and societal implications—The ENHANS project. In *Extreme Natural Hazards, Disaster Risks and Societal Implications*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2014; pp. 3–14. Available online: https://www.cambridge.org/core/books/extreme-natural-hazards-disaster-risks-and-societal-implications/extreme-natural-hazards-and-societal-implications-the-enhansproject/D7B17A560473839A6856E6D8C872360F (accessed on 21 November 2019).
4. Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A. Differential interferometry, structural lineaments and terrain deformation analysis applied in Zero Zone 2015 Earthquake (Manta, Ecuador). *Environ. Earth Sci.* **2019**, *78*, 499. [CrossRef]
5. Ruiz Rivera, N. La definición y medición de la vulnerabilidad social. Un enfoque normative. *Investigaciones Geográficas* **2012**, *77*, 63–74, Instituto de Geografía Distrito Federal: Ciudad de México, México. Available online: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56923353006 (accessed on 17 October 2019).
6. Naya, A. El Riesgo Sísmico en Quito: Análisis y Simulaciones. Master's Thesis, Nice Sophia Antipolis University, Nice, France, 2010. Available online: http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-12/010053328.pdf (accessed on 25 September 2019).
7. Chatelain, J.-L.; Tucker, B.; Guillier, B.; Kaneko, F.; Yepes, H.; Femandez, J.; Valverde, J.; Hoefer, G.; Souris, M.; Dupérier, E.; et al. Earthquake risk management pilot project in Quito, Ecuador. *GeoJournal* **1999**, *49*, 185–196. Available online: https://www.researchgate.net/publication/226524449_Earthquake_risk_management_pilot_project_in_Quito_Ecuador (accessed on 20 August 2019). [CrossRef]
8. Aguiar, R. Seismic Microzonation of Quito. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE. Instituto Panamericano de Geografía e Historia. IPGH. ISBN 978-9978-301-02-9. 2013. Available online: https://www.researchgate.net/publication/277305703_Microzonificacion_Sismica_de_Quito (accessed on 5 November 2019).
9. Parra, C.; Humberto, A. Desarrollos Metodológicos y Aplicaciones Hacia el Cálculo de la Peligrosidad Sísmica en el Ecuador Continental y Estudio de Riesgo Sísmico en la Ciudad de Quito. Ph.D. Thesis, E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía, Madrid, Spain, 2015. Available online: http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/2465/1/T-SENESCYT-01317.pdf (accessed on 25 November 2019).
10. Criado, M.; Martínez-Graña, A.; Santos-Francés, F.; Veleda, S. Integration of GIS technology in the urban planning to extend the city of Zamora, Spain. *Environ. Eng. Manag. J.* **2019**, *18*, 1399–1411. Available online: http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/issues/vol18/vol18no7.htm. (accessed on 25 November 2019).
11. Jguirim, I. *Functional and Structural Analysis of an Urban Space Extended from Space Syntax*; Naval Academy Research Institute: Brest, France, 2014; Available online: https://www.researchgate.net/publication/265521103_Functional_and_Structural_Analysis_of_an_Urban_Space_Extended_from_Space_Syntax (accessed on 15 November 2019).
12. Schmidtlein, M.; Wood, N. Sensitivity of tsunami evacuation modeling to direction and land cover assumptions. *Appl. Geogr.* **2014**, *56*, 154–163. Available online: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622814002690 (accessed on 15 November 2019). [CrossRef]
13. Mohareb, N. Emergency evacuation model: Accessibility as a starting point. *Proc. Inst. Civ. Eng. Urban Des. Plan.* **2011**, *164*, 215–224. Available online: https://www.researchgate.net/publication/256294101_Emergency_evacuation_model_Accessibility_as_a_starting_point (accessed on 15 November 2019). [CrossRef]

14. Kimura, M.; Sime, J. Exit Choice Behaviour during the Evacuation of Two Lecture Theatres. *Fire Saf. Sci.* **1989**, *2*, 541–550. Available online: https://www.iafss.org/publications/fss/2/541 (accessed on 25 October 2019). [CrossRef]
15. Emo, B.; Hölscher, C.; Wiener, J.; Dalton, R. Wayfinding and Spatial Configuration: Evidence from street corners. In *Proceedings: Eighth International Space Syntax Symposium*; Greene, M., Reyes, J., Castro, A., Eds.; PUC: Santiago, Chile, 2012; Available online: http://sss8.cl/8098.pdf (accessed on 25 October 2019).
16. Hillier, B.; Penn, A. Natural movement: Or, configuration and attraction in urban pedestrian movement. *Environ. Plan.* **1993**, *20*, 29–66. Available online: https://pdfs.semanticscholar.org/701b/a15fed53eaae5eb65c1460827cd1471f14fd.pdf (accessed on 15 October 2019). [CrossRef]
17. Hillier, B.; Iida, S. Network and Psychological Effects in Urban Movement. In Proceedings of the Spatial Information Theory International Conference, Ellicottville, NY, USA, 14–18 September 2005; Available online: https://link.springer.com/chapter/10.1007/11556114_30 (accessed on 25 October 2019).
18. Moris, R.; Walker, R. Reconstrucción de territorios vulnerables en un escenario de reconstrucción inequitativa. El caso de Pelluhue, Chile. In *Learning from 27F: A Comparative Assessment of Urban Reconstruction Processes After the 2010 Earthquake in Chile*; University y Santiago Research Cell: Santiago, Chile, 2015; Available online: https://www.researchgate.net/publication/322571214_Learning_from_27F_A_Comparative_Assessment_Of_Urban_Reconstruction_Processes_After_The_2010_Eathquake_In_Chile_coautor (accessed on 15 November 2019).
19. Allan, P.; Bryant, M.; Wirsching, C.; Garcia, D.; Rodriguez, M.T. The Influence of Urban Morphology on the Resilience of Cities Following an Earthquake. *J. Urban Des.* **2013**, *18*, 242–262. Available online: https://www.researchgate.net/publication/263555294_The_Influence_of_Urban_Morphology_on_the_Resilience_of_Cities_Following_an_Earthquake (accessed on 15 November 2019). [CrossRef]
20. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. 2018. Available online: https:www7.quito.gob.ec-/mdmq_ordenanzas/ComisionesdelConcejo/UsodeSuelo/2018/2018-07-30/6.PlanEspecialLaMariscal/PlanEspecialLaMariscal/Propuesta/ (accessed on 15 January 2020).
21. Perissin, D. SARPROZ Software Manual. 2015. Available online: http://ihome.cuhk.edu.hk/~{}b122066/manual/index.html (accessed on 15 October 2019).
22. Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A. Determination of Primary and Secondary Lahar Flow Paths of the Fuego Volcano (Guatemala) Using Morphometric Parameters. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 727. Available online: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/6/727/pdf (accessed on 15 October 2019).
23. Gens, R.; Logan, T. *Alaska Satellite Facility Software Tools Manual*; Geophysical Institute; University of Alaska Fairbanks: Fairbanks, AK, USA, 2003; Available online: https://media.asf.alaska.edu/uploads/Get%20Started/asf_software_tools.pdf (accessed on 22 November 2019).
24. Roccheggiani, M.; Piacentini, D.; Tirincanti, E.; Perissin, D.; Menichetti, M. Detección y monitoreo de movimientos de tierra inducidos en túneles usando la interferometría SAR Sentinel-1. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 639. Available online: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/6/639 (accessed on 22 November 2019). [CrossRef]
25. Sánchez-Sánchez, Y.; Martínez-Graña, A.; Santos-Francés, F.; Yenes, M. Index for calculation of future wine areas according to climate change. Application to the Protected Designation of Origin "Sierra de Salamanca" (Spain). *Ecol. Indic.* **2019**, *107*, 105646. Available online: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105646 (accessed on 22 November 2019).
26. Martínez-Graña, A.M.; Silva, P.G.; Valdés, V.; Elez, J. Environmental modelling of paths landscaped less impact for linear infrastructure in nature parks. Application in "Las Batuecas-Sierra de Francia" and "Quilamas" nature parks (Central System, Salamanca, Spain). *Environ. Eng. Manag. J.* **2019**, *18*, 991–999. Available online: http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/issues/vol18/vol18no5.htm (accessed on 22 November 2019).
27. Penchev, G. Using Space Syntax for Estimation of Potential Disaster Indirect Economic Losses. *Comp. Econ. Res.* **2015**, *19*. Available online: https://www.researchgate.net/publication/313784332_Using_Space_Syntax_For_Estimation_Of_Potential_Disaster_Indirect_Economic_Losses (accessed on 1 October 2019). [CrossRef]
28. Hillier, B. The hidden geometry of deformed grids: Or, why Space Syntax works, when it looks as though it shouldn't. *Environ. Plan.* **1999**, *26*, 169–191. Available online: https://journals.sagepub.com/doi/10.1068/b4125 (accessed on 15 October 2019). [CrossRef]
29. Space Syntax; University College London-UCL Bartlett School of Architecture. Official Space Syntax Page. Available online: http://otp.spacesyntax.net/overview-2/ (accessed on 15 October 2019).

30. Turner, A. Depthmapx: A program to perform visibility graph analysis. In Proceedings of the Third International Space Syntax Symposium, Atlanta, GA, USA, 7–11 May 2001; Available online: https://pdfs.semanticscholar.org/d940/499fc935708b6d5f069c36a8b6a2069894c7.pdf (accessed on 15 October 2019).
31. Batty, M.; Ranaô, S. *The Automatic Definition and Generation of Axial Lines and Axial Maps Centre for Advanced Spatial Analysis*; University College London: London, UK, 2003; pp. 1–19. Available online: https://pdfs.semanticscholar.org/75f6/2fee454772c4bbb37cf4c9eedff80a101fb1.pdf (accessed on 22 November 2019).
32. Criado, M.; Martínez-Graña, A.; Santos-Francés, F.; Veleda, S. Multi-Criteria Analyses of Urban Planning for City Expansion: A Case Study of Zamora, Spain. *Sustainability* **2017**, *9*, 1850. Available online: https://www.mdpi.com/2071-1050/9/10/1850 (accessed on 22 November 2019). [CrossRef]
33. Silva, P.G.; Elez, J.; Giner-Robles, J.L.; Rodriguez Pascual, M.A.; Perez López, R.; Roquero, E.; Bardají, T.; Martínez-Graña, A. ESI-07 ShakeMaps for instrumental and historical events in the Betic Cordillera (SE Spain): An approach based on geological data and applied to seismic hazard. *Quat. Int.* **2017**, *451C*, 185–208. Available online: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1040618216302968 (accessed on 15 January 2020). [CrossRef]
34. Turner, A.; Penn, A.; Hillier, B. An Algorithmic Definition of the Axial Map. *Environ. Plan.* **2005**, *32*, 425–444. Available online: https://www.researchgate.net/publication/23541493_An_Algorithmic_Definition_of_the_Axial_Map/citation/download (accessed on 22 October 2019). [CrossRef]
35. Bardají, T.; Martínez-Graña, A.; Sánchez Moral, S.; Barret, H.; García-González, D.; Cuezva, S.; Cañaveras, J.C.; Jiménez-Higueras, A. Geomorphology of Dra Abu el-Naga (Egypt): The basis of the funerary sacred landscape. *J. Afr. Earth Sci.* **2017**, *131*, 233–250.
36. Bostenaru Dan, M.; Armas, I. Earthquake impact on settlements: The role of urban and structural morphology. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2015**, *15*. Available online: https://www.researchgate.net/publication/307667362_Earthquake_impact_on_settlements_the_role_of_urban_and_structural_morphology (accessed on 5 June 2019). [CrossRef]
37. Soulas, J.P.; Egüez, A.; Yepes, H.; Perez, H. Tectónica activa y riesgo sismico en los Andes ecuatorianos y el extremo sur de Colombia. *Bol. Geol. Ecuat.* **1991**, *2*, 3–11. Available online: https://www.researchgate.net/publication/263555294_The_Influence_of_Urban_Morphology_on_the_Resilience_of_Cities_Following_an_Earthquake (accessed on 26 November 2019).
38. Martínez-Graña, A.M.; Goy, J.L.; Zazo, C. Geomorphological applications for susceptibility mapping of landslides in natural parks. *Environ. Eng. Manag. J.* **2015**, *15*, 1–12.
39. Vidal Montes, R.; Martínez-Graña, A.M.; Martínez Catalán, J.R.; Ayarza, P.; Sánchez San Román, F.J. Vulnerability to groundwater contamination, (SW Salamanca, Spain). *J. Maps* **2015**, *12*, 147–155. [CrossRef]
40. Santos-Francés, F.; Gil-Pacheco, E.; Martínez-Graña, A.M.; Alonso Rojo, P.; Ávila Zarza, C.; García Sánchez, A. Concentration of uranium, spatial distribution and in the horizons of soils developed on granitic rocks and slates of the West of Spain. *Environ. Pollut.* **2018**, *236*, 1–11.

© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

remote sensing

MDPI

Article

Detection of Terrain Deformations Using InSAR Techniques in Relation to Results on Terrain Subsidence (Ciudad de Zaruma, Ecuador)

Marcelo Cando Jácome, A. M. Martinez-Graña and V. Valdés *

Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Salamanca, 37008 Plaza de la Caidos s / n., Spain; id00709713@usal.es (M.C.J.); amgranna@usal.es (A.M.M.-G.)

* Correspondence: vvaldes@usal.es; Tel.: +34-923-294-400; Fax: +34-923-294-514

Received: 14 April 2020; Accepted: 15 May 2020; Published: 17 May 2020

Abstract: In Zaruma city, located in the El Oro province, Ecuador, gold mines have been exploited since before the colonial period. According to the chroniclers of that time, 2700 tons of gold were sent to Spain. This exploitation continued in the colonial, republican, and current periods. The legalized mining operation, with foreign companies such as South Development Company (SADCO) and national companies such as the Associated Industrial Mining Company (CIMA), exploited the mines legally until they dissolved and gave rise to small associations, artisanal mining, and, with them, illegal mining. Illegal underground mining is generated without order and technical direction, and cuts mineralized veins in andesitic rocks, volcanic breccia, tuffs and dacitic porphyry that have been intensely weatherized from surface to more than 80 meters depth. These rocks have become totally altered soils and saprolites, which have caused the destabilization of the mining galleries and the superficial collapse of the topographic relief. The illegal miners, called "Sableros", after a period of exploitation at one site, when the gold grade decreased, abandon these illegal mines to begin other mining work at other sites near mineralized veins or near legalized mining galleries in operation. Due to this anthropic activity of illegal exploitation through the mining galleries and "piques" that remain under the colonial center of the city, sinkings have occurred in various sectors detected and reported in various technical reports since 1995. The Ecuadorian Government has been unable to control these illegal mining activities. The indicators of initial subsidence of the terrain are small movements that accumulate over a time and that can be detected with InSAR technology in large areas, improving the traditional detection performed with geodetic instrumentation such as total stations and geodetic marks. Recent subsidence at Fe y Alegría-La Immaculada School, the city's hospital and Gonzalo Pizarro Street, indicates that there is active subsidence in these and other sectors of the city. The dynamic triggers that have possibly accelerated the rate of subsidence and landslides on the slopes are earthquakes (5 to 6 Mw) and heavy rains in deforested areas. Although several sinks and active subsidence caused by underground mining were detected in these sectors and in other sectors in previous decades, which were detailed in various reports of geological hazards prepared by specialized institutions, underground mining has continued under the colonial city center. In view of the existing risk, this article presents a forecasting methodology for the constant monitoring of long-term soil subsidence, especially in the center of the colonial city, which is a national cultural heritage and candidate for the cultural heritage of humanity. This is a proposal for the use of synthetic aperture radar interferometry (InSAR) for the subsidence analysis of topographic relief in the colonial area of the city of Zaruma by illegal mining galleries.

Keywords: Terrain deformation; mining galleries; subsidence; InSAR

1. Introduction

The city of Zaruma is in the foothills of the Vizcaya Mountain Range of the Northern Andes, in the south of Ecuador; see Figure 1.

Figure 1. Location of the study area in the South of the country, in the Andes Mountains.

Its relief is very irregular, with high areas dissected by deep valleys and canyons, and several rivers, such as Salvias, Ortega, Amarillo and El Salado river. Mining exploitation has a history cataloged since before the conquest of America. The city located within the Puyango river basin has provided abundant gold reserves. According to data from the Mining Regulation and Control Agency (ARCOM), 288,000 tons of quartz is extracted annually with an average of 4 grams of gold per ton, reaching a production of 1152 kilos of gold per year. [1].

One of the hazards for the city caused by underground mining is related to the old abandoned galleries and pikes carried out by illegal miners, which is causing the sinking of the land and the collapse of the buildings in the urban area of the city.

Recently, in the years 2016 and 2019, considerable subsidence has occurred in some parts of the city, such as the city hospital, Gonzalo Pizarro Street, Fe y Alegría-La Inmaculada, subsidence that was detected in several studies conducted in previous decades [2,3].

The abandoned galleries and without technical closure, as well as the illegal pickets possibly caused the sinks dating from 2001 in several places such as in the sports coliseum, the municipal swimming pool, the Immaculate School, Gonzalo Pizarro Street, Zambrano Street, Colon, the city hospital among other sectors.

The sinking ground is a very common phenomenon around mining operations of underground exploitation. This subsidence is causing difficulties in the socio-economic development of Zaruma city and has directly endangered homes, buildings of the municipal basic services, educational centers, roads and uninterrupted environmental systems, including the possible loss of human lives.

Here, the importance of monitoring the subsidence of the relief in the colonial area of the city is born; monitoring that will strengthen the appropriate municipal ordinances for the protection of the population, the city and the environment.

The measurements of the subsidence of the relief are generally carried out punctually, with traditional methods, mainly by leveling the relief in static and dynamic GPS networks with the difficulty of obtaining regional and continuous sinking trends. A regional survey by leveling the relief with these traditional methods would imply onerous economic expenses. On the other hand, the surface of the soil induced by the excavations of mining galleries without pillars that support the weight of the soil load and the eroded rock, Figure 2(A), has exposed the buildings of the city to deformations and collapse of its structure, as several studies show, carried out since 2001 [2].

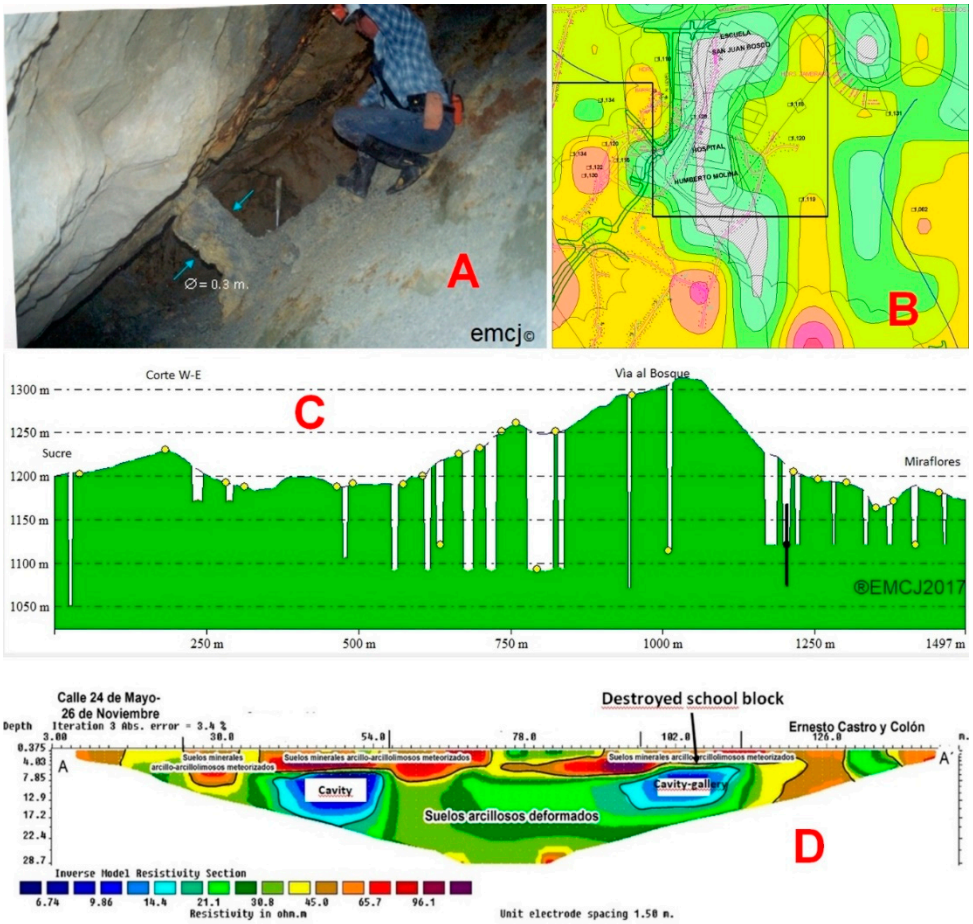


Figure 2. (**A**) Pillars exploited and destroyed, without resistance to the load of the upper rock and soil that in the sector reaches more than 50 meters thick. (**B**) Sinking dating back to 2001 using the flow pattern technique and morphological rupture lines. (**C**) W–E Topographic profile and subsidence caused by mining galleries in underground projection to the top of the galleries. (**D**) Electrical tomography of the subsoil in the streets May 24, November 26, Ernesto Castro, Colon and Gonzalo Pizarro. The collapse of the La Immaculada-Fé y Alegría school block was possibly due to the instability caused by the underground gallery that exists below (blue spot). This sinking was reactivated in 2019.

In particular, the stress efforts caused by the bending and cutting component of these deformations have damaged the building materials making them almost fragile. These ground deformations and subsidence were verified in 2001 by inspecting the underground mining galleries, in addition to the geological characterization, without using the DInSAR technique, which did not exist at that time. The technique used and developed was the analysis of flow patterns and morphological rupture lines, developed by the authors of this article, and topographic–geological information of each gallery investigated by ex-National Directorate of Geology, National Directorate of Geology [2–4], among researchers. An example of the state of deformation in 2001 can be seen in Figure 2B in the hospital sector of the city Humberto Molina and the San Juan Bosco school, where there is a anthropogenic subsidence zone (area with black slanted lines), caused by the mining galleries represented by green and cyan lines.

A topographic profile W–E from Sucre Street to Miraflores Street, is presented, Figure 2C, from the surface to the top of the inventoried mining galleries at that time. This topographic profile shows the intensity of subsidence caused by the underground galleries. The last study carried out by the Secretariat of Risk Management by means of electrical tomography of the subsoil in 2016, verified that the areas susceptible to subsidence detected in the previous decade were activated and caused the collapse of the La Inmaculada-Fé y Alegría School. Subsequently in 2019, subsidence occurred on

24 May and 26 November on Ernesto Castro, Colon and Gonzalo Pizarro Streets. Subsidence that were previously detected, Figure 2D.

In December 2016, the Immaculate School-Fe y Alegría, completely collapsed possibly due to being in an old gallery and in illegal exploitation, which sank the ground, as determined by several recent technical reports [3]. The classroom block collapsed as its foundations sank, and consequently the structures fractured and collapsed.

Figure 3 shows the collapse of the school in October 2016 (A), the technical filling done in 2017 (B), the new collapse in the same place (C) and the new collapse in the Gonzalo Pizarro Street sector (D), which occurred in 2019.

Figure 3. (**A**) Collapse of the Fe y Alegría School, in October 2916. (**B**) Technical filling done at the site in 2017. (**C**) Reactivation of the collapse in the place where the school was in 2017. (**D**) New collapse near Gonzalo Pizarro Street in 2019. Images taken from El Expreso Newspaper, Ecuador en vivo, Pichincha Universal and Arden los Socavones Facebook page.

The Zaruma canton is developed on the External Slopes of the Western Cordillera, it presents diversified reliefs on ancient volcanic materials, with partial pyroclastic coverage. The city is located on an andesitic–porphyritic volcano-sedimentary series mineralized with metallic sulfides deformed by granodioritic and tonalitic intrusive [5].

The Morphology of the Zaruma Canton is characterized by presenting steep slopes, rounded ridges and numerous hills that result from the dendritic pattern of the secondary drains. The heights are between 1150 and 2800 masl. The main drainages of the area are the Río Luís that merge with the Río Salatì and Río Ambocas and which end at the Río Pindo. The Calera River and the Yellow River are also located within the area, which joins a few kilometers before its confluence with the Pindo River that forms the Puyango River downstream. There are numerous relatively large streams. The predominant geoform of the area corresponds to heterogeneous slopes, with medium to strong slopes (>25–40%), relative differences between 200 and 300 m, the drainage density is little dissected, with long lengths greater than 500 m.

Structural lineaments preferential NW–SE directions are fundamentally found by controlling the drainage pattern in the study area; however, important structures especially in the E–W and N–S

direction are controlling the mineralization in the sector and are responsible for the external and internal geodynamic processes, which has caused the deformation of the main existing geoforms in the study area. Local geological faults, fracture systems and joints were considered in the concentration pattern model of this type of guidelines, to determine relief deformations in [4] and which were verified in the current methodology.

Locally, the study area is located within the Portovelo Unit, exposed in the work of research of the Zaruma geological sheet, scale 1: 100000, prepared by the National Research Geological, Mining, Metallurgical Institute. The mineralization at Zaruma is housed in intermediate to siliceous volcanics of the Portovelo Unit, which is faulty against the metamorphic rocks of the south, along the Piñas-Portovelo geological fault system and discordantly overlaps the El Oro Matamorphic Complex. This Unit, for the most part, is made up of massive porphyry andesitic lavas to andesitic basalts and gaps with intermediate tuffs. There are also rhyolitic to dacitic "Ash Flow" type tuffs with intercalations of sedimentary rocks (slates, cherts). The andesitic volcanoes present generalized propylitic alteration to epidote, calcite and chlorite. The main structural geological feature of the region is the Piñas-Portovelo fault / thrust system, E–SW direction, which has a great descent in the North block and separates the Saraguro group from the El Oro Metamorphic Complex. The metamorphic rocks of the basement, along this fault system, have been cataclysmically deformed and brecciated [6].

The city has a mining exclusion area, declared EMERGENCY RESOLUTION No. SGR-029-2015, which encloses the colonial center of the city and is the internal limit where it is prohibited to carry out mining work that has not been respected. When the underground mining works and galleries enter the exclusion zone, exploiting and chasing the veins laden with gold, after a while, they abandon those "pikes" without any technical closure, leaving gaps below the surface that have collapsed after several years of settlement. This has caused the collapse of the soil and as in the case of the Fe y Alegría-la Immaculada School, causing a sinkhole that was initially 10 m deep and currently can reach 150 m. Underground galleries in that sector can reach more than 250 meters depth.

The landscape in Zaruma is changing intensely due to the intensification of illegal mining. When galleries are abandoned due to lower ore grade, illegal miners leave the galleries without technical closure, causing the upper layers to collapse. This sinking process continues to the surface and eventually causes the ground to sink, fracturing the houses above them.

The consequence of mining exploitation around the veins that have been exploited indiscriminately for decades, has caused new local surface and underground hydrological conditions, which influenced in equilibrium the species of plants, animals and other organisms that occupy those areas that have had to adapt to the new conditions imposed by the limits of urban mining growth, which has put them at the limit of their extinction [7].

To reduce the threat of subsidence caused by underground mining in this study, in this article, Differential Interferometry techniques used to detect small relief deformations with high precision, using data from the synthetic microwave aperture radar-Synthetic Aperture Radar (SAR) and enhancing the trace or traces of underground galleries that are not found in the mining cadaster of the sector and that are possibly the cause of the collapses in various sectors of the city.

In recent years, DInSAR Differential Interferometry has been used to measure relief deformations very effectively based on large stacks of SAR images, unlike the two classic images used in standard InSAR configurations [8].

The state of the art of DInSAR techniques that make use of the data acquired by spatial SAR sensors exploit the information contained in the radar phase of complex SAR images acquired at different times over the same area. Several studies have contributed to improve the spatial location of subsidence by excavation of tunnels that cause the desiccation of aquifers by underground mineral extraction [9].

The DInSAR technique and its applications have been documented in several articles in high-level scientific journals such as Nature and Science, where it has contributed in different fields of Geosciences such as seismology, with important scientific achievements, including coseismic and post-seismic

analysis before the occurrence of an earthquake. Volcanology is another important field of application, with several studies of volcanic deformation (deflation and elevation). These volcanic deformations have allowed determining the possible origins of secondary lahars as can be seen in [10].

The DInSAR analysis on landslides that despite being an important application for the location and reduction of these events, according to several researchers, the DInSAR analysis has less efficient results, mainly due to the loss of coherence due to its heterogeneous character in its composition. Despite this, with the Persistent Scatterers-PS dispersion technique, the geometry of some types of landslides can be determined with good results. The most relevant results are described in [10]. In the case of subsidence and ground lift, the DInSAR analysis has obtained efficient results in several parts of the world that have been described in specialized journals. It has been demonstrated as tunnels and underground galleries that have unbalanced the water systems of the surface runoff as well as the groundwater flow systems, causing the destruction of the buildings on the surface. Other subsidence processes worldwide have been investigated for other factors such as fluid pumping, construction work, geothermal activity, etc. [11]. In most of the published results that refer to urban areas, the DInSAR data is consistent even in long periods, due to the existence of static artificial reflectors such as buildings and other reinforced concrete structures that remain stable. With the advent of Persistent Scatterers techniques with high and pseudo coherence, more efficient results have been obtained to monitor deformations of the relief outside urban, suburban and industrial areas [12–24].

In Ecuador, there are few studies using SAR images, InSAR methodologies and their variants. In 1977 the Ecuadorian Government created the Center for Integrated Surveys of Natural Resources by Remote Sensors (CLIRSEN), a technological and scientific entity aimed at integrating the most advanced technologies related to Geodesy, Natural Resources, Environment, Cadaster, Geographic Information Systems (SIG), Software. Clirsen, used radar images of lateral vision and of real opening (SLAR), acquired by the oil companies in the Amazon region and the first semi-controlled mosaic of Radar Aero transported synthetic opening (SAR), images taken for the exploration of oil fields in 1982.

Subsequently, the Ecuadorian Space Institute replaces Clirsen Center and in 2013 the first InSAR analysis project with Cosmo-SkyMed images is carried out within the Space and Geophysics Technology project in risk management external geodynamics for prevention and mitigation of floods and torrential floods [25]. This was the first project that the regent institution in remote sensing executed in the country. In 2014, one of the first projects of soil deformation analysis was carried out using the DInSAR technique in a mountainous region of the Andean region. This work was done with Roi-Pac software with very good results [26]. Since 2016, after the destructive earthquake of 7.8 Mw on the Ecuadorian coast that caused more than 600 deaths and economic losses of more than 3 miles million dollars, the Risk Management Secretariat, implemented the deformation zone analysis project in the country, using the InSAR methodology.

The authors of this article have developed some projects using the InSAR methodology with a pair of Sentinel images and with piles images to determine deformations of the ground in the Fuego volcano in Guatemala, subsidence in Zaruma, neighborhood in Quito city and combined InSAR analysis with geomorphological, geophysical and geotechnical methods in Manta and Portoviejo cities as can be seen in the articles [27].

The following is a summary of obtaining the Interferometric Phase: The Radar System of Synthetic Opening-SAR, allow the obtaining of images of the reflectivity of the ground, which are subsequently processed by InSAR (Interferometry SAR) techniques for the generation of precise maps of soil deformation. The technology (InSAR) or SAR Interferometry is the technique that is based on the study of the phase interference pattern of the waves of two SAR images to generate maps of displacements of the topographic relief, and digital models of terrain elevation [28]. With this technique, it is possible to determine, displacements of the topographic relief, in mm/year of large extensions of the topographic relief, without the need for field measurements and at low cost. [29]. This technique can also provide more data to understand the geomorphological evolution of the site. An antenna of synthetic or virtual opening consists of a vector of successive and consistent signals of radar that are transmitted and

received by a small antenna that moves along a certain flight or orbit path. The signal processing uses the magnitudes and phases of the signal received on successive pulses to create an image [30]. From interferometry, the data obtained are the distances between the satellite and the ground area, calculated by the measurement of times and lags. The main platforms that use Radar Synthetic Aperture are shown in Table 1 [31].

Table 1. Resolution of the most common radar images in meters [31].

SATELLITE	BAND	Acquisition Mode	Nominal Pixel Dimensions: Ground range x Azimuth (m)	Repeat Cycle (day)
ERS-1 & ERS-2	C	Standard Beam	20 × 4	35
Envisat	C	Standard Beam	20 × 4	35
Radarsat-1	C	Standard Beam	20 × 5	24
Radarsat-1	C	Fine Beam	10 × 5	24
Radarsat-2	C	Standard Beam	20 × 5	24
Radarsat-2	C	Fine Beam	10 × 5	24
Radarsat-2	C	Ultra-Fine Beam	3 × 3	24
TerraSAR-X	X	Standard	3 × 3	11
TerraSAR-X	X	Spotlight	1.5 × 1.5	11
Cosmo-SkyMed	X	Standard	3 × 3	16(8)
Cosmo-SkyMed	X	Spotlight	1.5 × 1.5	16(8)
ALLOS PALSAR	L	Fine Beam	10 × 5	46

If at least two observations of the same site are obtained from space at different times, the "interferometric phase" is directly proportional to any change in the range of topographic relief characteristics.

In reference to Figure 4 for the acquisition of an interferogram, have followed what M. Crosetto et al., describes about the basic principles of Interferometry from the Synthetic Aperture Radar (SAR) [30].

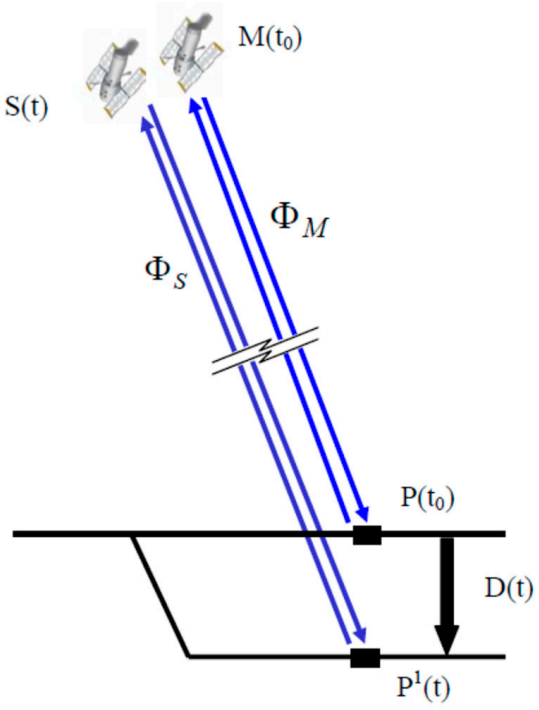


Figure 4. Displacement diagram of topographic relief and phase change of the signal [11].

At time t_0, the sensor obtains a first SAR image, measuring the phase Φ_M (Equation (1)), an image called master, M. If a deformation of the ground D occurs, over a time, point P moves to P^1. Subsequently, the satellite obtains a second image at time t, and measures the phase Φ_S. This image is called slave, S. The InSAR technique calculates the phase difference between Φ_S and Φ_M, a difference called interferometric phase $\Delta\Phi_{Int}$.

$$\Delta\Phi_{Int} = \Phi_S - \Phi_M \text{ (eq. 1)} \quad (1)$$

In this study, the DInSAR methodology has been used to determine this type of deformation movement and is an ideal tool to monitor the sinking of the topographic relief in large areas and for prolonged periods, with a high precision of a few millimeters to centimeters per square kilometer. Sentinel images in the C band, were used to determine the deformation and accumulated displacement over a period from 2016 to 2019 [27]. A period in which subsidence occurred as mentioned above.

To study the local subsidence of the soil processed a multitemporal series of interferograms in the C band with one stack of Sentinel 1 images before the collapse of the Fe y Alegría-La Immaculada School and after. The results were verified in those sites that have sunk where abandoned and active underground mines are found.

There are historical studies that report severely damaged buildings, possibly due to being in subsidence areas in the Colonial Center of the Zaruma city. Figure 5 shows the location of the city, the mining exclusion area (ocher color), the underground mining galleries (red lines) in the central part and to the east, the veins and mineralized structures a geological faults (black color lines). In the western part, there are no surveys of mining galleries except for one represented with a red color line (possibly, there is no survey of the mining cadaster in this area).

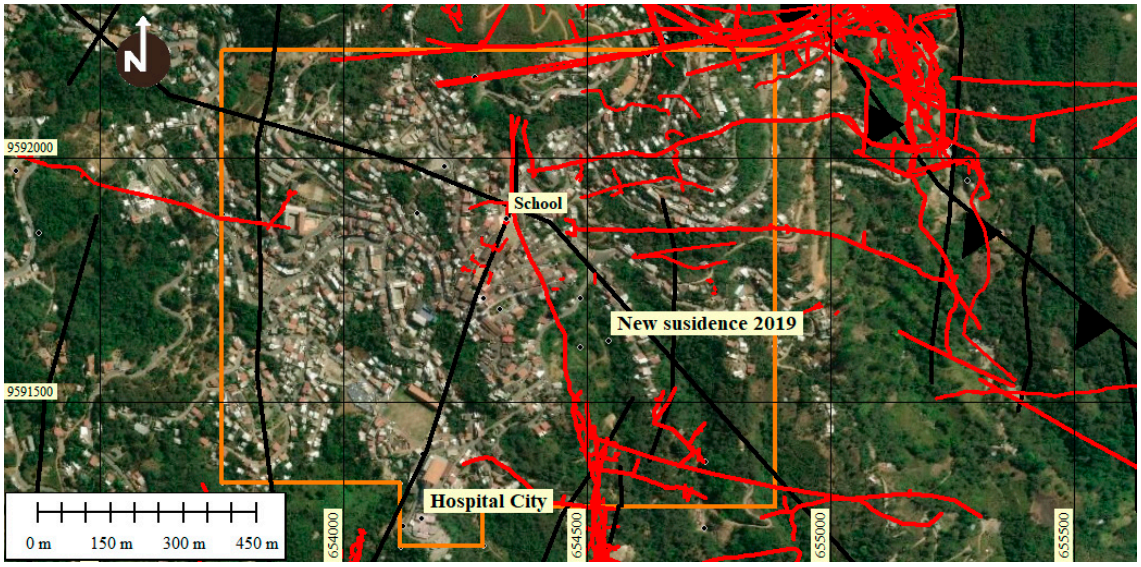


Figure 5. Underground locations of mining galleries outside and within the exclusion area of the Zaruma city. In ocher color, the Exclusion Zone polygon, the mining galleries from the center to the east in red lines, the mineralized structures and geological faults in black color lines. Dots black color are bocamines. Data source: Risk Management Secretariat.

2. Materials and Methods

Considering that, interferometry can detect minute deformations of the topographic relief with high precision using microwave SAR data. In this article, the DInSAR methodology has been used to determine this type of deformation movement and is an ideal tool to monitor the sinking of the topographic relief in large areas and for prolonged periods of time, with a high precision of a few millimeters to centimeters per square kilometer. Sentinel images in the C band were used to determine the deformation and accumulated displacement over a period from 2016 to 2019 [16–24]. A period

in which several subsidence occurred as mentioned above. The calculation of the accumulated displacement may have errors due to atmospheric noise, which in this case was reduced with the filter for Atmospheric Phase Screen reduction (APS) tool, to obtain interferograms with high coherence, which guarantees the accumulated displacement results in mm / year. The residual error is 0.1 mm. The displacement is an average within the period studied.

The images were taken from 25 October 2016, before the sinking, until 22 October 2019, and include images from 2016, 2017, 2018, period within which the beginning of the sinking in the school is located (26 October 2016). This allowed us to analyze how the subsidence evolved and determined possible reactivation of the subsidence in the school (22 October 2019), including the new collapse on Gonzalo Pizarro Street in August 2019 (rate +/- 30 mm/year, lifting/sinking).

One of the factors that causes errors in the capture and interpretation of interferograms with InSAR technology is the influence of atmospheric noise.

To avoid the influence of atmospheric noise, the Atmospheric Phase Screen (APS) filter has been applied in SARPROZ, taking into account that in this central area of the city, the vegetation coverage is minimal and is unlikely to cause atmospheric noise that distorts the quality of acquired images. Other sources of noise have been reduced, applying filters using the SARPROZ program. The objective of the reduction of the atmospheric noise is to obtain a high degree of coherence in the results to guarantee that the accumulated values of displacement and velocity have a high correlation with the real local subsidence caused by underground mining.

In this study, the filter for Atmospheric Phase Screen reduction (APS) was used with the persistent dispersion interferometry methodology PS-InSAR, in a Sentinel 1 B multitemporal imaging stack of 20 available images. The PS-InSAR Persistent Scatter is an InSAR processing technique that uses multiple images taken at regular intervals to achieve better measurement results.

The processing of the image stack allowed determining the topographic relief movement, by varying the time phase for each pixel in a time.

The method focuses on finding stable dispersers over time, not influenced by atmospheric noise and providing a stable response signal, which in the case of the city, correspond to artificial structures such as buildings, roads, obelisks, among others structures, called Persistent Scatters (PS) These Dispersers, provide a history of stable phases during the image acquisition time because they do not suffer from temporal correlation, allowing long-term observation and monitoring of the deformation of the sectors in their surroundings.

To analyze the multitemporal displacement of the Fe y Alegría-La Inmaculada School, the available images of Sentinel 1 B, on the stack [30] were used to obtain results before the beginning of the collapse in the school (26 October 2016), and during the evolution of the deformation of the land, until the reactivation of the sinking in the site and the new sinking in Gonzalo Pizarro Street. The project followed standard interferometric process in the SARPROZ software, according to the flow chart of Figure 6 [32–34].

To analyze the dispersion and coherence of the data and results of the analyzed parameters (velocity of movement mainly) in a time series with 20 images used, the PS technique was applied using the SARPROZ software with the following procedures, which the authors implemented and applied in other sectors and published in scientific articles [28]:

SARPROZ is very powerful and versatile software that implements a wide range of Synthetic Aperture Radar (SAR), Interferometric SAR (InSAR) and Multitemporal InSAR processing techniques [32].

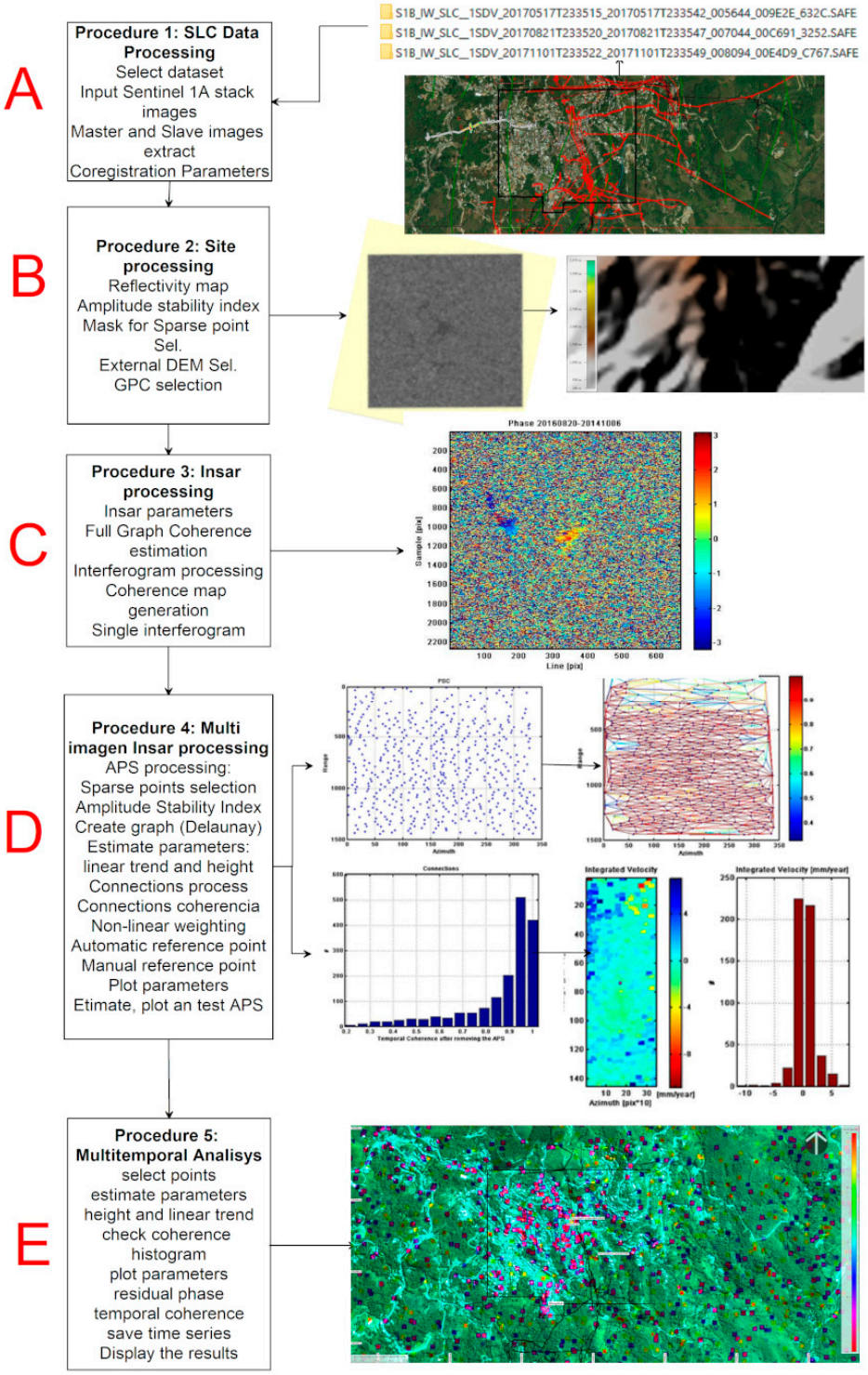


Figure 6. The SARPROZ software process used to obtain the relief deformations by DInSAR analysis. Steps (**A**–**E**) of each portion of the routine. See text for further explanation.

Procedure 1: SLC (A) data processing to import or update extracted data from Sentinel 1 images. Master and slave images are extracted and defined by selecting them manually or automatically. In the star chart in Figure 7A, the master image is close to half the perpendicular and temporal baseline domain between 1B and right, to try to minimize the effects of normal and temporal baselines. Finally, the Co-registration Parameters of the pixels of the corresponding master and slave images are defined for the elaboration of interferograms correctly.

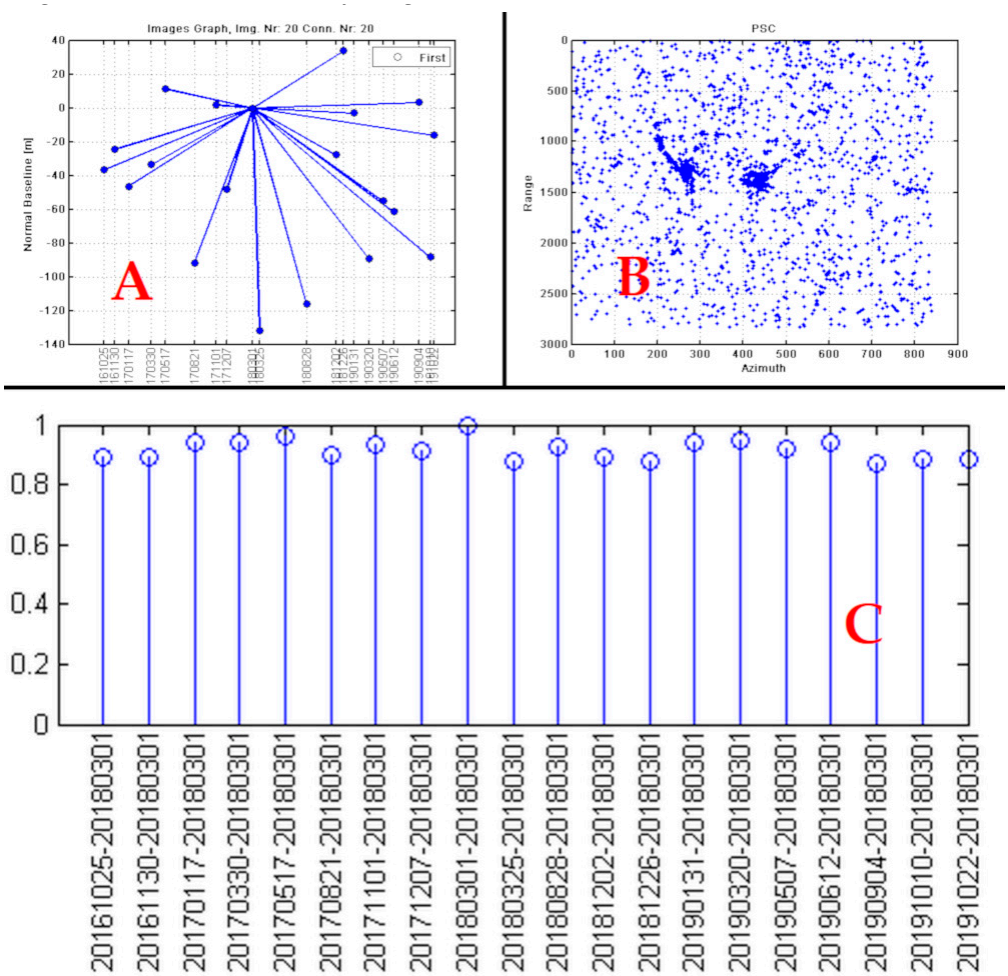


Figure 7. (**A**) Representation of the Sentinel 1 B image set, in the normal basal–temporal space, where each point and line represents an image and an interferogram, respectively. (**B**) Scattered points for PS-InSAR analysis. (**C**) Consistency greater than or equal to 0.85 of the Sentinel 1 image stack.

Procedure 2: is called Site Processing (B), in which preliminary parameters of the images such as the reflectivity map are extracted, from the average time reflectivity of all the images in the stack. The amplitude stability index is calculated which is a unique number that provides a statistical property of the amplitude series with ranges between 0 and 1. A mask is generated for the selection of the scattered points based on a threshold value of the index of amplitude stability, whereby values above the threshold enter the interferometric process and values below this threshold will be masked and will not enter the process, Figure 7B. Select an external Digital Elevation Model (DEM), to eliminate the topographic phase and geocode the images with the option Ground Control Point Selection-GPC, for orbital correction, flattening of interferograms and definition of persistent dispersers. The basic characteristic of a DEM is that it has positioned reference points; in this case, it is in relation to the Shuttle Radar Topography Mission -SRTM- that has a high degree of confidence in its position. Other external DEMs of various spatial resolutions can be used, provided they have stable static reference points (stable reflectors) that have not changed over time. Finally, the complete graphic coherence is calculated, to estimate the coherence of all the possible connections (interferograms) in the image scene.

Procedure 3: called InSAR (C) processing in which the InSAR parameters for interferometric processing are defined by estimating the complete graphic coherence according to the loaded image stack and the average coherence of the generated interferograms. From this calculated coherence, an interferogram is generated between the master image and each of the slave images. In this procedure,

a single interferogram can also be generated, freely chosen from the master image with any of the slave images.

Procedure 4: called InSAR Multi Image Processing (D) in which the atmospheric noise APS is eliminated and the candidate points are selected to generate the persistent dispersion-PS, those that have a stable position in terms of deformation of the topographic relief. Based on these points, the program calculates the displacement height, relief velocity and the residuals of those parameters that serve to recover the delay of the atmospheric phase. The candidate points of persistent dispersion-PS in the urban area of Zaruma correspond to the constructions of buildings that remain stable over time both in radiometry and in the interferometric phase [34]. The stack of 20 images used is the most important factor for estimating the coherence of the pixels, since it allowed identifying suitable PS for the displacement analysis of the relief. Insufficient use of the images will produce an overestimate of the coherence in the entire scene, a poor estimation of the PS, therefore, in false displacements. PS location is considered reliable when 20 or more images are used. In this phase, the APS ambient noise is also estimated, which can affect the process of generating the interferograms due to different atmospheric conditions at the time of image acquisition. Eliminating atmospheric noise, APS is important as it improves the coherence and phase response signal of the images to obtain more accurate ground displacement data.

Procedure 5: called Multitemporal Analysis (E) is a procedure that, based on the previous atmospheric noise reduction procedure, is used for the analysis of MT-InSAR multitemporal interferometry based on persistent scatter (PS). With this procedure, dispersers were identified, whose signal is dominant within the total dispersion of the analyzed pixels and with which a deformation map of the topographic relief was obtained, in which the deformation rate is represented from the time series obtained. These maps are made up of thousands of PS (persistent dispersions) and each PS is associated with an annual linear velocity value (mm / year), and with the accumulated displacement on each date of image acquisition.

A requirement before performing the analysis with PS-InSAR is that the image signals throughout time series must remain consistent for the extraction of PS points and to analyze their dispersion. In this case, to measure the relative displacement and the accumulated displacement as a function of a reference point, a stable point was selected (an artificial construction anchored to the ground, whose peak value in the histogram has a residual height with value 0 (point in ground) Points that are not on the ground may be unstable. The methodology used calculates the movement of the nearby points relative to this reference point, so it must be very stable.

In this case, the program chose PSC (Persistent Scatter Candidates) points based on their location in a connecting network and with a coherence threshold value greater than> 0.8. As mentioned, these points are parts of artificial civil structures to analyze the dispersion of amplitude stability around those points, drawing a coherent point connection network (Delaunay spatial connection graph). This procedure estimated a high coherence in the connections of each point of the network to obtain the height and relief displacement velocity with high confidence. After estimating the above parameters with high consistency, atmospheric noise was removed. The choice of the number of images in the stack showed coherence greater than or equal to 0.8, as presented in Figure 7C and the estimation of APS atmospheric noise with high coherence for the entire set of points was processed with a nonlinear spatial distribution, ensuring that the final coherence is satisfactory.

The cumulative and integrated velocity and displacement of the relief were obtained considering that the accumulated displacement = velocity × time, so that at the reference point, the peak of the accumulated velocity histogram and displacement tends to zero, which means that most points have relative velocity and zero displacement, when they are approached and compared to the reference point.

The histograms verified that the connection speed and the connection residual height are consistent in the distribution of the residual value of travel velocity (mm/year) / height (m), as presented in Figure 8A–C, where a histogram is seen, without jumps and high coherence (connecting lines with a red tendency), Figure 8D.

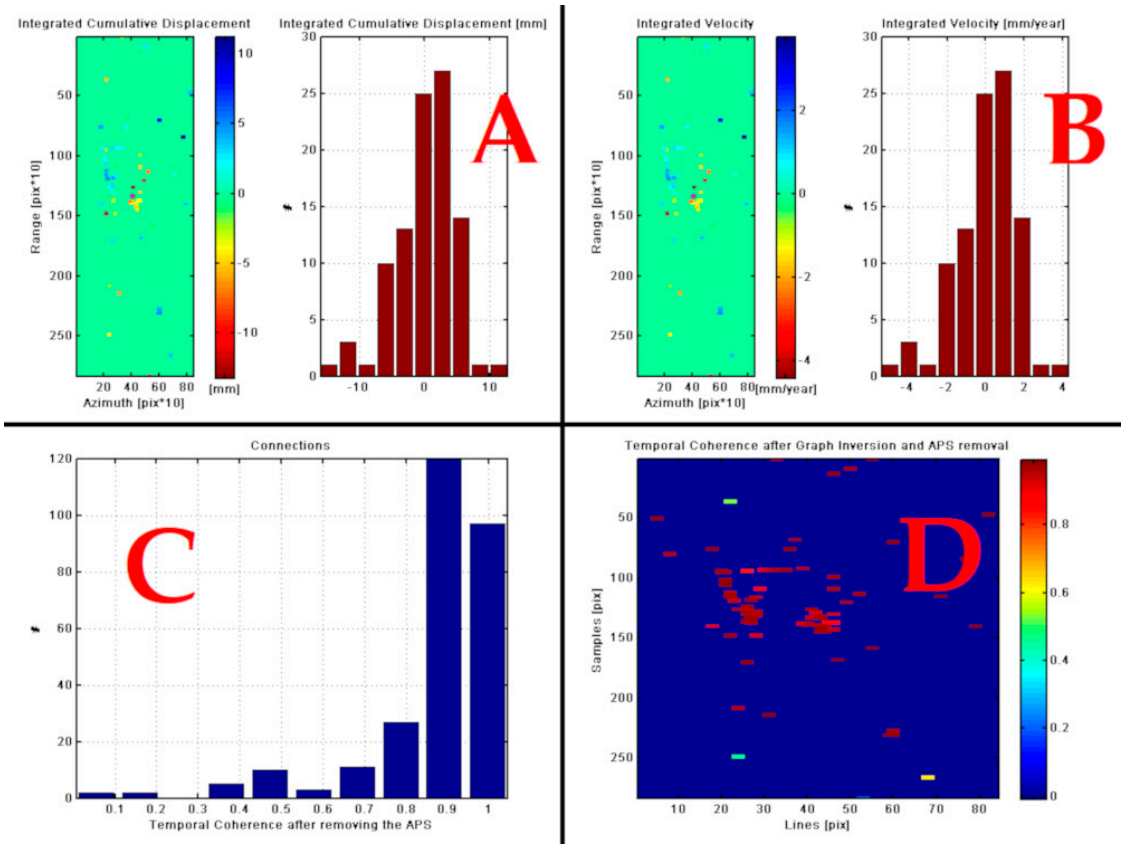


Figure 8. (**A**) Histogram of integrated cumulative displacement connections, (**B**) Integrated velocity, (**C**) Histogram and Temporal Coherence after removal of APS noise (**D**).

3. Results

The dispersion and coherence analysis of the displacement height relief velocity was obtained over a time, with the availability of a stack of 20 images, applying the PS-InSAR technique, with the procedures mentioned above.

The first result of the interferograms within the period from 25 October 2016 to 22 October 2019, before the sinking in the Fe y Alegría-La Immaculada School, in 26 October 2016 is shown in Figure 9. In (A) the current image of Google Earth with the old school site and the filler created to stabilize the site. In (B) the vertical displacement until October 2016. The elevation and subsidence relief values were within a range between −50 mm of subsidence (blue–cyan color) and 20 mm of the ground lifting (color towards red). The area completely collapsed in October and December 2016 (red polygon). The weak blue color inside the polygon indicates that on 25 October 25, the sinking of the area was in process. In the nearby areas, can see the deep cyan sinks, guided by the deep blue traces possibly demonstrate the presence of underground mining galleries. The white color represents the existing buildings in the school at that time. The year with the highest subsidence was 2016, possibly associated with low–moderate intraplate earthquakes and geological faults in the Gulf of Guayaquil [35,36].

The results of the interferograms obtained from the stack between 25 October 2016 to 22 October 2019, show that the subsidence processes were in progress producing a new subsidence on Gonzalo Pizarro Street (Figure 10).

Figure 9. (**A**) Location of Fe y Alegría-La Immaculada School in the study area before the collapse of the block of school classrooms. (**B**) Block collapse of school classrooms on October 25 of a day before the collapse that began on October 16, 2016, and completely collapsed in December 2016. The faint blue color indicates that before October 25, 2016 the sinking of the area was in process. Gallery is in red color and blocks houses are in white color.

The reclassified images of subsidences currently occurring in the city obtained by the InSAR method have a more detailed value than those presented in images 9 to 13 in a range of 20 mm/year (lifting relief) to −30 mm/year (subsidence relief) with an error of +/−5 mm, therefore InSAR performs a quantitative analysis since it starts from points that it identifies on the ground as stable and are geo-referenced in a coordinate system (in this case UTM; WGS84; 17 Sur Zone), to determine the elevation difference of the same point taken in two different periods of time and prepare the interferogram. This is presented in the following image. The images obtained demonstrate the ranges of subsidence that currently occur in the sector in a period of time 2016 to 2019, which is in values similar to the ranges of displacement obtained by the INIGEMM that are 15 mm in two months (very short time to have more real data) (Figure 10).

These results were compared with data from subsidence investigations conducted by National Metallurgical Mining Geological Institute-INIGEMM in March 21017 one year after the sinking of 2016 and presented in [37], as part of the studies for the stabilization of the collapse of the school in October 2016.

The technicians of this Institute, made five perforations inside the school and in the southern zone near the sinking area. The perforations reached a depth of 70 m, which in general determined a first layer with an average of 30 cm thick that corresponds to concrete in the foundations. Then there is a layer of about 20 m in average thickness that corresponds to clay, which, according to its lithological composition, corresponds to the saprolite (eroded rock).

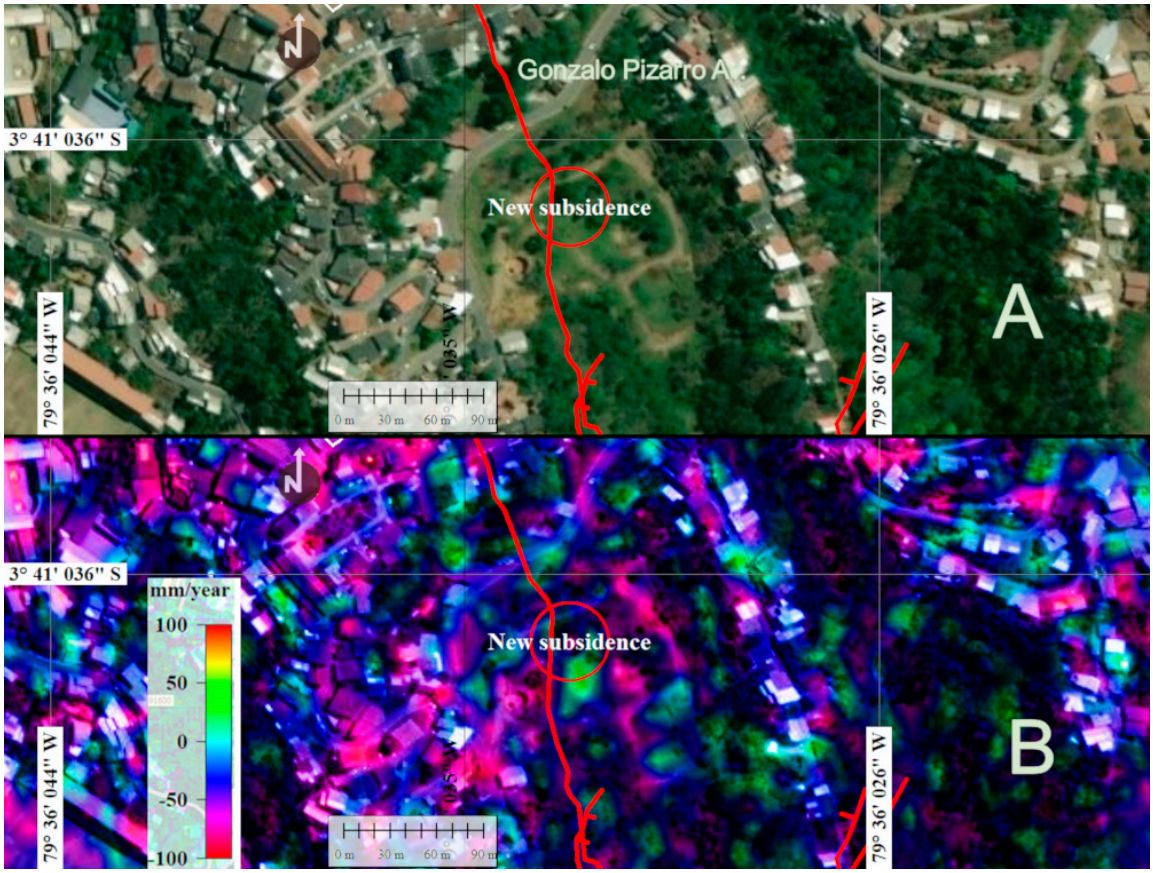


Figure 10. (**A**) Sites of new subsidence in Gonzalo Pizarro Street in August–September 2019. (**B**) The intense blue represents a range of high subsidence.

Then there is a layer about 8 m thick on average of andesite strongly weathered and finally, a layer of volcanic breccia with 50 m thickness on average.

The Rock Mass Rating -RMR- values obtained vary in a range from 14 for the clay (saprolite) with the lowest value to a value of 67 for the weathered andesite and the volcanic breccia.

The simple compression strength of these layers proved that the clay (saprolite) has a resistance classified as very soft, while andesite and the volcanic breccia have a resistance classified as hard.

The study of subsidence of the ground that the National Metallurgical Mining Geological Institute-INIGEMM carried out [37] from a monitoring network of 24 points between the months of March and April 2017, using a Total TOPCON GTS-750 station, determined that the average displacements in the school. They have a range between 1 to 15 mm in two months. This range of subsidence is within what the InSAR method.

The subsidence range with InSAR has greater definition and goes up to 50 mm/year in accumulated velocity from 2016 to 2019, at all times. This means that the InSAR methodology is more efficient, free and can be applied in large or regional areas.

Figure 11 shows the velocity of elevation and subsidence of the terrain within a range of −20 to 50 mm, to classify the most accurate rank levels at the site. (A) The new collapse in the Fe y Alegría school, (B) the new subsidence in Gonzalo Pizarro Street and in (C) the subsidence that are occurring in the city hospital, among other places that were analyzed by the authors in 2001 [2] and served to verify the results of this article.

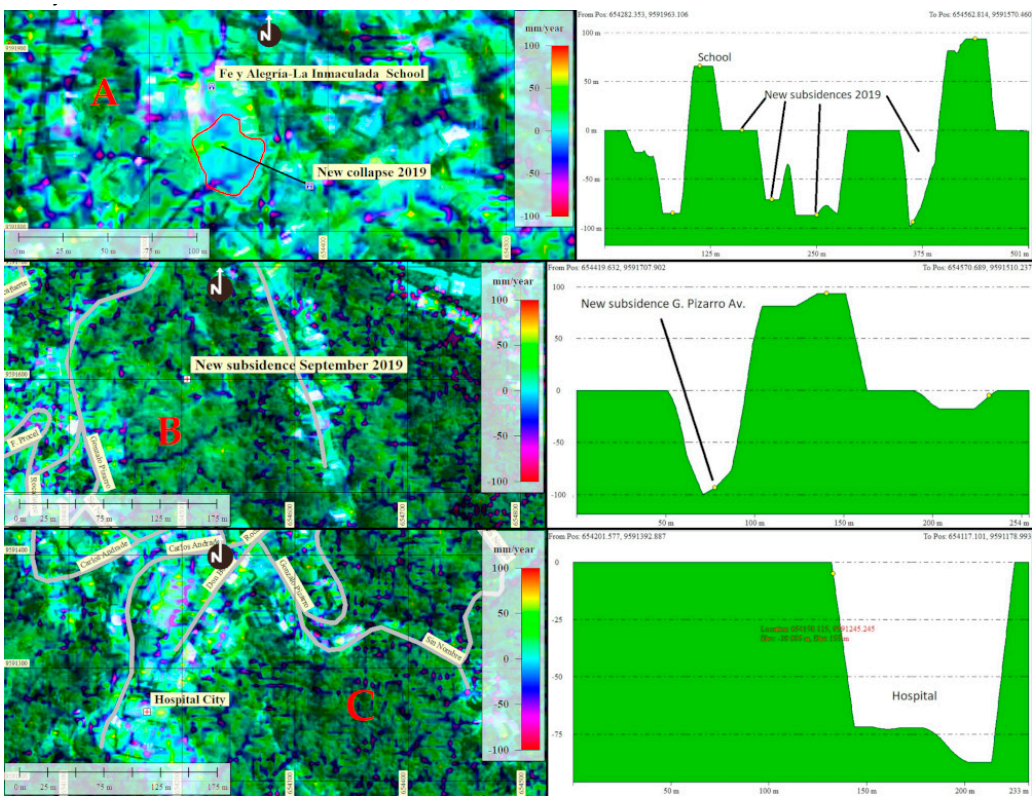


Figure 11. (A) Lifting velocity and subsidence of the ground at Fe y Alegría School (**A**), Gonzalo Pizarro Street (**B**), the city hospital(**C**), obtained from the interferometric analysis. These results corroborated previous studies and verified the analysis performed in this article.

The correlation of the subsidence areas that occurred in 2001, 2016 and 2019 through the interferometric analysis performed with the DInSAR methodology and correlated with the geotechnical and subsidence investigations carried out by INIGEMM and the thesis author [36] (Figure 12), allowed the determination of progressive surface deformations that can cause current subsidence mainly in several sectors and its neighborhood.

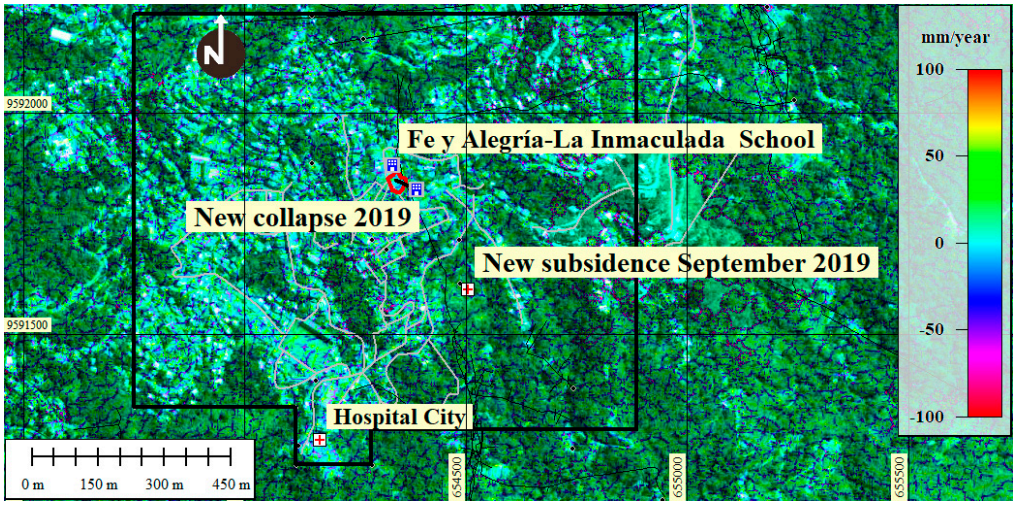


Figure 12. Determination of the "traces" (blue stripes) of connections of unmapped mining galleries. These galleries, generally illegal and abandoned, are connected to mineralized veins and legal mapped galleries, breaking the balance of the rock mass, intensifying the subsidence of the topographic surface of the sector.

Note the correlation between the sinking areas CF5 of Figure 13A and the new collapse occurred at the same site in 2019 of Figure 13B.

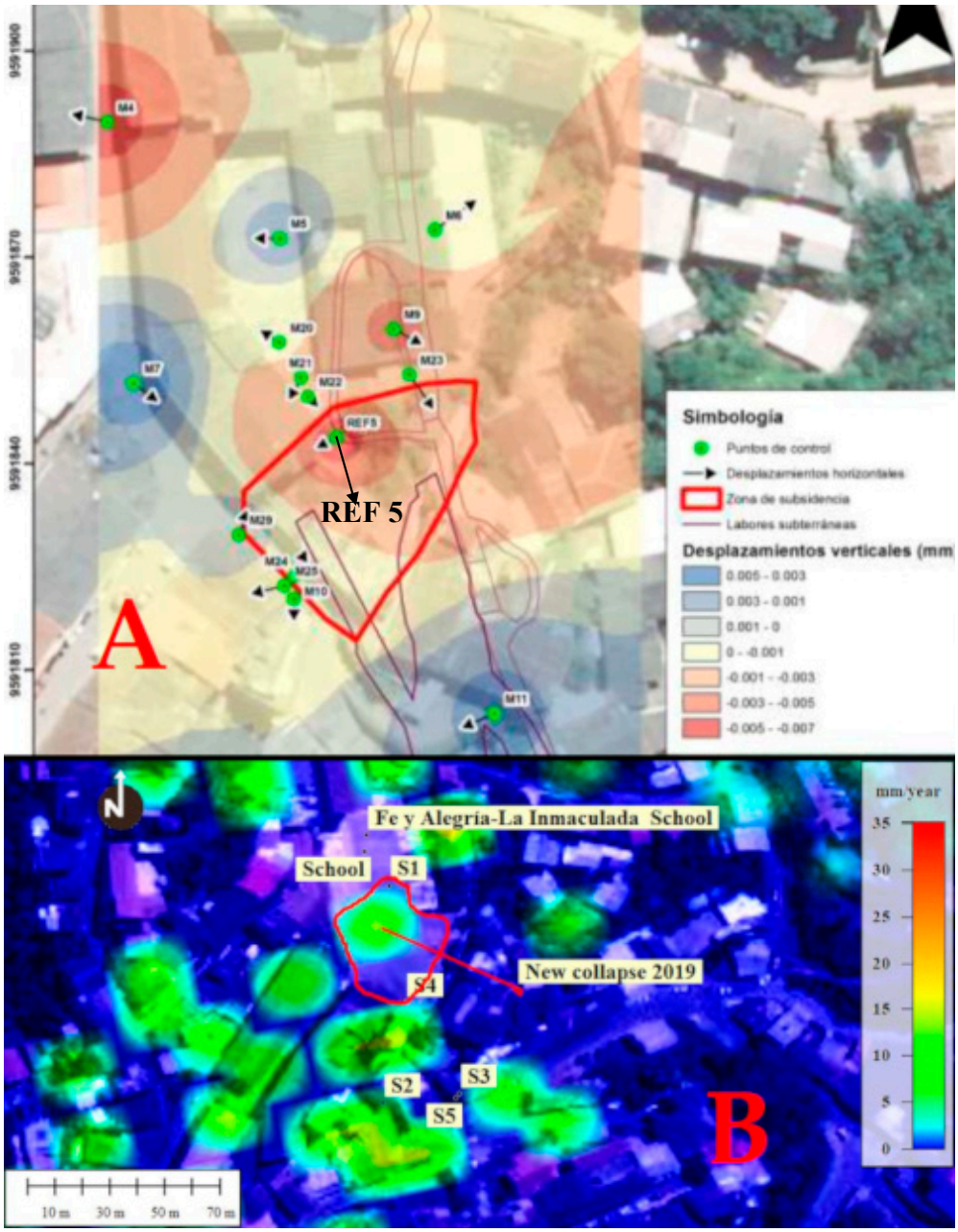


Figure 13. Correlation between the results obtained from areas of subsidence by InSAR Interferometry with the geotechnical investigations of subsidence carried out by INIGEMM and the author of the thesis [37]. Image 13A has low resolution since its origin. Note the correlation between the sinking areas CF5 of (**A**) and the new collapse occurred at the same site in 2019 of (**B**). S1 to S2 surveys conducted by INIGEMM.

It is necessary to highlight the correlation that exists between the area of maximum subsidence REF 5 in Fe y Alegría-La Inmaculada School that seen in Figure 13A of the INIGEMM and the new collapse occurred in the same site in the 2019 of Figure 13B elaborated with the InSAR methodology. There is a correlation between subsidence in other nearby sectors. INIGEMM considered geotechnical parameters such as cohesion, angle of friction, UCS classification, and other parameters

4. Discussion

From the process and interpretation of the images of the Sentinel 1 C band, unstable areas related to mining activities were obtained in the underground galleries that are within the mining exclusion area, with superficial movements of the relief in some susceptible sites that they require deeper research in geology, geotechnics and geophysics.

The 20 interferograms analyzed in the C band show high spatial coherence due to the high temporal correlation (Figure 8). The reduction of atmospheric noise through the SARPROZ APS process helped to achieve a strong connection between dispersed points with high coherence so that displacement values and travel velocity are reliable and correlated with the actual events that occurred in the years 2016 and 2019.

This high coherence may also be because the study area has no intense vegetation that can cause noise and there is. Before 25 October 2016, interferograms show progressive deformations of the soil that accumulated until the sinking of 26 October 2016 and December 2016 and August–September 2019, dates on which the subsidence occurred.

Most interferograms reveal continuous surface movements in the central part of the exclusion zone of the city of Zaruma, at sites where several underground mining galleries were located (Figure 13).

The sectors that presently present subsidence according to the SAR interferometry study, can be seen in Figure 14 and are the following: the municipal market, the Fe y Alegría-La Inmaculada School (1), sports coliseum (2), municipal pool and jail (3), Gonzalo Pizarro Street (4), Church (5), Central Park and Municipality (6), City Stadium (7), El Oro Avenue, (8), City Hospital, San Juan Bosco School (9), Gil Gilbert Street (10), Roground Hotel (11), El Sexmo (12), November 26 School(13), Reinaldo Espinosa Street (14), among other sectors.

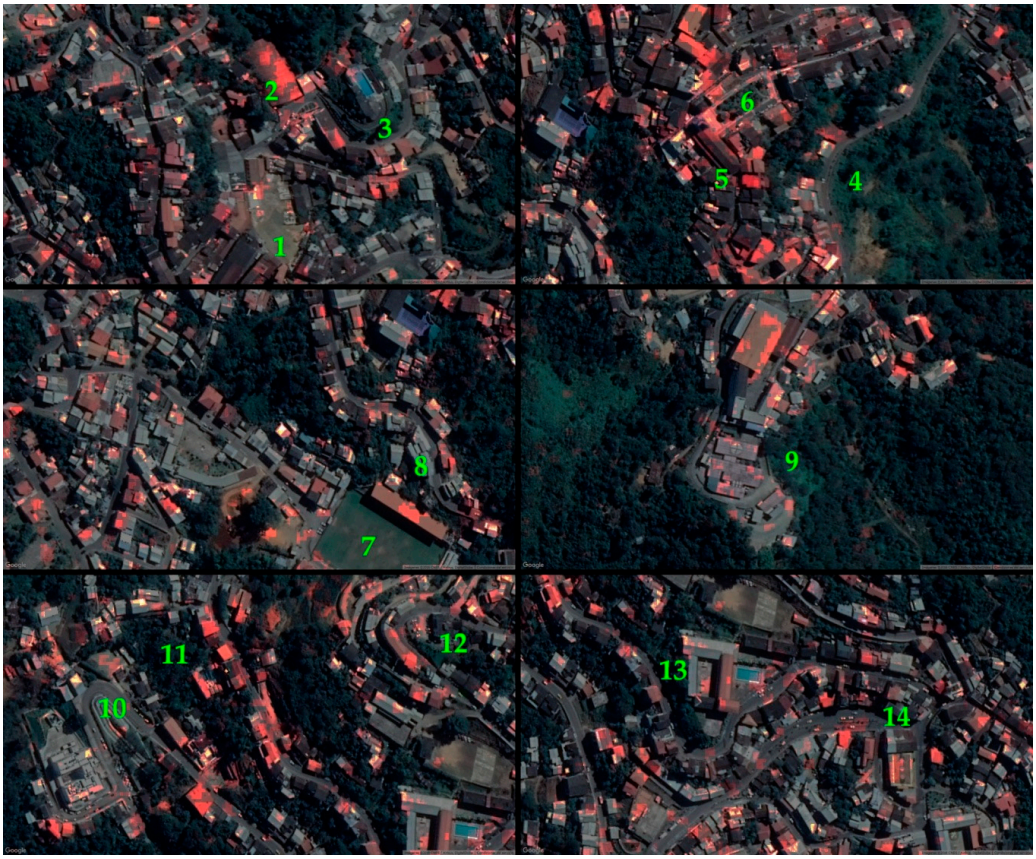


Figure 14. DInSAR analysis, determined that there are many constructions with potential sinkholes in some sectors of the city (red spots on the roofs).

5. Conclusions

The existence of a layer of clay 25 m thick on average, with low geotechnical characteristics and easily deformable, is the answer for the occurrence of surface subsidence of the ground obtained with the InSAR method.

This means that the response of this clay layer to underground mining excavations in the underlying rock layers (eroded andesite and volcanic gap) is directly related to the sinking of this soft layer therefore from the soil and buildings and other constructions, in several sectors of the city.

The analysis of surface displacement by the DInSAR technique, related to historic, legal and illegal underground galleries corroborated the instability state of the colonial center of the city of Zaruma, where more than 40% of the area is unstable.

20 Sentinel 1 images chosen for the elaboration of the interferograms and the multitemporal analysis of the displacement and its velocity, allowed to obtain reliable values of these parameters coinciding with the real events of subsidence that occurred since 2014 and which were described in studies of various institutions since 2001.

This multitemporal technique for data in the C band also served to extract information on the traces or surface traces of subsidence that have left the tunnels of the underground galleries in the western sector of the exclusion area of the city. Sector where there is no underground mining cadastral information of the mining galleries.

The results of accumulated displacement (mm / year) and deformations of the topographic relief, have determined that the study area is unstable with subsidence of the relief in localized sites, related to underground mining galleries that require further investigation for their stabilization.

SARPROZ efficiently allowed applying the DInSAR Multitemporal Interferometry processing technique as the current study with optimal results.

This technique must be taken by the municipal authorities as a forecasting tool to obtain the displacement and its velocity in intensity ranges over time and propose geotechnical programs for its reduction. This is a home base to strengthen the Territorial Planning.

Author Contributions: Conceptualization, M.C.J. and A.M.M.-G.; methodology, M.C.J. and V.V.; software, M.C.J.; validation, M.C.J. and A.M.M.-G.; formal analysis, M.C.J.; investigation, M.C.J. and A.M.M.-G.; resources, M.C.J.; data curation, M.C.J.; writing—original draft preparation, A.M.M.-G.; writing—review and editing, A.M.M.-G. and V.V.; visualization, M.C.J.; supervision, M.C.J.; project administration, A.M.M.-G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Acknowledgments: This research was funded by projects Junta Castilla y León SA044G18 and the GEAPAGE research group has participated.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Decentralized Autonomous Government of Zaruma 2014. Development and Management Territorial Plan Update. *Zaruma, El Oro Province, Ecuador.* Available online: http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/0760001150001_PROPUESTA%20ACTUALIZACION%20PDyOT%20del%20CANT%C3%93N%20ZARUMA_19-04-2015_23-06-10.pdf (accessed on 5 May 2020).
2. Vidal Montes, R.; Martinez-Graña, A.M.; Martínez Catalán, J.R.; Ayarza Arribas, P.; Sánchez San Román, F.J. Vulnerability to groundwater contamination, SW Salamanca, Spain. *J. Maps* **2016**, *12*, 147–155. [CrossRef]
3. Martinez-Graña, A.M.; Goy, J.L.; Cimarra, C. 2D to 3D geologic mapping transformation using virtual globes and flight simulators and their applications in the analysis of geodiversity in natural areas. *Environ. Earth Sci.* **2015**, *73*, 8023–8034.
4. Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A. Numerical modeling of flow patterns applied to the analysis of the susceptibility to movements of the ground. *Geosciences* **2018**, *8*, 340. [CrossRef]
5. Vikentyev, I.; Banda, R.; Tsepin, A.; Prokofiev, V.; Vikentyeva, O. Mineralogy and Formation Conditions of Portovelo-Zaruma Gold-Sulphide Vein Deposit, Ecuador. *Geochem. Mineral. Petrol.* **2005**, *43*, 148–154.

6. Spencer, R.M.; Montenegro, J.L.; Gaibor, A.; Perez EPViera, F.; Spencer, C.E. The Portovelo-Zaruma mining camp, SW Ecuador: Porphyry and epithermal environments. *SEG Newsl.* **2002**, *49*, 8–14. Available online: https://www.researchgate.net/publication/285751271_The_Portovelo-Zaruma_mining_camp_SW_Ecuador_porphyry_and_epithermal_environments (accessed on 5 May 2020).
7. Lopez Bravo, M.; Santos Luna, J.; Quezada Abad, C.; Segura Osorio, M.; Perez Rodriguez, J. Actividad Minera y su Impacto en la Salud Humana. Revista Ciencia UNEMI Volumen 9—Número 17, Enero—Abril 2016, 92–100. Available online: https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5556797.pdf (accessed on 15 April 2020).
8. Fárová, K.; Jelének, J.; Kopačková-Strnadová, V.; Kycl, P. Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovičky Landslide, Czech Republic. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 2670. Available online: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/22/2670 (accessed on 8 May 2020). [CrossRef]
9. Crosetto, M.; Crippa, B.; Biescas, E.; Monserrat, O.; Agudo, M. State-of-the-Art of Land Deformation Monitoring Using Differential SAR Interferometry. 2005. Available online: https://www.researchgate.net/publication/228351503_State-of-the-Art_of_Land_Deformation_Monitoring_Using_Differential_SAR_Interferometry (accessed on 8 May 2020).
10. Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A. Determinación de las rutas de flujo lahar primario y secundario del volcán de Fuego (Guatemala) utilizando parámetros morfométricos. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 727. Available online: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/6/727 (accessed on 9 May 2020). [CrossRef]
11. Young, N. Applications of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR): A Small Research Investigation. 2018. Available online: https://www.researchgate.net/publication/328773243_Applications_of_Interferometric_Synthetic_Aperture_Radar_InSAR_a_small_research_investigation (accessed on 5 May 2020). [CrossRef]
12. Tofani, V.; Raspini, F.; Catani, F.Y.; Casagli, N. Técnica de interferometría de dispersión persistente (PSI) para caracterización y monitoreo de deslizamientos de tierra. *Teledetección* **2013**, *5*, 1045–1065. Available online: https://www.semanticscholar.org/paper/Persistent-Scatterer-Interferometry-(PSI)-Technique-Tofani-Raspini/0f0ed27b2ccaad44e66fdc25c415e91f81b8f1ca (accessed on 5 May 2020).
13. Carlà, T.; Intrieri, E.; Raspini, F.; Bardi, F.; Farina, P.; Ferretti, A.; Colombo, D.; Novali, F.; Casagli, N. Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR. *Sci. Rep.* **2019**, *9*, 14137. [CrossRef]
14. Zhou, L.; Zhang, D.; Wang, J.; Huang, Z.; Pan, D. Mapping land subsidence related to underground coal fires in the wuda coalfield (north- ern china) using a small stack of alos palsar differential interferograms. *Remote Sens.* **2013**, *5*, 1152–1176. Available online: https://www.semanticscholar.org/paper/Mapping-Land-Subsidence-Related-to-Underground-Coal-Zhou-Zhang/e47448a372084bdb0f1dfd0dd8ad7cf889d41e77 (accessed on 10 April 2020). [CrossRef]
15. Govil, H.; Chatterjee, R.S.; Malik, K.; Diwan, P.; Tripathi, M.K.; Guha, S. Identification and measurement of deformation using sentinel data and psinsar technique in coalmines of korba. *ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2018**, *XLII-5*, 427–431. Available online: https://www.researchgate.net/publication/329042788_identification_and_measurement_of_deformation_using_sentinel_data_and_psinsar_technique_in_coalmines_of_korba/citation/download (accessed on 14 April 2020).
16. Aobpaet, A.; Caro, C.M.; Hooper, A.; Trisirisatayawong, I. Land Subsidence Evaluation Using Insar Time Series Analysis in Bangkok Metropolitan Area. 2009. Available online: https://www.researchgate.net/publication/228820037_land_subsidence_evaluation_using_insar_time_series_analysis_in_bangkok_metropolitan_area/citation/download (accessed on 10 April 2020).
17. Abdikan, S.; Arıkan, M.; Sanli, F.B.; Cakir, Z. Monitoring of coal mining subsidence in peri-urban area of Zonguldak city (NW Turkey) with persistent scatterer interferometry using ALOS-PALSAR. *Environ. Earth Sci.* **2014**. [CrossRef]
18. Martínez-Graña, A.M.; Goy, J.L.; Zazo, C. Geomorphological applications for susceptibility mapping of landslides in natural parks. *Environ. Eng. Manag. J.* **2016**, *15*, 327–338.
19. Sousa, J.J.; Ruiz, A.M.; Hanssen, R.F.; Perski, Z.; Bastos, L.; Gil, A.J.; Galindo-Zaldívar, J. PS-INSAR measurement of ground subsidence in Granada area (Betic Cordillera, Spain). 2008. Available online: https://www.researchgate.net/publication/228765038_PS-INSAR_measurement_of_ground_subsidence_in_Granada_area_Betic_Cordillera_Spain (accessed on 15 April 2020).

20. Roccheggiani, M.; Piacentini, D.; Tirincanti, E.; Perissin, D.; Menichetti, M. Detección y monitoreo de movimientos de tierra inducidos en túneles usando la interferometría SAR Sentinel-1. *Sens Remote* **2019**, *11*, 639. Available online: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/6/639 (accessed on 15 April 2020). [CrossRef]
21. Qin, Y.; Daniele, P. Monitoring underground mining subsidence in South Indiana with C- and L-band InSAR technique. In Proceedings of the 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS); 2015; pp. 294–297. Available online: https://www.semanticscholar.org/paper/Monitoring-underground-mining-subsidence-in-South-C-Qin-Perissin/08576df99bb5059e904e808f4502ef6a75e894ca (accessed on 15 April 2020).
22. Colombo, D.; Farina, P.; Moretti, S.; Nico, G.; Prati, C. Land subsidence in the Firenze-Prato-Pistoia basin measured by means of spaceborne SAR interferometry. IGARSS 2003. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. In Proceedings of the Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477), Toulouse, France; 2003; Volume 4, pp. 2927–2929. Available online: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1294634&isnumber=28604 (accessed on 15 April 2020). [CrossRef]
23. Thapa, S.; Chatterjee, R.; Singh, K.; Kumar, D. Land subsidence monitoring using ps-InSAR technique for l-band sar data. *ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2016, XLI-B7, 995–997.* Available online: https://www.researchgate.net/publication/309341322_land_subsidence_monitoring_using_ps-insar_technique_for_l-band_sar_data (accessed on 15 April 2020).
24. Zhang, A.; Lu, J.; Kim, J.-W. Detectan la deformación del suelo inducida por la minería y los peligros asociados utilizando técnicas InSAR espaciales, Geomática. *Peligros Riesgos Nat.* **2018**, *9*, 211–223.
25. Muñoz, E.; Flor, C.; Caizaluisa, A.M.R.; Carlos, E. Escenarios Climáticos en presencia del Fenómeno El Niño (FEN) en las Micro-cuencas Cristal, Potosí, Pechiche y Balsas del Ecuador. *Rev. Climatol.* **2015**, *15*, 7–25. Available online: https://www.researchgate.net/publication/279303370_Escenarios_Climaticos_en_presencia_del_Fenomeno_El_Nino_FEN_en_las_Micro-cuencas_Cristal_Potosi_Pechiche_y_Balsas_del_Ecuador (accessed on 1 May 2020).
26. Torres, T.M.; Platzeck, G. Aplicación de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) como una herramienta para detectar deslizamientos en una región de los Andes en Ecuador. Pyroclastic Flow. *J. Geol.* **2014**, *4*, 22–52. Available online: http://pyflow.net/joomla30/index.php/archivo/9-all-issues/26-ms042014 (accessed on 10 May 2020).
27. Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A. Differential interferometry, structural lineaments and terrain deformation analysis applied in Zero Zone 2016 Earthquake (Manta, Ecuador). *Environ. Earth Sci.* **2019**, *78*, 499. Available online: https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12665-019-8517-4 (accessed on 20 April 2020). [CrossRef]
28. Interferometric Synthetic Aperture Radar. An Introduction for Users of InSAR Data." 2010. Available online: https://www.semanticscholar.org/paper/INTERFEROMETRIC-SYNTHETIC-APERTURE-RADAR-An-for-of/0a4e021fb3f247aee3c32c5a89dc4c61774029f2 (accessed on 10 May 2020).
29. Gens, R.; Logan, T. Alaska Satellite Facility software tools Manual. Published by Geophysical Institute, 2003. University of Alaska Fairbanks P.O. Box 7320 Fairbanks, AK-99775 USA. 2003. Available online: https://media.asf.alaska.edu/uploads/Get%20Started/asf_software_tools.pdf (accessed on 10 May 2020).
30. Sillerico, E.; Marchamalo, M.; Rejas, J.G.; Martínez, R. La Técnica DInSAR: Bases y Aplicación a la Medición de Subsidencias del Terreno en la Construcción. *Inf. Constr.* **2010**, *62*. Available online: https://www.researchgate.net/publication/46179345_La_tecnica_DInSAR_bases_y_aplicacion_a_la_medicion_de_subsidencias_del_terreno_en_la_construccion (accessed on 22 April 2020). [CrossRef]
31. Zebker, H.A.; Rosen, P.A.; Goldstein, R.M.; Gabriel, A.; Werner, C.L. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers Earthquake. *J. Geophys. Res.* **1994**, *99*, 19617–19634. Available online: https://ieeexplore.ieee.org/document/399105 (accessed on 20 April 2020). [CrossRef]
32. Perissin, D. SARPROZ Software Manual, 569p. 2009. Available online: http://ihome.cuhk.edu.hk/~{}b122066/manual/index.html (accessed on 26 April 2020).
33. Wegmuller, U.; Werner, C.; Strozzi, T.; Wiesmann, A. Monitoring Mining Induced Surface Deformation. In Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Sym- Posium, 2004. IGARSS'04. Proceedings. IEEE International. IEEE. 2004, Volume 3, pp. 1933–1935. Available online: https://www.researchgate.net/publication/282017903_Monitoring_Underground_Mining_Subsidence_In_South_Indiana_With_C-_And_L-Band_Insar_Technique (accessed on 5 May 2020).

34. Milan, L. Insar Used for Subsidence Monitoring of mining Area Okr, Czech Republic. Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry, Fringe. 2009. Available online: https://www.semanticscholar.org/paper/insar-used-for-subsidence-monitoring-of-mining-area-lazecky/b18a7fa05756a494491d20694abb53637a1466c3 (accessed on 10 May 2020).
35. IGEPN. Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional. *Quito.* Available online: http://www.igepn.edu.ec/solicitud-de-datos (accessed on 10 March 2020).
36. Chunga, K.; Ochoa-Cornejo, F.; Mulas, M.; Toulkeridis, T.; Menéndez, E. Characterization 452 of seismogenic crustal faults in the gulf of Guayaquil, Ecuador. *Andean Geol.* **2019**, *46*, 66–81. [CrossRef]
37. Campoverde, C. Subsidence Analysis for Mining Activity in the Zaruma Urban Helmet. Case of Study la Inmaculada School. Public Thesis Prior to Obtaining the Title of Mining Enginer. Faculty of Engineering in Earth Sciences Faculty. Littoral Polytech High School. 2017. Available online: http://www.fict.espol.edu.ec/sites/fict.espol.edu.ec/files/CAMPOVERDE.pdf (accessed on 10 May 2020).

© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

800 AÑOS

VNiVERSiDAD
Đ SALAMANCA

1218 ~ 2018