



**DETERMINACIÓN DEL RIESGO POR FENÓMENOS DE
REMOCIÓN EN MASA (F.R.M) PARA PROYECTOS DE
INFRAESTRUCTURA LINEALES. CASO DE ESTUDIO:
SUBCUENCA DEL RÍO PALACÉ.**

John Fander Higidio Castro

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Civil
Programa Ingeniería Ambiental
Popayán
2014

**DETERMINACIÓN DEL RIESGO POR FENÓMENOS DE
REMOCIÓN EN MASA (FRM) PARA PROYECTOS DE
INFRAESTRUCTURA LINEALES. CASO DE ESTUDIO:
SUBCUENCA DEL RÍO PALACÉ.**

Trabajo de grado, modalidad investigación para aspirar al título de:
Ingeniero Ambiental

John Fander Higidio Castro

Director

MSc. Nixon Alexander Correa Muñoz

Co- Director

Ing Luis Jorge González Muñoz

Línea de investigación:
Geomática

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Civil
Programa Ingeniería Ambiental
Popayán
2014

Nota de aceptación

El director y los jurados una vez revisado el informe final y escuchada la sustentación, dan por aprobado el presente trabajo de grado

Firma director

Firma co-director

Firma Jurado 1

Firma Jurado 2

Dedicatoria

Jhon Fander Higidio Castro

A Dios, quien me dió la fortaleza para conseguir este logro frente a los obstáculos que se presentaron, a pesar de mis errores y fallas, Él nunca se olvido de mí.

Mis padres **Zenaida Castro** y **Guillermo Franco Higidio** por ser mi motor y bendición, los que me enseñaron a soñar y a ser la persona que soy.

Mis hermanas **Andrea** y **Johana** por su apoyo incondicional, sus consejos y por creer en mis capacidades.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas e instituciones que han hecho posible que esta tesis de pregrado llegue a feliz término:

Al Acueducto y Alcantarillado de Popayán especialmente a la División Ambiental Fundación Procuencia Río Las Piedras por brindarme la oportunidad de desarrollar esta investigación y dar un pequeño aporte en el Acueducto Subcuenca Río Palacé.

Al ingeniero Nixon Alexander Correa Muñoz, como director y amigo por su interés, tiempo, apoyo y valiosos aportes para que el proyecto saliera adelante.

Al ingeniero Luis Jorge González por su colaboración en el desarrollo de este estudio.

A la Doctora Liliana Recaman Mejía por su tiempo y apoyo para que esta investigación fuera posible.

Al ingeniero Fabio Salazar por su tiempo e información en las visitas de campo para el desarrollo del estudio.

Al laboratorio de topografía de la Universidad del Cauca por la colaboración en la prestación de equipos para el desarrollo de esta investigación.

Al grupo de trabajo de la División Ambiental por su apoyo y colaboración fundamental en este proyecto

Y a todos mis amigos que me han apoyado y ayudado.

Resumen

Esta investigación continúa con la implementación de los conceptos, algoritmos y métodos de la nueva ciencia de la geomorfometría, aplicados en la zona centro occidente del departamento del Cauca, mediante la tesis de maestría en Geomática: “Método para la caracterización de las formas del terreno, caso departamento del Cauca”, (Correa, 2012). A partir de la experiencia adquirida, se evaluó la calidad de los modelos digitales del terreno, disponibles en los centros espaciales, a escala semidetallada; se derivaron parámetros del terreno mediante la corrida de algoritmos implementados en software libre, y se analizaron en forma multivariada, junto con información temática de la zona de estudio relacionada con cobertura, medidas geométricas como la distancia a fallas, a los ríos y como factor detonante la precipitación. Se seleccionó un conjunto de variables no redundantes a partir de la técnica no paramétrica del análisis de componentes principales y se obtuvo un modelo de predicción de la susceptibilidad de la zona de estudio ante deslizamientos mediante el enfoque estadístico de la regresión logística multinomial, utilizando como variable dependiente un inventario de deslizamientos obtenido a partir de recorridos de campo y como variables independientes las variables del terreno: pendiente, factor longitud de pendiente, índice topográfico de humedad, longitud de ruta de flujo, suelos e índice de convergencia. El mapa de susceptibilidad obtenido se reclasificó en las categorías extremadamente baja, muy baja, baja y media alta, de acuerdo con los valores de probabilidad obtenidos y comparados con otras investigaciones. La vulnerabilidad se evaluó mediante la asignación de pesos a cada elemento expuesto de la Red de conducción, igualmente de acuerdo con la revisión de literatura realizada. La superposición de los mapas de amenaza y vulnerabilidad permitió conocer el Riesgo de la zona de estudio, la cual se presentó finalmente en las categorías de baja, media y alta.

La no disponibilidad de estudios a escala semidetallada del Riesgo por este fenómeno natural por las entidades encargadas del riesgo en la zona de estudio, no permitió la validación del modelo de predicción, pero la evaluación del error cuadrático medio de la elevación, desde la cual se derivaron los parámetros del terreno y la superposición de los resultados en el globo virtual Google Earth, arroja una zonificación concordante con lo encontrado en las visitas de campo realizadas.

Palabras Clave: Geomorfometria, análisis del terreno, Fenómenos de Remoción en Masa, regresión logística multinomial, Amenaza, Vulnerabilidad, Riesgo.

Abstract

This research continues the implementation of the concepts, algorithms and methods of the new science of geomorphometry applied in the west central area of the department of Cauca, by the master's thesis in Geomatics: "Method for the characterization of landforms case Cauca "(Correa, 2012). From experience, the quality of digital terrain models, available space centers, contains semi scale was assessed; ground parameters were derived by the implemented algorithms run on free software, and analyzed using multivariate techniques, along with thematic information of the study area related to coverage, geometric measurements such as distance to faults, rivers and trigger factor precipitation. A set of non-redundant variables were selected from the non-parametric technique of principal component analysis and a model for predicting susceptibility to landslide study area was obtained using the statistical approach to multinomial logistic regression, using as a variable dependent on landslide inventory obtained from field observations and variables as independent field variables: slope, slope length factor, topographic wetness index, flow path length, soil and rate of convergence. The susceptibility map is reclassified obtained in extremely low, very low, low and high average, according to the probability values obtained and compared to other research categories. The vulnerability was assessed by assigning weights to each element of the network exposed driving, also according to the literature review. Overlaying maps of threat and vulnerability renders the risk of the study area, which was finally submitted in the categories of low, medium and high.

Unavailability of studies contains semi scale risk by this natural hazard by entities of risk in the study area did not allow validation of the prediction model, but the evaluation of mean square error of elevation, from which were derived terrain parameters and overlapping results in the virtual globe Google Earth casts a zoning consistent with those found in field visits.

Keywords: Geomorphometry, terrain analysis, landslide phenomena, multinomial logistic regression, threat, vulnerability, risk.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	VII
Abstract	VIII
Lista de figuras	XI
Lista de tablas.....	XIII
Introducción	1
1. Objetivos.....	5
1.1 General	5
1.2 Específicos	5
2. Aspectos generales zona de estudio.....	6
3. Revisión de literatura	11
4. Metodología	29
5. Resultados y discusión de resultados	38
5.1 Evaluación de la exactitud de los Modelos Digitales de Elevación (DEMs).....	39
5.2 Parámetros morfométricos del terreno.....	45
5.2.1 Pendiente (Slope)	45
5.2.2 Factor LS	47
5.2.3 Índice topográfico de humedad (TWI)	48
5.2.4 Índice de convergencia	50
5.2.5 Longitud ruta de flujo.....	51
5.3 Parámetros de proximidad geométrica	52
5.3.1 Distancia a drenajes	52
5.3.2 Distancia a fallas geológicas.....	53
5.4 Tipos de suelos	54
5.5 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	55
5.6 Inventario de deslizamientos.....	57
5.7 Análisis de componentes principales (ACP).....	58
5.8 Análisis de Amenaza por factores condicionantes del terreno en la zona de estudio	60
5.9 Análisis del factor disparador en la zona de estudio.....	65
5.10 Análisis de vulnerabilidad en la infraestructura lineal Red Acueducto Palacé.....	67
5.11 Análisis del Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa	68
5.12 Validación de resultados	69

6. Conclusiones y recomendaciones.....	72
6.1 Conclusiones.....	73
6.2 Recomendaciones.....	74
Anexos.....	75
Anexo A: Registro fotográfico de la zona de estudio	76
Anexo B: Tabla de precipitaciones máximas diarias (mm)	78
Anexo C: Tabla de precipitaciones máximas mensuales (mm)	78
Anexo D: Mapa de amenaza ante deslizamientos en la zona de influencia sobre la Red de conducción.....	79
Anexo E: Mapa de Vulnerabilidad de la Infraestructura lineal	80
Anexo F: Mapa de Riesgos de la Infraestructura lineal	81
Bibliografía.....	82

Lista de figuras

<i>Figura 2-1: Ubicación zona de estudio Subcuenca Río Palacé</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2-2 : Digitalización de capas temáticas en la Zona Estudio</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2-3: Zona de influencia sobre la Infraestructura lineal</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3-1: Relación Susceptibilidad, Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3-2 : Ancho de banda sensores OLI-TIRS del Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4-1: Modelo conceptual de etapas en la determinación del Riesgo ante F.R.M.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 5- 1: Digitalización en pantalla Carta Topográfica IGAC 343 III.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5-2 : Modelos Digitales de Elevación Zona de estudio en 3D.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 5-3: Boxplot - Diagrama de cajas y bigotes.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5-4: Diferencias de elevaciones DEM SRTM1” y DEM-TOPO.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5-5: Comparación mapa de pendientes IGAC – SRTM1”</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5 - 6: Tramos de pendientes alrededor de la Red de conducción.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5-7: Mapa factor LS</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5-8: Mapa índice topográfico de humedad (WTI)</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5-9: Mapa índice de convergencia</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5-10: Mapa de longitud de ruta de flujo</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5-11: Mapa distancia a drenajes</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5-12: Mapa de distancias a fallas geológicas</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5 -13: Mapa de Suelos.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5-14 : Imagen Landsat 8 zona de estudio</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5-15: Mapa índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)</i>	<i>56</i>

<i>Figura 5 16: Inventario de F.R.M en la zona de influencia.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5- 17: Análisis de componentes principales</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5-18: Mapa de probabilidades de Amenaza por deslizamientos derivados de la regresión logística.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5 -19: Mapa de propagación de flujo múltiple en la zona de influencia.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5 -20 : Mapa de Amenazas ante F.R.M en la zona de estudio</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5 - 21 : Mapa de amenaza ante F.R.M en la zona de influencia sobre la Red de conducción</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5 - 22: Espacialización de estaciones pluviométricas en la zona de estudio</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5 - 23: Semivariogramas de la precipitación Máximas diarias</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5 24: Mapa precipitaciones Máximas diarias (DIA) y mensuales (MES).....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5- 25: Perfil vertical de Red de conducción Acueducto Palacé.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5-26 : Mapa de Vulnerabilidad de la Infraestructura lineal.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5 - 27: Mapa de Riesgos Infraestructura lineal</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5-28: Validación cualitativa del modelo de amenaza ante F.R.M</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5 29: Mapa área de acumulación de flujo.....</i>	<i>71</i>

Lista de tablas

<i>Tabla 1-1 : Algunos estudios en el campo de la geomorfometría</i>	4
<i>Tabla 3-1 : Clasificación de Procesos de Remoción en Masa</i>	13
<i>Tabla 3- 2: Clasificación de movimientos basados en la velocidad de desplazamiento</i>	13
<i>Tabla 3- 3 : Descripción de Fenómenos de Remoción en Masa</i>	14
<i>Tabla 3- 4 : Parámetros morfométricos utilizados en la modelación de susceptibilidad ante F.R.M.</i>	17
<i>Tabla 3- 5 : Metodología para la modelación con SIG</i>	18
<i>Tabla 3- 6 : Estudios realizados en el mundo con diferentes metodologías en el análisis de FRM</i>	21
<i>Tabla 3-7: Exactitud vertical y horizontal DEMs de diferentes fuentes</i>	25
<i>Tabla 3- 8: Parámetros de algunos Sistemas de Satélite</i>	26
<i>Tabla 3- 9 : Distribución de las bandas en OLI y TIRS</i>	28
<i>Tabla 4-1: Métodos de derivación de parámetros primarios y secundarios</i>	33
<i>Tabla 5-1: Características de los DEMs analizados</i>	40
<i>Tabla 5-2: Estadística Descriptiva DEMs</i>	41
<i>Tabla 5-3: Error Cuadrático Medio (RMSE)</i>	43
<i>Tabla 5-4: Estadísticas de los parámetros morfométricos</i>	60
<i>Tabla 5-5 : Pesos de evidencia para los parámetros morfométricos</i>	61
<i>Tabla 5-6: Coeficientes calculados en la regresión logística</i>	62



Capítulo 1

Introducción

Introducción

➤ Problema de estudio

En el país, son numerosos los casos en que los Fenómenos de Remoción en Masa (F.R.M) han afectado obras de infraestructura, especialmente oleoductos y acueductos, así como también vías de comunicación, poblaciones que han cobrado gran cantidad de víctimas (Plaza G, 1996; Plaza G, 1998).

En los últimos años se presentaron aspectos de inestabilidad del terreno en la zona de estudio subcuenca Río Palacé generando deterioro en la infraestructura de la Red de conducción del Acueducto de Palacé debido a la desestabilización de taludes que provocaron deslizamientos de tierra y roca así como hundimiento y pérdida de la banca ocasionados por presencia de afloramientos de aguas y de escorrentía superficial no manejados que obstaculizaron los caminos de la servidumbre (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S.P. ,2012).

Debido a los movimientos en masa de taludes y fragmentación de los bosques, que han impedido el normal funcionamiento de la Red de conducción, sumando la mala planificación de los predios y el sobrepastoreo que pueden incrementar los Fenómenos de Remoción en Masa (F.R.M), se hace necesario identificar, determinar y seleccionar parámetros geomorfométricos característicos de la zona de estudio que aporten la mayor información para así determinar un modelo de Susceptibilidad espacial confiable que junto a la incidencia de la precipitación como factor detonante ante movimientos masales permitan identificar las zonas con mayores riesgos para la toma de acciones preventivas y correctivas frente a peligros que afecten las estructuras lineales.

Son muchas las causas que pueden generar movimientos masales entre ellas están rocas muy meteorizadas, fuertes pendientes, poca cobertura vegetal y factores detonantes externos (sismos, vulcanismo, antrópicos y precipitaciones) que pueden generar riesgos potenciales en la degradación de los suelos. En este sentido se pretende hacer uso del Modelo digital de elevación, la geomorfometría y los Sistemas de Información Geográfica como herramientas para estimar la Susceptibilidad del terreno (Amenaza por factores condicionantes del terreno), Amenaza por influencia de la precipitación (Amenaza por factor natural disparador) y el Riesgo de los elementos expuestos principalmente sobre la infraestructura de la Red de conducción del Acueducto ante movimientos en masa con el fin de obtener resultados indicativos de las principales áreas que se encuentran vulnerables.

La implementación de modelos predictivos cuantitativos basados en metodologías probabilísticas tendrá como objetivo disminuir la subjetividad y correlacionar parámetros explicatorios para garantizar la menor redundancia en la información intrínseca de éstos, mayor precisión y concordancia con la realidad del modelo.

La investigación de este estudio tiene como justificación:

- Generar parámetros del terreno a partir del análisis numérico de la elevación (a partir de DEMs), geométricos (S.I.G) y de cobertura (P.D. imágenes de satélite) y mapas continuos de precipitación (Geoestadístico).
- Generar cartografía base ante Fenómenos de Remoción en Masa (F.R.M) a escala semidetalladas debido a la generalidad en la escala de la Cartografía oficial donde se delimita la zona de estudio en una sola categoría de Amenaza ante Fenómenos de Remoción en Masa.
- Necesidad de obtener un modelo de Predicción de Amenaza y Riesgo a partir de métodos estadísticos como el análisis de componentes principales y regresión logística multinomial como un insumo para realizar posteriores investigaciones que puedan ser extrapolables a otras zonas.

➤ **Antecedentes**

Las metodologías de carácter cuantitativo para el análisis del terreno se han apoyado en la Geomorfometría (Correa, 2012; Gutiérrez, 2012; Abarca, 2010), una subdisciplina de la Geomorfología que trata de describir la forma de la superficie de la tierra, con el uso combinado de las matemáticas, ciencias de la tierra y la informática (Pike, 2000) , para el modelado la superficie del terreno mediante diferentes técnicas útiles para evaluar el medio físico y ha utilizado como instrumento fundamental para evaluar la calidad y determinar parámetros morfométricos del terreno los modelos de elevación digital proporcionando un mayor análisis en la calidad de las variables y la información primaria de entrada al modelo.

Algunos estudios que se han realizado en diferentes partes del mundo (Tabla1-1) donde se han utilizado los Modelos de elevación Digital haciendo uso de la Geomorfometría.

Tabla 1-1 : Algunos estudios realizados en el campo de la geomorfometría

Autor	Objeto	Método	Resultado
Hengl et al., 2008	Evaluar los errores de los DEMs y determinar sus efectos sobre los resultados del modelado espacial.	Modelado geoestadístico (regresión de errores – kriging) de la topografía mediante mapas auxiliares (distancia a corrientes, complejidad del terreno, sombreado analítico, índice de vegetación normalizado)	Los errores de los DEM-SRTM 3” son mayores que los DEM-TOPO, pero es necesario refinar la técnica, implementando métodos de regresión kriging locales (ajuste de variogramas y modelos de regresión en una ventana móvil).
Arrell et al., 2007	Identificar los límites entre las diferentes clases morfológicas	Identificación difusa de clases morfométricas a partir de DEMs con diferentes resoluciones y umbrales de gradiente, aspecto y curvatura. Uso de la técnica de clasificación no supervisada “c-means difusa”	Las diferentes clases morfométricas se observan en forma óptima a diferentes resoluciones, pero una RE=100 m tiene un equilibrio entre la delimitación del relieve a escala semidetallada y el suavizado de los datos para reducir el ruido de la superficie.
Grohmann et al., 2007	Aplicar el DEM-SRTM3” en geomorfología y análisis morfotécnico	Parámetros morfométricos considerados (pendiente, aspecto, rugosidad y superficie isobase). Obtención de un mapa isobase (versión simplificada de la superficie topográfica original, desde la cual se remueve el ruido de la erosión de las corrientes de primer orden permitiendo la identificación de áreas con posible influencia tectónica.	La extracción de la red de drenaje a partir del DEM-SRTM3” presentó buenos resultados al compararlo con un mapa topográfica a 1:50000, por tanto el DEM-SRTM3” es un buen recurso para análisis geomorfológico a escala semidetallada

Fuente: Correa, 2012

1. Objetivos

1.1 General

- Determinar el Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa (F.R.M) para proyectos de Infraestructura lineal en la zona de estudio Subcuenca del Río Palacé.

1.2 Específicos

- Evaluar la Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo de la infraestructura lineal en la zona de estudio Subcuenca Río Palacé.
- Evaluar la incidencia de la precipitación como factor disparador ante Fenómenos de Remoción en Masa en la zona de estudio.
- Validar los resultados del Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa en el área estudiada.



Capítulo 2

Aspectos generales zona de estudio

2. Aspectos generales zona de estudio

La Subcuenca Hidrográfica del Río Palacé comprende un área total de 64.532 Ha entre los municipios de Totoró, Cajibío, Silvia, Puracé y Popayán, se sitúa en la parte central y nor-oriental del Departamento del Cauca (POMCH, 2010).

La zona de estudio en la Subcuenca Río Palacé se encuentra localizada entre las coordenadas $2^{\circ} 28' 19,2''$ latitud norte y $76^{\circ} 32' 16,8''$ longitud oeste (esquina inferior izquierda), y $2^{\circ} 30' 57,6''$ latitud norte y $76^{\circ} 29' 13,2''$ longitud oeste (esquina superior derecha), de igual forma dentro de los 765.091,695 sobre X, y 1.060.053,602 sobre Y, 769.983,914 sobre X y 1.065.678,232 sobre Y, metros respectivamente. Atraviesa los municipios de Popayán y límites con Totoró (Figura 2-1). Cubre una superficie de 27,51 km² aproximadamente y un perímetro de 21,03 km. La cota mínima y máxima está entre 1850 m y 2300 m respectivamente. Las inclinaciones más representativas muestran un rango entre los 0° y 28° (media=13,97°; SD=6,88°) y zonas con pendientes máximas que van hasta los 65° sobre el cañon del Río Palacé.

En la Figura 2-1 se observa la ubicación de la Subcuenca Río Palacé y la zona de estudio donde se encuentran las obras de infraestructura lineales del Acueducto de Palacé. Para definir el área de estudio se utilizaron criterios como la disponibilidad de información y cartografía base quedando delimitada gran parte en el municipio de Popayán y una parte en el municipio de Totoró.

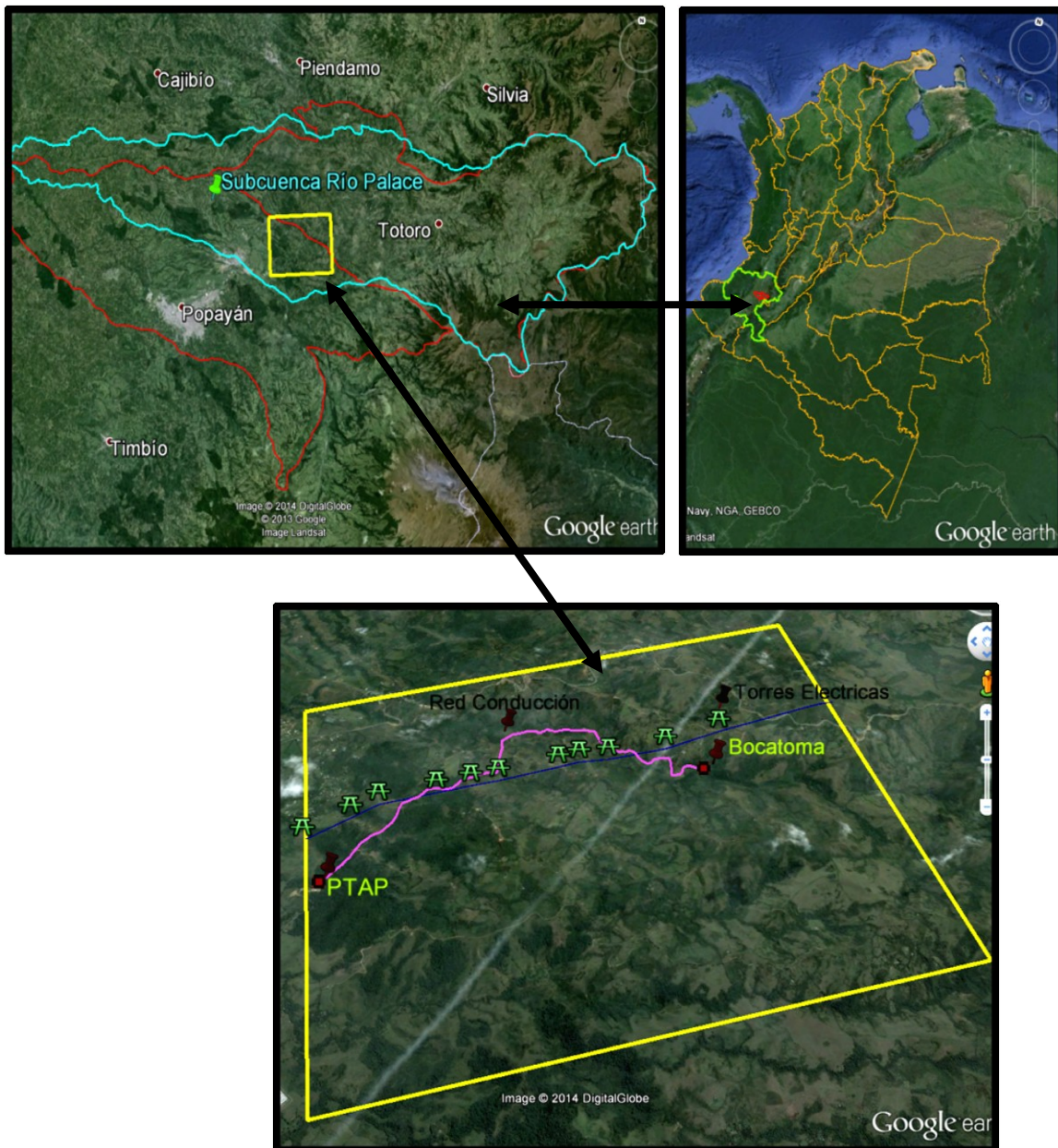
Según informes técnicos del Acueducto y Alcantarillado de Popayán La zona por donde atraviesan las obras de infraestructura lineales:

- Está dedicada básicamente a la agricultura predominan los cultivos frijol, café, hortaliza, yuca, se encuentran variedades de pastos, áreas de reserva de bosques, rastrojos, ciénagas, predominan especies vegetales como el roble, eucaliptos, pino, alisos, helechos, zarza, chachafruto, nacedero entre otros.
- El acceso a la bocatoma es por la Vía Popayán - Totoró a una distancia de 4 a 5 Km aproximadamente, por vía pavimentada, en donde se toma el desvío por una carretera sin pavimentar de aproximadamente 2 Km, la vía se encuentra en buenas condiciones de mantenimiento, no presenta inestabilidad de taludes.
- La Línea de conducción de agua cruda se construyó para una capacidad nominal de 500 l/s con una longitud de 5,715 m entre la salida de los desarenadores y la cámara de quietamiento a la entrada de la planta de potabilización, en tubería de presión de 686 milímetros.
- La banca donde se encuentra instalada la Línea de conducción, tiene un promedio de 4 metros de ancho y la construcción de cuatro túneles: El primero

de una longitud aproximada de 132 m, el segundo de 348,67 m, el tercero de 169,70 m y el cuarto de 98,40 m. se cuenta con seis viaductos para pasos inferiores de quebradas o drenajes de aguas lluvias a lo largo de la conducción.

➤ La población que se beneficia del servicio del acueducto Palacé es aproximadamente unos 20.000 habitantes del sector del norte de Popayán y veredas circunvecinas que actualmente se beneficiaban del acueducto el Tablazo.

Figura 2-1: Ubicación zona de estudio subcuenca río palacé



En la zona de estudio como se pueden observar en la Figura 2-1 se encuentran las obras de infraestructura lineales, Red de conducción del Acueducto de Palacé y 11 torres eléctricas de alta tensión (voltaje 230 KV)

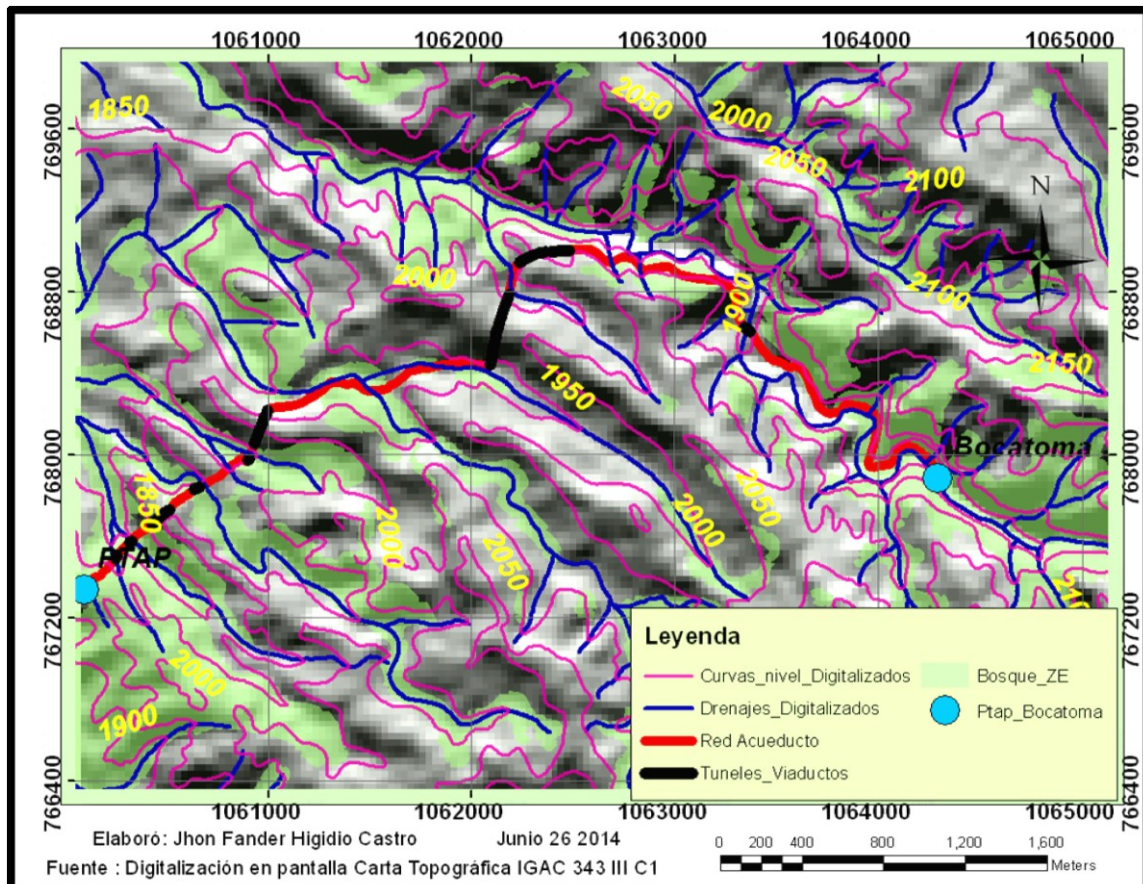
que se encuentran paralelas a esta, implementadas en la zona en 1987 por la compañía de Interconexión I.S.A, 9 de ellas pertenecen al municipio de Popayán y 2 al municipio de Totoró.

Esta conformada por el Río principal Palacé que atraviesa solo una longitud de 8107,28 m sobre esta y las siguientes Quebradas: Quebrada Clarete con una longitud aproximada de 7724,13 m, Quebrada La Palma 2394,26 m, Quebrada Agua Tibia 3353,14m, Quebrada Zarzalito 3492,75 m, Quebrada La Selva 1008,92 m, Quebrada Las aguas 527,46m, Quebrada Montenegro 1495,58m, Quebrada El Cabuyo 3681,89m y sus respectivos afluentes.

En la Figura 2-2 se indica la digitalización en pantalla de las capas temáticas drenajes, curvas de nivel, bosques extraídas de la Carta topográfica IGAC 343 III C1 de la zona de estudio y se indican las obras de infraestructura lineal, Red de Acueducto del Río Palacé, túneles y viaductos.

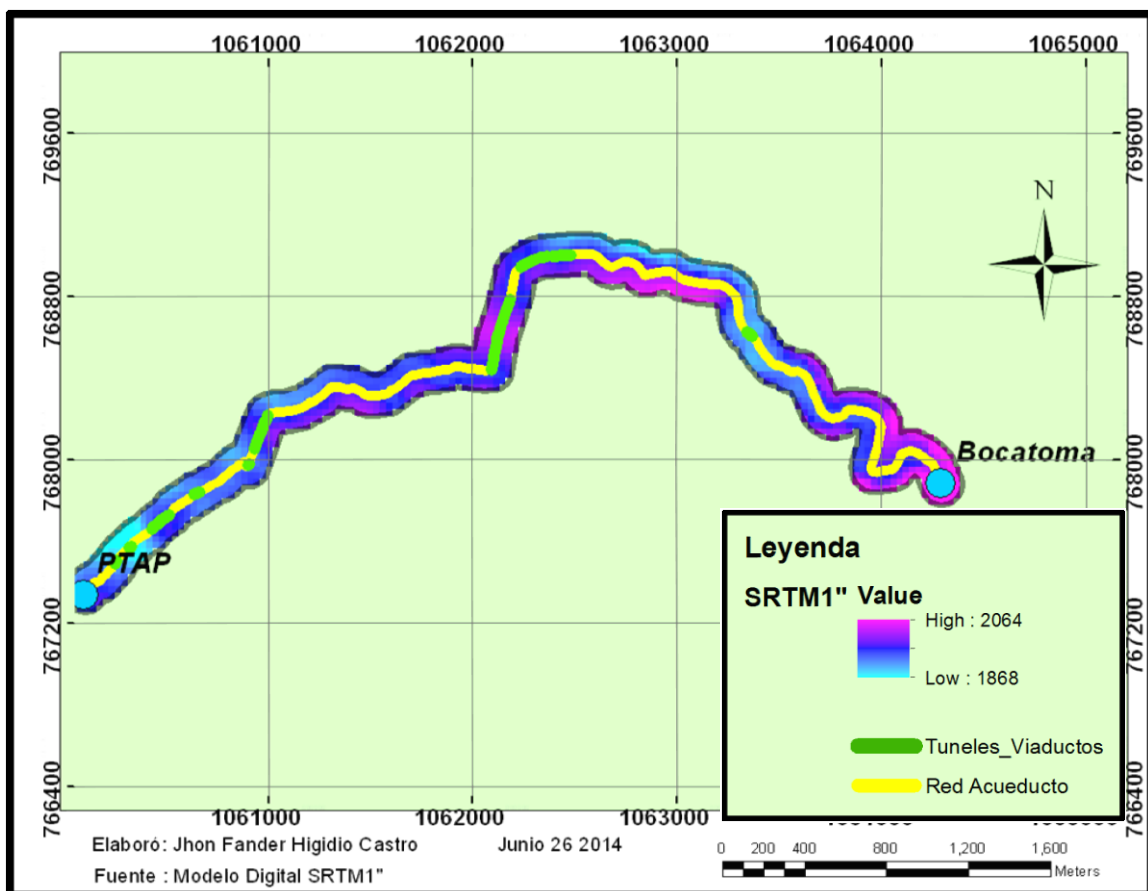
Otro aspecto interesante de resaltar es la densidad de bosque natural en la zona y los esfuerzos colectivos de la población junto al Acueducto de Popayán a través de la Fundación Río Piedras por conservar y aislar éstas áreas de protección ambiental.

Figura 2-2 : Digitalización de capas temáticas en la Zona Estudio



Dentro de la zona de estudio se delimitó un radio de influencia de 100 m para analizar el modelo de predicción de Amenaza y Riesgo sobre la Red de conducción, criterios apoyados en la revisión de literatura y en la distribución de movimientos masales sobre la zona de estudio. Esta área tiene como límite el cañón sobre el Río Palacé donde se presentan las pendientes más pronunciadas, con un relieve moderado a fuertemente escarpado seguido de un relieve moderadamente ondulado. La altura de la zona de influencia está en el rango de 1868-2064 m, con un área aprox 1,21 km² sobre la Red de conducción y un perímetro de 12,14 km (Figura 2-3).

Figura 2-3: Zona de influencia sobre la Infraestructura lineal





CAPÍTULO 3

Revisión de literatura

2. Revisión de literatura

Los Fenómenos de Remoción en Masa (F.R.M) denominados “slope movement” (Varnes, 1978) o “landslide” (Sharpe, 1938), son movimientos de una masa de roca, suelo o derrubio de una ladera en sentido descendente (Cruden, 1991). Otros autores coinciden con esta definición afirmando que los Fenómenos de Remoción en Masa, “son desprendimientos relativamente rápidos de volúmenes variables de suelo, rocas o combinación de ambos”. Las causas más comunes de su origen son: altas pendientes, aumento de presiones intersticiales por infiltración de agua, sobrepeso de materiales acumulados en las vertientes y por la combinación de estos con factores geológicos, entre otras” (Acosta y Peláez ,1995).

Existe una gran variedad de clasificaciones de procesos de Remoción en Masa, lo cual es resultado de su complejidad y de los enfoques a través de los cuales se han llevado a cabo investigaciones con respecto a este tema en una amplia gama de disciplinas. Estas clasificaciones se han basado de manera general, en aspectos como los atributos morfológicos de los movimientos, tanto de la superficie de ruptura como del área de depósito (Brunsdén, 1973; Crozier, 1973); en el tipo y velocidad del movimiento (Sharpe, 1938; Varnes, 1978); tamaño y tipo de los materiales involucrados (Coates, 1977; Varnes, 1978); antigüedad del movimiento (Zaruba y Mencl, 1969); grado de actividad (Erskine,1973); y tipo climático (Sharpe, 1938; Hutchinson, 1968). Es importante resaltar como una excepción a los F.R.M, la erosión y los hundimientos de cavidades o de materiales en este tipo de movimientos, por ser procesos más lentos y prolongados en el tiempo (Varnes, 1978; Fernández, 2001). La clasificación más aceptada y utilizada en la actualidad es la que se basa en el mecanismo del movimiento, en forma general estos movimientos de Remoción en Masa se pueden clasificar en: Caídas o desprendimientos, vuelcos o desplomes, deslizamientos, expansiones laterales, flujos y movimientos complejos. Una simple y completa clasificación que considera estos aspectos es la ofrecida por el programa EPOCH (1993), el cual a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988), elabora una diferenciación entre el tipo de movimiento y los materiales involucrados. De acuerdo con esta clasificación, los diferentes movimientos se subdividen por materiales formadores, los cuales pueden ser rocas, detritos ó derrubios y suelos, tal como se muestra en la Tabla 3-1.

En la Tabla 3-2 se puede observar el grado de Riesgo del deslizamiento y su relación con la velocidad que ocurre, desde extremadamente rápido de aprox 5 m/s que pueden ocasionar grandes impactos y extremadamente bajas menores a 15 mm/año. También se habla de velocidades moderadas 13 m/mes (Australian Geomechanics Society, 2002; Cruden y Varnes, 1996).

Tabla 3-1 : Clasificación de Procesos de Remoción en Masa

Tipo de Movimiento	Tipo de Material		
	Rocas	Derrubios	Suelo
Desprendimiento	Caída o desprendimiento de rocas	Caída o desprendimiento de derrubios	Caída o desprendimiento de suelo
Vuelco o Desplome	Vuelco o desplomes de rocas	Vuelco o desplomes de rocas	Vuelco o desplomes de rocas
Deslizamiento rotacional	Individual Múltiple Sucesivo	Individual Múltiple Sucesivo	Individual Múltiple Sucesivo
Deslizamiento translacional	Deslizamiento de roca en bloque	Deslizamiento de derrubio en bloque	Deslizamiento translacional de suelo
Deslizamiento planar	Deslizamientos de rocas	Deslizamientos de derrubios	Coladas de barro
Flujos	Flujo de rocas	Corrientes de derrubios	Flujos de tierra, arena o suelo
Expansión Lateral	Expansión lateral en rocas	Expansión lateral en derrubios	Expansión lateral en suelos
Complejo	Ej :Avalancha de rocas	Ej: Flujo deslizante	Ej: Rotación con flujo de tierra

Fuente: EPOCH (1993) a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988)

Tabla 3-2: Clasificación de movimientos basados en la velocidad de desplazamiento

Clase	Descripción	Velocidad Típica	Daños Esperados
1	Extremadamente Rápido	5 m/seg	Catástrofe de gran violencia.
2	Muy Rápido	3 m/min	Pérdida de vidas Humanas debido a que la velocidad del movimiento es muy rápida.
3	Rápido	1.8 m/h	Posible escape y evacuación, estructura, posesiones y equipo destruido por la masa desplazada.
4	Moderado	13 m/mes	Estructuras poco sensibles pueden ser mantenidas si están localizadas a una distancia considerable en relación con el pie de la masa desplazada.
5	Lento	1.6 m/año	Carreteras y estructuras poco sensibles pueden ser mantenidas a través de frecuente trabajo de mantenimiento.
6	Muy lento	>15 mm/año	Algunas estructuras permanentes no son dañadas y si son agrietadas por el movimiento, pueden ser reparadas.
7	Extremadamente Lento	<15 mm/año	Construcción posible con precauciones.

Fuente: Australian Geomechanics Society, 2002 después Cruden y Varnes, (1996)

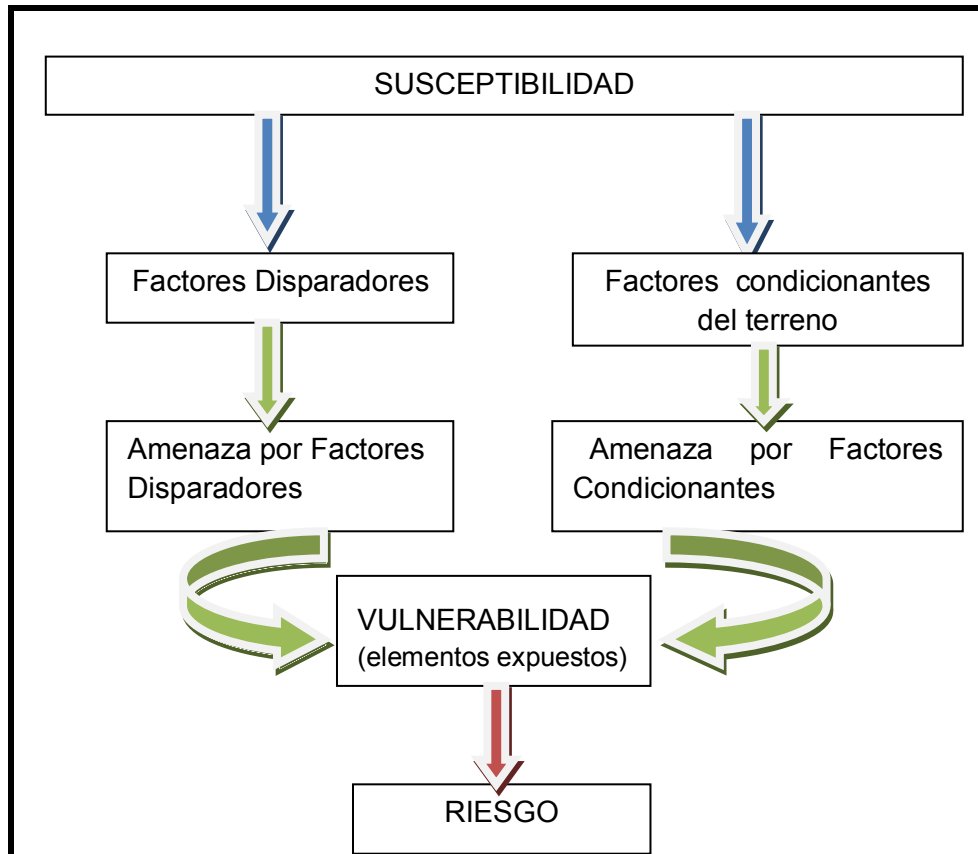
La clasificación utilizada y conceptual en el presente estudio se apoya en las publicadas por Varnes, 1958,1978; Ayala et al., 1987, Corominas y García Yagüe, 1997; Highland et al., 2008 tal como se indica en la Tabla 3-3 que se basan fundamentalmente en el mecanismo de rotura y propagación del movimiento utilizando básicamente criterios morfológicos.

Tabla 3-3 : Descripción de Fenómenos de Remoción en Masa

Fenómeno de Remoción en Masa	Descripción
Desprendimiento	Este proceso de remoción es muy común en laderas empinadas o verticales, que comienzan con un desprendimiento de suelo o roca, o ambos, en una pendiente pronunciada que se desprenden de laderas empinadas o acantilados. Los indicadores de caída de rocas inminente incluyen terrenos con rocas, salientes o rocas fracturadas unida a lo largo de pendientes pronunciadas.
Vuelco o Desplome	Este tipo de movimiento consiste en la rotación de una masa de suelo, detritos o roca en torno a un eje o pivote determinado por su centro de gravedad. Su movimiento es hacia adelante o hacia la parte externa, por lo cual involucra inclinación o basculamiento, pero no implica colapsamiento.
Deslizamiento rotacional	Se caracterizan por que la superficie de rotura se curva hacia arriba (en forma de cuchara, superficie cóncava) se producen fundamentalmente en materiales homogéneos ó en macizos rocosos muy fracturados (Antonie, 1992) debido a que los deslizamientos de rotación se presentan con mayor frecuencia en materiales homogéneos, son los deslizamientos más comunes en los materiales “de relleno”, su extensión es variable y generalmente el gran volumen de material que se desplaza es difícil de estabilizar de forma permanente.
Deslizamiento translacional	Los deslizamientos translacionales es otro de los tipos más comunes de deslizamientos de tierra en todo el mundo. Se encuentran a nivel mundial en todo tipo de ambientes y condiciones. Suelen producirse sobre materiales heterogéneos con superficies de discontinuidad bien definidas. En general, son menos profundos que los deslizamientos de rotación.
Flujos	Son un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída.
Expansión Lateral	Son movimientos resultados de la fracturación y expansión de suelos o masas de roca compactos, debido a la licuefacción o fluidización del material subyacente, ocurren cuando materiales gruesos, como fragmentos de rocas, grava, etc., están inmersos en una matriz de material más fino o contienen arcillas. La mayoría de los deslizamientos y los flujos involucran algún grado de expansión.
Complejo	Ocurre cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al ir desplazándose ladera abajo. Varnes (1978), denomina así a un tipo de movimiento en masa que involucra una combinación de uno o más de los tipos principales de movimientos, entre los más importantes cabe destacar los aludes o avalanchas de rocas y los flujos deslizantes.

Para determinar el Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa (F.R.M) se debe tener presente dos conceptos importantes: La Vulnerabilidad (elementos expuestos) y la Amenaza (factores condicionantes del terreno y factores disparadores) debido que se encuentran íntimamente relacionados. La Susceptibilidad permite definir la Amenaza ya sea por factores condicionantes del terreno o por factores disparadores y ambos generan un Riesgo potencial (Figura 3-1).

Figura 3-1: Relación de Susceptibilidad, Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo



Guzzetti et al. (1999; 2005; 2006; 2009) definen la Susceptibilidad como el grado en el cual un área puede ser afectada por futuros movimientos; una estimación de “dónde” podrían ocurrir estos movimientos. El análisis de Susceptibilidad es considerado un análisis espacial (Corominas et al., 2003), que no involucra la probabilidad temporal ni la magnitud de los movimientos esperados (Guzzetti *et al.*, 2009), generalmente expresa la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de los factores condicionantes (intrínsecos) propios del suelo o roca sin la intervención de factores desencadenantes (externos).

Los mapas de Susceptibilidad a deslizamientos (Amenaza por factores condicionantes del terreno) pueden considerarse como derivados de los mapas

de inventario de deslizamientos debido a que un inventario es esencial para la preparación de un mapa de Susceptibilidad y por consiguiente un insumo para determinar el Riesgo (Varnes, 1984). El inventario de deslizamiento debe tener información básica de localización y el tipo de deslizamiento (Tabla 3-1).

Un modelo de Susceptibilidad a los deslizamientos va más allá de un mapa de inventario y muestra las áreas que tienen un potencial de deslizamientos. Estas áreas se determinan por la correlación de algunos de los principales factores condicionantes (variables independientes) que contribuyen al deslizamiento (tales como laderas escarpadas, unidades geológicas débiles que pierden fuerza cuando se saturan o se perturban y mal drenaje de la roca o el suelo) con la distribución de deslizamientos de tierra del pasado (variables dependientes) que se extrapolan a zonas sin movimientos con objeto de evaluar su propensión a los mismos por vía estadística. Por ejemplo, superponer un mapa geológico con un mapa de inventario que presenta los deslizamientos existentes puede identificar unidades geológicas específicas propensas a deslizamientos (Highland et al., 2008), es decir, el mapeo de Susceptibilidad a deslizamientos utiliza estadística bivariada o multivariada que enfoca el análisis entre factores de control de deslizamiento de tierra y la distribución de deslizamientos (Guzzetti et al., 1999).

Hay diferentes factores que contribuyen a la inestabilidad de taludes, con frecuencia, es la combinación de procesos naturales y actividades humanas (deforestación, cambio en el uso del suelo). Hay varios factores involucrados en acción conjunta que producen inestabilidad de laderas (Crozier, 1984; Irigaray, 1995). Estos factores se pueden agrupar en factores condicionantes (determinantes o pasivos), que controlan los deslizamientos espacialmente (Hansen, 1984; Crozier, 1984, 1986) y factores desencadenantes (disparadores o activadores) que controlan la actividad en el tiempo.

Los Factores Condicionantes (determinantes o pasivos) son aquellos que condicionan la estabilidad sin que ésta se inicie (equilibrio límite) o aquellas condiciones naturales que hacen la ladera más susceptible al movimiento. Estos factores determinantes dependen bien de la naturaleza de los materiales (litología, textura, discontinuidades, etc.) o de la morfología del terreno como la pendiente, orientación, altitud, curvatura, etc (Alcántara, 2000). La combinación de los factores determina la relación entre las fuerzas resistentes y activadoras de la inestabilidad.

Los Factores Disparadores (desencadenantes o activos) son aquellos que inician el movimiento debido a la modificación, frecuentemente rápida, de las condiciones preexistentes de estabilidad. Entre éstos destacan la precipitación (intensa o acumulada), que implica el aumento del contenido de agua y la

presión intersticial del suelo, la actividad sísmica, que produce aumento del esfuerzo de cizalla y la actividad volcánica (Dai et al., 2002a).

Diferentes autores han utilizado diversos parámetros morfométricos a lo largo de la historia para predecir modelos de Susceptibilidad ante la existencia de movimientos en masa como el grado de la pendiente y naturaleza del lecho de rocas para definir unidades de terreno (Brabb et al., 1972). Otros han incorporado nuevas variables, tales como: proximidad a los drenaje y a estructuras, red de caminos, cobertura de la tierra, NDVI, actividad tectónica, precipitaciones, Factor de longitud de pendiente, Índice topográfico de humedad (TWI), Índice de poder de corriente (SPI) entre otras (Guzzetti et al., 1999; Dai y Lee, 2002b; Moreiras, 2005; Guzzetti et al, 2006, Oh y Pradhan, 2011; Nefeslioglu et al.,2012; Pradhan, 2013; Taner, 2013).

En la Tabla 3-4 de indican las variables morfométricas utilizadas por diferentes autores en estudios de S usceptibilidad por Fenómenos de Remoción en Masa a través del tiempo.

Tabla 3- 4 : Parámetros morfométricos utilizados en la modelación de Susceptibilidad ante F.R.M

Parámetro morfométricos	Autores
Litología	Varnes (1984); Baeza y Corominas(2001), Zezere (2002)
Vegetación, Uso del suelo, Índice de vegetación (NDVI)	Varnes (1984); Guzzetti et al., (1999), Lee y Talib (2005)
Geomorfología	Varnes (1984)
Pendientes	Lee y Talib (2005); Dai y Lee (2002b); Guzzetti et al., (1999), Binaghi et al.,(1998);Remondo et al., (2003)
Curvatura	Guzzetti et al., (1999)
Elevaciones	Dai y Lee (2002b); Guzzetti et al.,(1999); Binaghi et al.,(1998); Baeza y Corominas (2001)
Orientaciones	Remondo et al., (2003); Baeza y Corominas (2001)
Distancia a fracturas	Lee y Talib (2005); Binaghi et al.,(1998)
Distancia a Red de drenajes	Binaghi et al.,(1998); Lee y Talib (2005)
Concavidad-Convexidad	Lee y Talib (2005); Dai y Lee (2002b); Remondo et al., (2003)
Estructuras	Varnes (1984)
Precipitación	Clerici et al., (2002)
Rugosidad	Remondo et al., (2003)
Espesor de depósitos superficiales	Zezere(2002); Remondo et al., (2003)

Fuente: Bonachea (2006)

En los últimos años hubo grandes progresos en la investigación y documentación de métodos para la predicción y mapeo de la cartografía en Fenómenos de Remoción en Masa (F.R.M), tales como: los estadísticos,

heurísticos y determinísticos (Guzzettiet al., 1999), en virtud de la necesidad de información que pueda ser usada por los planificadores para minimizar los impactos socio-económicos. Una clasificación general se presenta en la Tabla 3-5 donde se exponen bases en que se orienta dichos métodos Directos e Indirectos en el estudio de Fenómenos de Remoción en Masa.

Tabla 3-5 : Metodología para la modelación con SIG

Métodos Cualitativos (Directos)	Métodos Cuantitativos(indirectos)	Métodos Semicuantitativos(Directos -indirectos)
Es el método más subjetivo de todos, utilizan índices de deslizamientos basados en opiniones de expertos para identificar las áreas con similares características geológicas y geomorfológicas que son susceptibles a deslizamientos de tierra. También se les denomina métodos Heurísticos.	Buscan eliminar la subjetividad cuantificando los grados de riesgo en valores absolutos y se basa en expresiones matemáticas basado en procesos que correlacionan los factores causales y deslizamientos de tierra. Dependen de la calidad y cantidad de datos colectados.	Son metodologías cualitativas, que utilizan procedimientos de ponderación y calificación.
Evaluación por un experto: Análisis Geomorfológico y combinación cualitativa de mapas.	Determinísticos (Mora-Vahrson) y Estadísticos (Regresión logística, Lógica difusa; Análisis Componentes Principales, Redes Neuronales, Peso de Evidencias (WOFE), Validación Cruzada)	Evaluación multicriterio (Proceso de jerarquías analíticas y suma ponderada de pesos de factores de clases)

Las técnicas cualitativas fundamentaron la cartografía y mapeo de deslizamientos y aún hoy son fuentes importantes en el estudio de los mismos (Evans 1997 y Guzzetti et al., 1999). Cada día las investigaciones guiadas hacia el estudio del territorio buscan generar aproximaciones más reales que permitan una mejor identificación de los problemas y de las soluciones a éstos. Cámara et al. (2005) hace énfasis en el uso de técnicas de estadística espacial como la lógica difusa y análisis multicriterio (Hutchinson, 1991; Saaty; 1980), donde se considera un conjunto de operaciones espaciales teniendo presente todas las variables que intervienen para caracterizar con el uso de la teoría de las probabilidades y la teoría de la posibilidad las distribuciones espaciales. Lo anterior debido que la lógica booleana a pesar de ser una técnica valida puede quedar corta en la representación del espacio y determinación del verdadero comportamiento de la situación y problema; contextos que se han venido mejorando con la lógica difusa al permitir desarrollar modelos más precisos en donde los valores de probabilidad no son un conjunto finito de dos elementos, sino que pueden situarse en todo el rango de valores posibles obteniendo una gama de posibilidades sin límites de opciones.

Con el objetivo de disminuir la subjetividad se están implementando técnicas más sofisticadas donde las predicciones de áreas susceptibles a deslizamientos se basen en expresiones matemáticas y correlaciones estadísticas de un conjunto de variables de entrada al modelo (Carrara et al., 1995; Dai et al., 2002a; Lee et al., 2004). La invención y desarrollo de técnicas cuantitativas han permitido obtener modelos de probabilidad espacial bastante satisfactorios, de acuerdo con su validación independiente (Remondo, 2001; Zêzere, 2002; Remondo et al., 2003). Los Métodos cuantitativos han sido utilizados por distintos autores que han investigado la Susceptibilidad a deslizamientos como: **La Regresión Logística** usada cuando la variable dependiente es categórica (presencia o ausencia) y las variables independientes son categóricas, numéricas o ambas (Menard, 2002; Ozdemir et al., 2012; Dai and Lee, 2003; Lee, 2004, 2005; Ayalew y Yamagishi, 2005; Chang et al., 2007; Lee y Pradhan, 2007; Das et al., 2010, Olmacher y Davis., 2003; Bonachea, 2006; Pradhan, 2008), **Redes neuronales Artificiales (AAN)** se encuentran expresadas en un modelo matemático, la cual tiene como objetivo construir un nuevo modelo de datos generando procesos que permitan generalizar y predecir salidas desde un conjunto de entradas (Atkinson y Tatnall, 1997; Lee et al., 2004; Gómezy Kavzoglu, 2005; Yesilnacar y Topal, 2005; Nefeslioglu al., 2008), **La Lógica difusa (fuzzy logic)** cuyas fronteras no son precisas y está especificada mediante una función que mapea el grado de pertenencia o certeza con la que se asocia cierto elemento a las diferentes categorías, atributos, estados de cosas ó conjuntos que conforman el dominio (Ercanoglu y Gokceoglu, 2004; Pradhan et al., 2009; Akgun et al., 2012), **Neuro-Difuso** (Oh y Pradhan, 2011; Bui et al., 2012; Pradhan, 2013), **Peso de evidencias (WOFE)** se basa en un enfoque estadístico bivariada bayesiana, que se ha extendido a la evaluación de amenaza de deslizamientos (Ozdemir et al., 2012; Lee et al., 2004) y otras como **Soporte en Maquinas Vector (SVM)** (Yilmaz, 2009; Marjanović et al., 2011; Pradhan, 2013; Taner, 2013).

De igual manera la validación del modelo es importante a la hora de verificar la predicción del modelo, se utiliza únicamente como una técnica en la prueba de aceptación de bondad de ajuste y por lo tanto juzga el modelo. La Validación cruzada es una de varias técnicas estadísticas más utilizadas para probar la fuerza de una predicción del modelo (Geisser, 1974). La validación del mapa de Susceptibilidad se utiliza como un modelo predictivo de la localización de futuros movimientos en masa. Diferentes autores han usado métodos de validación calculando el área bajo la curva característica (ROC: Área Under Receiver-Operator Characteristic Curve”), llamada las AUC o el índice Kappa de concordancia (Smith, et al., 2007). La curva ROC es un método de evaluación independiente de la exactitud de umbral que valida los modelos predictivos y define la calidad del modelo probabilístico, describiendo su

habilidad para predecir confiablemente la ocurrencia o no ocurrencia de un evento (Fawcett, 2006). Los rangos varían de 0 a 1; cuando el valor de la AUC es igual a 1, al igual que el índice kappa indica una perfecta concordancia.

En la Tabla 3-6 se indican algunos estudios realizados en el mundo con las diferentes metodologías aplicadas para modelos de predicción de amenaza ante deslizamientos, los parámetros del terreno utilizados y su respectiva validación.

Guzzetti et al., (1999), definieron la Amenaza o peligrosidad por movimientos en masa como: “la probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa potencialmente peligrosos de una determinada magnitud, en un período Específico y en una determinada área”. La amenaza natural involucra a diferencia de la susceptibilidad un factor externo disparador de los movimientos en masa (Varnes, 1984).

Según Dai et al (2002a), la relación entre la ocurrencia de deslizamientos y las características de las lluvias es la base para el desarrollo de sistemas regionales de alerta en tiempo real de deslizamientos de tierra. Se han realizado varios intentos para establecer relaciones entre las lluvias y los deslizamientos, estas relaciones generalmente se basan en la suposición de que existe una relación directa entre la aparición de deslizamientos y la cantidad de precipitaciones, en términos de intensidad de la lluvia y la duración de los eventos ó precipitaciones a corto plazo (24 horas) y las precipitaciones antecedentes. La Geospatial Information Societies (2013) recomienda para la evaluación de amenazas de deslizamientos utilizar datos de precipitaciones en 24 horas. Fowze et al., (2010) utiliza para la evaluación de amenazas por precipitaciones las máximas anuales diarias.

La Vulnerabilidad es el grado de pérdida provocado en un elemento ó conjunto de elementos presentes en un área por la ocurrencia de un fenómeno determinado con una magnitud ó intensidad dada y comúnmente se expresa en escala de 0 (sin daño) a 1 pérdida total (UNDRO, 1991; Varnes, 1984). Para Dai et al (2002a), la evaluación de la Vulnerabilidad consiste en la comprensión de la interacción entre un deslizamiento y los elementos afectados. En general, la Vulnerabilidad a deslizamientos puede depender de: la distancia, el volumen y la velocidad de deslizamiento, los elementos en riesgo (edificios y otras estructuras), su naturaleza y su proximidad y los elementos en riesgo (personas), su proximidad, entre otros.

La interacción o relación entre la Amenaza y Vulnerabilidad es una medida para estimar el Riesgo que se define como el grado de pérdida esperado debido a un fenómeno potencialmente dañino consideran la expresión del

Riesgo $R = H$ (Amenaza) $\times V$ (Vulnerabilidad) (UNDRO, 1991; Varnes 1984). Crozier y Glade, (2005) definen el Riesgo como la probabilidad de pérdida que puede ser medida en términos de daños a las personas ó a los bienes materiales, como resultado de la interacción entre la Amenaza asociada a un evento de procesos de Remoción en Masa y las condiciones locales de vulnerabilidad. Algunos autores han clasificado la Susceptibilidad, Amenaza y Riesgo a Fenómenos de Remoción en Masa en las siguientes categorías: Los mapas de Susceptibilidad representando diferentes clases: baja, moderada, alta y muy alta (Brabb et al., 1998; Guzzettiet al., 1999). Otros autores clasifican el rango de Susceptibilidad extremadamente baja ó sin susceptibilidad, muy baja, baja, media, alta (Bai et al, 2006; Ayalew y Yamaguchi, 2005), baja, moderada y alta en estudios referenciados por la USGS en Canadá (Highland et al., 2008) y por último baja, moderada, alta y muy alta (Nandi y Shakoor., 2008; Das et al., 2012). Por otra parte los mapas de Amenazas ó peligro de deslizamiento, Pradhan (2008) los clasifica en sin amenaza, baja, moderada, alta, muy alta. Nadim et al., (2013) clasifica la Amenaza por deslizamiento producido por precipitaciones en alta y baja. El Riesgo en trabajos mencionados por la USGS lo clasifican en bajo, medio y alto (Highland et al., 2008).

Tabla 3-6 : Estudios realizados en el mundo con diferentes metodologías en el análisis de FRM

Estudio	Resultados
Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia (Pradhan, 2008)	Utilizaron insumos de entrada como pendiente, aspecto, curvatura, distancia a drenajes, litología, distancia de lineamientos, tipo de suelo, cobertura, precipitación, e índice de vegetación normalizada y el inventario de deslizamientos. Los coeficientes demostraron la exactitud de la regresión logística multivariada en la evaluación de la amenaza a deslizamientos en tres islas de Malasia que fueron 94%, 89, 86% mediadas a través de AUC (área bajo la curva) y en la validación cruzada obtuvieron porcentajes de 90% y 79% con resultados razonables.
Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos (Bonachea, 2006)	Aplicó distintas técnicas utilizando variables categóricas y continuas como inventario de deslizamientos, elevación, pendiente, litología, uso del suelo, espesor de regolito con diferentes técnicas estadísticas como regresión logística, función de relación de probabilidad, Lógica difusa, redes neuronales artificiales y bayes, llegando a la conclusión que todos los métodos arrojaron resultados muy similares y la importancia de la calidad de las variables de entrada al modelo.

<p>A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses (Nandi y Shakoor, 2008)</p>	<p>Utilizó como insumos un mapa de inventario de deslizamientos, Factores de inestabilidad como el ángulo de la pendiente, tipo de suelo, erodabilidad del suelo, índice de liquidez del suelo, cobertura del terreno, precipitación y proximidad a drenajes, responsable de la ocurrencia de deslizamientos de tierra a escala 1:24000. El valor de AUC de curva ROC para análisis bivariado fue de 0,59, con un error estándar estimado de 0,11 y para la regresión logística multivariada fue 0,81, con un error estándar estimado de 0,07. Estos resultados indican que la regresión logística es un buen estimador de la susceptibilidad de deslizamientos.</p>
<p>Landslide susceptibility mapping along road corridors in the Indian Himalayas using Bayesian logistic regression models (Das et al.,2012)</p>	<p>Modeló factores condicionantes del terreno y obtuvo valores de la curva ROC para la regresión logística bayesiana de 86% y para la regresión logística ordinaria del 79,6%. Validó el modelo de la regresión logística bayesiana utilizando el 50% de las celdas de deslizamientos y obtuvo una exactitud de predicción del 83,9% en este modelo.</p>
<p>A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey (Ozdemir y Altura,2012)</p>	<p>Los parámetros utilizados en el modelo fueron geología, permeabilidad, uso del suelo, precipitación, elevación, pendiente, aspecto, curvatura total, plano de curvatura, perfil de curvatura, índice de humedad, índice de poder de corriente, índice de capacidad de sedimentos (Factor LS), distancia a drenajes entre otros: la capacidad de predicción de los modelos para el radio de frecuencia, evidencia de pesos y regresión logística multinomial a través del área bajo la curva ROC de 0,976, 0,952, y 0,937 respectivamente.</p>
<p>GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China (Bai et al.,2006)</p>	<p>La calidad de los mapas de susceptibilidad fue validada con un porcentaje de predicción de 81,4% y un RMSE de 0,392 utilizando variables como aspecto, elevación, ángulo de pendiente, plano de curvatura, tipo de suelo, distancia a drenajes, interceptos.</p>
<p>Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh province (Vietnam): A comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models (Bui et al.,2011)</p>	<p>Utilizo el 70% de los deslizamientos del inventario para construcción del modelo de predicción y el 30% restante para la validación del modelo. Los resultados mostraron que los 10 modelos aplicados de lógica difusa arrojaron valores de la AUC desde 0,9185 a 0,9370 indicando que los modelos tienen una buena capacidad de predicción.</p>
<p>Landslide susceptibility mapping using geological data, a DEM from ASTER images and an Artificial Neural Network (ANN) Honshu Island, Japan (Kawabata y Bandibas, 2008)</p>	<p>Incluye parámetros como pendiente, aspecto, elevación, geología, geomorfología y límites de distancia. Desarrollo procesos de entrenamiento a través de redes neuronales artificiales obteniendo una exactitud del 90% en la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en áreas particulares.</p>
<p>Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy) (Conforti et al., 2012)</p>	<p>La curva ROC arrojó un valor del área bajo la curva (AUC) de 0,90 que demuestra la robustez y buena confiabilidad del modelo de susceptibilidad de deslizamientos. Obtuvo validaciones muy acertadas con un 85% de confiabilidad para deslizamientos por caídas en altas y muy altas.</p>

Los modelos de Susceptibilidad a deslizamientos reflejan condiciones de campo existentes, las más importantes fuentes de datos incluyen un inventario de deslizamientos bien preparados, parámetros geológicos y geomorfológicos (elevación, pendiente, aspecto y curvatura) (Highland et al., 2008). Para determinar dichos factores de inestabilidad del terreno juegan un papel importante los Modelos digitales de elevación (DEM), que se definen como un arreglo ordenado de números que representan la distribución espacial de la altura sobre un datum arbitrario en un paisaje (Moore et al., 1991) ó simplemente un arreglo regular de puntos de elevación (Chang, 2004).

El uso de los DEMs se ha incrementado como fuente de datos para el análisis visual y matemático de la topografía, del paisaje, de las formas de la tierra y constituyen una fuente de datos con alto potencial para caracterizar el relieve en forma cuantitativa (López, 2006; Martínez et al., 2004; Moore et al., 1991), gracias a disciplinas como la Geomorfometría, también conocida como análisis digital del terreno o geomorfología cuantitativa (Pike et al., 2009; Shary et al., 2002; Florinsky, 1998) que se encarga del análisis cuantitativo de la superficie de la tierra permite obtener la relación entre la forma del relieve y los parámetros numéricos usados para su descripción (Bolongaro et al., 2005; Pike, 2000).

Como principales fuentes de datos digitales de elevación están: El Modelo digital de elevación ASTER (Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer) y el modelo digital de elevación SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). El DEM SRTM es una base de datos global de la topografía de la tierra obtenido mediante la técnica de interferometría con radar (Sensores activos) de apertura sintética (InSAR), mientras del DEM-ASTER está basado en el método de estéreo-correlación (Sensores pasivos) automatizada de imágenes adquiridas con sensores que captan las longitudes de onda del visible y el infrarrojo cercano (Jacobsen, K., 2005).

El modelo digital de elevación ASTER (Radiómetro Espacial Avanzado de Reflectancia y Emisión Térmica) está situado a bordo del satélite TERRA, lanzado en diciembre de 1999 como parte del Sistema de Observación Terrestre de la NASA (EOS). El sistema ASTER presenta una resolución espectral compuesta por tres subsistemas ópticos. El primero es el visible e infrarrojo cercano (VNIR, Visible and Near Infrared), el segundo por infrarrojo de onda corta (SWIR - Shortwave Infrared) y por último infrarrojo térmico (TIR, Thermal Infrared). El DEM ASTER de 1 Arco segundo tiene una resolución de 30 m en el ecuador (Toutin, 2008; Nikolakopoulos et al., 2006; Abrams, 2000).

Por otro lado el Modelo digital SRTM (Misión Espacial Radar Topográfica) realizó entre el 11 y el 20 de febrero de 2000 a bordo del transbordador espacial "Endeavour" (Rabus, et al., 2003). Los DEMs derivado de SRTM

(SRTM1" y SRTM3") con resoluciones aproximadas de 30 y 90 m respectivamente a partir de técnica de interferometría radar.

Los DEMs pueden ser derivados de sensores activos por diferentes fuentes como, la RADAR, la tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging) y la fotogrametría aérea (Nelson., et al, 2009).

Desarrollos recientes, han permitido nuevas opciones en la generación de DEM con mayor resolución espacial mediante el uso del sensor activo LIDAR (Light Detection And Ranging Detección y Alcance de Luz) que por sus siglas en ingles se conoce como sistema de escaneo aerotransportado, apareció en la década de los 90. LIDAR es un tipo de sensor activo, mediante el cual el sensor transmite una señal con energía electromagnética en longitudes de onda del visible y el infrarrojo (en infrarrojo cercano-rojo, ó a veces en los espectros del visible) hacia el suelo y luego registra el reflejo de esa señal, lo que muchas veces lo hace incapaz de penetrar la niebla, el humo ó la lluvia (Nelson., et al ,2009).

La tecnología LIDAR producen DEMs de alta calidad con resoluciones espaciales que van de 0,5 a 2 m y error vertical de 15 cm (Flood, 2001) y en el plano horizontal de 50 a 100 cm (Smith, 2005). Los mapas producidos por LIDAR son muy claros y detallados y en muchos casos revelan indicios de deslizamientos de tierra del pasado que son prácticamente invisibles por otros medios debido a la cobertura vegetal densa. El LIDAR es costoso y sumamente técnico y lo utilizan principalmente organismos gubernamentales, universidades y algunas entidades privadas (Highland et al., 2008). Para estudios topográficos detallados se requieren utilizar DEMs derivados de esta nueva tecnología que proporciona mayor exactitud, el único inconveniente es el costo comercial que tiene la creación de DEMs con LIDAR, razón por la que no se utilizó en este estudio.

La capacidad predictiva de los modelos depende de la calidad de las variables independientes (factores condicionantes). En este sentido, se está trabajando en el análisis de la influencia de la exactitud/resolución de las variables del terreno en la calidad de la predicción (Olague et al., 2005).

La calidad de los mapas de susceptibilidad de deslizamientos producidos y la representación de las condiciones reales del terreno dependen de la exactitud de la información utilizada como insumo. Por ello es necesario evaluar la exactitud del DEM antes de derivar los parámetros de la entrada de un modelo a representar, esta calidad puede evaluarse en dos fases: la primera es diseñar un análisis y control de la calidad durante la adquisición y los procesos de producción, y en segundo lugar una valoración independiente del DEM contra unos datos de referencia (Zhang et al., 2008).

Para evaluar la exactitud del DEM, se consideran los valores de altura del DEM, contra los de una fuente de referencia. Unos de los procedimientos que se utilizan para evaluar la calidad de los DEM son el error estándar, la raíz media del error cuadrático (RMSE; Root Mean Square Error) (Singh, 2004; Hengl et al., 2003).

De la exactitud del DEM depende la calidad de los parámetros del terreno que se derivan, y esto puede ser crítico cuando se usa para el modelado ambiental y para la predicción de la distribución espacial de propiedades hidrológicas, geomorfológicas y biológicas (Thompson et al., 2001; Florinsky, 1998; Chang, 1991). La exactitud vertical y horizontal de los modelos digitales de elevación determinados por el RMSE se indican en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7: Exactitud vertical y horizontal DEMs de diferentes fuentes

DEM	Exactitud vertical (m)	Exactitud horizontal (m)	Autores
SRTM1"	16	6	Nelson, et al., 2009 Hartemink y McBratney, 2009
	7-15 (Level 1)	USGS	
	Mitad del intervalo de contorno (Level 2)		
SRTM3"	16	20	Nelson, et al., 2009 Hartemink y McBratney, 2009
	30	USGS	
ASTER	30	30	Fujisada et al., 2005
	7-50	7-50	Hartemink y McBratney, 2009

Correa (2012)

Por otra parte los sensores remotos son instrumentos que han tenido gran evolución en la historia para obtener información acerca de un objeto, área ó fenómeno de investigación registrando inventarios permanentemente a través de sistemas de registro. En los últimos años los sensores remotos y los sistemas de información geográfica (SIG) han sido instrumentos primordiales en la identificación y mapeo de los procesos de remoción en masa así como también en la evaluación del riesgo asociado (Nagarajan et al., 1998; Liu et al., 2004; Bathrellos et al., 2009), debido que permiten extraer, almacenar y procesar de forma rápida la información (Carrara et al., 1995; Dikau et al., 1996; Van Westen et al., 1997; Guzzetti et al., 2006). Debido a lo anterior los sistemas de información geográfica contribuyen integración, modelación y exploración de datos espaciales de diferentes fuentes y su relación causa-efecto (Van Westen y Soeters, 2000).

Los Modelos digitales de elevación (DEM), así como otros parámetros ambientales, tales como la clasificación de la vegetación, el crecimiento de la cobertura vegetal pueden ser obtenidos a través de la información de imágenes

satelitales las cuales han sido de gran aplicación para determinar usos y coberturas del suelo, vigor de la vegetación, identificación de deslizamientos entre otras (Carvacho et al., 2010).

Los datos registrados por los sensores remotos son almacenados en formato raster y la resolución espacial está dada por el tamaño del pixel. En la Tabla 3-8 se indican las resoluciones espaciales de las bandas PAN (pancromática), VNIR (bandas del visible y el infrarrojo cercano), SWIR (el infrarrojo de onda Corta) y TIR (banda térmica del infrarrojo) para las diferentes imágenes satelitales. Dentro de los tipo pasivo se encuentran la técnica de procesamiento óptica a la cual pertenecen la mayoría de sensores remotos puestos en órbita como: SPOT, LANDSAT, IKONOS, QUICKBIRD entre otras.

Tabla 3-8: Parámetros de algunos Sistemas de Satélite

Satélite óptico	Sensor	Resolución Espacial (metros) y (# bandas)				Bandas adicionales	Año Lanzamiento
		PAN	VNIR	SWIR	TIR		
LANDSAT 5	MMS		80 (4)		120(1)		(EE.UU) 1984
	TM		30 (4)	30 (2)			
LANDSAT 7	ETM+	15	30 (4)	30 (2)	60 (1)		(EE.UU) 1999
LANDSAT 8	OLI/TIRS	15	30(4)	30(2)	30(2)	Azul costera y cirrus	(EE.UU)2013
SPOT 2	2HRV	10	20 (3)				(FRANCIA) 1990
SPOT 4	2HRVIR	10	20 (3)	20 (1)			(FRANCIA) 1998
SPOT 5	2HRG	2.5– 5	10 (3)	20 (1)			(FRANCIA) 2002
QUICKBIRD 2	BGIS 2000	0.6	2.5 (4)				(EE.UU) 2001
IKONOS 2	OSA	1	4 (4)				(EE.UU) 1999

Fuente: Metternicht et al (2005)

El Programa Landsat, el cual se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), ha utilizado los satélites como una forma visionaria de explorar y vigilar la superficie terrestre.

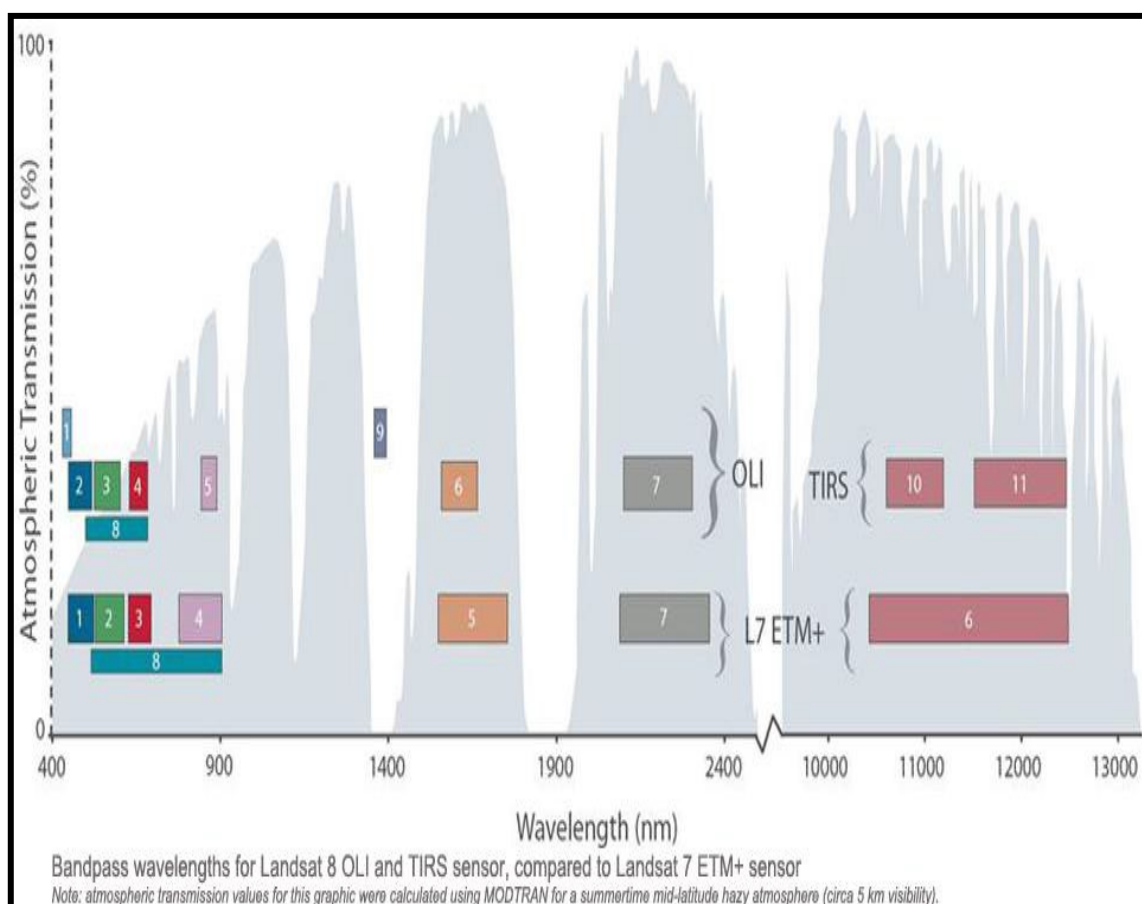
Ariza (2013) hace un recuento y descripción de las principales características y funcionamiento del nuevo programa Landsat suministrado por la USGS que en la actualidad se encuentra en su octava versión denominada: "Landsat Data Continuity Mission"(LDCM) el 11 de febrero de 2013 fue lanzado el octavo satélite de observación de la serie Landsat que continuará el legado de archivo de los anteriores satélites, convirtiéndose de esta manera en el futuro de los satélites de observación de la tierra de mediana resolución con más historia. El programa Landsat 8 consta de una plataforma con capacidad de carga de dos de sensores de observación terrestre, el primero de ellos denominado Operational Land Imager (OLI) y el sensor térmico infrarrojo Thermal Infrared

Sensor (TIRS). OLI y TIRS recogerán los datos de forma conjunta para proporcionar imágenes coincidentes de la superficie terrestre, incluyendo las regiones costeras, hielo polar, las islas y las zonas continentales.

Las bandas espectrales del sensor OLI, aunque similares a el sensor Landsat 7 ETM +, como se muestran en la Figura 3-2, proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras y un nuevo canal infrarrojo de onda corta (banda 9) para la detección de nubes cirrus.

Estas nuevas bandas, ayudarán a los científicos a medir la calidad del agua y facilitarán la detección de nubes altas y delgadas que previamente han sido difíciles de observar en las imágenes Landsat (Tabla 3-9).

Figura 3-2 : Ancho de banda sensores OLI-TIRS del Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7



Fuente: USGS (2013)

Tabla 3-9 : Distribución de las bandas en OLI y TIRS

BANDAS		LONGITUD DE ONDA (μm)	RESOLUCION (m)
Banda 1	Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
Banda 2	Azul	0.45 - 0.51	30
Banda 3	Verde	0.53 - 0.59	30
Banda 4	Rojo	0.64 - 0.67	30
Banda 5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
Banda 6	Infrarrojo de onda corta (SWIR 1)	1.57 - 1.65	30
Banda 7	Infrarrojo de onda corta (SWIR 1)	2.11 - 2.29	30
Banda 8	Pancromática	0.50 - 0.68	15
Banda 9	Cirrus	1.36 - 1.38	30
Banda 10	Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
Banda 11	Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Fuente: USGS (2013)

Las imágenes Landsat 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9. Una banda nueva (1) (azul-profundo) es útil para estudios costeros y aerosoles. La nueva banda (9) es útil para la detección de cirrus. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Dos bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 metros de resolución (Tabla 3-9).

El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte-sur por 183 kilómetros de este a oeste (106 km por 114 km). La calidad de los datos (relación de la señal en función del ruido) y la resolución radiométrica (16 bits) del OLI y TIRS es más alta que los anteriores instrumentos Landsat (8 bits para TM y ETM+), proporcionando una mejora significativa en la capacidad de detectar cambios en la superficie terrestre.

Actualmente se tienen imágenes satelitales de alta resoluciones que son codiciadas en el mercado a pesar de su costo debido a sus grandes aplicaciones a escalas detalladas en el análisis topográfico y de cobertura del terreno. Algunos de los programas que se han utilizado en estudios a nivel mundial son las imágenes satelitales SPOT, QUICKBIRD, IKONOS. (Metternicht et al, 2005). Las resoluciones espaciales de imágenes LANDSAT, ASTER y SPOT, pueden proveer una mejor aplicación para la identificación de grandes y medianas áreas de cárcavas, pero no permite el análisis secuencial en la expansión de éstas. En la actualidad con imágenes de alta resolución espacial como IKONOS y QUICKBIRD, es posible monitorear áreas con mayor detalle, para describir los rasgos de la erosión (Vrieling, 2007; Sujathaet al., 2000).



CAPÍTULO 4

Metodología

4. Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos de evaluar la Susceptibilidad espacial como Amenaza por factores condicionantes morfométricos del terreno y por otro parte determinar la incidencia de las precipitaciones para obtener un mapa de Amenazas por precipitaciones ante Fenómenos de Remoción en Masa (sin tener en cuenta la variabilidad temporal), se consideraron factores condicionantes resultado del análisis estadístico y el efecto de las precipitaciones en la zona de estudio, primordialmente por donde atraviesa las obras de infraestructura lineales del Acueducto Palacé para así obtener la predicción del modelo de Amenazas por factores morfométricos del terreno y por un factor disparador como la precipitación ante movimientos en masa. Para ello se realizaron las siguientes actividades que iniciaron con la Recopilación de información primaria y secundaria, Visita a campo, Pre-procesamientos de datos, Evaluación de la exactitud de los Modelos digitales de elevación (DEMs), Análisis del terreno en el DEM de referencia, Extracción de parámetros morfométricos, Análisis de la Amenaza mediante el modelo de regresión logística multinomial, Análisis de la Vulnerabilidad, Análisis de la precipitación como factor de disparador natural ante F.R.M y determinación del Riesgo en una zona de influencia de 100 m de la infraestructura lineal.

➤ **Recopilación de información Primaria y Secundaria**

La recopilación de información bibliografía actualizada permitió seleccionar los métodos y variables en la determinación del Riesgo ante F.R.M. Un insumo importante en etapas del proceso fueron los Modelos digitales de elevación (DEMs) para análisis del terreno, Imagen Satelital Landsat 8 y los estudios realizados por el Acueducto de Popayán.

Para esta investigación fueron utilizados los DEMs SRTM1” (*Shuttle Radar Topography Mission*) con resolución espacial aprox de 30 m, obtenido del I.G.A.C del 26 abril 2011 utilizado en la Tesis de Maestría Correa (2012), SRTM3” de resolución espacial aprox de 90 m, obtenido del C.I.A.T (Centro Internacional de Agricultura Tropical) del 15 marzo de 2011 y ASTERGDEM V2 (*Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) de resolución espacial aprox 30 m, obtenido de la U.S.G.S (<http://asterweb.jpl.nasa.gov>) del 17 de octubre de 2011. Además se utilizó la Carta topográfica 343 III C1 proporcionada por el I.G.A.C al igual que cartografía digital de suelos usada en estudio de investigación Correa (2012) y descarga de cartografía de los servicios del SIGOT.

Para el cálculo del Índice de vegetación normalizada (NDVI) se utilizó una imagen multispectral Landsat 8 descargada del servidor de la NASA (USGS) del 24 de enero de 2014 (WRS Path 009, WRS Row 058).

Los datos de precipitaciones entre el período 1985-2013 fueron proporcionadas por el I.D.E.A.M, precipitaciones máximas diarias y mensuales de 11 estaciones pluviométricas que se encuentran alrededor de la zona de estudio.

➤ **Visita de campo**

Se realizó la visita de campo con el acompañamiento del director y funcionarios del Acueducto de Popayán por toda la Red de conducción con el objetivo de observar las características del terreno y espacializar los elementos Expuestos vulnerables a los F.R.M mediante GPS de precisión métrica: tubería de conducción de agua cruda, túneles, viaductos, obras implementadas para los deslizamientos en la zona. También se llevó a cabo la actualización del inventario de deslizamiento con su respectiva clasificación según el tipo de F.R.M y registro fotográfico (Anexo A).

➤ **Pre-procesamiento de los datos**

Se construyó un polígono que contenía el área de estudio, se rasterizaron según el tamaño de pixel del DEM de referencia. El DEM de referencia fue cortado para obtener el DEM en el área de estudio, al igual que la cartografía proporcionada por el I.G.A.C. Los resultados se convirtieron a coordenadas planas en el sistema MAGNA SIRGAS origen complementario Oeste y se exportaron en formato ASCII, (Software ArcGIS 9.3). Sobre la zona de estudio se estableció una zona de influencia a 100 m de la infraestructura de conducción apoyado en estudios que corroboran la influencia de este radio de acción en los F.R.M (Das et al., 2012; Doyuran, 2004; Ayalew y Yamagishi., 2005; Larsen y Parks., 1997)

Posteriormente se realizó la transformación de coordenadas al sistema MAGNA SIRGAS Colombia Oeste para la georeferenciación y digitalización en pantalla de la Carta topográfica del IGAC 343-III-C1, escala 1:25000 en la zona de estudio que comprendió bosques, vías, drenajes y curvas de nivel con distancia de contorno de 50 m; insumos para la elaboración del DEM topográfico (DEM-TOPO) y el mapa de distancia a drenajes. La cartografía digital I.G.A.C fue recortada a la zona de estudio para su posterior implementación en el modelo de susceptibilidad.

La imagen satelital Landsat 8 fue proyectada al sistema de referencia MAGNA SIRGAS para el cálculo del Índice de vegetación normalizada (NDVI) y recortada a la zona de estudio.

Para el análisis del factor detonante se ordenaron los datos de precipitación máxima diaria para su posterior análisis geoestadístico e interpolación para obtención un mapa continuo de precipitaciones.

➤ Evaluación de la exactitud de los DEMs

A partir de la digitalización de las curvas de nivel se generó un Modelo digital topográfico (DEM-TOPO) usando interpolación spline recomendada para generar modelos digitales a partir de datos de contornos (Conrad, 2007; Neteler y Mitasova, 2008), utilizando el software SAGA.

Para la estimación de la exactitud los Modelos digitales SRTM, ASTER y DEM TOPO fueron vectorizados y pasados a formato .txt para realizar el análisis exploratorio de la elevación en el software R. Posteriormente se confrontó valores de referencia de elevación proporcionados por el DEM-TOPO asumidos como verdaderos frente a los datos de elevación obtenidos de los Modelos Digitales en estudio para determinar el Error medio cuadrático (**RMSE**) como una de las formas para calcular la exactitud en los DEMs mencionadas anteriormente. El número de celdas analizadas **N**= 31474.

El cálculo se realizó a través de la siguiente ecuación, donde Z es la elevación de cada modelo digital:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Z_{DEM-TOPO} - Z_{SRTM, ASTER})^2}{N}}$$

➤ Análisis del terreno y extracción de parámetros en el DEM de referencia en la zona de estudio.

Conocida la incertidumbre de los Modelos digitales de elevación, se seleccionó el DEM de referencia con menor RMSE. Para esta investigación el DEM SRTM1" estuvo dentro de los límites permitidos según la U.S.G.S y otros estudios mencionados anteriormente. Su resolución espacial genera escalas de trabajo se encuentra en el rango de 1:25000 a 1:50000.

Del DEM SRTM1" se determinaron parámetros morfométricos primarios y secundarios en el software SAGA con algoritmos utilizados por distintos autores en estudios de modelación de deslizamientos. La correlación estadística entre las variables y el radio de inercia en la información de éstas determinadas por el análisis de componentes principales (ACP) fueron el criterio para seleccionar los parámetros morfométricos implementados en la predicción del modelo de Susceptibilidad.

En la Tabla 4-1 se especifican los parámetros utilizados entre los que están la pendiente, Índice topográfico de humedad (TWI), factor de longitud de pendiente (LS), Índice de convergencia y longitud de ruta de flujo.

Tabla 4-1: Métodos de derivación de parámetros primarios y secundarios

No	Parámetro	Método
1	Pendiente	Zevenbergen y Thorne ,1987
2	Índice de convergencia	Koethe,1996
3	Índice topográfico de humedad	Standar (Conrad,2003)
4	Longitud ruta de flujo (m)	MFD (Quinn et al.,1991;Freeman,1991)
5	Factor LS	Moore et al,1991

➤ **Procesamiento imagen satelital Landsat 8 para el cálculo del NDVI**

Para el análisis de la cobertura se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) como una medida cuantitativa relacionada con las condiciones de la vegetación y su biomasa. Los valores de este índice fluctúan entre -1 y 1, valores cercanos a 1 indican mayor vigor de la vegetación, y menores 0 escasa vegetación del terreno. El NDVI se calculó en la imagen Landsat 8 obtenida del 24 de enero de 2014 bajo la ecuación:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR}-\text{R}}{\text{NIR}+\text{R}}$$

Donde:

NIR= banda 5 del infrarrojo cercano, con un rango espectral de 0.85 - 0.88 μm ,
R= banda del rojo, con un rango espectral de 0.64 - 0.67 μm perteneciente a la banda 4.

➤ **Análisis de la amenaza espacial mediante el modelo de regresión logística multinomial en la zona de estudio.**

Para la predicción de la Amenaza espacial de factores condicionantes del terreno se utilizó el método estadístico de regresión logística multinomial (L.R.M) en el cual las variables dicotómicas son medida como 0 (ausencia) y 1 (presencia) o verdadero y falso, determinado a partir de uno o más factores independiente (Menard, 1995).

En el caso de deslizamiento para el Mapeo de Amenaza, el objetivo de L.R.M sería encontrar el modelo de mejor ajuste para describir la relación entre la presencia o ausencia de F.R.M (variable dependiente) y un conjunto de parámetros independientes del terreno como la pendiente, litología etc.

La regresión logística es usada cuando la variable dependiente es categórica, y las variable independiente es categórica, numérica o ambas (Menard, 2002). Se adoptó este modelo considerando que la variable dependiente a predecir es categórica (F.R.M) y no asume relación lineal entre la variable dependiente y

las variables independientes debido que es un método no paramétrico así que no demanda normalidad en la distribución de los datos.

En la regresión logística se codifican los valores de la variable dependiente como 1 y 0, lo que da como resultado que la variable represente la proporción de casos que ocurren en sus dos categorías (caso binomial) ó en una de sus múltiples categorías (multinomial). El valor predicho de la variable puede ser interpretada como la probabilidad de que en un caso caiga en una de las categorías de la variable dependiente (Menand, 2002). Un modelo lineal no se ajusta apropiadamente a las variables binomiales o multinomiales debido que los valores de probabilidad pueden ser mayores que 1 o menores que 0. El mejor modelo que linealiza la relación entre la variable dependiente y la variable independiente es el modelo Logit construido a través de la regresión logística (Debella-Gilo et al., 2007).

Así la ecuación de la relación entre la variable dependiente y las variables independientes es la siguiente:

Logit (Y) = $\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k$, Donde Y= Valor que toma la variable dependiente, β_k = parámetros de población a ser estimados, X_k = variables independientes.

Para el presente estudio se implemento la extensión Arc-SDM (Spatial Data Modeller) de ArcView 3.2 que contiene herramientas de regresión logística multinomial y el análisis por evidencia de pesos (Logistic Regression /Weights of Evidence), (Kemp et al., 2001). Posteriormente se utilizó el script en AML "Landslide probabilities" de propagación de flujo multiple (MFD) en ArcInfo utilizando el DEM de referencia para predecir la magnitud ó el área de deslizamiento en la zona de estudio acorde a Gruber et al., 2008. Los resultados obtenidos explican las áreas afectadas por deslizamientos en todas las direcciones de pendientes abruptas que contienen las celdas cercanas.

La Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa se clasificó en 4 categorías Extremadamente Baja, Muy Baja, Baja y Media- Alta.

➤ **Análisis del factor detonante precipitación**

En primera instancia se identificaron las estaciones metereológicas próximas a la zona de estudio y posteriormente se seleccionaron las estaciones que fueron utilizadas para la evaluación de la precipitación en base a su ubicación dentro del área del proyecto y de los datos por ellas registrados (Anexo B y C).

El análisis de precipitación se realizó a través de herramientas geoestadísticas obteniendo un semivariograma que muestran la dependencia espacial que

existe entre la distancia y la precipitación en la zona de estudio para así definir el criterio de interpolación en la obtención del mapa continuo.

➤ **Análisis de la Vulnerabilidad en los elementos expuestos**

La Vulnerabilidad de los elementos expuestos que se enfocó este estudio fue sobre la Red de conducción, túneles y viaductos del Acueducto Palacé. Aunque se identificaron torres eléctricas paralelas a la Red de conducción las cuales no se incluyeron en este estudio siendo este un tema de investigación en la evaluación del Riesgo para una segunda fase.

La mayoría de estudios de Vulnerabilidad están asociados a la población, edificaciones, vías entre otras lo que hace necesario resaltar que hay pocos estudios y falta mayor investigación con respecto a la evaluación de la vulnerabilidad en tuberías de conducción donde se especifique con mayor detalle los rangos de Vulnerabilidad en los elementos expuestos. Debido a lo anterior se adoptaron probabilidades de Vulnerabilidad para la infraestructura lineal, viaductos y túneles teniendo en cuenta lo visto en campo del terreno a lo largo de la Red de conducción y de acuerdo con DAS I et al. (2010) entre 0,3 y 1. Los valores más bajos se le asignaron a los viaductos y túneles por ser menos vulnerables (0,3-0,5) y estar en zonas menos propensas a deslizamientos, mientras que a la Red de conducción se le asignaron valores por tramos (0,5-1) de acuerdo a la influencia de deslizamientos y áreas críticas del terreno. El mapa de Vulnerabilidad obtenido se clasificó en 4 categorías Baja, Media, Alta y Muy Alta.

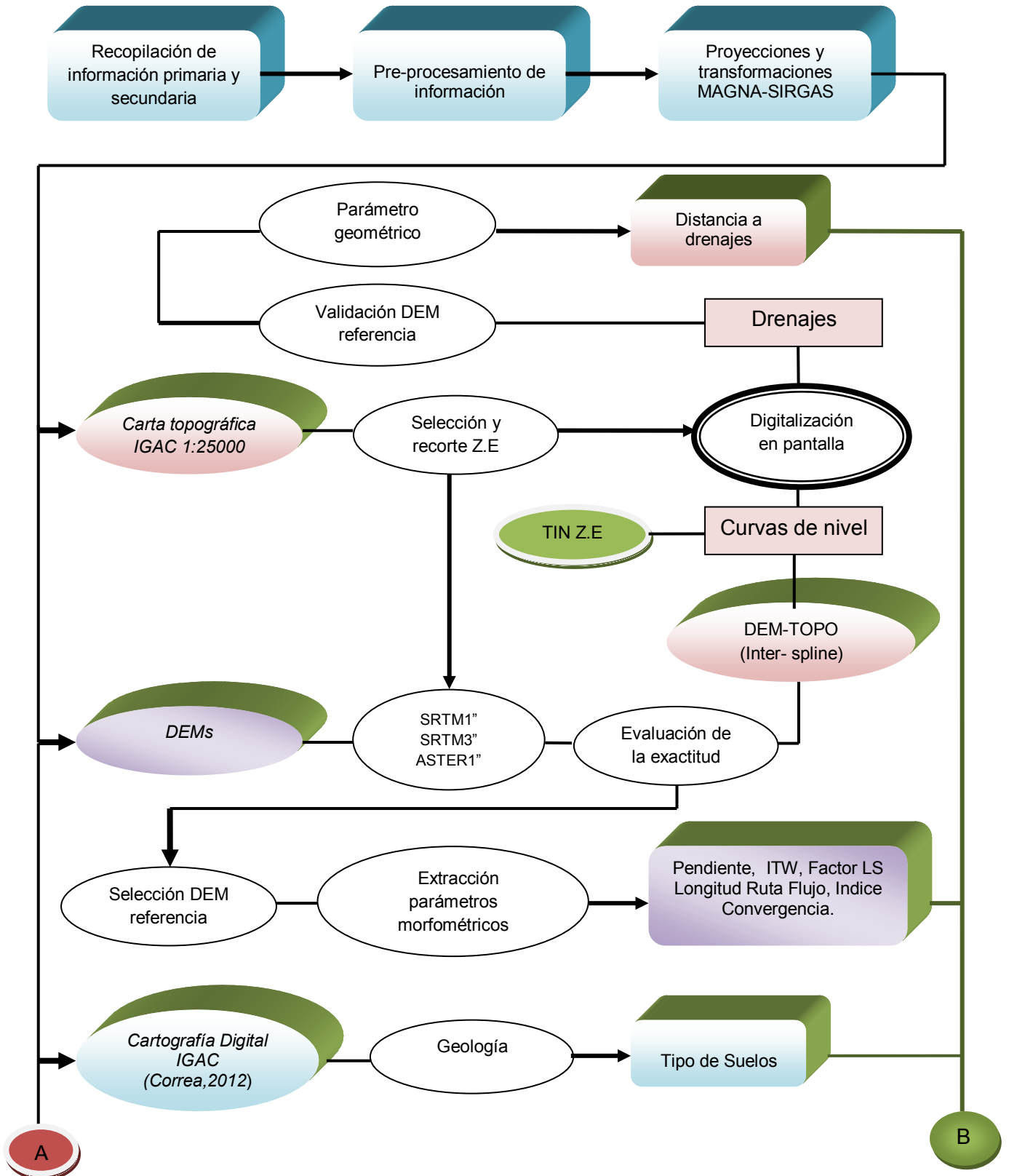
➤ **Validación del modelo de predicción en la zona de estudio**

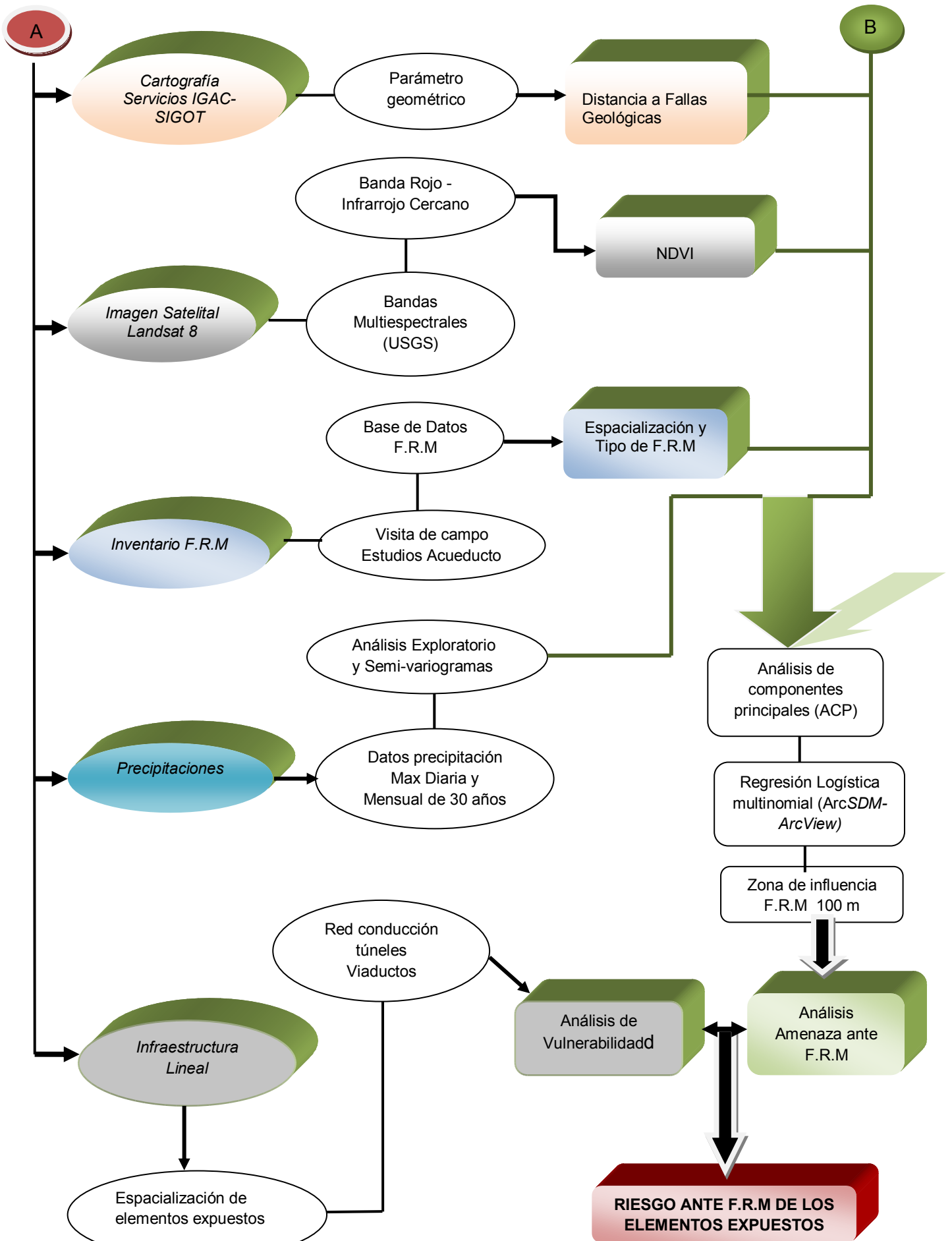
Se validó en primera instancia la exactitud del DEM de referencia para garantizar la calidad de las variables utilizadas en el modelo. Posteriormente la red de drenajes extraída en el DEM de referencia fue comparada con la red de drenajes digitalizada en pantalla de la carta topográfica I.G.A.C resaltando el potencial del Modelo digital de elevaciones en la identificación de los drenajes de la zona de estudio y por último la validación del modelo de predicción se realizó cualitativamente debido a la falta de datos semidetallados en la Cartografía oficial ante Amenazas por F.R.M.

➤ **Determinación del Riesgo ante F.R.M en la infraestructura lineal**

Para determinar el Riesgo se utilizó el algebra de mapas del software ArcGis 9.3 donde se realizó la operación de superposición de los mapas de Amenaza y Vulnerabilidad obtenidos, clasificando el Riesgo en tres categorías Baja, Media y alta. En la Figura 4-1 se presenta un resumen el desarrollo de las etapas que se llevaron a cabo en el presente estudio.

Figura 4-1: Modelo conceptual de etapas en la determinación del Riesgo ante F.R.M







CAPÍTULO 5

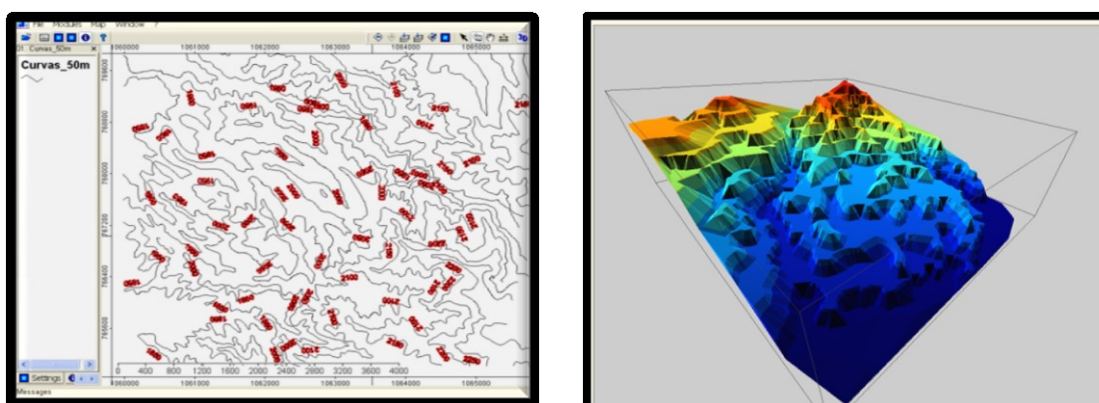
Resultados y discusión de resultados

5. Resultados y discusión de resultados

5.1 Evaluación de la exactitud de los Modelos Digitales de Elevación (DEMs)

Para evaluar la exactitud de los Modelos digitales de elevación en la zona de estudio se generó un DEM topográfico (DEM-TOPO) a partir de curvas de nivel digitalizadas en pantalla de la Carta topográfica 343 III del I.G.A.C a escala 1:25000 y un TIN que muestra un primer plano de la zona de estudio (Figura 5 - 1).

Figura 5- 1: Digitalización en pantalla Carta Topográfica IGAC 343 III



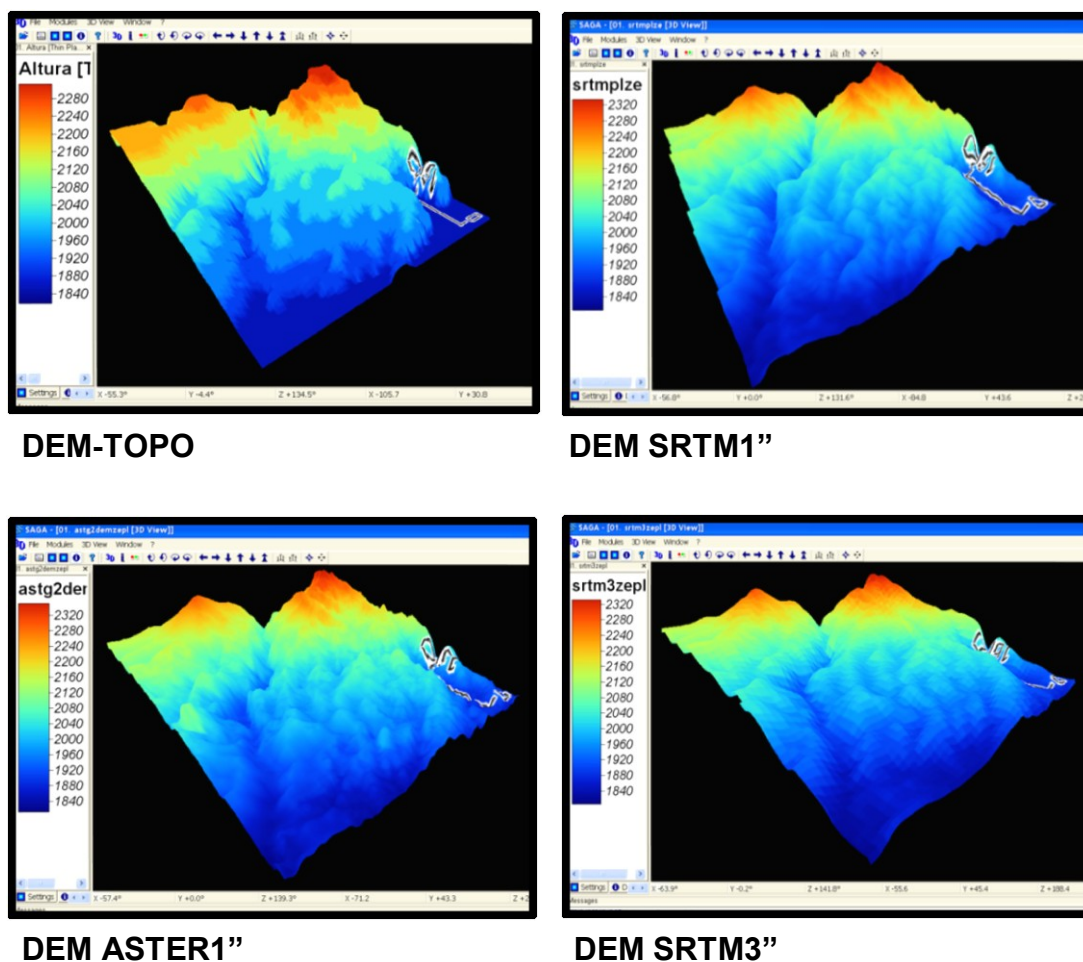
En la Figura 5-1 se puede observar que la topografía es más pronunciada y escarpada sobre el Rio Palacé que es límite de frontera entre el municipio de Popayán y Totoró donde se encuentran la Red de infraestructura lineal del Acueducto Palacé. El altiplano de Popayán se resalta en los colores azules oscuros que es la zona con distribuciones de elevaciones más bajas y las distribuciones con elevaciones altas se encuentran hacia la parte de la Bocatoma del Acueducto Palacé y hacia el municipio de Totoró en colores amarillos y rojizos. A pesar del fenómeno de “terráceo” que genera el efecto de anisotropía en el TIN se puede tener una primera visualización de los rasgos de la topografía y relieve en la zona de estudio (Hofierka et al., 2009).

La evaluación de la exactitud se realizó para los Modelos digitales de elevación (DEMs) SRTM y ASTER, los cuales se indican en la Figura 5-2 cuya resolución espacial en los datos de elevación provenientes de los DEMs adquiridos en el año 2011, es de 30,82 m en los DEM-SRTM1” y DEM-ASTER, para el DEM-SRTM3” de 92,46 m (Tabla 5 -1).

Tabla 5-1: Características de los DEMs analizados

DEM	Fuente	Espaciamiento (m)	Fecha De Adquisición
SRTM1"	IGAC	30,819	26-Abr-11
SRTM3"	CIAT	92,457	15-Mar-11
ASTER1"	NASA	30,819	17-Oct-11

Figura 5-2 : Modelos Digitales de Elevación Zona de estudio en 3D



De acuerdo a la Figura 5-2 los DEM SRTM1'' y SRTM3'' presentan valores de elevaciones similares entre sí generando superficies afectadas por la resolución espacial entre los modelos digitales, característica que le permite al DEM SRTM1'' generar una superficie más suave y definida al tener 30 m aproximadamente en su resolución espacial.

En un primer plano visual se nota una gran similitud de los DEMs SRTM con respecto a la zona generada por DEM-TOPO. Los DEMs SRTM tienden a sobre-estimar de manera sustancial las elevaciones en las partes altas. Con respecto al DEM ASTER1'' se puede observar que genera una zona difusa y con mucho ruido en las elevaciones distribuidas hacia la parte central sobre la

Altiplanicie de Popayán, una diferencia notoria con la zona generada por el DEM SRTM1”, a pesar que ambos DEMs tienen la misma resolución espacial de aproximadamente 30 m.

Los DEMs TOPO, SRTM y ASTER fueron vectorizados para obtener un listado de elevaciones, el cual fue subido al software R para el análisis descriptivo (Tabla 5-2).

Tabla 5-2: Estadística Descriptiva DEMs

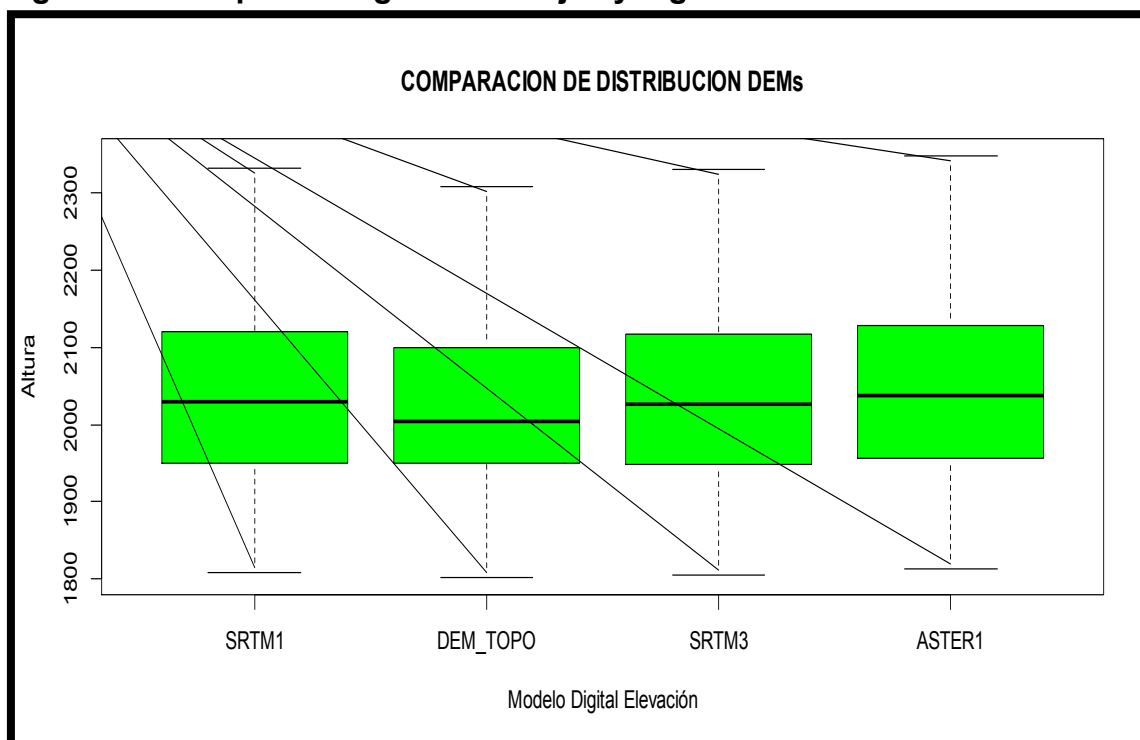
Parámetros Estadísticos	ASTER1"	DEM_TOPO	SRTM1"	SRTM3"
Media	2044.33	2031.68	2037.56	2035.51
Desviación Estándar (sd)	112.16	111.30	111.83	111.6
IQR (Rango Intercuartilico)	172	150	170	170
Coefficiente de Variación (CV)	5.49%	5.48%	5.49%	5.48%
Asimetría	0.219	0.29	0.231	0.237
Kurtosis	-0.657	-0.726	-0.646	-0.627
Valor Min	1813	1801	1808	1811
Q1 (25%)	1956	1950	1950	1948
Q2 (50%)	2037	2003	2029	2027
Q3 (75%)	2128	2100	2121	2118
Valor Max	2349	2309	2333	2331

La elevación varió entre 1808 m y 2333 m con media de 2307,56 m en el DEM-SRTM1”, entre 1811 m y 2331 m con media 2035,51 m en el DEM SRTM3”, DEM ASTER1” entre 1813 m y 2349 m con un promedio de 2044,33 m; entre 1801 m y 2309 m con media de 2031,68 m en el DEM-TOPO. Debido a lo anterior el DEM ASTER1” tiende a sobre-estimar con mayor proporción las elevaciones en los valores altos a la derecha de la distribución y se ratifica la concordancia entre datos de elevación de los modelos SRTM. La media del DEM-TOPO difiere con respecto a la media de los Modelos digitales SRTM y ASTER siendo un poco más alto el ASTER.

La simetría y forma de las distribuciones de la elevación, medidas con el coeficiente de sesgo y kurtosis, muestran que los 4 modelos digitales tienen un sesgo ligeramente positivo y una forma que no se asemeja a la distribución normal.

El diagrama de cajas y bigotes, resume la distribución de las elevaciones en cinco estadísticos: mínimo, primer cuartil, mediana, tercer cuartil y máximo valor (Figura 5-3).

Figura 5-3: Boxplot - Diagrama de cajas y bigotes



El diagrama de cajas muestra la distribución con sesgo ligeramente positivo como se mencionó anteriormente y no arroja valores extremos atípicos o inusuales, lo que indica que aunque se presentan diferencias en los extremos de las elevaciones estas se encuentran dentro del rango sin tener que rechazar datos. Además se puede observar la similitud en la distribución de las elevaciones en los modelos digitales SRTM y ASTER, y diferencias en los valores extremos altos así como en 2 cuartil de la distribución con respecto al DEM-TOPO. Estas diferencias de elevaciones se evaluarán para conocer la exactitud de los Modelos digitales SRTM Y ASTER con respecto al DEM-TOPO y determinar la incertidumbre de los mismos.

La calidad de un DEM debe evaluarse antes de derivar los parámetros geomorfométricos que serán el insumo primario de entrada al modelo a través de una valoración independiente del DEM contra unos datos de referencia (Zhang et al., 2008). Para estimar la calidad de los DEMs, se consideran los valores de altura del DEM, contra los de una fuente de referencia que se toma como valores verdaderos. Uno de los procedimientos que se utilizan para evaluar la exactitud de los DEMs es la raíz media del error cuadrático (RMSE) (Singh, 2004; Hengl et al., 2003).

En la Tabla 5-3 se indican los resultados de evaluación en exactitud de la elevación vertical a través del RMSE de los modelos digitales para seleccionar el modelo de referencia de la zona de estudio.

Tabla 5-3: Error Cuadrático Medio (RMSE)

DEMs	RMSE (m)
SRTM1" vs DEMTOPO	21,14
SRTM3" vs DEMTOPO	21,22
ASTER1" vs DEMTOPO	25,83
SRTM1" vs SRTM3"	10,05
SRTM1" vs ASTER1"	13,42
STRM3" vs ASTER1"	17,18

Según la USGS (servicio geológico U.S) el error vertical para Modelos digitales derivados a partir de técnica de interferometría radar como el modelo digital SRTM1" pueden obtenerse como máximo un error cuadrático medio (RMSE) de aproximadamente la mitad del intervalo de contorno, es decir, la mitad de la distancia vertical a la que se encuentran las curvas de nivel y una precisión de 6m en la horizontal generando escalas de trabajo entre 1:25000 y 1:50000 y para el Modelo digital SRTM3" un RMSE máximo de 30 m y una precisión de 20 m en la horizontal generando escalas inferiores a 1:50000 (Chang, 2004; Nelson et al., 2009).

En los modelos digitales obtenidos a partir de técnica óptico ASTER1" tienen un RMSE vertical que varía entre 7-50 m y una precisión horizontal que varía en el mismo rango (Hartemink y McBratney, 2009).

En laTabla 5-3 se muestra la incertidumbre en la distancia vertical obtenida mediante el error cuadrático medio, tomando como datos de referencia el DEM-TOPO a escala 1:25000. Se encontró RMSE en el SRTM1" de 21.14 m, SRTM3" de 21.22 m y ASTER de 25.83 m respectivamente.

Trabajos de investigación realizados también encontraron incertidumbres con DEM-TOPO a escala 1:25000; para el SRTM1" un RMS de 18.1m, SRTM3" de 11.7m, ASTER1" de 33.1m (Correa, 2012). El mayor error vertical se obtuvo en el modelo ASTER1" con una diferencia de 4.69 m y 4.61 m con respecto a los Modelos SRTM (1"-3"). Una razón de esta diferencia es la técnica de procesamiento óptica del Modelo ASTER frente al radar del SRTM que lo hace más apetecible para desarrollar trabajos de modelamiento espacial. Los errores obtenidos para los modelos SRTM tienen una diferencia muy pequeña de 0,08 m, debido a su naturaleza de procesamiento.

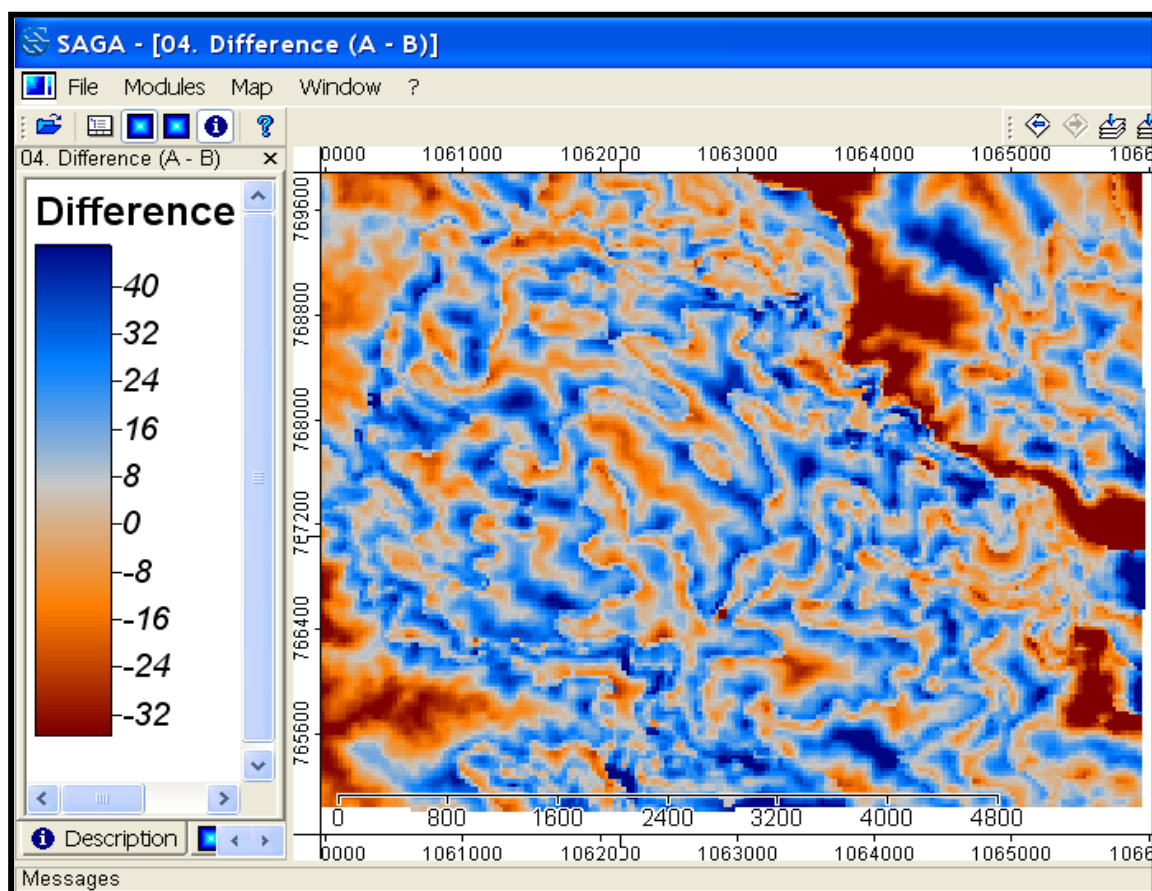
Los resultados muestran que las diferencias en los errores de los tres modelos son pequeñas, razón por la cual en la zona de estudio cualquiera de ellos podría utilizarse para el desarrollo de este trabajo dependiendo los alcances del proyecto. Teniendo en cuenta las escalas de trabajo que genera el Modelo digital, la resolución espacial y los resultados encontrados, el Modelo SRTM1"

de un arco segundo es el que mejor se ajusta para el modelamiento espacial, debido que obtuvo la tolerancia máxima permitida en la exactitud vertical y la escala de trabajo que podría generar está entre 1:25000 y 1:50000 (Chang, 2004).

Con respecto a las diferencias entre los Modelo digitales SRTM Y ASTER los DEMs SRTM presentan menor RMS (10,05 m) lo que indica que las elevaciones son más similares. Teniendo como referencia las elevaciones del SRTM1" se encuentra una mayor discrepancia en el modelo ASTER1" con RMS de 13,42 m y por último las elevaciones con mayores discrepancias se dan entre los Modelos SRTM3" y ASTER1" con un RMS de 17,18 m.

Las diferencias en las elevaciones entre el DEM SRTM1" y el DEM-TOPO se pueden observar en la Figura 5-4 donde se encontraron discrepancias de la zona variando en un rango de -35,64 hasta 46,64 m. Los errores negativos (color rojizo) sub-estimaciones de la elevación por parte del DEM SRTM1", mientras que los errores de magnitud positiva (color azul) sobre-estimación de la elevación.

Figura 5-4: Diferencias de elevaciones DEM SRTM1" y DEM-TOPO



5.2 Parámetros morfométricos del terreno

5.2.1 Pendiente (Slope)

La pendiente en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical. La relación entre la ocurrencia de movimientos de laderas y la pendiente es innegable. Mientras el ángulo de la pendiente aumenta también incrementa la tensión en el suelo ó del material no consolidado. La mayoría de las evaluaciones de peligrosidad regional por movimientos en masa, utiliza el ángulo de pendiente como una de las variables independientes más importantes (Brabb et al., 1972; Corominas et al., 2003; Guzzetti et al., 2006; Moreiras., 2005).

La pendiente extraída del DEM SRTM1” de la zona de estudio tiene un rango de variación entre 0 y 64,55° (0 y 210%) con promedio de 13.97 y un rango representativo de 0 a 28°. Las inclinaciones más altas se presentan sobre el curso del Río Palacé (Figura 5-6) que actúa como límite entre los municipios de Popayán y Totoró. El tramo más crítico donde se encuentran las pendientes más fuertes sobre el transcurso de la Red de conducción es aproximadamente hasta los K2+800 como se observa en el Figura 5-5.

Pasando la abscisa K2+800 la inclinación de la pendiente disminuye significativamente hasta llegar a un tramo comprendido entre las abscisas K5+600 y K5+800 con fuerte inclinación cerca a la planta de tratamiento (Figura 5-5 y 5-6 C). Estas variaciones de pendiente se evidencian en la geomorfología del terreno comenzando con un relieve motañoso escarpado de fuertes pendientes hasta la altiplancie con un relieve moderado a fuertemente ondulado como muestran las Figuras 5-6 (A, B, C).

La cartografía proporcionada por el I.G.A.C demarcada en los polígonos maneja una escala muy general como se observa en la Figura 5-5, la pendiente del terreno varía en el rango 50-75%, desde la bocatoma hasta la abscisa K3+000 aproximadamente de la Red de conducción mientras que las pendientes generadas con el DEM SRTM1” llegan cerca al 210%. De la abscisa K4+200 en adelante se observa coincidencia en el rango de pendientes del 25%-50% en gran parte del terreno así como en los demás rangos de pendientes demarcadas en la cartografía I.G.A.C con las del DEM SRTM1”. Esto refleja la fuerte potencialidad del Modelo digital SRTM1” en la extracción de la pendiente del terreno y el nivel de detalle que proporciona.

Figura 5-5: Comparación mapa de pendientes IGAC – SRTM1”

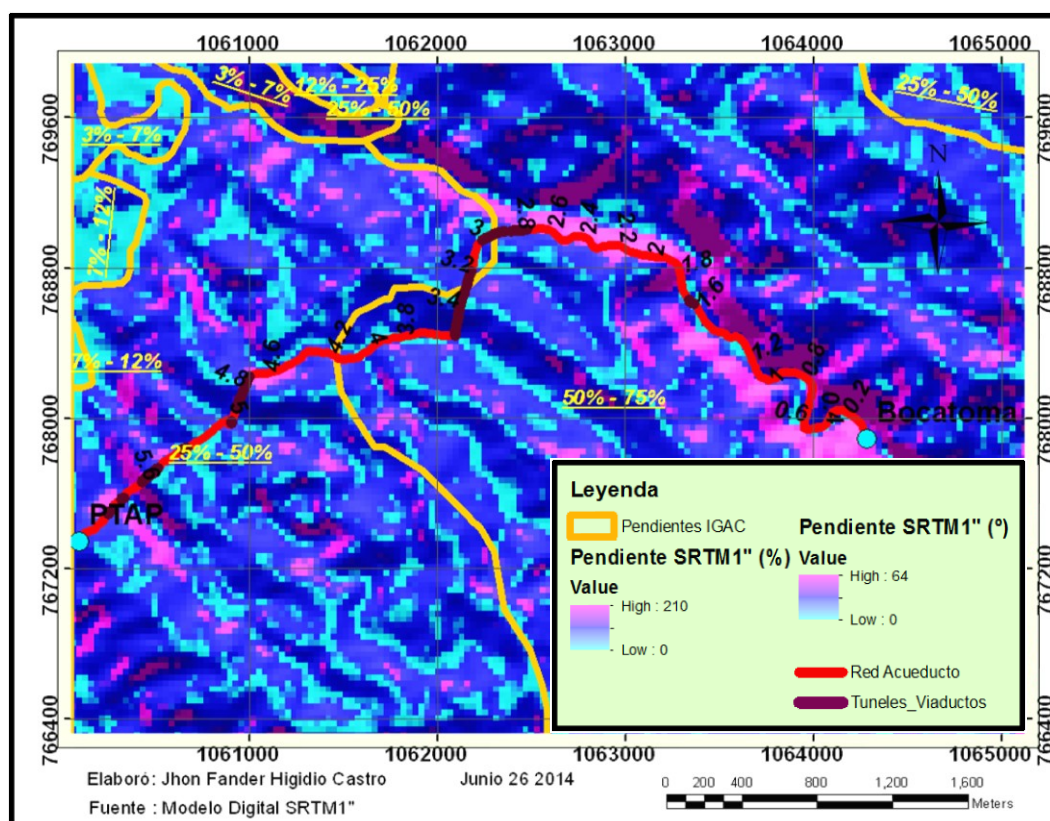
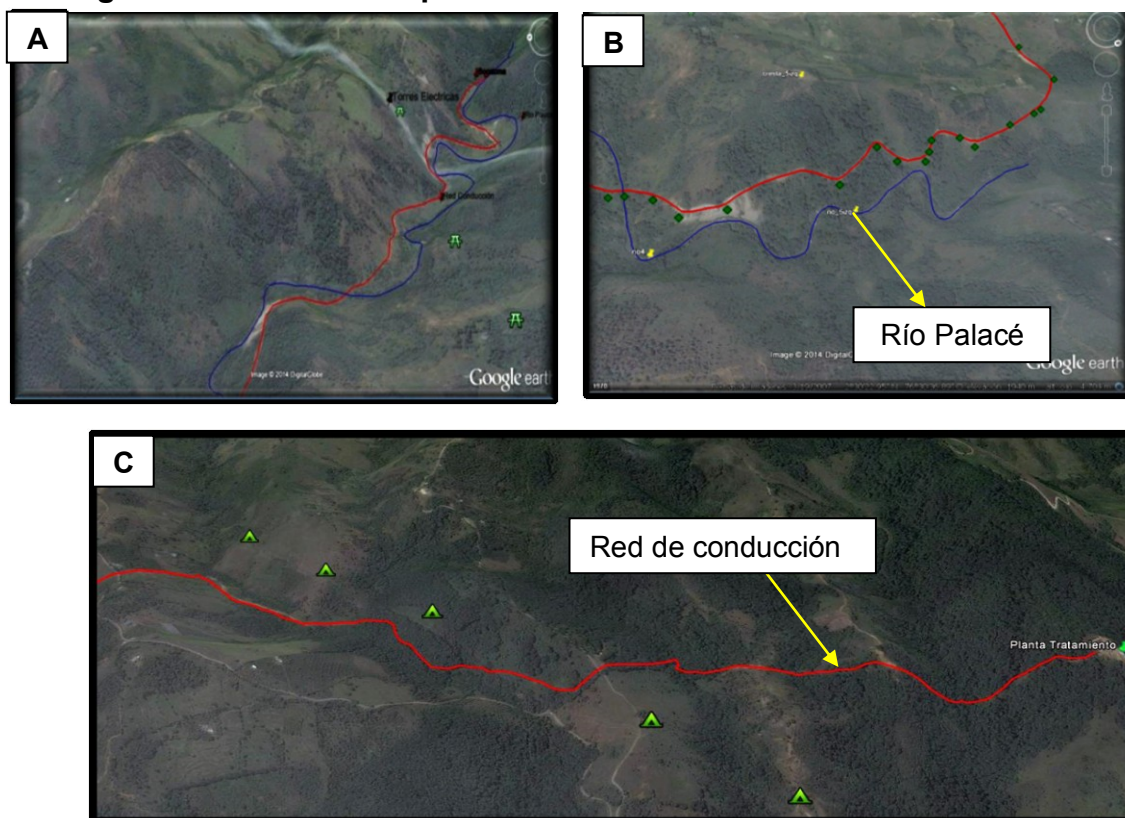


Figura 5 -6: Tramos de pendientes alrededor de la Red de conducción



5.2.2 Factor LS

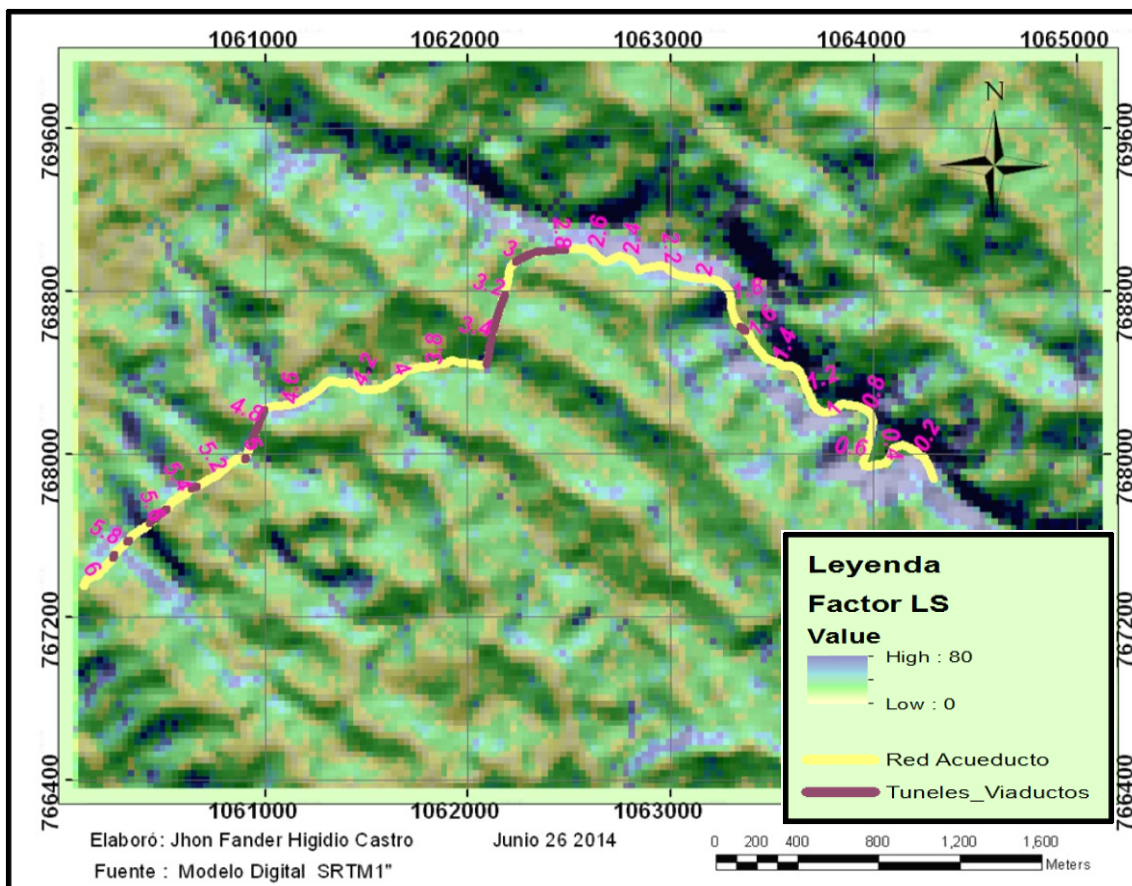
Los efectos específicos de la topografía sobre la erosión del suelo son estimados por el factor topográfico secundario adimensional, LS, como el producto de la longitud de pendiente, L , y la inclinación de pendiente, S , considerados sobre un punto de interés (Van Remortet al., 2001). La longitud dependiente, λ , ha sido definida como la distancia desde el punto de origen del flujo superficial hasta el punto donde ó bien el gradiente de pendiente decrece lo suficiente como para que la deposición comience, o también, el flujo sea concentrado en un canal definido, como puede ser una red de drenaje ó un canal construido (Wischmeier y Smith, 1978).

El factor LS para la zona de estudio tiene un rango que varía entre 0 – 80,29, promedio de 8,04, y un coeficiente de variación del 67,67% que indican la variabilidad de datos en el área de estudio y la relevancia del parámetro en el análisis del terreno. Este factor está íntimamente relacionado con la pendiente del terreno y es más sensible a cambios en la inclinación de ésta. Los mayores valores LS se encuentran en las áreas con mayores gradientes de pendiente donde el relieve del terreno es más pronunciado, esto es, sobre el cañón del Río Palacé desde la Bocatoma hasta aproximadamente K2+800 sobre la Red de conducción, así como también incrementa en las áreas de concentración de caudal básicamente sobre los afluentes (red de drenaje) que atraviesan la infraestructura. Posteriormente hay un cambio del relieve entre moderado y fuertemente ondulado hasta aproximadamente la abscisa K6+000 donde los valores LS del terreno comienzan a disminuir obteniendo los valores LS más bajos de la zona hacia las áreas planas (Figura 5-7). Sobre la abscisa K5+600 y K5+800 de la Red de conducción se puede observar como los valores del LS aumentan coincidiendo en campo con una fuerte inclinación sobre este tramo del terreno.

Lo anterior indica que sobre el cañón del Río Palacé es donde se pueden presentar las velocidades más altas de flujos superficiales y por tanto mayores tasas de erosión sobre el área de estudio debido a los aumentos de inclinación de la pendiente y la longitud de esta (Haan et al., 1994). Según Mc Coole et al. (1997), la erosión en suelos de textura gruesa, es considerablemente más sensible a los cambios en la inclinación de pendiente que los cambios en longitud de pendiente.

El parámetro LS ha sido implementado en estudios de susceptibilidad ante F.R.M debido que calcula la distribución espacial de capacidad de transporte de sedimentos y las evaluaciones del paisaje de la erosión (Moore y Wilson, 1992).

Figura 5-7: Mapa factor LS



5.2.3 Índice topográfico de humedad (TWI)

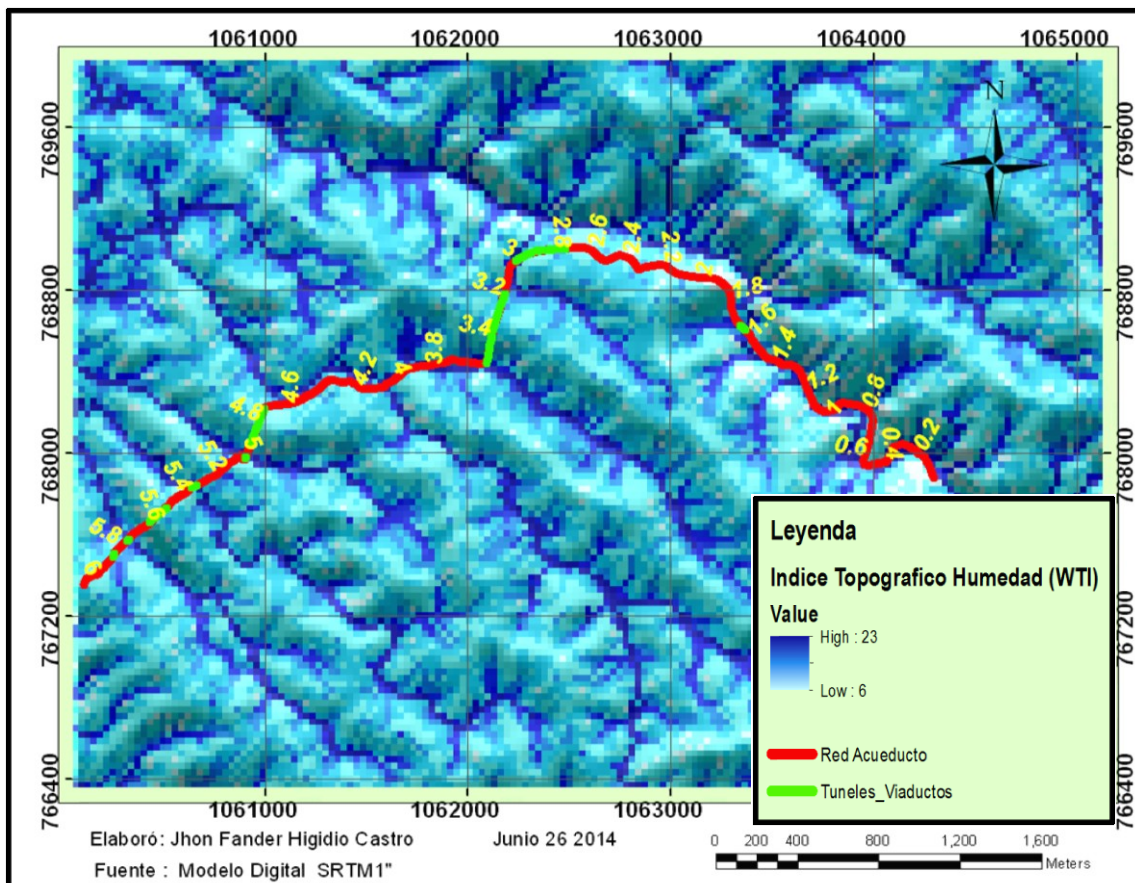
El índice topográfico de humedad (TWI) es otro factor topográfico secundario que contribuye a la caracterización de humedad en el suelo y describe el efecto de la topografía en la acumulación del agua, considerando el tamaño y la posición de las áreas saturadas a generar escorrentías (Wilson y Gallant, 2000), relaciona la dirección y acumulación del flujo representadas por el área de captación o área de acumulación con la pendiente del terreno. Los valores mínimos y máximos en la zona de estudio están entre 6,11- 23,39, con un rango de variación representativo de 5,98 y 13,69, promedio general de 9,80 y coeficiente de variación de 19,46, valores similares con los obtenidos por Correa (2012) de 5,4 y 16,1 con promedio general de 10,1 para una zona de estudio que comprendió el área de esta investigación.

Los mayores valores de TWI (mayor contenido de humedad del suelo) están en la salida de los canales de drenaje, puntos más húmedos de una cuenca y disminuye hacia las divisorias de aguas (Wilson y Gallant, 2000). En la Figura 5-8 se observa bien definida la red de drenajes y como los valores máximos del TWI se encuentran sobre las zonas por donde atraviesa el Río Palacé y sus afluentes. En general gran parte del terreno por donde atraviesa la Red de

conducción, las celdas tienen tendencias a acumular agua sobre todo en las formas del terreno más cercanas a los drenajes y de menor altitud como las orillas encontrándose valores altos en este índice y por lo tanto, se podrían considerar más favorables para almacenar la humedad en el suelo y mayor potencial para la acumulación de agua.

En la zona de estudio los valores del TWI se incrementan sobre las celdas con pendientes en su mayoría bajas que concuerdan con zonas cóncavas que sigue trayectoria de los drenajes, indicando, mejor disposición del terreno para conservar la humedad en el suelo y las áreas con pendiente altas terrenos montañosos escarpados tienden hacia índices bajos debido al hecho que la inclinación de la pendiente desfavorece que el agua se mantenga en el suelo por acción de la gravedad indicando que son suelos bien drenados con poco potencial topográfico para almacenar el agua. Lo anterior indica la presencia de zonas húmedas con presencia de escorrentía debido a la saturación de agua en los suelos que pueden ser áreas propensas a la erosión y la predicción del desarrollo de cárcavas. Los mayores índices de humedad se encuentran desde la Bocatoma abscisa K0+000 hasta K3+200 sobre el cañón del Río Palacé, de las abscisas K3+600 a K4+600 donde atraviesan afluentes a la Red de conducción y llegando a la planta de tratamiento en las abscisas K5+000, K5+400 y K5+800 respectivamente (Figura 5-8).

Figura 5-8: Mapa índice topográfico de humedad (WTI)



5.2.4 Índice de convergencia

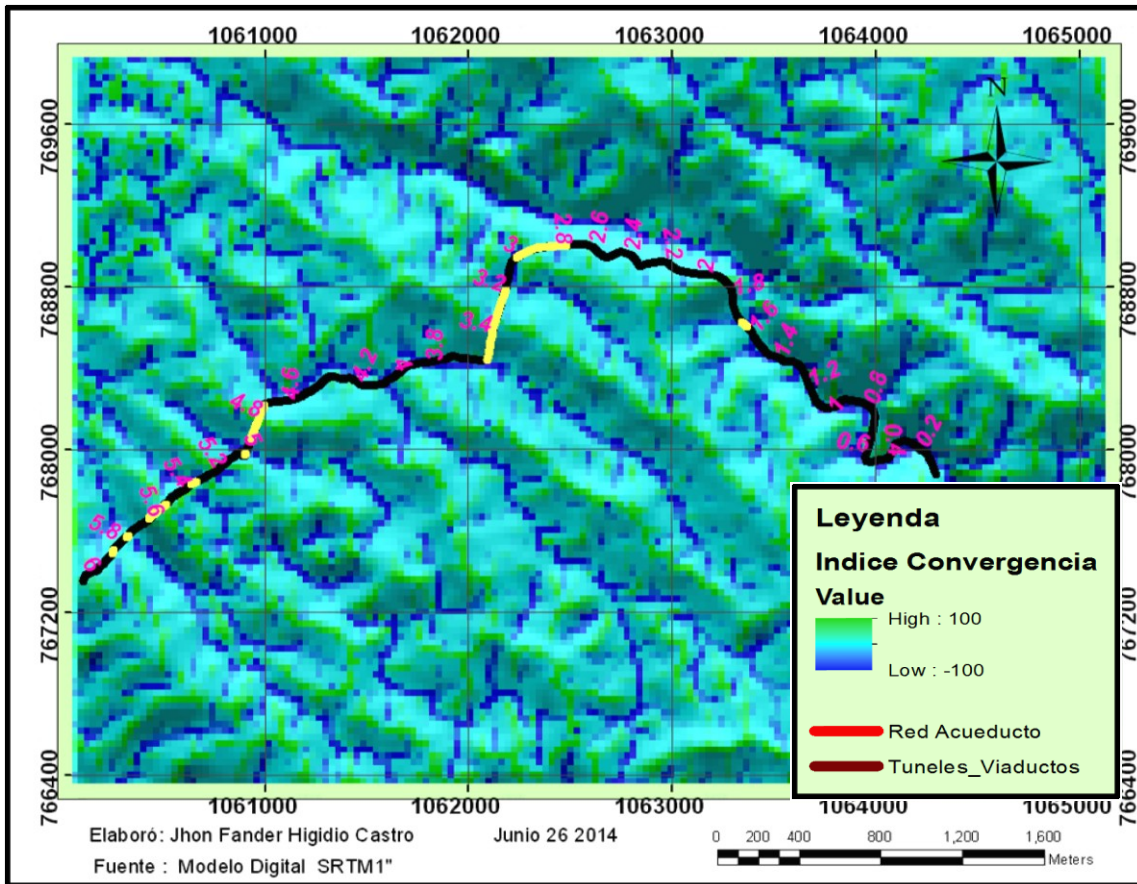
Este índice propuesto por Kothe et al. (1996) utiliza los valores del aspecto de las celdas vecinas para calcular la convergencia y divergencia del flujo, por lo que es similar a la curvatura plana, pero no depende de las diferencias absolutas de las alturas. Los resultados son dados en porcentajes, valores negativos corresponden a convergencia y positivos a divergencia de las condiciones de flujo (Figura 5-9).

El índice de convergencia de la zona de estudio tiene un rango de variación de -100 a 100, con un rango representativo de -39,76 a 39,75, promedio 0,011, resultados muy similares a los encontrados por Correa (2012) que ratifica una buena potencialidad y calidad en este parámetro para el estudio de esta investigación. Las zonas en color verde oscuros presentan los valores más altos de este índice representando la divergencia de flujo sobre las partes altas ó las crestas del terreno y los colores azules oscuros, las zonas con valores mas bajos, representando la convergencia de flujo en puntos bajos del terreno (Conrad, 2007). Los colores verdes claros tienden hacer áreas con relieves planos.

Este índice se apoya principalmente en la curvatura vertical, lo que indica que esta muy relacionado con la curvatura del terreno debido que en una zona cóncava se espera que el contenido de humedad y acumulación de agua se mantenga por mayores períodos de tiempo que si la zona tuviera una forma convexa. Debido a lo anterior el índice de convergencia es una medida para determinar como el flujo diverge en cada celda (valor mayor de cero) o converge (valor menor de cero).

En algunas zonas se presentaron índices neutros sin convergencia ni divergencia que indican zonas con relieves planos. Se resaltaron valores negativos de este índice sobre toda la longitud de la Red de conducción asociados al cañón del Río Palacé hasta la abscisa K2+800 aprox y sus afluentes, resaltando las formas cóncavas del terreno donde se acumula el flujo de las microcuencas que se forman y los índices positivos resaltando las formas convexas delimitadas por las divisorias de aguas sobre las crestas o picos del terreno con las pendientes más altas de la zona (Figura 5-9).

Figura 5-9: Mapa índice de convergencia



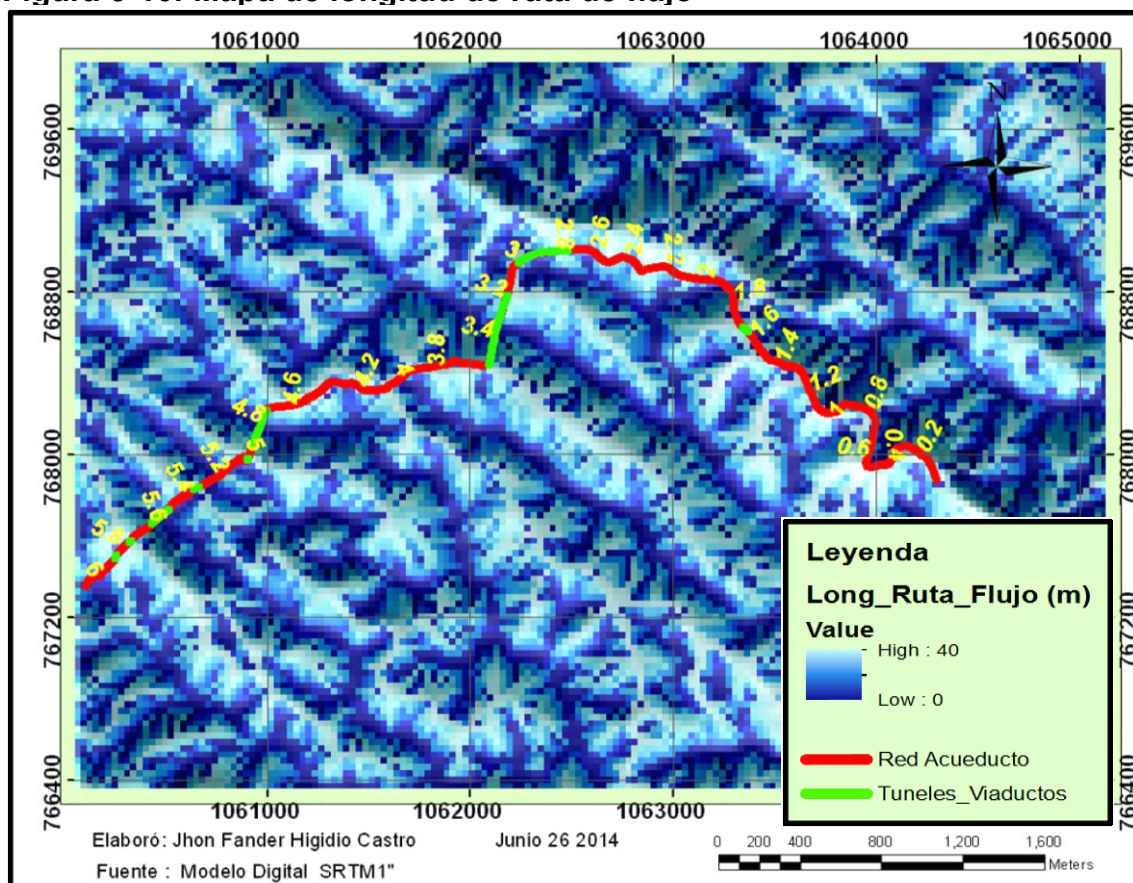
5.2.5 Longitud ruta de flujo

La longitud de ruta de flujo calcula la distancia aguas arriba o aguas abajo ó la distancia ponderada a lo largo de la ruta de flujo para cada celda. La zona de estudio presenta un rango de variación de 0 - 40 m con promedio de 20,29 m y un coeficiente de variación del 66,73%.

Las distancias más largas que recorre el flujo para encontrar su lugar de drenaje más cercano se presentan en las zonas cóncavas donde se encuentra principalmente el cañón del Río Palacé y sus afluentes. Aproximadamente hasta los k2+800 de la tubería de conducción las celdas de mayores valores de longitud en color blanco se encuentran próximas a la red de drenaje indicando esto, que la mayor parte del flujo por escorrentía toma las rutas hacia el Río Palacé o hacia sus afluentes donde posteriormente se concentra. De la abscisa k2+800 en adelante de la tubería las ruta de flujo van hacia los afluentes donde se pueden observar algunos viaductos aprox en la abcisas k5+100, k5+400, k5+800 y k5+900 respectivamente. Por otro lado los colores azules oscuros son los valores mas bajos en longitud indicando que el flujo no toma estas

vías, por lo tanto, hay menor concentración y almacenamiento en estas zonas (Figura 5-10).

Figura 5-10: Mapa de longitud de ruta de flujo



5.3 Parámetros de proximidad geométrica

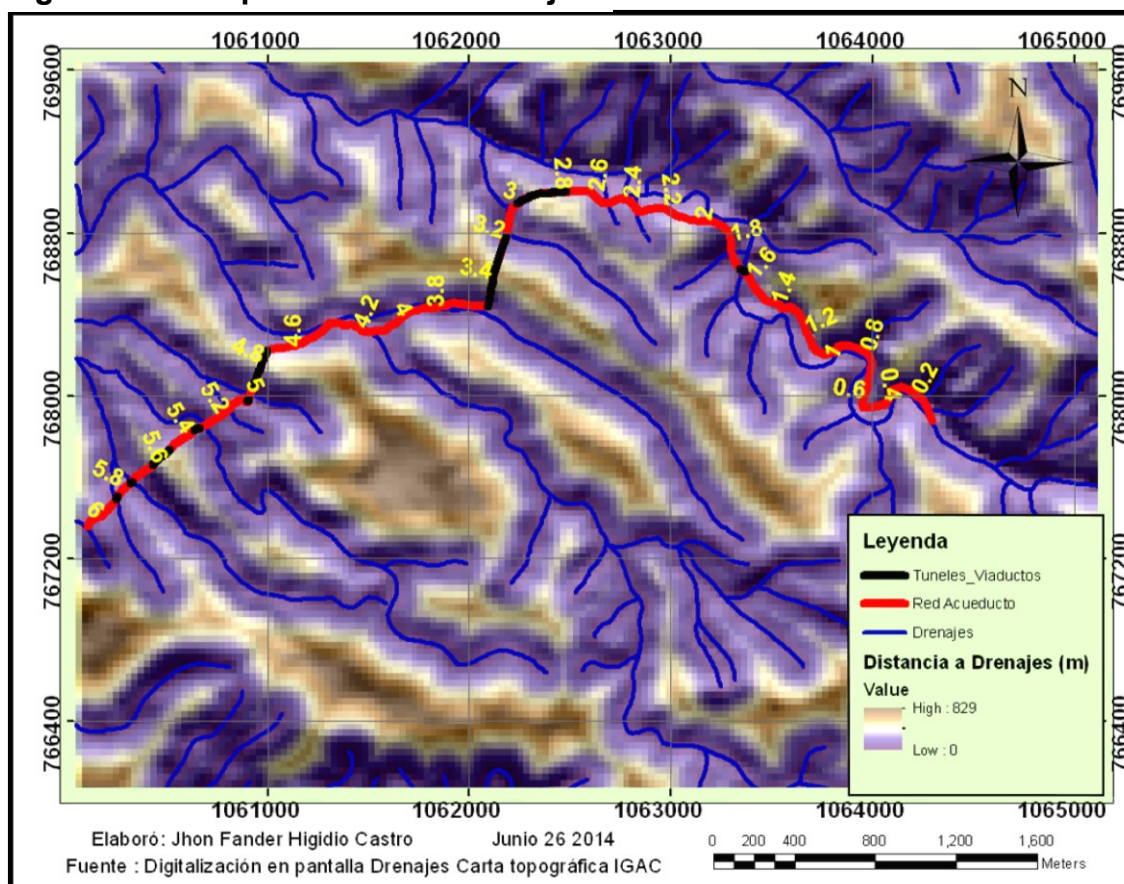
Dos parámetros de proximidad geométrica se analizaron en la zona de estudio, estos son la distancia a drenajes y la distancia a fallas.

5.3.1 Distancia a drenajes

Este parámetro determina distancias horizontales euclidianas a los drenajes. Según Dai y Lee (2001) los ríos tienen grandes efectos sobre deslizamientos de tierra a través de la erosión de laderas o saturación de la parte inferior del material cuando el nivel del agua aumenta. De acuerdo a la Figura 5-11 la distancia presenta un rango de variación entre 0 – 829 m donde sobresalen las distancias horizontales bajas en colores morados indicando que gran parte del terreno está muy cercano a los canales de drenajes. Siguiendo la Red de conducción solo sobre las abscisas k1+200, k3+400, k4+800, y k5+600 respectivamente las distancias a los drenajes son altas en color café indicando que sobre estos tramos las celdas del terreno se encuentran alejadas de redes de drenajes.

En general las distancias a drenajes bajas son las que más se resaltan sobre la tubería de conducción tomando importancia en el área de estudio debido a lo afirmado por Dai y Lee (2001).

Figura 5-11: Mapa distancia a drenajes

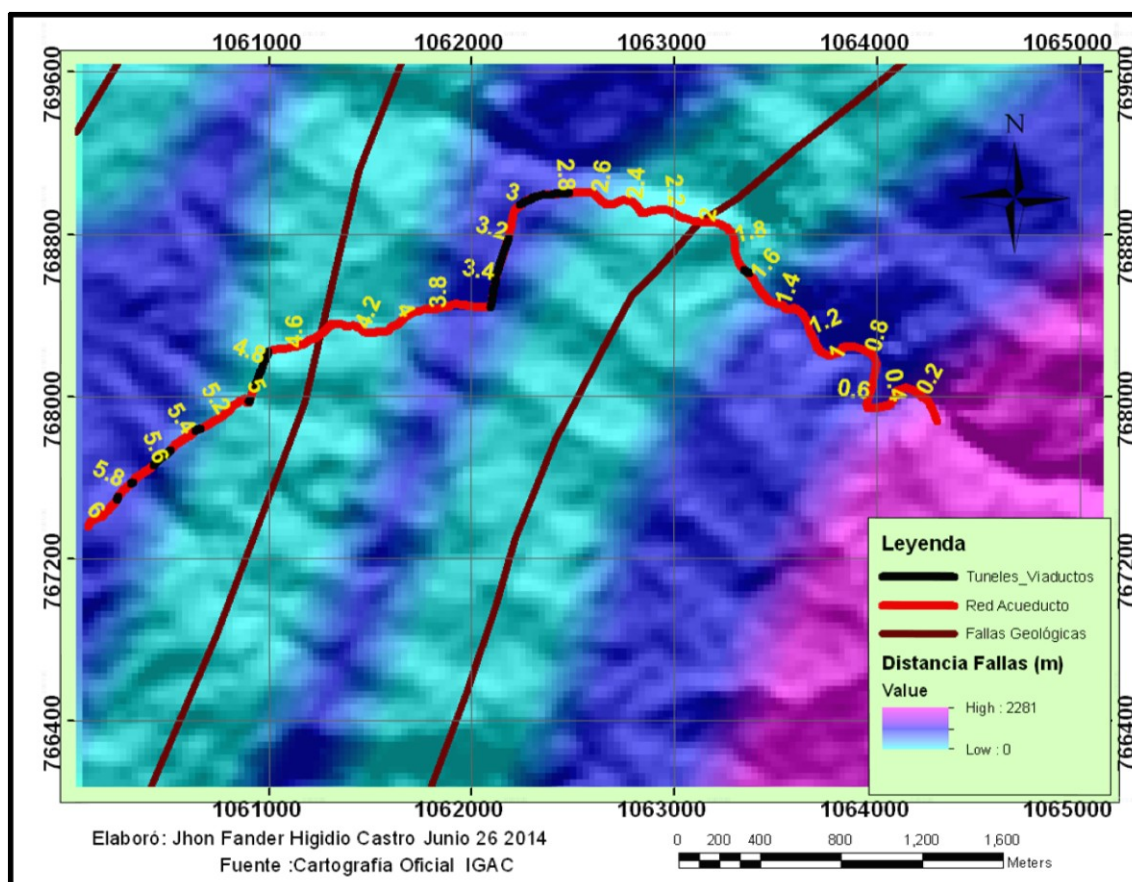


5.3.2 Distancia a fallas geológicas

En la Figura 5-12 se observan las fallas geológicas que atraviesan la Red de conducción del Acueducto de Palacé aprox en las abscisas K2+000 y K4+500. Según la cartografía I.G.A.C estas fallas se encuentran en actividad incierta y cubiertas en un rango de variación entre 0 – 2281 m a lo largo de la infraestructura de conducción. La primera falla geológica se encuentra sobre los afloramientos rocosos que se reflejan con rocas meteorizadas y escarpes con pendientes fuertes. La segunda falla geológica se encuentra en pendientes menos pronunciadas.

Según los informes del Acueducto de Popayán las fallas la Estrella y el Crucero que atraviesan la Red de conducción presentan fuertes rasgos de actividad tales como silletas, escarpes y quiebres del terreno, sin embargo en la actualidad no hay indicios de presentar fuertes efectos en la zona de estudio.

Figura 5-12: Mapa de distancias a fallas geológicas

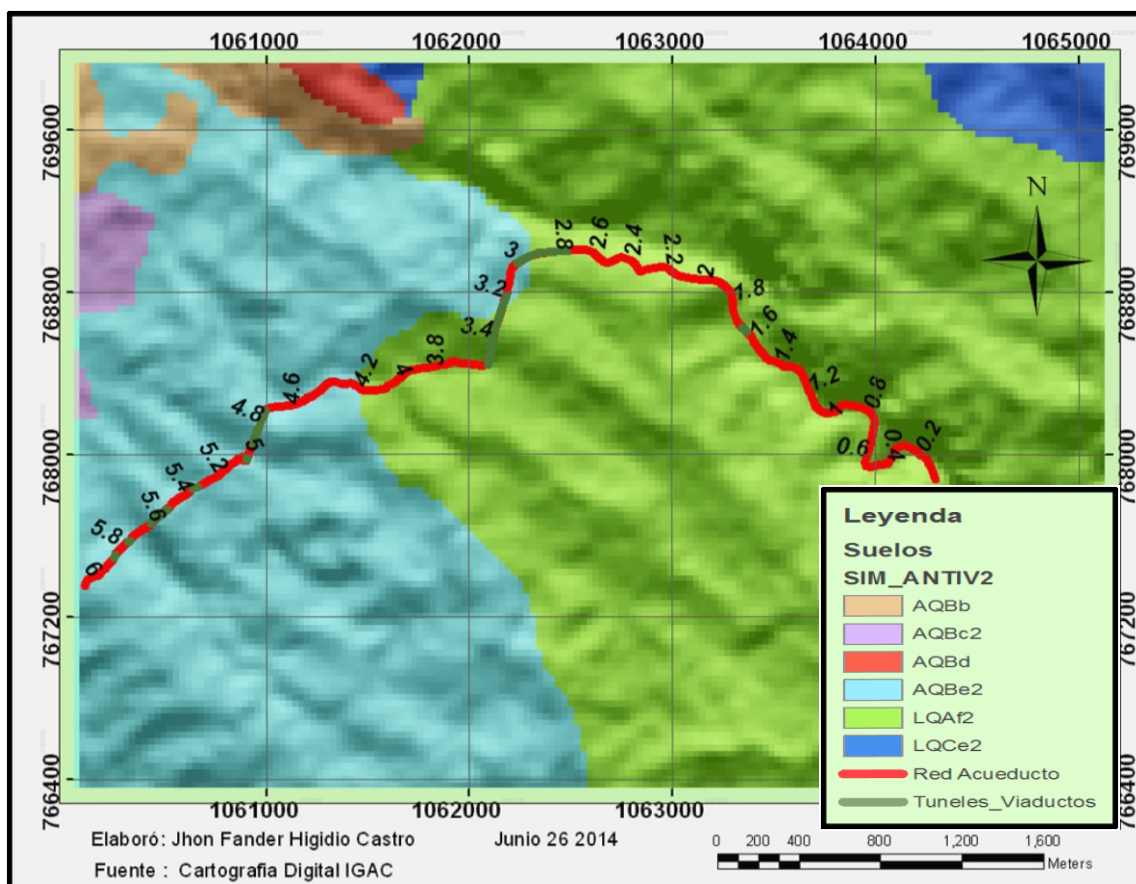


5.4 Tipos de suelos

De acuerdo al Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Cauca a escala 1: 100.000 (IGAC, 2009) en la zona de estudio se destacan las unidades LQAf2 y AQBe2 (Figura 5-13). La primera conformada por los suelos de unidades cartográficas y taxonómicas: Dystrudepts (35%), Hapludox (30%), Hapludands (25%) y Udorthents (10%), con textura moderadamente gruesas a finas. Las pendientes más críticas se encuentran sobre esta unidad con relieves ligeramente ondulados a escarpados derivados de capas de cenizas volcánicas discontinuas sobre rocas ígneas (andesitas, tobas y brechas) y sedimentarias, se presenta erosión de moderada a severa.

La segunda unidad conformada por suelos de la asociación Dystrudepts (60%), y Hapludands (40%), con texturas moderadamente finas a finas y fertilidad baja a moderada. Conformada por rocas ígneas no diferenciadas y capas espesas de cenizas volcánicas. Hace parte de la altiplanicie volcano-erosional con relieves ligeramente ondulados y erosión moderada. Se presentan algunas zonas con pendientes altas y susceptibilidad a los movimientos en masa.

Figura 5 -13: Mapa de Suelos



5.5 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es un parámetro que ilustra la distribución espacial de la cubierta vegetal. Los datos resultantes son delimitados por un rango entre $-1,0$ y $1,0$ que indica la falta de vegetación ó densa vegetación, respectivamente (Deering et al., 1975).

Este índice en la zona de estudio determinado por la imagen Landsat 8 (Figura 5-14) permitió observar el nivel de crecimiento y vigor de la vegetación a lo largo del terreno al obtener valores del NDVI en un rango de variación entre $0,12$ y $0,61$ con promedio de $0,414$ por donde atraviesa la Red de conducción, lo cual es indicador de una buena actividad fotosintética al arrojar valores cercanos a 1 .

Analizando el trayecto de la Red de conducción los índices mas bajos de NDVI se encuentran en un primer tramo entre las abscisas $K0+200$ a $k1+600$ aprox hacia el flanco derecho de la tubería debido a la presencia de taludes empinados con superficies de escasa vegetación, posteriormente se observan algunas áreas con suelos descubiertos debido a la presencia de pequeñas cárcavas y pata de vaca sobre las abscisas $k2+000$ a $k3+000$. Sobre la abscisa $k2+800$ aprox se encuentra el viaducto 2 que se construyó debido a un deslizamiento en la zona concordando con valores bajos de NDVI que ilustra

poca cobertura vegetal. Lo anterior indica que el refuerzo de las raíces aumenta la fuerza del suelo para reducir la incidencia de deslizamientos de allí la importancia de la vegetación en la estabilidad de las laderas. Después de la abscisa k3+000 se pueden observar los índices mas altos de NDVI representando una mayor densidad y vigor de la vegetación con excepción en la abscisa k4+800 (Figura 5-15).

Figura 5-14 : Imagen Landsat 8 zona de estudio

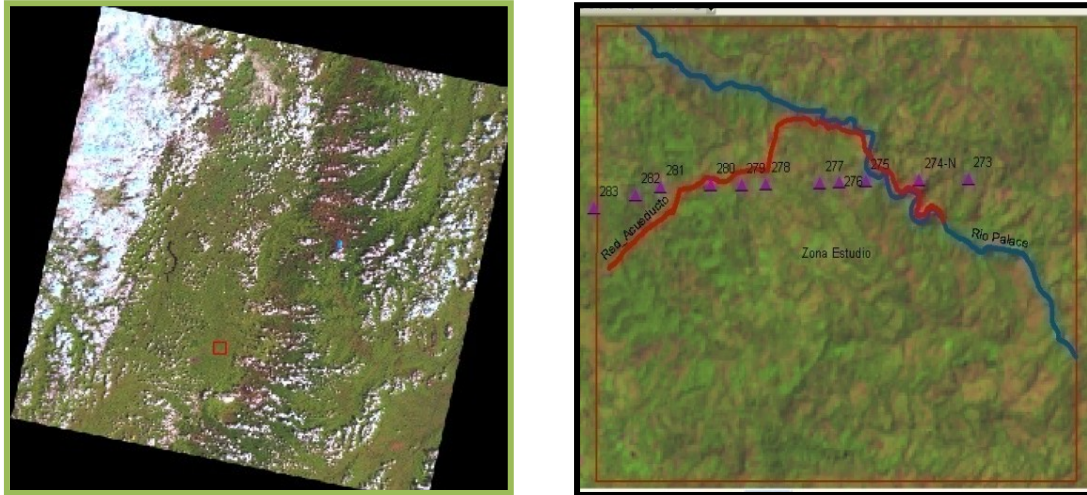
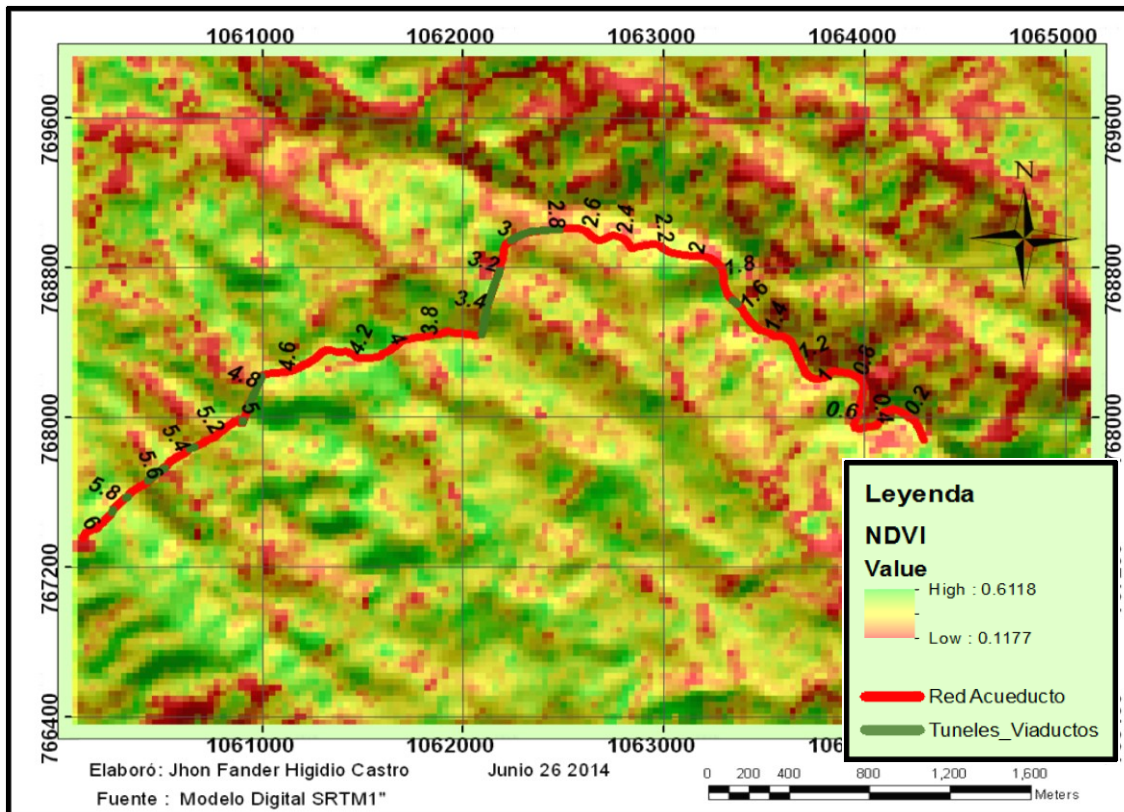


Figura 5-15: Mapa índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

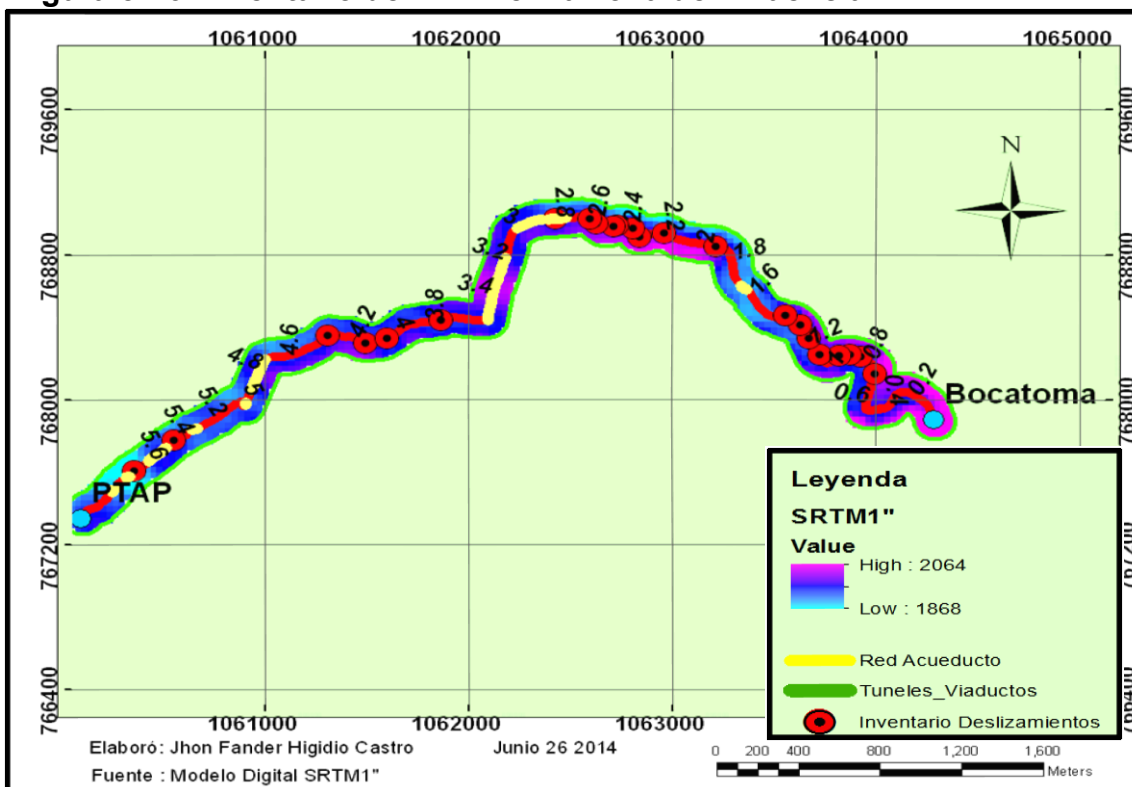


5.6 Inventario de deslizamientos

Otro factor condicionante de la ocurrencia futura de movimientos masales, es la presencia previa de tales procesos. De acuerdo a lo anterior, futuros movimientos ocurrirán bajo similares condiciones geo-ambientales que ocurrieron y dieron origen a los eventos del pasado, este principio es aplicado por diversos autores en el estudio de Susceptibilidad y Amenaza (Carrara et al., 1991; Hutchinson, 1995; Guzzetti et al., 1999; 2006; Moreiras, 2005). El inventario de F.R.M es esencial para identificar con precisión los lugares y las propiedades de los deslizamientos de tierra ocurridos en el pasado para entender cómo funcionan y que factores facilitan la predicción de localizaciones en la ocurrencia de futuros deslizamientos. Los F.R.M en la zona se identificaron por visita de campo sumados a los informes técnicos del Acueducto de Popayán (Figura 5-16).

Un total de 23 F.R.M fueron identificados a lo largo de la Red de conducción, como se muestra en la Figura 5-16 de los cuales 17 se localizaron desde la abscisa k0+000 hasta la abscisa k2+800 aprox sobre el Río Palacé y 6 hasta llegar a la planta de tratamiento (PTAP) abscisa k6+000. Las secuelas permitieron identificar los F.R.M entre los que están deslizamientos traslacionales, desprendimientos de rocas, caídos o volcamiento (topple) de roca y suelo fino, flujos de detritos y desprendimientos de tierra. También se identificaron zonas con tratamiento de erosión y socavación de corrientes.

Figura 5-16: Inventario de F.R.M en la zona de influencia

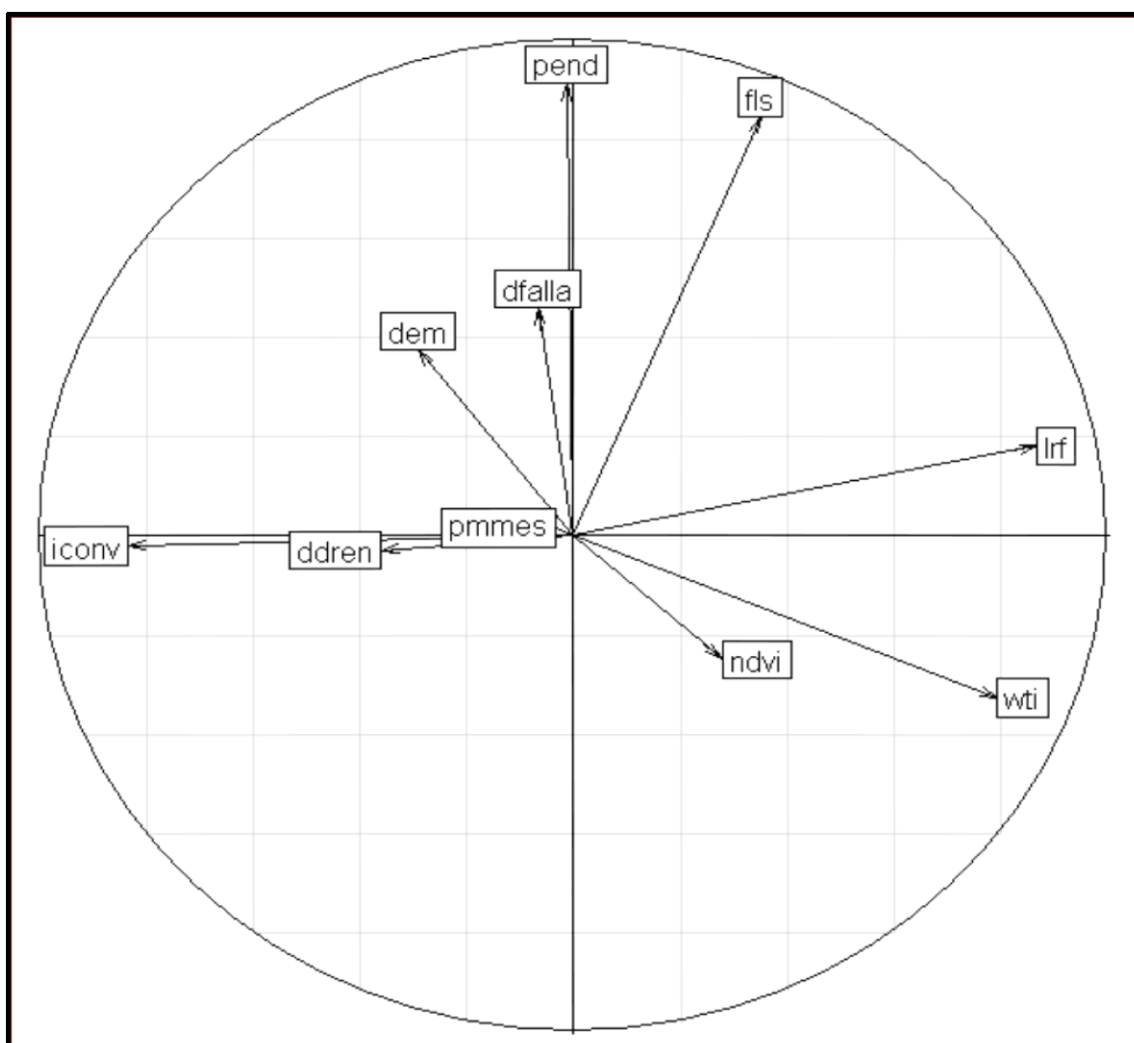


5.7 Análisis de componentes principales (ACP)

Remondo (2001) utilizó en el modelo de susceptibilidad un conjunto reducido de variables morfométricas debido que la introducción de otras variables le aportaban pocas mejoras y obtenía resultados muy similares en los modelos. Por ello antes de realizar el modelado predictivo de los parámetros mencionados anteriormente se procedió a realizar el análisis componentes principales (ACP), para así extraer variables que aporten la mayor representatividad al modelo de Susceptibilidad del terreno, lo que indica que para generar la predicción del modelo en la zona de estudio no es necesario incorporar al análisis todas las variables propuestas.

A través del análisis de componentes principales (Pardo et al., 2007) se extrajeron los parámetros morfométricos que se utilizaron en el modelo de predicción de Amenaza ante F.R.M como se indica a continuación (Figura 5-17).

Figura 5-17: Análisis de componentes principales



Se analizaron mediante la metodología de análisis de componentes principales (ACP) 10 parámetros morfométricos del terreno que se explicaron anteriormente entre los que están la pendiente (pend), distancia a fallas (dfalla), distancia a drenajes (ddren), índice convergencia (iconv), longitud ruta de flujo (lrf), factor LS (fls), índice topográfico de humedad (wti), precipitación máxima mensual (pmmes), índice de vegetación de diferencia normalizada (ndvi), elevación (dem).

En el primer plano factorial del ACP (Figura 5-17) un conjunto reducido de parámetros obtuvieron un 81,40% de inercia en la información y buena representación con un radio de acción cercano a 1, como la pendiente (pend), factor LS (fls), longitud ruta de flujo (lrf), índice topográfico de humedad (wti) y el índice convergencia (iconv). La poca correlación entre estas garantiza independencia entre cada parámetro morfométrico, lo que permitió la extracción de parámetros con la menor redundancia de información intrínseca entre las variables predictores de inestabilidad del terreno.

La mayor correlación se dió entre la pendiente y el factor LS, que debido a las condiciones de fuertes pendientes sobre el Río Palacé se determinó utilizarlo ya que aporta información a la tasa de erosión en la zona de estudio y está siendo incorporado en estudios de predicción de susceptibilidad del terreno como se mencionó anteriormente.

La distancia a fallas y drenajes, no tiene buena representación en el radio de acción del primer plano factorial (Figura 5-17), lo que indica, que no aportarían mejoras al modelo predictivo de Susceptibilidad, concordando con el estudio realizado por Bonachea (2006) donde las distancias de proximidades geométricas no aportaron significativamente al modelo. Lo anterior sugiere que la sismicidad y las precipitaciones no han sido un factor disparador importante en la zona durante el periodo cubierto por este estudio al igual que el socavamiento por acción del curso del agua, la cobertura vegetal y la elevación. La influencia antrópica en futuras investigaciones podría ser el agente disparadores o desencadenantes del área de estudio frente a los posibles factores condicionantes del terreno.

Los parámetros morfométricos se determinaron en el DEM SRTM1", con el software SAGA 2.1.0 (System for Automated Geoscientific Analyses; University of Gottingen, Germany), que tiene implementado gran cantidad de algoritmos, para el cálculo de los parámetros geomorfométricos e hidrológicos.

En la Tabla 5-4 se indican las estadísticas descriptivas de las variables morfométricas seleccionadas donde se muestra el rango mínimo, máximo, desviación estándar y variabilidad de cada parámetro en la zona de estudio.

Los resultados obtenidos muestran gran variedad en la información que aporta cada parámetro: 67,67% en el factor LS, longitud de ruta de flujo con

porcentajes de variación del 66,73%, la pendiente con 49,25%, el índice de convergencia con un 19,46% que reflejan la gran variación de datos que aporta cada variable al modelo de Susceptibilidad del terreno.

A partir del análisis estadístico se determinó los parámetros que se utilizaron para el modelo de predicción en el análisis de Amenaza ante F.R.M del terreno entre los que están: Inventario de F.R.M, parámetros morfométricos mencionados en la Tabla 5-4 y el tipo de suelos.

Tabla 5-4: Estadísticas de los parámetros morfométricos

ParametrosMorfométricos	Rango Min-Max	Media Aritmética	Sd	CV %
Pendiente (%)	0 –210	25.36	13.64	53.78
Pendiente (°)	0 -64.55	13.97	6.88	49.25
Factor LS	0 - 80.29	8.04	5.44	67.67
Índice topográfico humedad(TWI)	6.11- 23.39	9.80	1.91	19.46
Índice convergencia	-100 –100	-0.0059	19.87	-
Longitud ruta de flujo (m)	0- 40.10	20.29	13.54	66.73

5.8 Análisis de Amenaza por factores condicionantes del terreno en la zona de estudio

Para la obtención del modelo de Amenaza por factores condicionantes se implementaron simultáneamente los métodos estadísticos *Regresión logística multinomial* y *Evidencia de pesos* con el fin de conocer la correlación de los parámetros morfométricos con los F.R.M.

En cuanto a los pesos asignados por el método estadístico pesos de evidencia (WOFE) se puede observar mejor correlación entre la pendiente y los F.R.M con un peso de evidencia de 5,24 en un rango de variación de 47° a 49°, lo que indica la localización de deslizamientos en relieves inestables con este grado de pendientes y un contraste (C) de 8,25 que ratifica una correlación significativa con los deslizamientos en la zona de estudio. Este índice contraste (C) da una medida de asociación espacial entre los predictores y los deslizamientos (YannickThiery y Al., 2005), es decir, ofrece una primera visión general de aceptar o rechazar un predictor en la estimación de la correlación espacial con los deslizamientos. Cuando este valor del contraste (C) tiene a cero la presencia del parámetro considerado no afecta a la distribución de los deslizamientos en la zona, lo que indica, que las dos variables son completamente independientes y cuando el valor del contraste es de aproximadamente 2 o más, la correlación es muy significativa (Barbieri et al.,

2009). El factor LS tuvo un peso de 4,22, con un contraste 6,28, lo que indica también una significativa correlación con los deslizamientos predictivos en valores comprendidos entre 36 a 44. Posteriormente el índice topográfico de humedad con un peso de 1,99, un valor C= 5,97, en el rango 16 a 17. El índice de convergencia con un peso de 0,13, C = 5,90, en un rango de -11 a 11, longitud de ruta de flujo con un peso de 0,64 y C= 4,60 en un rango de 27 a 31 m, y el mapa de suelos un peso de 0,29 y C 4,40 donde el relieve es moderadamente escarpado. Estos resultados indican una fuerte correlación espacial en la distribución de los movimientos en masa de la zona de estudio con los parámetros condicionantes del terreno (Tabla 5-5).

Tabla 5-5 : Pesos de evidencia para los parámetros morfométricos

Temas Probatorios	W (peso)	Contraste (C)	Contraste estandarizado
M_pendiente	5,34	8,25	0,79
M_factor LS	4.22	6,28	3,2
M_índice humedad	1,99	5,97	0,59
M_l_ruta_flujo	0,64	4,60	0,46
M_suelos	0,29	4,40	0,44
M_índice _convergencia	0,13	5,90	0,59

Los resultados confirman la importancia de la pendiente como uno de los parámetros más importantes en el análisis de evaluaciones de amenazas por movimientos en masa con otros autores (Brabb et al., 1972; Corominas et al., 2003; Guzzetti et al., 2006; Moreiras., 2005). La predicción del modelo de movimientos en masa muestra que la amenaza a deslizamientos tendrá probabilidades de ocurrencia en la zona de estudio sobre relieves con ángulos de pendientes media de 48°. En la Figuras 5-18 se observa que las zonas con mayores probabilidades a ser afectadas por movimientos en masa son las que se encuentran sobre el Cañón del Río Palacé, que es donde se encontraron las mayores pendientes del terreno y diaclasamientos de rocas fracturadas sobre la Red de conducción hasta aproximadamente la abscisa k2+800 teniendo como punto de inicio la Bocatoma. En la Figura 5-20 y 5-21 (Ampliación anexo D) se muestran áreas puntuales categorizadas en amenaza media alta en colores rojos sobre el inicio de la Bocatoma y la curvatura de la tubería de conducción.

Por otro parte la zona más crítica a movimientos en masa coincide con los valores del factor LS más altos sobre el área de estudio siendo más sensible el terreno a valores LS promedio de 40, que es donde se pueden producir las velocidades más altas de flujos superficiales y por tanto mayores tasas de erosión sobre la zona debido a los aumentos de inclinación de pendiente y longitud de esta sobre el Río Palacé (Haan et al., 1994).

El índice topográfico de humedad fue un factor importante debido que presentó buen contraste en las relaciones con los Fenómenos de Remoción y una predicción a deslizamientos en valores promedio de este índice de 17, lo que muestra la presencia de áreas susceptibles en zonas del terreno húmedas con presencia de escorrentía debido a la saturación de agua en los suelos y que tienen tendencias a acumular agua sobre todo en las formas del terreno más cercanas a los drenajes y de menor altitud, es decir sobre las zonas cóncavas del área de análisis propensas al carvamiento y erosión del suelo. Lo anterior es soportado por el índice de convergencia donde las áreas con predicción de deslizamiento se encuentran en rangos donde el flujo converge, es decir, sobre zonas cóncavas y planas, donde se espera que el contenido de humedad y acumulación de agua se mantenga por mayores periodos de tiempo. Del mismo modo el flujo se concentra por escorrentía sobre el Cañon del Río Palacé y sus afluentes, en donde las áreas más propensas a deslizamientos son aquellas donde las rutas que toma el flujo para su posterior concentración se encuentran a distancias promedio de 29 m.

Sobre la clase 5 de la la unidad de suelo perteneciente a tipo LQAf2 con suelos de textura moderadamente gruesas a finas. Las pendientes más críticas se encuentran sobre esta unidad con relieves que pasan de ondulados a escarpados derivados de capas de cenizas volcánicas discontinuas sobre rocas ígneas (andesitas, tobas y brechas) y sedimentarias sobre la zona de influencia de la Red de conducción. Sobre esta unidad se presentan las áreas de análisis más propensas a sufrir amenazas por movimientos en masa y es la variable que se encuentra más representada en el coeficiente de regresión logística para el cálculo de las probabilidades futuras de ocurrencia a deslizamientos, seguido del factor LS y la pendiente (Tabla 5-6).

Tabla 5-6: Coeficientes calculados en la regresión logística

Temas Probatorios	Coeficiente
M_pendiente	0.279738
M_factor LS	0.783356
M_índice humedad	0.156052
M_I_ruta_flujo	-0.057326
M_suelos (clase 5)	7.285853
M_índice _convergencia	-0.211331

El método de propagación de flujo múltiple (MFD) implementado por Gruber et al., 2008, muestra las áreas afectadas por deslizamientos en la zona de estudio donde se puede observar la magnitud de la masa deslizada que alcanzaría el deslizamiento en direcciones múltiples siendo afectadas con mayor grado las zonas con pendientes más abruptas. En la Figura 5-19 se muestra la propagación de los deslizamientos en zonas puntuales del terreno con

Amenaza a movimientos en masa donde muestra la superficie de masa deslizada que ocurriría al darse el deslizamiento.

Figura 5-18: Mapa de probabilidades de Amenaza por deslizamientos derivados de la regresión logística.

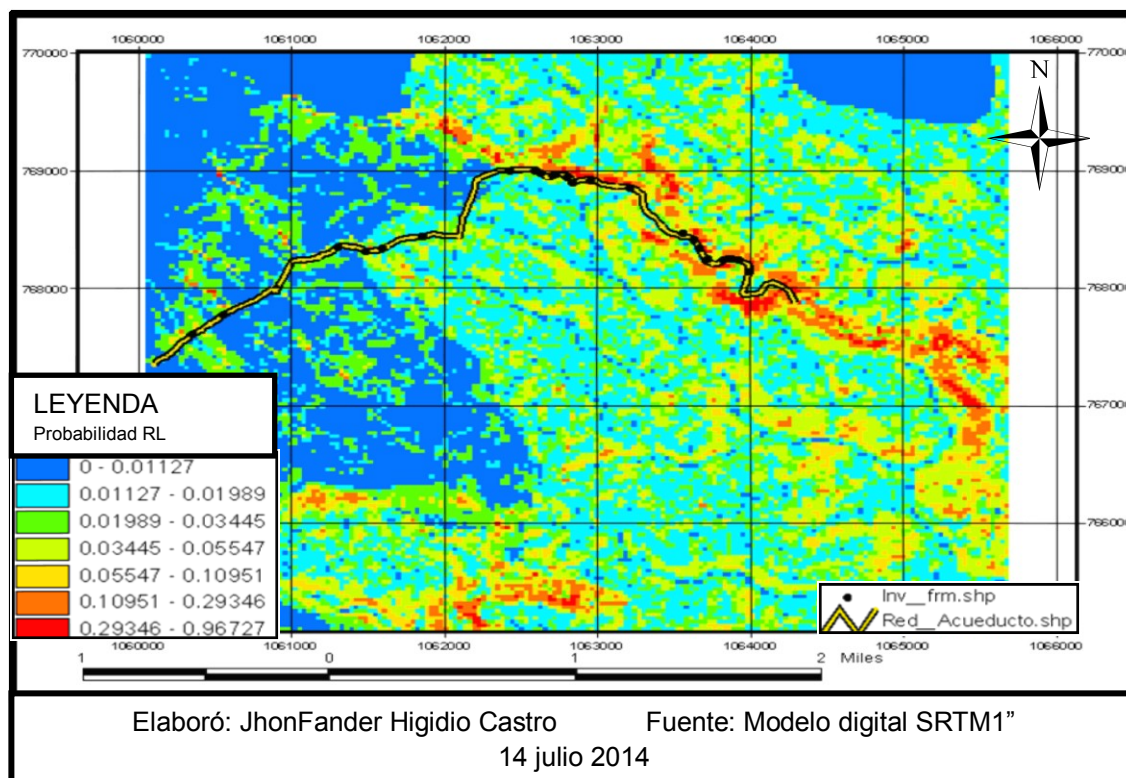


Figura 5 -19: Mapa de propagación de flujo múltiple en la zona de influencia

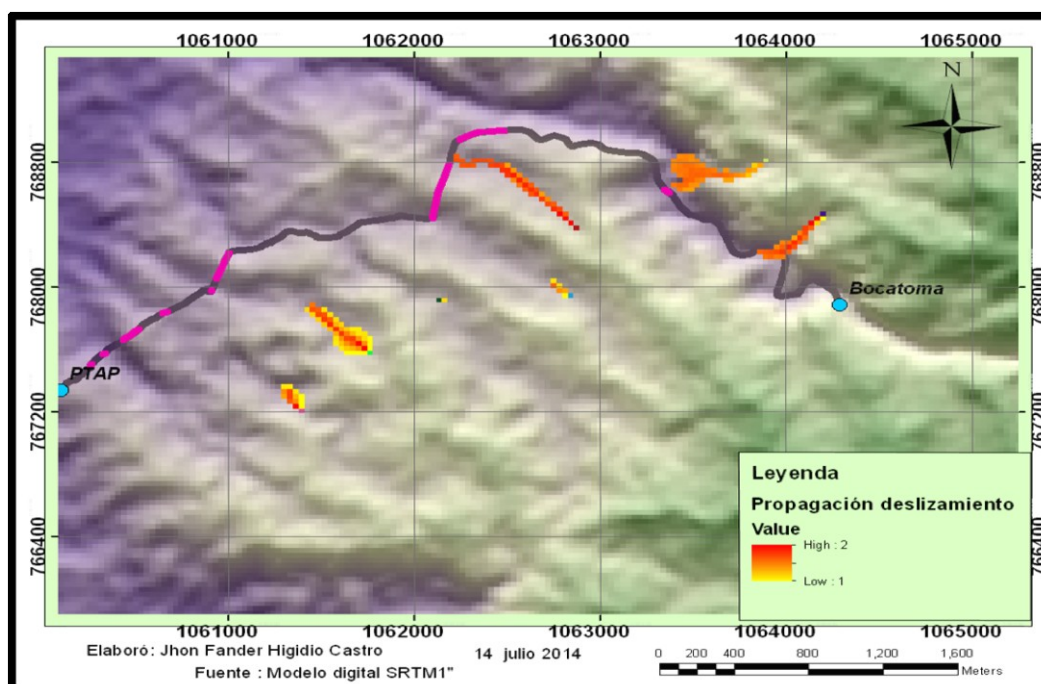


Figura 5 -20 : Mapa de Amenazas ante F.R.M en la zona de estudio

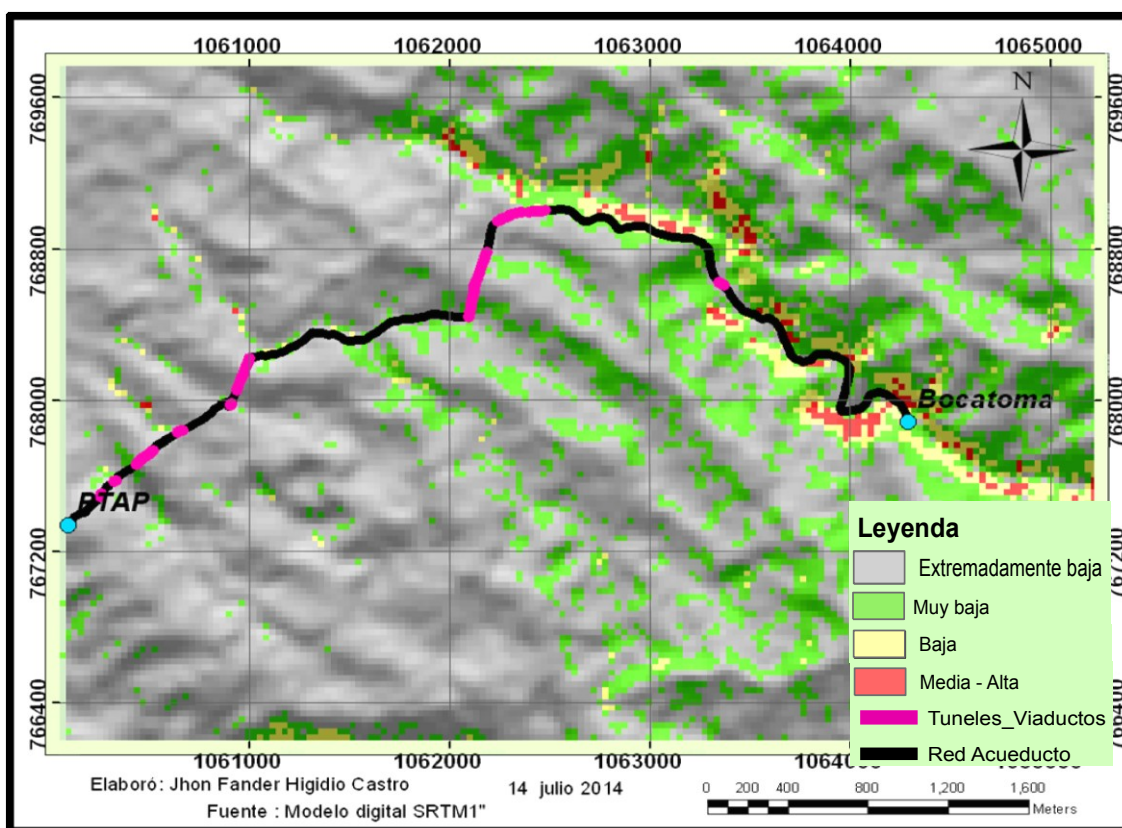
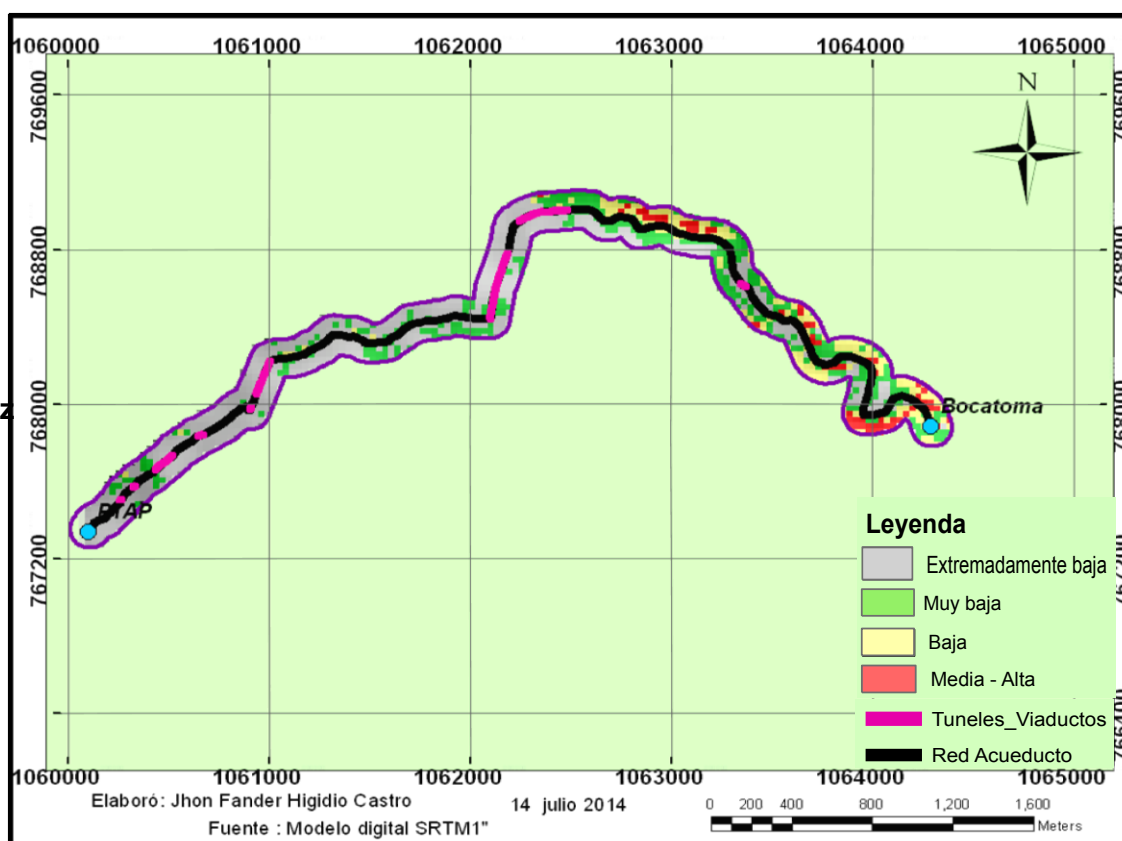


Figura 5 - 21 : Mapa de amenaza ante F.R.M en la zona de influencia sobre la Red de conducción



5.9 Análisis del factor disparador en la zona de estudio

Como variable disparadora o desencadenante ante F.R.M se implementó la precipitación. Al realizar el análisis de esta variable para generar un mapa continuo por métodos geoestadísticos se obtuvo que no hay dependencia espacial, es decir, la variabilidad de la precipitación no se encuentra a las distancias a las cuales se tiene la información debido que las estaciones pluviométricas se encuentran muy separadas (Figura 5-22). En la Figura 5-23 se indican los resultados obtenidos de las precipitaciones máximas diarias analizadas geoestadísticamente con los modelos exponencial y de ondas (WAVE), que muestran resultados muy similares con una dependencia espacial a distancias muy cortas (1,5 km) debido que las estaciones están muy alejadas (entre 5 y 40 km) por lo que el método de kriging no es aplicable.

Como no fue posible modelar la dependencia espacial cualquier modelo que se genere de esta variable es incierto. Sin embargo se aplicaron métodos determinísticos como el Thin Spline Local para generar mapas continuos de precipitaciones máximas diarias y mensuales pero al no conocer la incertidumbre no hay seguridad en el aporte de este parámetro en el modelo de Amenaza (Figura 5-24).

Figura 5- 22: Espacialización de estaciones pluviométricas en la zona de estudio

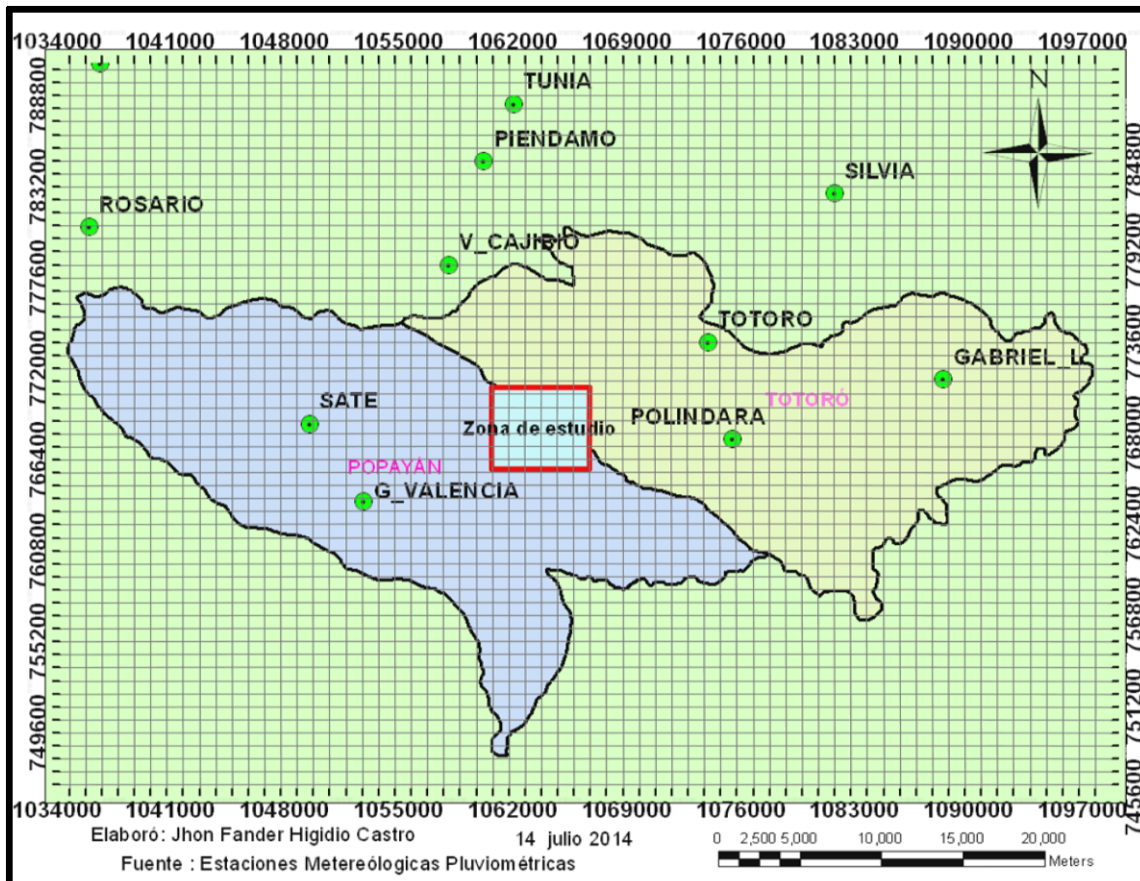
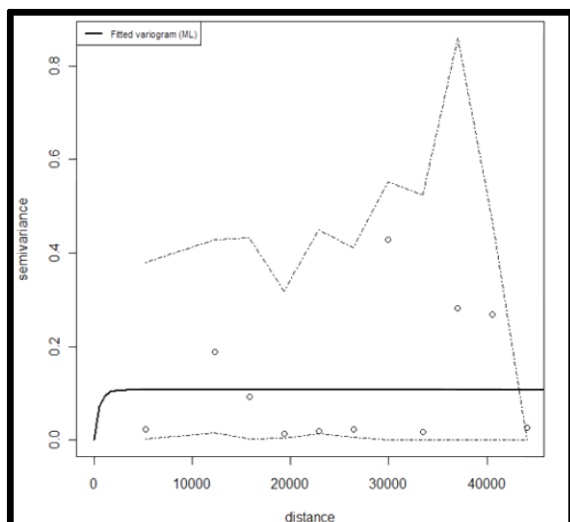
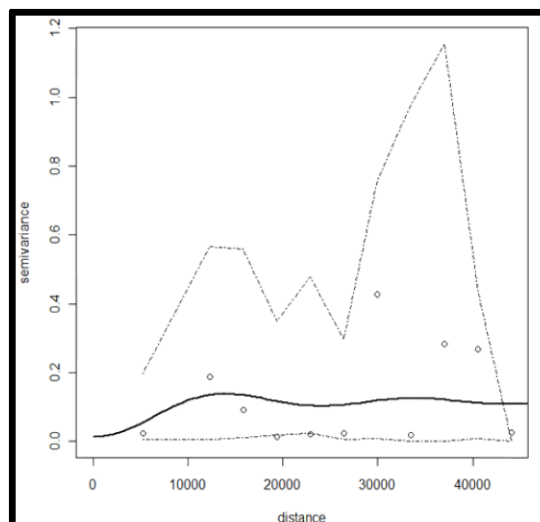


Figura 5-23: Semivariogramas de la precipitación Máximas diarias

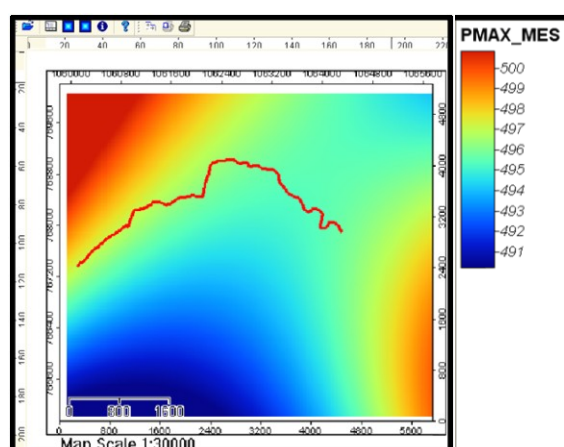
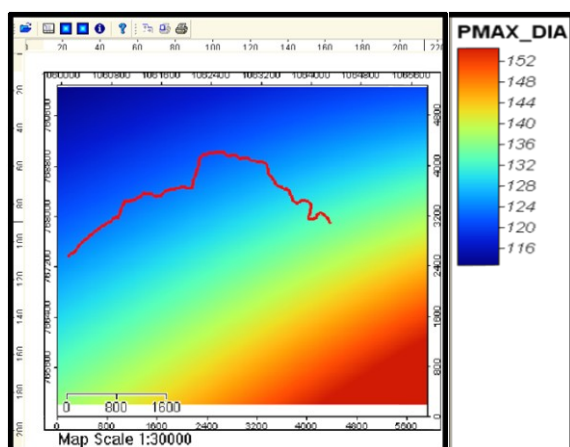


Modelo exponencial



Modelo WAVE

Figura 5-24: Mapa precipitaciones Máximas diarias (DIA) y mensuales (MES)

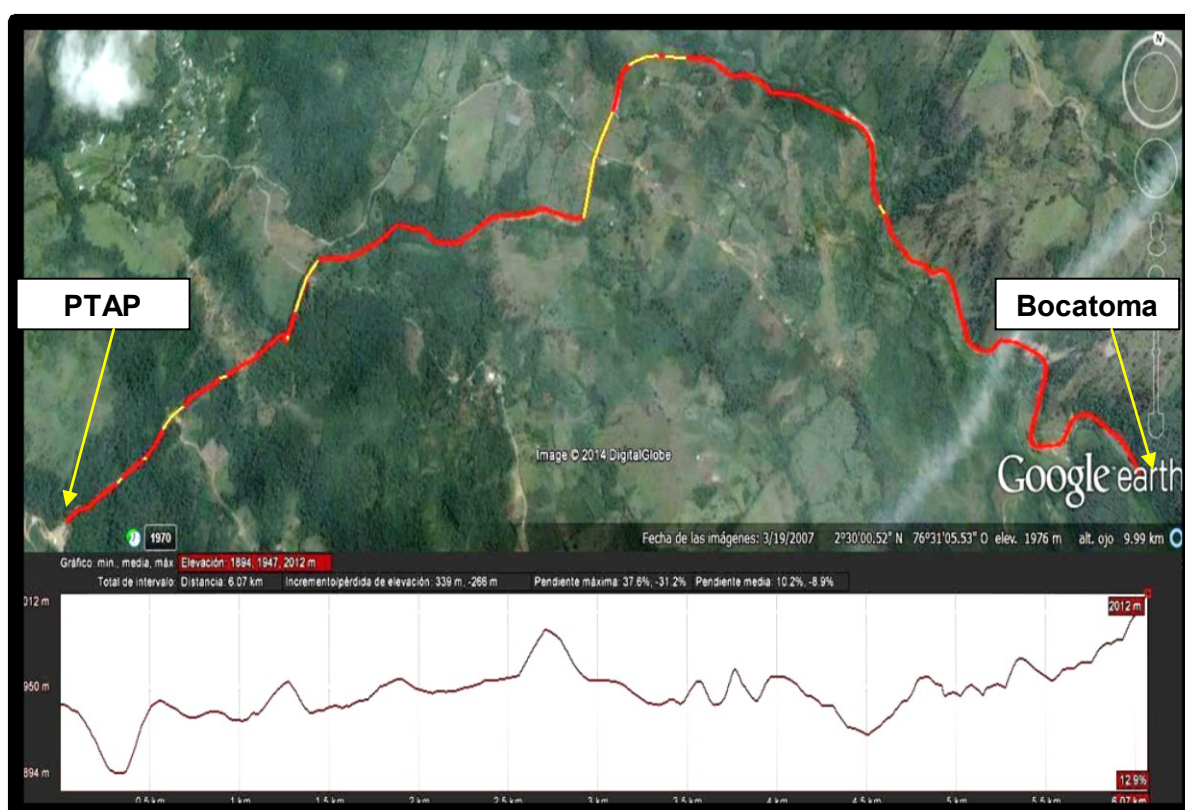


La precipitación se involucró en el análisis de componentes principales (ACP) como se mencionó anteriormente junto a los factores condicionantes del terreno y el índice de vegetación normalizado. Al obtener el círculo de correlaciones se observó que no es una variable representativa en la zona de estudio razón por la cual no se adoptó como factor disparador del modelo de predicción. Lo anterior indica que no fue posible generar el mapa de Amenaza por precipitaciones ante movimientos en masa del área estudiada, por no haber dependencia espacial en la variable y falta de representatividad en el primer plano factorial del ACP. Sin embargo no se debe descartar del todo en futuros estudios ya que la implementación de estaciones pluviométricas más cercanas en la zona de estudio ayudarían a obtener datos que permitan hacer un análisis detallado de la variabilidad y dependencia espacial con métodos robustos en este parámetro.

5.10 Análisis de vulnerabilidad en la infraestructura lineal Red Acueducto Palacé.

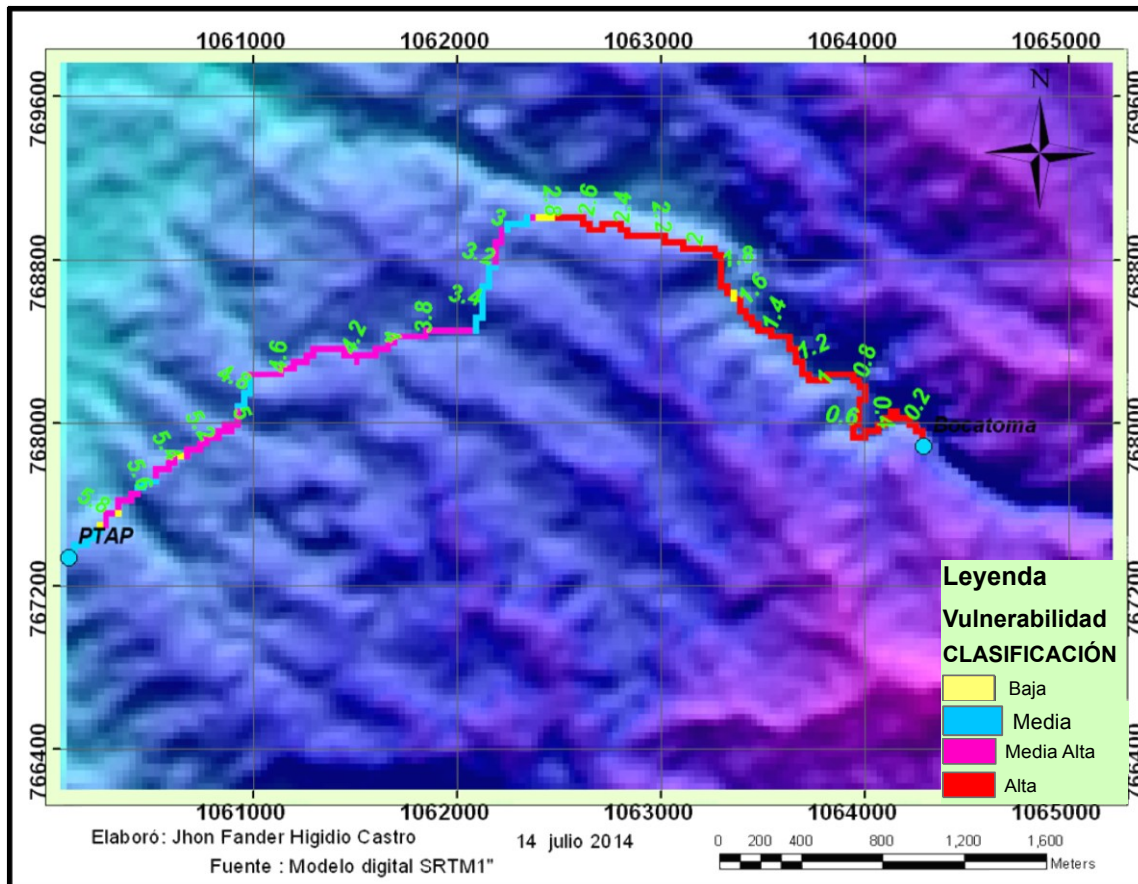
La Red de conducción tiene una longitud aproximada de 6,00 km, pendiente máxima de 21° en la abscisa 5,6 km y de 17° en la abscisa 1,15 km, una elevación mínima de 1894 m y máxima de 2012 m con un desnivel de 118 m aproximadamente. La tubería cuenta con 5 viaductos, un pontón en concreto y 4 túneles (Figura 5-25).

Figura 5-25: Perfil vertical de Red de conducción Acueducto Palacé



Para el análisis de la Vulnerabilidad se asignaron probabilidades a los elementos expuestos como la Red de conducción, viaductos y túneles que varían de 0.3 a 1, como se mencionó anteriormente. El mapa de Vulnerabilidad generado se clasificó en 4 categorías Baja, Media, Media Alta y Alta, donde la categoría Alta se encuentra entre las abscisas K0+000 a K2+800 exceptuando el viaducto de la abscisa K1+600 con categoría baja. De la abscisa K2+800 hasta K6+000, se encuentra la categoría Media alta, con excepción de los túneles que se pertenecen a una categoría de Vulnerabilidad media y los viaductos a una categoría Baja como se muestra en la Figura 5-26 (Ampliación anexo E).

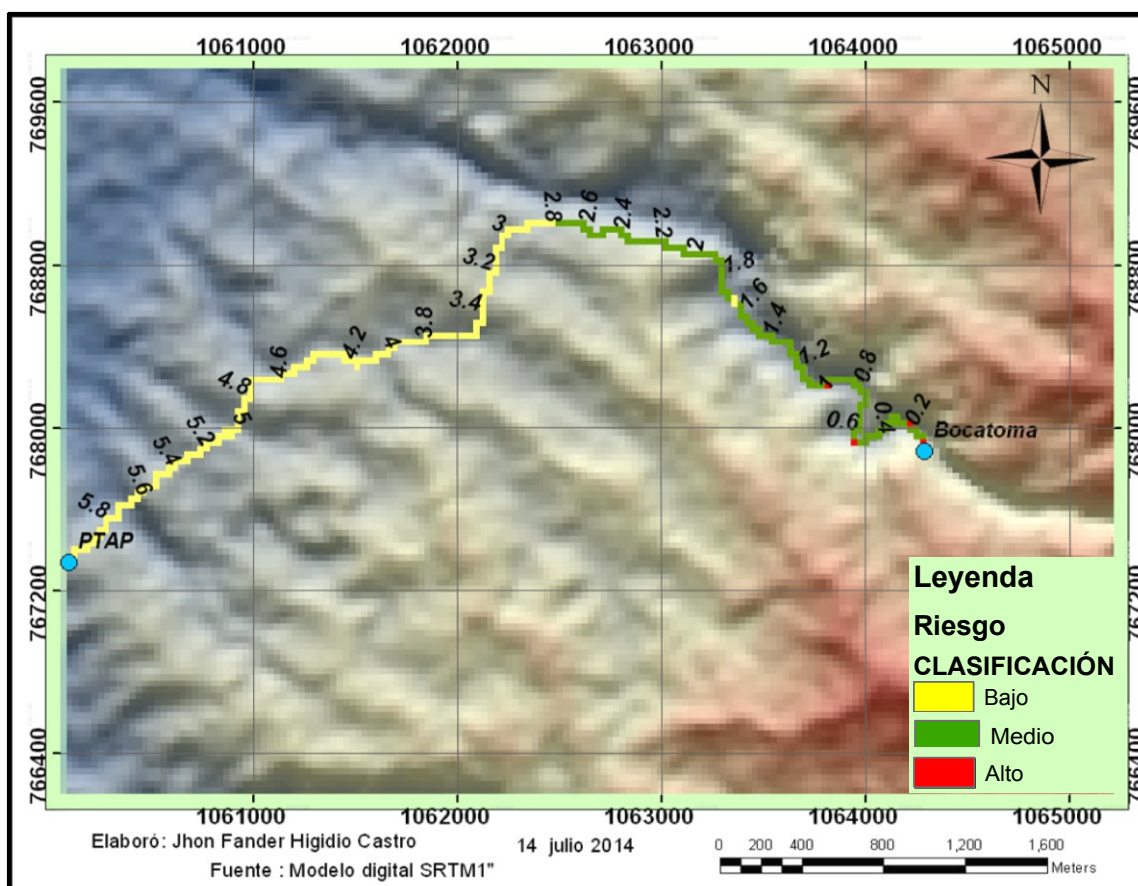
Figura 5-26: Mapa de Vulnerabilidad de la Infraestructura lineal



5.11 Análisis del Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa

El Riesgo por Fenómenos en Masa obtenido con el enfoque estadístico de la regresión multinomial al superponer las variables del terreno extraídas desde el DEM-SRTM de 30 m de la NASA, muestra una mayor exposición de la línea de conducción de la Red de Acueducto de Palacé, entre las abscisas K0+000 a K2+800 en la categoría de Riesgo medio, con algunas zonas puntuales en la categoría de Riesgo alto, localizados en la mayor curvatura del Río Palacé donde el macizo rocoso de los taludes se encuentran altamente fracturados. Después del alejamiento del trazado de la tubería de conducción del Río Palacé y hasta la entrega en la planta de tratamiento (K6), el Riesgo indicado en color amarillo es bajo como se observa en la Figura 5-27 (Ampliación anexo F).

Figura 5 - 27: Mapa de Riesgos de la Infraestructura lineal



5.12 Validación de resultados

➤ Validación del modelo de Amenaza ante F.R.M

La validación de la exactitud en al elevación del DEM SRTM1” con el error medio cuadrático permitió obtener variables de entrada confiables al modelo de predicción al estar dentro de los límites permitidos por la U.S.G.S., para escalas a nivel de semidetalle ($E < 1:10000$).

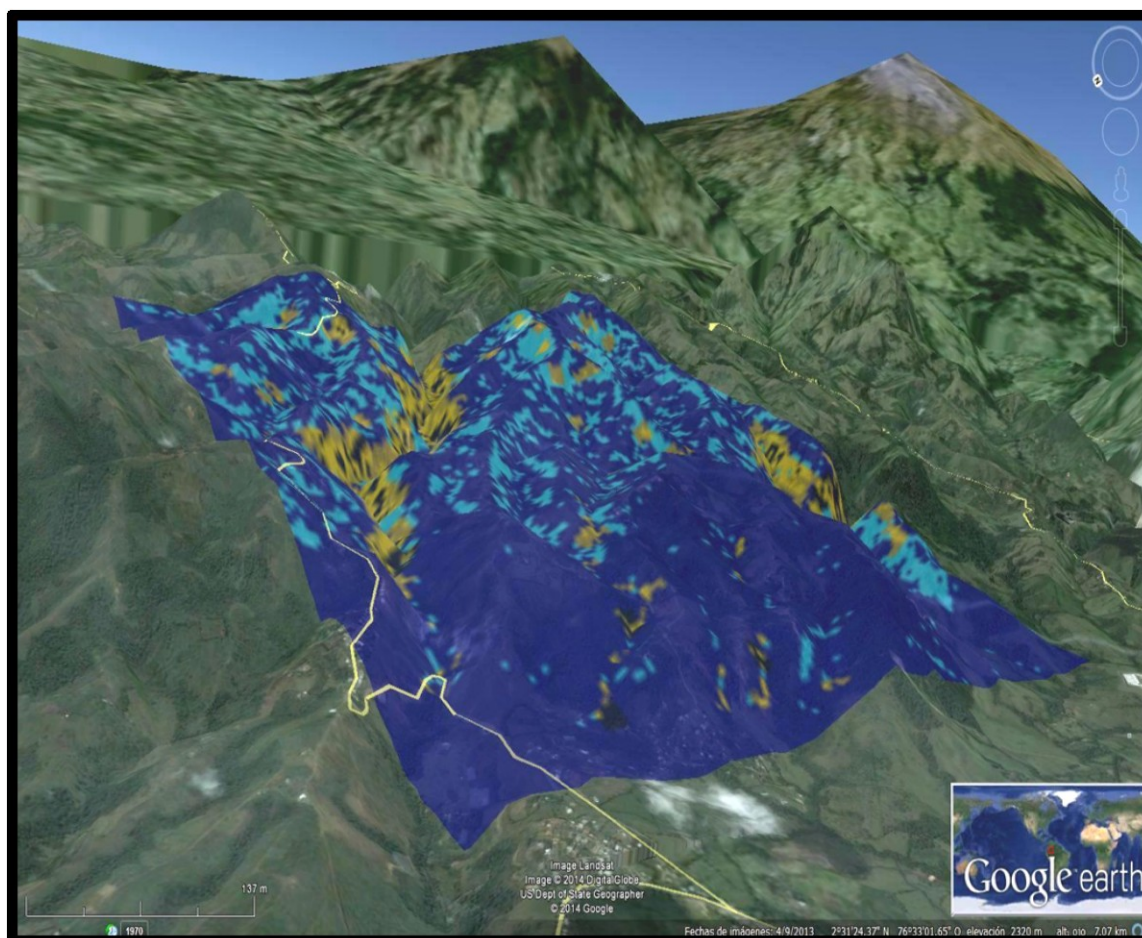
La cartografía oficial I.G.A.C de Amenaza ante Fenómenos de Remoción en Masa en el Departamento del Cauca esta a una escala muy general razón por la cual no se pudo llevar acabo el proceso de validación cuantitativa del modelo predictivo, sin embargo la validación cualitativa tuvo buena concordancia con los deslizamientos ocurridos en el pasado del área estudiada indicando que puede ser extrapolable a otras zonas debido a la objetividad en la utilización de parámetros morfométricos implementados con su respectivo inventario histórico de deslizamientos.

La superposición de los resultados del modelo de Amenazas ante Fenómenos de Remoción en Masa sobre las imágenes Google Earth, se pueden observar

en las Figuras 5-28, donde se comparó, la concordancia de movimientos en masa en la zona de estudio con las predicción de ocurrencia de deslizamientos, las cuales se resaltan en color amarillo con probabilidades media-alta y las zonas con baja y sin peligro a deslizamientos en color azul oscuro y claro. Lo anterior permitió hacer una evaluación cualitativa de la exactitud en la predicción del modelo de Amenaza.

Por otra parte se comparo el drenaje digitalizado en pantalla de la Carta topográfica del I.G.A.C y por la red de drenaje obtenido mediante el DEM SRTM1" (Figura 29) donde se puede observar una gran concordancia en la superposición de las capas, lo que ratifica la fuerte potencialidad del DEM STRM1" para detectar la red de drenaje y así poder utilizar este instrumento con gran confiabilidad en zonas donde no se tenga información sobre los drenajes.

Figura 5-28: Validación cualitativa del modelo de amenaza ante F.R.M



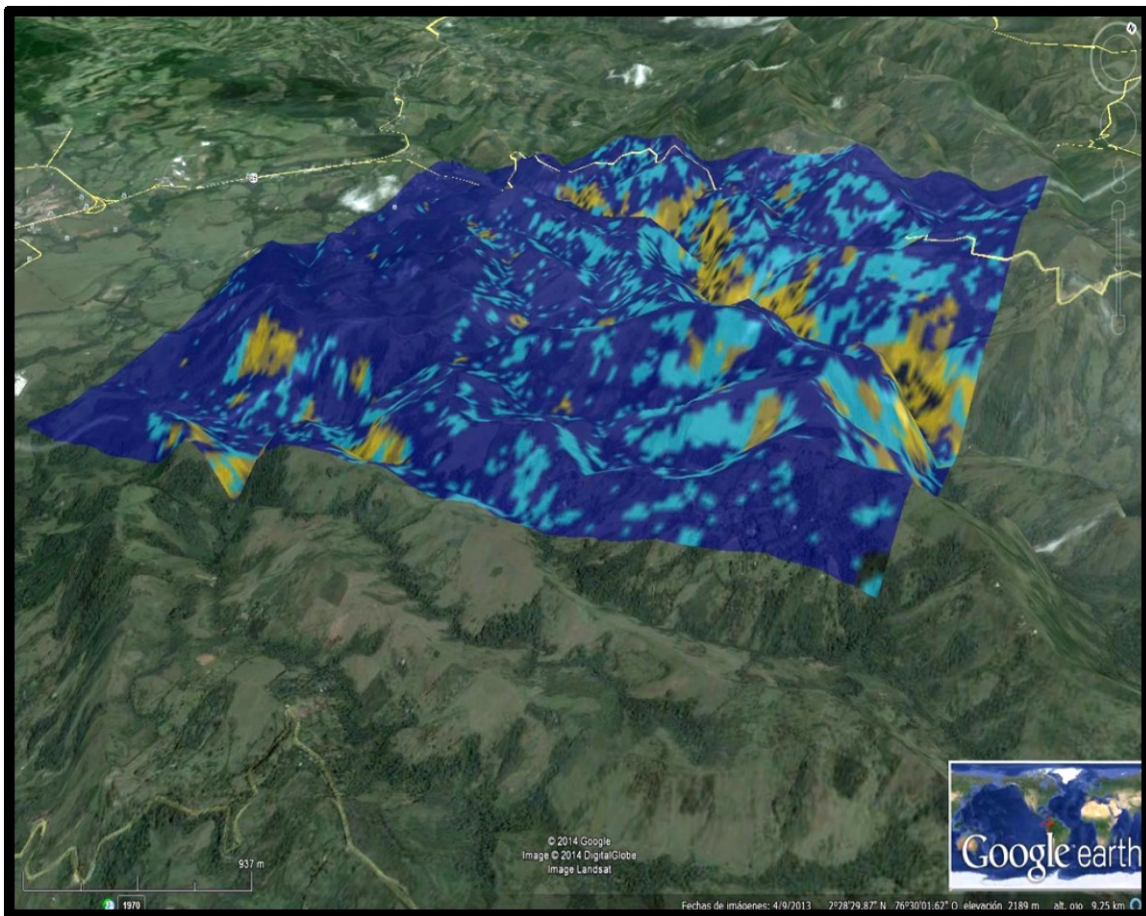
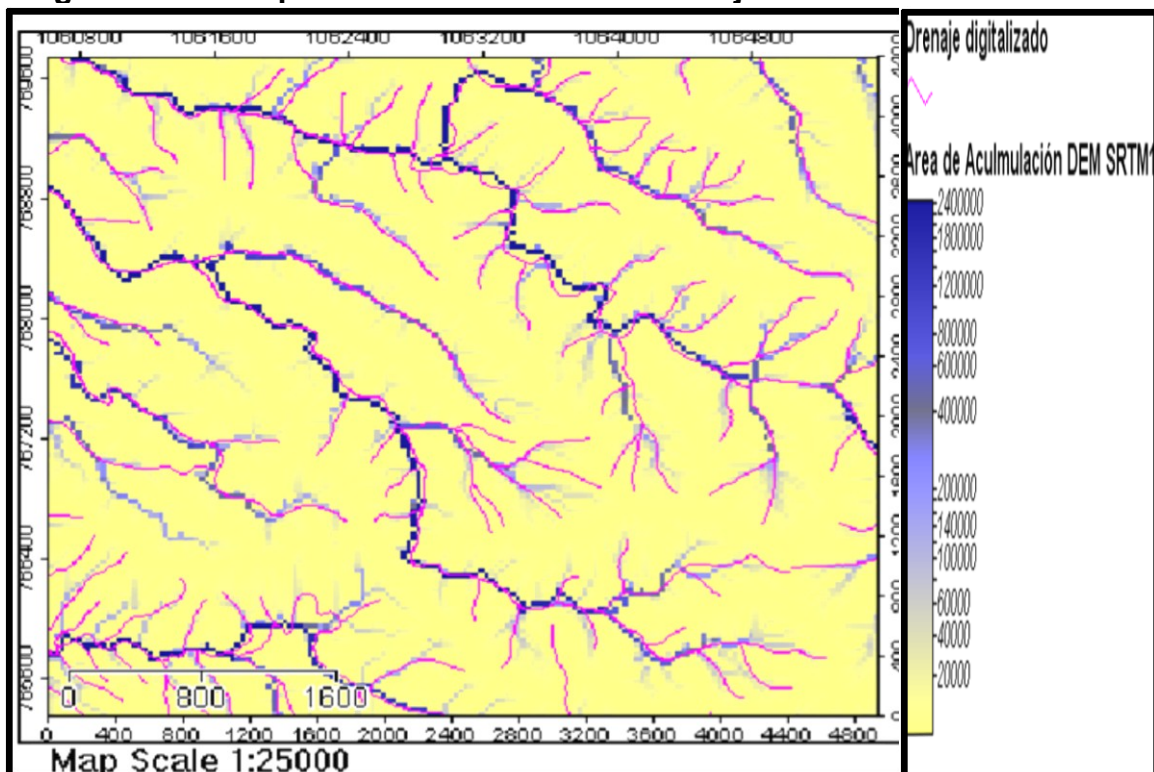


Figura 5 - 29: Mapa área de acumulación de flujo





CAPÍTULO 6

Conclusiones y recomendaciones

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

- Mediante el método estadístico de la regresión logística multinomial que relacionó un inventario de Fenómenos de Remoción en masa obtenido mediante recorridos de campo y espacialización GPS, con variables independientes derivados mediante algoritmos desarrollados por investigadores en el campo de la geomorfometría en un DEM-SRTM de 30 m de resolución espacial; se obtuvo una sectorización del Riesgo de la línea de conducción del Acueducto del Río Palacé.
- La Amenaza se evaluó mediante el enfoque estadístico de la regresión multinomial a partir de parámetros del terreno obtenidos de un DEM-SRTM de 30 m de resolución espacial. La Vulnerabilidad se evaluó mediante la asignación de probabilidades a priori de los elementos expuestos de la Red de conducción, de acuerdo con la revisión de literatura existente sobre el tema. El Riesgo resultó de la superposición mediante álgebra de mapas de los resultados de la Amenaza y Vulnerabilidad, categorizados en los niveles bajo, medio y alto.
- Mediante el método estadístico paramétrico del análisis de componentes principales, donde se relacionaron las variables analizadas (parámetros del terreno, parámetros de cobertura y del suelo, parámetros geométricos de distancia a las fallas y a la red de drenaje y como disparador (la precipitación), se encontró que solo un conjunto de 5 parámetros aportó al 80% de la variabilidad total, es decir, tuvieron el mayor aporte al modelo estadístico implementado, resultando la precipitación máxima mensual con baja representación en el primer plano factorial, por lo que esta variable no resultó significativa en el modelo de predicción de la Amenaza y por lo tanto no fue posible evaluar la Amenaza por precipitaciones ante movimientos en masa. Por otra parte un análisis de la variabilidad espacial de precipitación máxima mensual, mediante la aplicación de los principios de la geoestadística no mostró dependencia espacial a las distancias de las estaciones suministradas por el IDEAM, por lo que la aplicación de métodos robustos de interpolación espacial, no fueron posibles y en consecuencia la incertidumbre obtenidas por estos métodos no era posible conocerla, salvo que se implementen en la zona de dispositivos de medición de precipitación a distancias más cortas.
- En relación con la validación de resultados, se debe indicar que debido a la falta de mapas a escala semidetallada, no es posible cuantificar la exactitud del mapa de predicción obtenido a través de índices como el de Kappa o las

curvas ROC. Sin embargo, una validación cualitativa, mediante la superposición de los resultados sobre el globo virtual Google Earth y los resultados del análisis de propagación con el software “landslide” escrito en lenguaje AML, arroja resultados muy prometedores de acuerdo a los que se visualizó en los recorridos de campo y el registro fotográfico obtenido. Sin embargo, el análisis de exactitud del DEM-SRTM 1” de la NASA, donde se obtuvo un error medio cuadrático vertical del orden de 21 m, es un indicador de que el error de propagación de los productos derivadas con éste se encuentra dentro de las tolerancias de DEMs del nivel 2, es decir, productos a escala semidetallada, lo cual es suficiente para estudios a nivel de prefactibilidad. Esto se corroboró también con los parámetros secundarios como los hidrológicos, los cuales muestran una importante concordancia con la red de drenaje obtenido con la digitalización en pantalla de las planchas topográficas suministradas por entidad oficial de producirlas, el IGAC.

6.2 Recomendaciones

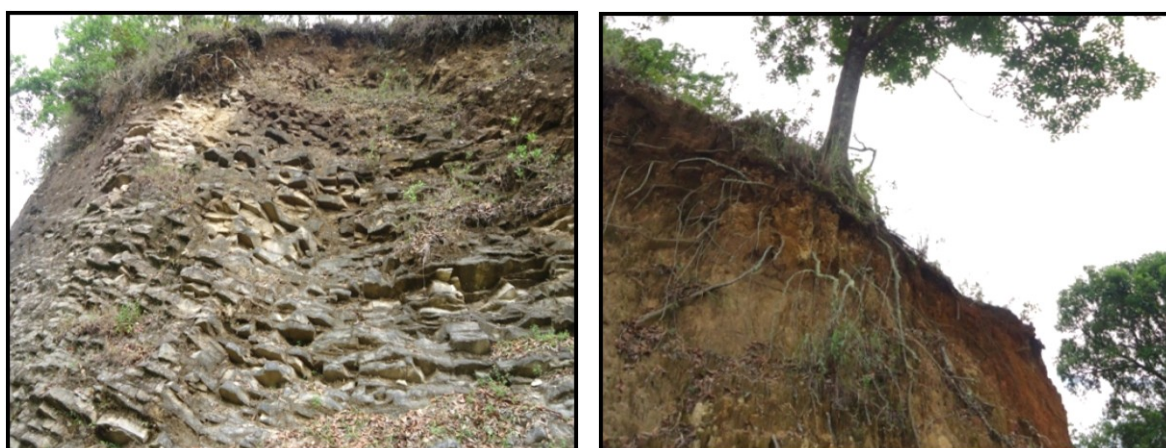
- Debido al escaso número de investigaciones en el tema de Vulnerabilidad se recomienda que una próxima línea de investigación a nivel de pregrado sea exclusivamente el tema de Vulnerabilidad de la infraestructura ante Fenómenos de Remoción en Masa.
- En la revisión de literatura se encontraron numerosos métodos estadísticos para el análisis de la Amenaza tales como la ponderación de pesos de evidencia (*WOFE*), la *Lógica difusa* y la *Redes neuronales*. Sin embargo en nuestro medio son poco conocidos y por tanto se requiere que las nuevas investigaciones los implementen a partir de la buena potencialidad de los DEMs encontrados en este estudio.
- La confiabilidad del modelo de predicción depende de tener unas buenas bases de datos o inventario de deslizamientos que cuantifiquen su magnitud, extensión y tipo, para esto en la revisión de literatura se encontró una buena potencialidad del procesamiento de imágenes de satélite lo cual genera una línea de investigación en la obtención automática de los Fenómenos de Remoción en Masa a partir de sensores remotos.
- El mapa de Riesgo obtenido en esta investigación a escala semidetallada debe servir como insumo para realizar estudios detallados y puntuales que permitan dar una solución definitiva ante el Riesgo de la Red de conducción por colapso de los taludes altamente fracturados en los primeros 2.8 km en la línea de conducción.

Anexos

Anexo A: Registro fotográfico de la zona de estudio



Material de los taludes adyacentes al Río Palacè cerca de la bocatoma en zona con alta pendiente.



Grado de fracturamiento de los taludes de la Red de conducción en el tramo inicial y exposición al interperismo en altura importante



Grado de meteorización de los taludes rocosos con pendiente vertical y saturación de los suelos cerca del Río.



Tramos en viaducto contruidos para salvar problemas de inestabilidad ocurridos en el pasado.



Tramos contruidos en taludes de baja altura con materiales finos limo-arcillosos.



Tramos con zonas húmedas y material rocoso sin compactar.

Anexo B: Tabla de precipitaciones máximas diarias (mm)

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TOTORO	70	65	80	59	54	65	54	30	53	76	78	77
TUNIA	80.4	112.4	100.4	89	115.6	43.8	53.5	58.5	63.1	75.2	103.2	81.3727
V_CAJIBIO	101.3	108	81.3	78.5	78	64.7	62	63	56.3	90.1	127.5	84.5
PIENDAMO	74	145	98	112	84	71	122	45	66	207	97	94
G_VALENCIA	97.1	75	102.8	94	101.8	48.8	58	68.2	90.6	80.4	96.4	125.8
SILVIA	55	120	80	70	120	66	60	31	110	70	80	53
SATE	80	65	96	93	66	81	73	80	121	85	101	114
ROSARIO	110	90	130	120	80	65	80	82	68	110	90	100
DINDE	87	98	160	100	91	87	96	75	89	89	93	130
POLINDARA	80	63	90	190	65	101	37	25	41	65	90	100
GABRIEL_L	40	32.4	28	36	43.6	28.4	27.4	18.2	26.8	40.6	43	25.7

Anexo C: Tabla de precipitaciones máximas mensuales (mm)

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TOTORO	377	353	387	324	276	160	142	98	181	421	448	446
TUNIA	410.4	472	489.3	436.8	415.4	156.8	154.4	115.2	268.5	459.8	414.2	344.8
V_CAJIBIO	441.9	467.5	418.3	368.5	351.6	182	218.8	134.9	246.6	450.5	558.8	436.5
PIENDAMO	403	454	468	381	378	225	432	172	226	659	484	403
G_VALENCIA	431.7	419.5	436.1	323	290.5	201.3	146.4	206.5	249	487.9	520.9	462.3
SILVIA	326	358	296	311	331	122	114	100	275	401	503	235
SATE	457	357	389	334	273	324	249	208	236	471	657	499
ROSARIO	589	453	516	475	420	319.4	282	271	405	505	679	589
DINDE	522	527	587	495	364	347	307	251	370	477	539	533
POLINDARA	440	366	369	385	218	124	112	61	213	328	514	329
GABRIEL_L	165.5	171.3	174.2	174.5	189.4	170	166.5	134	155.8	151.1	195.5	167.3

Anexo D: Mapa de amenaza ante deslizamientos en la zona de influencia sobre la Red de conducción

Anexo E: Mapa de Vulnerabilidad de la Infraestructura lineal

Anexo F: Mapa de Riesgos de la Infraestructura lineal

Bibliografía

ABARCA, OSCAR., 2010. Desarrollo de un modelo de Geoprocesamiento para la valoración productiva y tributaria de tierras agrícolas en Venezuela. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid.

ABRAMS, M. 2000. ASTER: data products for the highspatialresolutionimageronNASA's EOS-AM1 platform. *International Journal of Remote Sensing*. 21, pp. 847–861.

ACOSTA, HUMBERTO Y PELÁEZ MEJÍA., 1995. Zonificación de cuencas por movimientos en masa, bajo SIG”, Rio Lejos, Quindío”. Medellín, pp.10-20.

AKGUN, A., SEZER, E.A., NEFESLIOGLU, H.A., GOKCEOGLU, C., PRADHAN, B., 2012. An easy to use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm. *Computers & Geosciences* 38, pp.23–34.

ALCÁNTARA, AYALA, I., 2000.”Landslide: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología”, *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm.41. Instituto de Geografía, UNAM, México, pp.7-25.

ARRELL, K., FISHER, P., TATE, N., BASTIN, L., 2007. A fuzzy c-means classification of elevation derivatives to extract the morphometric classification of landforms in Snowdonia, Wales. *Computers & Geosciences*, Vol.; 33.No 10, pp. 1366-1381.

ARIZA, Alexander., 2013. Descripción y Corrección de Productos Landsat 8: “Landsat Data Continuity Mission”. (LDCM). Version 1. Grupo Interno de Trabajo en Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá-colombia, pp.7-21.

ANTONIE, P., 1992. “Les problémes posés par l’instabilité des versants de grande ampleur-aspectsgéologiques”. *Bull. Int. Assoc. Engineering Geology*, N° 45, pp 9-24.

ATKINSON, P.M., TATNALL, A.R.L., 1997. Neural networks in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 18, pp. 699–709.

AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY., 2002. Landslide risk management concepts and guidelines. Australian Geomechanics Society sub-committee on landslide risk management, pp. 51–70.

AYALA, F.J., ELÍZAGA, E., GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I., DURÁN, J.J., BELTRÁN DE HEREDIA, F., OLIVEROS, M.A., CARBÓ, A., GUILLAMONT, M.L., CAPOTE, R., 1987. Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España. IGME, Madrid.

AYALEW, L. Y YAMAGISHI, H., 2005. The application of GIS based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda–Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65, pp.15–31.

BAEZA, C., COROMINAS, J., 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, pp.1251-1263.

BAI, SHI-BIAO., WANG, JIAN., LÜ, GUO-NIAN., ZHOU, PING-GEN., HOU, SHENG-SHAN., XU, SU-NING., 2006. GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China, *Geomorphology* 115 (2010), pp 23–31.

BARBIERI G. AND P. CAMBULI., 2009. The weight of evidence statistical method in landslide susceptibility mapping of the Rio Pardu Valley (Sardinia, Italy), pp 2658-2664.

BATHRELLOS, G. D.; D. P. KALIVAS AND H. D. SKILODIMOU. 2009. GIS-based landslide susceptibility mapping models applied to natural and urban planning in Trikala, Central Greece. *Estudios Geol.* 65(1), pp.49-65.

BELL, R., GLADE, T., 2004. Quantitative risk analysis for landslides - Examples from BÍldudalur, NW-Iceland. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4, pp.117-131.

BERNARDO, O'HIGGINS., 2001-2005. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla, pp. 728-737.

BINAGHI, E., LUZI L., MADELLA P., RAMPINI, A., 1998. Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and fuzzy Dempster-Shafer approaches. *Natural Hazards* 17, pp.77-97.

BÖHNER, J., T. SELIGE. 2007. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. *Göttinger Geographische Abhandlungen*. 115, pp.13-27.

BOLONGARO A., V. TORRES, V., SORANIC, D., FRAMED, ORTIZE, M. A., 2005. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, México. *Geomorphology*. 67, pp. 407–422.

BONACHEA, JAIME., 2006. Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. España.

BONACHEA, J., REMONDO, J., CENDRERO, A., 2004. Evaluación y cartografía de riesgo de deslizamientos a partir del análisis de los movimientos ocurridos en el pasado reciente y de sus efectos. En: Benito, G., Díez Herrero, A., (Eds.), *Riesgos Naturales y Antrópicos en Geomorfología 2*. Sociedad Española de Geomorfología, Madrid, p. 423-434.

BO LIM; SPANGER-SIEGFRIED, BURTON, MALONE, E. Y S. HUQ. 2005. "Marco de Políticas de adaptación al Cambio Climático: Desarrollo de estrategias, Políticas y Medidas". Primera edición 2005, publicada por Cambridge University Press bajo el título "adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Development Strategies, Policies and Measures", pp.17-20

BOLONGARO, A., TORRES, V., SORANI, V., FRAME, D., ARTURO ORTIZ, M., 2005. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico. *Geomorphology*, Vol.; 67. No 3-4, pp. 407-422.

BUI, D., PRADHAN, B., LOFMAN, O., REVHAUG, I., DICK, O., 2012. Landslide susceptibility mapping at Hoa Binh province (Vietnam) using an adaptive neuro fuzzy inference system and GIS. *Computers and Geosciences* 45, pp. 199–211.

BUI, DIEU TIEN., PRADHAN, BISWAJEET., LOFMAN, OWE., REVHAUG, INGE., DICK, OYSTEIN B., 2011. Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh province (Vietnam): A comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models, *Journal Catena* 96 (2012), pp.28–40.

BURROUGH, P. A., 1986. Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment. *Monographs on Soil and Resources Survey*. No. 12. Oxford University Press, p.193.

BRABB, E.E.; Pampeyan, E.H. & Bonilla, M.G., 1972. "Landslide susceptibility in San Mateo County, California" U.S. Geol. Surv. Misc.; Field Studies Map MF-360, scale 1:62.500.

BRABB, E.E., GRAYMER, R.W., JONES, D.L., 1998. Geology of the Onshore Part of San Mateo County, California: A Digital Database. United States Geological Survey (USGS) Digital Open-File Report 98-137. Scale 1:62,500.

BRUNSDEN, D., 1973, "The application of systems theory to the study of mass movement", *Geología Aplicada e Hidrogeología*, University of Bari. 8, 1, pp. 185-207.

CÂMARA, GILBERTO, VIEIRA, ANTONIO MIGUEL Y SIMEAO, JOSÉ., 2005. Representações Computacionais do Espaço: Um Diálogo entre a Geografia e a Ciência da Geoinformação.

CARRARA, A; M. CARDINALLI AND F. GUZZETTI; F. GUZZETTI AND P. REICHENBACH., 1995. GIS Technology in mapping landslide hazard. En: Carrara, A and F. Guzzetti (Eds.): *Geographical Information Systems in assessing natural hazards*. Kluwer Academic Publishers, Holanda, pp.335.

CARVACHO BART, L. Y SÁNCHEZ MARTÍNEZ, M., 2010. Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla, pp. 728-737.

COATES, D.R., 1977. "Landslide perspectives", in Coates, D R. (ed.), *Landslide*, Geological Society of America.

COOKE, R.U. & DOORNKAMP, J.C., 1974. "Geomorphology in Environmental Management"; Oxford University Press. London, pp .413.

CONFORTI, MASSIMO., PASCALE, STEFANIA., ROBUSTELLI, GAETANO., SDAO, FRANCESCO., 2012. Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment(northern Calabria, Italy). *Journal Catena* 113 (2014), pp. 236–250.

CONRAD, O., 2007., SAGA. Program Structure and Current State of Implementation. In: Bohner, J., McCloy, K.R., Strobl, J. (Eds), *SAGA – Analysis and Modelling Applications*. Vol. 115. Verlag Erich GmbH, pp.39-52.

CONVENIO ACUEDUCTO – ISA., 2012. "Diseño piloto metodológico de Análisis de Vulnerabilidad en zonas de influencia de proyectos lineales, e implementación de acciones de mitigación de procesos de Remoción en masa acelerados por factores de exceso de precipitación en un área piloto del Departamento del Cauca". Cauca, pp.5-14.

COROMINAS, J. Y GARCÍA YAGÜE, A., 1997. "Terminología de los movimientos de ladera" IV Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables; Alonso, E.; Corominas, J.; Chacón, J.; Oteo, C. y Pérez, J. (eds.). Granada. Vol. III, pp.1051-1072.

COROMINAS, J.; R. COPONS; J. M. VILLAPLANA; J. ALTIMIR AND J. AMIGÓ., 2003. Integrated Landslide Susceptibility Analysis and Hazard Assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards* 30, pp.421–435.

CORREA, NIXON A., 2012. Método para la caracterización de las formas del terreno en zonas de montaña utilizando Modelos Digitales de Elevación. Caso: Departamento del Cauca. Tesis de maestría en Geomática. Universidad Nacional de Colombia.

CLERICI, A., PEREGO, S., TELLINI, C., VESCOVI, P., 2002. A procedure for landslidesusceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology* 48, pp.349- 364.

CROZIER, M. J., 1973. "Techniques for the morphometric analysis of landslips", *Zeitschrift für Geomorphologie*, 17, pp. 78-101.

CROZIER, M.J., 1984. "Field assessment of slope instability" *Slope Instability*; Brunsden, D. and Prior, D.H. (eds.); John Wiley & Sons Ltd. New York, pp. 103-142.

CROZIER, M.J., 1986. *Landslide: causes, consequences, and environment*. Croom Helm. London.

CROZIER, M. J. AND T. GLADE., 2005. Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach, in *Landslide Hazard and Risk*. Eds T. Glade, M.

Anderson and M. J. Crozier. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, West Sussex, England.

CRUDEN, D.M., 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin International Association Engineering Geology* 43, pp. 27-29.

CRUDEN, D.M., VARNES, D.J., 1996. Landslide types and processes. Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslide: investigation and mitigation (Special Report)*. National Research Council, Transportation and Research Board Special Report 247, Washington, DC, pp.36–75.

CHANG, K.T. 1991. The effect of MDE resolution on slope and aspect mapping. *Cartography and GIS*.18, pp. 69-77.

CHANG, K., 2004. *Introduction to Geographic Information Systems*. Mc Graw – Hill College. New York, p. 400.

CHANG, K., CHIANG, S., HSU, M., 2007. Modeling typhoon- and earthquake-induced landslides in a mountainous watershed using logistic regression. *Geomorphology* 89, pp. 335–347.

DAI, F.C., LEE, C.F., NGAI, Y.Y., 2002a. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology* 64, pp.65-87.

DAI, F.C., LEE, C.F., 2002b. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 42, pp.213-228.

DAI, F.C., LEE, C.F., 2003. A spatiotemporal probabilistic modelling of storm-induced shallow landsliding using aerial photographs and logistic regression. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, pp. 527–545.

DAS, I., SAHOO, S., VANWESTEN, C.J., STEIN, A., HACK, R., 2010. Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rockmass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). *Geomorphology* 114, pp. 627–637.

DAS, ISWAR., STEIN, ALFRED., KERLE, NORMAN., DADHWAL, VINAY., 2012. Landslide susceptibility mapping along road corridors in the Indian Himalayas using Bayesian logistic regression models, River in the Himalayas (India). *Geomorphology* 179, pp. 117-124.

DEBELLA-GILO, M.; ETZELMULLER, B; KLAKEGG, O., 2007. Digital soil mapping using Digital Terrain analysis and statistical modelling integrated into GIS: Examples from Vestfold County of Norway. *ScanGIS 2007-Proceedings of the 11th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Sciences*. Asnoruega university of Life Sciences. pp.237-253.

DEERING, D., ROUSE, J., HAAS, R., SCHELL, J., 1975. Measuring forage production of grazing using from landsat MSS data. In: *Tenth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, ERIM, Ann Arbor, pp. 1169–1178.

DIKAU, R.; D. BRUNSDEN; L. SCHROTT AND M. IBSEN., 1996. Landslide Recognition. Identification, movement and causes. Chichester, John Wiley & Sons Ltd.

DOBOS, E.Y HENGL, T., 2009. Soil mapping applications. En: T.HENGL Y H.REUTERS (EDS). Geomorfometry. Concept, Software, Applications. Amsterdam-Oxford: elsevier, pp. 461-479.

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A E.S.P. (s.f.), 2012. Informe técnico: "Deslizamientos en la línea de Conducción de agua Cruda Acueducto palace". Popayán, pp. 2-8.

EPOCH., 1993. The temporal occurrence and forecasting of landslides in the European community. Flageollet, J. C. (Ed.), Contract No. 90 0025, Final Report.

ERCANOGLU, M., GOKCEOGLU, C., 2004. Use of fuzzy relations to produce landslides susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). Engineering Geology 75, pp. 229–250.

ERSKINE, C. F., 1973. "Landslides in the vicinity of the first Randall Reservoir. S. Dakota", U.S. Geol. Survey, p. 64.

EVANS, S.G., 1997. Fatal landslides and landslides risk in Canadá. En: Cruden, D., Fell, R. (Eds.), Landslide risk assessment, Balkema, Rotterdam, pp. 185-196.

FAWCETT, T., 2006. An introduction to ROC analysis. Pattern Recogn Lett 27, pp. 861–874.

FERNÁNDEZ, T., 2001. "Cartografía, análisis y modelado de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en macizos rocosos mediante SIG: Aplicación a diversos sectores del sur de la provincia de Granada" Tesis Doctoral; Universidad de Granada, p.648.

FOWZE, J., BERGADO, D.T., SORALUMP, S., VOOTTIPREUX, P., DECHASAKULSOM, M., 2010. Rain-triggered landslide hazards and mitigation measures in Thailand: From research to practice, Geotextiles and Geomembranes 30 (2012), pp. 50-64.

FUJISADA, H., BAILEY, G.B., KELLY, G.G., HARA, S., ABRAMS, M.J., 2005. ASTER DEM performance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 43, pp. 2707–2714.

FLOOD, M., 2001. Laser Altimetry: From Science to Commercial LIDAR Mapping. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 67, pp.1209-1217.

FLORINSKY, I.V., 1998. Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations. Progress in Physical Geography. 22 (1), pp.33-60.

FLORINSKY, I. V., 2008. Applications of Terrain Analysis. Global Lineaments: Application of Digital Terrain Modelling. EN: Advances in Digital Terrain Analysis. Qiming Zhou · Brian Lees · Guo-an Tang (Eds.) Springer- Verlag Berlin Heidelberg.

GARCÍA-RODRÍGUEZ, M.J., MALPICA, J.A., BENITO, B., DÍAZ, M., 2008. Susceptibility assessment of earthquake triggered landslides in El Salvador using logistic regression. *Geomorphology* 95, pp. 172–191.

GEISSER, S., 1974. A predictive approach to the random effect model. *Biometrika* 61 (1), pp. 101–107.

GEOSPATIAL INFORMATION SOCIETIES (JB GIS), 2013. The Value of Geoinformation for Disaster and Risk Management. Published in English in Copenhagen, Denmark, ISBN 978- 87-90907-88-4. pp 4-75.

GOMEZ, H., KAVZOGLU, T., 2005. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology* 78, pp. 11–27.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I., 2002. “Ingeniería Geológica”. Precinte Hall. Madrid, 744 p.

GUTIÉRREZ, NANCY., 2012. Metodología para el cálculo de la humedad del suelo usando parámetros topográficos (DEM), climáticos y edáficos en un sector del piedemonte depositacional del municipio de Villavicencio. Tesis de maestría en Geomática. Universidad Nacional de Colombia.

GUZZETTI, F.; A. CARRARA; M. CARDINALLI; P. RAICHENBACH. 1999. Landslide hazards evaluation: a review of current techniques and their applications in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, pp. 181-216.

GUZZETTI, F., REICHENBACH, P., CARDINALI, M., GALLI, M., ARDIZZONE, F., 2005. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology* 72 (1-4), pp. 272-299.

GUZZETTI, F.; M. GALLI; P. REICHENBACH; F. ARDIZZONE; CARDINALLI, M. 2006. Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth system Sciences*, 6, pp. 115-131.

GUZZETTI, F.; M. MANUTA; F. ARDIZZONE; A. PEPE; M. CARDINALLI; G. ZENI; P. RAICHENBACH AND R. LANARI., 2009. Analysis of Ground deformation detected using the SBAS-DInSAR Technique in Umbria, Central Italy.

GRUBER, S; HUGGEL, C; PIKE, R., 2008. Modelling mass movements and landslide susceptibility. In: Hengl, T; Reuter, H I. *Geomorphometry*. Amsterdam, 527-550.

GROHMANN, C., RICCOMINI, C., MACHADO, F., 2007. SRTM-based morphotectonic analysis of the Poços de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil. *Computers & Geosciences*, Vol.; 33. No 1, pp. 10-19.

HAAN, C. T., BARFIELD, B. J., HAYES, J. C., 1994. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. Academic Press. San Diego, CA. USA. 588 p.

HANSEN, M.J., 1984. "Strategies for classification of landslides" *Slope Stability*; Brundsen, D. and Prior, D.H. (eds.); John Wiley & Sons Ltd. New York, pp. 1-25.

HARTEMINK y McBRATNEY, A.B., 2009. *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science. Volume 33. Series Editors. A.E. Edited by Tomislav Hengl & Hannes I. Reuter.*

HENGL, T., S. GRUBER, D. SHRESTHA. 2003. Digital Terrain Analysis in ILWIS. Lecture notes. En: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), <http://www.itc.nl/personal/shrestha/DTA/>.

HENGL, T Y ROSSITER, D., 2003. Supervised landform classification to enhance and replace photo-interpretation in semi-detailed soil survey. *Soil Science Society of America Journal*, 67 (6), pp. 1810-1822.

HENGL, T., BAJAT, B., BLAGOJEVIC, D. REUTER, H., 2008. Geostatistical modeling of topography using auxiliary maps. *Computers & Geosciences*, Vol.; 34, No 12, pp. 1886-1899.

HENGL, T & HANNES I., 2009. *Geomorphometry: Concept, Software, Applications. Elsevier-development in soil science, volumen 33, pp. 237-243.*

HIGHLAND, L.M., Y BOBROWSKY, PETER, 2008, *Manual de derrumbes. Guía para entender todo sobre los derrumbes: Reston, Virginia, Circular 1325 del Sistema Geológico de los EUA*, p. 129.

HOFIERKA, J, MITÁŠOVÁ, H; NETELER, M., 2009. *Geomorphometry in GRASS GIS*, p. 392.

HUNGR, O., MORGAN, G.C., Y KELLERHALS, R., 1984, Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measure: *Canadian Geotechnical Journal*, v. 21, pp. 663-667.

HUNGR, O., EVANS, S.G., BOVIS, M., Y HUTCHINSON, J.N., 2001, Review of the classification of landslides of the flow type: *Environmental and Engineering Geoscience*, v. 7, pp. 22-238.

HUTCHINSON. J. N., 1968. "Mass movement". En Fairbridge. R. W. (ed.), *Encyclopedia of Earth Sciences*, Reinhold, New York, pp. 688-695.

HUTCHINSON, J.N., 1988. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *Proceedings 5th of the International Symposium on Landslides. On Landslides, Lausanne, Switzerland, Vol. 1, pp. 3-35.*

HUTCHINSON, J.N., 1991. The Landslides Forming the South Wight Undercliff in: R.J. Chandler (Ed) Slope Stability: Engineering, Developments and Applications, London: Thomas Telford, pp.157-168.

IGAC., 2009. Estudio general de suelos y zonificación de tierras – departamento del Cauca, escala 1:100000. IGAC. Subdirección de Agrología. Bogotá. Imprenta Nacional.

IRIGARAY. C., 1990. “Cartografía de Riesgos Geológicos asociados a movimientos de ladera en el sector de Colmenar (Málaga)”. Tesis Licenciatura. Universidad de Granada, p.390.

IRIGARAY, C., 1995. Movimientos de ladera: inventario, análisis y cartografía de susceptibilidad mediante un Sistema de Información Geográfica. Aplicación a las zonas de Colmenar (Málaga), Rute (Córdoba) y Montefrío (Granada). Tesis doctoral. Universidad de Granada.

JACOBSEN, K., 2005. Analyses of SRTM Elevation Models. University of Hannover, Germany. En: Memorias Curso Taller “Modelos Digitales de Elevación – generación, manejo y análisis” Semana Geomática, IGAC.

KAWABATA, DAISAKU., BANDIBAS, JOEL., 2008. Landslide susceptibility mapping using geological data, a DEM from ASTER images and an Artificial Neural Network (ANN). Honshu Island, Japan. *Geomorphology* 113 (2009) 97–109.

KEMP, L.D., G.F. BONHAM-CARTER, G.L. RAINES, AND C.G. LOONEY, 2001, Arc-SDM: Arcview extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis.

KERVYN, M.; G. J. ERNST, R. GOOSSENS, P. JACOBS., 2008. Mapping volcano topography with remote sensing: ASTER vs. SRTM. *International Journal of Remote Sensing*. 29 (22), pp. 6515–6538.

LEE, S., CHOI, J., MIN, K., 2004. Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea. *International Journal of Remote Sensing*, 25(11), pp.2037-2052.

LEE, S., 2004. Application of likelihood ratio and logistic regression models to landslides susceptibility mapping using GIS. *Environmental Management* 34, pp. 223–232.

LEE, S., RYU, J., WON, J., PARK, H., 2004. Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Engineering Geology* 71, pp. 289–302.

LEE, S., 2005. Application of logistic regression model and its validation for landslides susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing* 26, pp. 1477–1491.

LEE, S., TALIB, J.A., 2005. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology* 47 (7), pp. 982- 990.

LEE, S Y PRADHAN, B., 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides* 4, pp. 33–41.

LILLESAND, T. y KIEFER, R. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*, 3a.ed. John Wiley and Sons, New York.

LIU, X.L.; Z. Q. YUE; L. G. THAM AND C. F. LEE. 2004. Empirical assessment of debris flow risk on a regional scale in Yunnan province, southwestern China. *Environmental Management* 30, pp.249-64.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. 2005. Interpretation of Digital Terrain Model. 267-284. In: *Digital Terrain Modelling: Principles and Methodology*. CRC press, p.323.

LÓPEZ, D., 2006. Desarrollo e Implementación de un Modelo para la Clasificación Automática de Unidades de Relieve a partir de Modelos Digitales de Elevación. Tesis de Maestría en Geomática. Centro de Investigación en Geografía y Geomática. México, D. F.

MARJANOVIĆ, M., KOVAČEVIĆ, M., BAJAT, B., VOŽENÍLEK, V., 2011. Landslide susceptibility assessment using SVM machine learning algorithm. *Engineering Geology* 123, pp.225–234.

MARTÍNEZ, J.A.; RAMOSA, M.C., POESEN, J., 2004. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology*.58, pp.305–321.

MCCOOL, D.K., FOSTER, G.R. y G.A. WEESIES., 1997. Slope Length and Steepness Factors (LS), Chapter 4, pp. 101-141.

MENARD, S., 1995. *Applied logistic regression analysis*. Sage University Paper Series on Quantitative Applications in Social Sciences, vol. 106. Thousand Oaks, California. 98 pp.

MENARD, S., 2002. *Applied Logistic Regression Analysis*. 2d ed. Thousand Oaks, CA: Sage.

METTERNICHT, GRACIELA; HURNI, LOREN; GOGU, RADU., 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. Switzerland, pp. 284-303.

MOORE I.D., GRAYSON, R.B. y LADSON A.R. 1991. "Digital terrain modelling review of hydrological, geomorphological and biological applications" *Hydrological Processes*, 5, pp.3-30.

MOORE, I., WILSON, J., 1992. Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method for estimation. *Journal of Soil and Water Conservation* 47, pp. 423–428.

MOREIRAS, S. M., 2005. Landslide susceptibility zonation in the Río Mendoza Valley, Argentina. *Geomorphology* 66, pp.345-357.

- NADIM, F., JAEDICKE, C., SMEBYE, H., KALSNES, B., 2013. Assessment of Global Landslide Hazard Hotspots. K. Sassa, B. Rouhban, S. Briceño, M. McSaveney and B. He (Eds.), *Landslides: Global Risk Preparedness*, Berlin/Heidelberg, 59-71.
- NAGARAJAN, R., MUKHERJEE, A., ROY, A., & KHIRE, M., 1998. Temporal remote sensing data and GIS application in landslide hazard zonation of part of Western Ghat, India. *International Journal of Remote Sensing*, 19(4), pp.573–585.
- NANDI, A., SHAKOOR, A., 2008. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses, northeastern Ohio, U.S.A. *Engineering Geology* 110, pp. 11–20.
- NEFESLIOGLU, H.A., GOKCEOGLU, C., SONMEZ, H., 2008. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Engineering Geology* 97, pp.171–191.
- NEFESLIOGLU, H.A., SAN, B.T., GOKCEOGLU, C., DUMAN, T.Y., 2012. An assessment on the use of Terra ASTER L3A data in landslide susceptibility mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 14, pp.40–60.
- NELSON, A; REUTER, H Y GESSLER, P., 2009. DEM Production Methods and Sources. En: T HENGL Y H. REUTER (Eds), *Geomorphometry. Concept, Software, Applications*. Amsterdam- Oxford: Elsevier, pp. 65-85.
- NETELER, M., MITASOVA, H. 2008. *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*, 3rd Edition. Springer, New York, p.406.
- NEUHÄUSER, BETTINA, TERHORST BIRGIT., 2006. Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany), pp.13-22.
- NIKOLAKOPOULOS, K. G., E. K. Kamaratakis, N. Chrysoulakis. 2006. SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing*. 27 (21), pp.4819-4838.
- OH, H.J., PRADHAN, B., 2011. Application of a neuro-fuzzy model to landslide-susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area. *Computers & Geosciences* 37, pp.1264–1276.
- OLAGUE, I., GONZALEZ-DÍEZ, A., CHUNG, C-J., REMONDO, J., BONACHEA, J., 2005. Effect of resolution of DEM for landslide hazard mapping. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7.
- OLMACHER, G. Y DAVIS, J., 2003. Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in Northeast Kansas, USA. *Engineering Geology*, 69, pp.332-343.

- OZDEMIR, ADNAN, ALTURAL, OLGA. 2012. A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping, Sultan Mountains, SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, pp.180-196.
- PARDO, ELÍAS; DEL CAMPO, PEDRO., 2007. Combinación de métodos factoriales y de análisis de conglomerados en R: el paquete FactoClass. *Revista Colombiana de Estadística Volumen 30 No. 2*. Bogotá, pp.231-245.
- PIKE, R.J., 2000. Geomorphometry diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography*.24 (1),pp.1–20.
- PIKE, R.J., I.S. EVANS, T. HENGL., 2009. *Geomorphometry: A Brief Guide*. Page 3 -30. Hengl, T., H. Reuter. 2009. *GEOMORPHOMETRY Concepts, Software, Applications*. *Developments in Soil Science – Volume 33* Elsevier, pp. 776.
- POMCH., 2010. Plan de Ordenación y Manejo de la Parte Alta de la Subcuenca Hidrográfica del Río Palacé”. Totoró-Gabriel López, p.42.
- PLAZA, G., 1996. “La Amenaza y Vulnerabilidad por Deslizamientos en la Región Andina del Ecuador. 7mo Congreso Ecuatoriano de Geología, Minas, Petróleos y Medio Ambiente, Tomo II, 21-24 de Octubre, Quito-Ecuador.
- PLAZA, G., 1998. Deslizamientos, zonas expuestas en el Litoral, causas y efectos. *Memorias del Seminario-Taller: Los Desastres Naturales y la Estrategia de Desarrollo a largo plazo*, Guayaquil-Ecuador.
- PRADHAN, BISWAJEET., 2008. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia, pp.1245-1256.
- PRADHAN, B., LEE, S., BUCHROITHNER, M., 2009. Use of geospatial data for the development of fuzzy algebraic operators to landslide hazard mapping: a case study in Malaysia. *Applied Geomatics* 1, pp. 3–15.
- PRADHAN, B., 2013. A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers & Geosciences* 51, pp.350–365.
- RABUS, B., EINEDER, M., ROTH, A., BAMLER, R., 2003. The shuttle radar topography mission — a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57 (4), pp. 241–262.
- REMONDO, J., 2001. Elaboración y validación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante técnicas de análisis espacial. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo.
- REMONDO, J., GONZÁLEZ, A., DÍAZ DE TERÁN J.R., CENDRERO, A., 2003. Landslide susceptibility models utilising Spatial Data Analysis techniques. A

case study from the Lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain). *Natural Hazards* 30 (3), pp. 267-279.

REMONDO, J., BONACHEA, J., CENDRERO, A., 2005. A statistical approach to landslide risk modelling at basin scale: from landslide susceptibility to quantitative risk assessment. *Landslides* 2 (4), pp.321-328.

RODRIGUEZ, E., C.S. MORRIS, AND J.E. BELZ, 2006. A global assessment of the SRTM performance, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3), pp. 249–261.

SAATY, T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.

SINGH, B. D., 2004. Influence of Digital Elevation Models Derived from Remote Sensing on Spatio-Temporal Modelling of Hydrologic and Erosion Processes. Thesis for Degree of Doctor of Philosophy. Cranfield University Siloe England, p. 370.

SUZEN, M.L., DOYURAN, V., 2004. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu Catchment, Turkey. *Engineering Geology* 71 (3–4), 303–321.

SUJATHA, G. R. S. DWIVEDI, K. SREENIVAS, L. VENKATARATNAM., 2000. Mapping and monitoring of degraded lands in part of Jaunpur district of Uttar Pradesh using temporal spaceborne multispectral data. *International Journal of Remote Sensing*. 21 (3), pp. 519-531.

SHAFIQUE, M., 2008. Predicting topographic aggravation of seismic ground shaking using geospatial tools: A case study of Kashmir earthquake Pakistan. Thesis of Master of Science in Geo-information Science and Earth Observation Neterland, p. 112.

SHARPE, C.F.S., 1938. *Landslides and related phenomena: a study of mass-movements of soil and rock*. Columbia University Press, New York, p.137.

SHARY, P.A., SHARAYA, L.S., MITUSOV, A.V., 2002. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*. 107 (1-2), pp.1-32.

SMITH, S.E., 2005. Topographic mapping. In: Grunwald, S. (Ed.), *Environmental Soil–Landscape Modeling: Geographic Information Technologies and Pedometrics*, vol. 1. CRC Press, New York, pp. 155– 182.

SMITH, M.J., GOODCHILD, M.F., Longley, P.A., 2007. *Geospatial Analysis. A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools*. British Library Cataloguing in Publishing Data. London. 394 p.

TANER, B., 2013. An evaluation of SVM using polygon-based random sampling in landslide susceptibility mapping: The Candir catchment area (western Antalya, Turkey), pp.400-412.

TOUTIN, T., 2008. ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: a review. *International Journal of Remote Sensing*.29 (7), pp.1855–1875.

THOMPSON, J. A., BELL, J. C., BUTLER.,C. A., 2001. Digital elevation model resolution: Effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. *Geoderma*, 100, pp. 67-89.

UNDRO., 1991. *Mitigation Natural Disaster: Phenomena, Effects and Action- A manualfor Policy makers and Planners*. Geneva. Office of the UN Desaster Relief Coordinator.

USGS., 2013. The U.S. Geological Survey Landsat8 Program.US Department of Interior Geological Survey. <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>.

VAN WESTEN, C. J., 1993. GISSIZ-Geographic Information Systems in slope Instability Zonation. ITC Publication, 15, Vol. 1, Enshede 1993.

VAN WESTEN, C. J., RENGERS, N., TERLIEN, M. T., SOETERS, R., 1997. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena trough GIS-based hazard zonation.*GeologischeRundschau* 86, (2): 404-414.

VAN WESTEN, C. J., SOETERS, R., 2000. Remote Sensing and Geographic Information Systems for Natural Disaster Management. En: Roy, van Westen, C. J. and P. Champati Ray (Eds.): *Natural Disasters and their mitigation. A Remote Sensing and GIS Perspective*.Indian Institute of Remote Sensing. National Remote Sensing Agency, India, pp. 31-76.

VAN REMORTEL, R., HAMILTON M., y HICKEY R., 2001, Estimating the LS factorfor RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data. *Cartography*, v. 30, no. 1, pp. 27-35.

VARNES, D.J., 1958. "Landslides types and processes" *Landslides and Engineering Practice*; Beckel, E.D. (ed.), Highway Research Board, Special Report, 29, pp. 20-47.

VARNES, D.J., 1978. Slope movements, type and processes. En: Schuster, R.L., Krizek, R.J. (Eds.), *Landslide Analysis and Control*. Transportation Research Board, National Academy Sciences, Washington, DC, Special report,p. 176.

VARNES, D.J., 1984. *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. UNESCO, Paris p.63.

VRIELING, A. 2007.*Mapping Erosion from Space*.Thesis of Doctoral WageningenUniversity.Nederland, p.167.

WEIBEL, R., HELLER, M., 1991.Digital terrain modelingen Maguire, D.J.; Goodchild, M.F. y rhind, D.W. (Eds.).*Geographical Information Systems*.Longman, Scientific & Technical. Vol. 1, pp. 269-297.

WILSON, J.P., GALLANT, J.C., 2000. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Wiley, New York, p.303.

WISCHMEIER, W.H., y SMITH D., 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses A Guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook No. 537. Agriculture Science and Education Administration, Washington, District of Columbia. USA

WOOD J., 1996. The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models. PhD thesis, University of Leicester, UK. Available at: <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd>.

YANNICK THIERY AND AL., 2005, Analyse spatiale de la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain, comparaison de deux approches spatialisées par SIG: Revue internationale de Géomatique/European Journal of GIS and Spatial Analysis, pp. 227-245.

YESILNACAR, E., TOPAL, T., 2005. Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). Engineering Geology 79, pp.251–266.

YILMAZ, I., 2009. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat, Turkey). Computers & Geosciences 35, pp. 1125–1138.

ZARUBA, Q.Y V. MENCL., 1969. Landslides and their control, Elsevier, Amsterdam. The Netherlands.

ZÊZERE, J.L., 2002. Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). Natural Hazards and Earth System Sciences 2 (1-2), pp.73-82.

ZHANG, J. X., C. KANG-TSUNG, W., JOAN QIONG., 2008. Effects of DEM resolution and source on soil erosion modelling: a case study using the WEPP model. International Journal of Geographical Information Science. 22 (8), pp. 925-942.

ZEVENBERGEN, L.W., THORNE, C.R., 1987. Quantitative analysis of land surface topography. Earth Surface Processes and Landforms 12, pp 47–56.