

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

**Análisis de los factores hidrológicos y geomorfológicos asociados a la amenaza por
movimiento en masa para la zona de estudio comprendida entre los municipios de
Campoalegre y Pitalito, Huila**

Bryan Andrey Beltrán Garzón

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero civil

Dirigido por:

Sergio Miguel González Palacios

Magíster en infraestructura vial

Co-director

Nelson Felipe Moreno Cardona

Magíster en ingeniería geotecnia

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Civil

Bogotá, D.C.

2021

Resumen

El territorio colombiano tiene un relieve de pendientes altas, además en su mayor parte presenta una geomorfología inestable, por ende, las altas precipitaciones combinadas con los dos factores mencionados anteriormente generan los movimientos en masa, por tal motivo el análisis de amenazas toma importancia pues permitirá identificar las zonas vulnerables o de alto riesgo para poder contrarrestarlos. En los municipios de Campoalegre y Pitalito (Huila), a lo largo de la historia se han presentado un total de 74 deslizamientos con registros que datan desde 1942, que han afectado a más de 2740 personas (SGC, 2015).

Por tal motivo, este proyecto de grado está enfocado en analizar los factores hidrológicos y geomorfológicos asociados a los movimientos en masa, por lo cual se utilizaron los métodos de curvas numéricas (CN) desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos, que permite estimar la precipitación efectiva o escurrimiento superficial, permitiendo identificar las condiciones de infiltración del suelo. Para esta metodología se evalúan los parámetros de lluvia, cobertura vegetal y tipo de suelo.

Por otro lado, se utilizó el método de Mora – Vahrson, el cual permite la clasificación de la susceptibilidad a los movimientos en masa, evaluando parámetros como litología, pendientes del terreno, sismicidad y lluvia. Finalmente, se generará el modelo de amenaza de la cuenca de estudio, mediante la combinación de estos dos métodos.

Palabras clave: deslizamientos, movimientos en masa, susceptibilidad, metodología del CN, metodología Mora – Vahrson.

Abstract

The Colombian territory has a relief of high slopes, also for the most part presents an unstable geomorphology, therefore, the high rainfall combined with the two factors mentioned above generate mass movements, Therefore, the analysis of threats becomes important because it will allow the identification of vulnerable or high-risk areas in order to counter them. In the municipalities of Campoalegre and Pitalito (Huila), throughout history there have been a total of 74 landslides with records dating from 1942, which have affected more than 2740 people (SGC, 2015).

For this reason, this degree project is focused on analyzing the hydrological and geomorphological factors associated with mass movements, for which the methods of numerical curves (NC) developed by the Soil Conservation Service (SCS) were used of the United States, which allows estimating the effective precipitation or surface runoff, allowing to identify the conditions of infiltration of the soil. For this methodology the parameters of rain, vegetation cover and soil type are evaluated.

On the other hand, the Mora - Vahrson method was used, which allows the classification of susceptibility to mass movements, evaluating parameters such as lithology, terrain slopes, seismicity and rain. Finally, the threat model of the study basin will be generated by combining these two methods.

Keywords: landslides, mass movements, susceptibility, NC methodology, Mora - Vahrson methodology.

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	10
2	Alcance del proyecto.....	11
3	Localización.....	12
4	Planteamiento del problema.....	14
4.1	<i>Descripción del problema</i>	<i>14</i>
4.2	<i>Formulación del problema</i>	<i>15</i>
5	Justificación.....	16
6	Objetivos	17
6.1	<i>Objetivo general.....</i>	<i>17</i>
6.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>17</i>
7	Estado del arte.....	18
8	Marco de Referencia	20
8.1	<i>Marco Teórico</i>	<i>20</i>
8.1.1	Tipos de Movimientos en masa.....	20
8.1.1.1	Caída.....	22
8.1.1.2	Volcamiento.....	23
8.1.1.3	Deslizamiento.....	24
8.1.1.4	Deslizamiento Traslacional.....	25
8.1.1.5	Deslizamientos Rotacionales.....	26
8.1.1.6	Deslizamiento Compuestos.....	27
8.1.2	Propagación lateral.....	27
8.1.3	Flujo.....	28
8.1.4	Reptación.....	28
8.2	<i>Tipos de movimientos en masa presentes en Pitalito y Campoalegre.....</i>	<i>29</i>
8.3	<i>Sistema de información geográfica</i>	<i>31</i>
8.3.1	Tipos de datos	32
8.3.1.1	Vector	32
8.3.1.2	Ráster.....	33
8.3.1.3	TIN (Triangular Irregular Network).....	33
8.3.1.4	DEM (Digital Elevation Model).....	34
8.4	<i>Recolección de la información.....</i>	<i>35</i>
8.5	<i>Marco Geológico.....</i>	<i>36</i>
8.6	<i>Marco Geomorfológico</i>	<i>37</i>
9	Metodología.....	40
9.1	<i>Método del Sistema de Conservación de Suelos (SCS):.....</i>	<i>42</i>
9.1.1	Parámetros del modelo:	43
9.1.1.1	Tipo de suelo hidrológico.....	43
9.1.1.2	Precipitación	45
9.2	<i>Método Mora - Vahrson:.....</i>	<i>45</i>
9.2.1	Parámetros pasivos:	48
9.2.1.1	Litología (Sl).....	48
9.2.1.2	Humedad del suelo (Sh)	50

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

9.2.1.3	Pendiente (Sp).....	52
9.2.2	Parámetros detonantes:	53
9.2.2.1	Sismicidad (Ds).....	53
9.2.2.2	Intensidad de lluvias (D _{LL}).....	54
10	Desarrollo	55
10.1	<i>Obtención del número de curva para la zona de estudio</i>	<i>55</i>
10.1.1	Generación del mapa de cobertura vegetal.....	55
10.1.1.1	Clases de Coberturas	55
10.1.2	Características hidrológicas.....	57
10.1.2.1	Recopilación de la información.....	57
10.1.2.2	Precipitación	59
10.1.3	Mapa de tipo de suelo	62
10.1.4	Generación del número de curva.....	62
10.1.5	Precipitación efectiva.....	64
10.2	<i>Obtención del mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos.....</i>	<i>66</i>
10.2.1	Litología (Sl).....	66
10.2.2	Humedad del suelo (Sh):	68
10.2.3	Pendiente (Sp).....	70
10.2.4	Sismicidad (Ds).....	72
10.2.5	Intensidad de lluvias (Dll)	74
10.2.6	Susceptibilidad a deslizamientos (H).....	77
10.3	<i>Precipitación Efectiva vs Susceptibilidad a Deslizamientos (H).....</i>	<i>78</i>
10.4	<i>Geomorfología vs Susceptibilidad a deslizamientos</i>	<i>80</i>
10.5	<i>Geología vs modelo de elevación digital del área de estudio</i>	<i>81</i>
11	Conclusión	83
12	Referencias	85

Lista de Tablas

Tabla 1. Tipos de movimientos en masa.....	21
Tabla 2. Escala de velocidad.....	22
Tabla 3. Movimientos Pitalito.....	29
Tabla 4. Movimientos Campoalegre.....	30
Tabla 5. Unidades geomorfológicas.	39
Tabla 6. Uso del suelo.....	43
Tabla 7. Grupos hidrológicos del suelo.	44
Tabla 8. Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento.....	47
Tabla 9. Clasificación Litológica.....	49
Tabla 10. Clasificación de los promedios mensuales máximos de la precipitación.	51
Tabla 11. Clasificación del factor de humedad.....	52
Tabla 12. Clasificación del factor pendiente según los rangos obtenidos.	53
Tabla 13. Actividad Sísmica.	54
Tabla 14. Valoración del parámetro de disparo por lluvias.	55
Tabla 15. Cobertura vegetal de la cuenca.	57
Tabla 16. Localización de las estaciones de la cuenca.	58
Tabla 17. Precipitación media mensual de las estaciones de la cuenca.....	59
Tabla 18. Valor número de curva para la cuenca de estudio.	63
Tabla 19. Geología y Litología de la cuenca de estudio.....	67
Tabla 20. Valores de Humedad para cada mes.	69
Tabla 21. Valores de aceleración pico efectiva.	72
Tabla 22. Valores de D_s y T_s	73
Tabla 23. Valores de las variables σ_y y μ_y	75
Tabla 24. Clasificación de los valores para susceptibilidad de deslizamiento.	77
Tabla 25. Unidades geomorfológicas presentes en grado de susceptibilidad alto.....	80

Lista de Figuras

Figura 1. Localización del área de estudio.....	12
Figura 2. (a) Esquema de la caída de rocas (b), movimiento definido como “colapso”.....	23
Figura 3. <i>Esquema del vuelto en bloque</i>	24
Figura 4. <i>Esquema de vuelco por flexión</i>	24
Figura 5. Deslizamientos traslacionales.....	25
Figura 6. <i>Deslizamientos en cuña</i>	26
Figura 7. Deslizamiento rotacional, mostrando rasgos morfológicos.....	26
Figura 8. Deslizamiento compuesto, zona urbana.	27
Figura 9. Propagación lateral.	28
Figura 10. Esquemas de reptación y solifluxión.	29
Figura 11. Localización de los movimientos en el área de estudio.	31
Figura 12. Representación de un vector.....	32
Figura 13. Representación de un raster.....	33
Figura 14. Representación de un TIN.....	34
Figura 15. Representación de un DEM,.....	34
Figura 16. Geología de la cuenca de estudio.	37
Figura 17. Geomorfología de la cuenca de estudio.....	39
Figura 18. Esquema conceptual de la metodología,	41
Figura 19. Cobertura vegetal de la cuenca de estudio.	56
Figura 20. Ubicación de las estaciones de la cuenca de estudio,.....	58
Figura 33. Mapa de tipo de suelo de la cuenca de estudio.....	62
Figura 34. Mapa del valor del número de curva de la cuenca de estudio.	63
Figura 35. Mapa del factor S de la cuenca de estudio.	64
Figura 36. <i>Precipitación efectiva mes de Enero</i>	65
Figura 37. <i>Precipitación efectiva mes de Febrero</i>	65
Figura 38. <i>Precipitación efectiva mes de Marzo</i>	65
Figura 39. <i>Precipitación efectiva mes de Abril</i>	65
Figura 40. <i>Precipitación efectiva mes de Mayo</i>	65
Figura 41. <i>Precipitación efectiva mes de Junio</i>	65
Figura 42. <i>Precipitación efectiva mes de Julio</i>	65
Figura 43. <i>Precipitación efectiva mes de Agosto</i>	65
Figura 44. <i>Precipitación efectiva mes de Septiembre</i>	66
Figura 45. <i>Precipitación efectiva mes de Octubre</i>	66
Figura 46. <i>Precipitación efectiva mes de Noviembre</i>	66
Figura 47. <i>Precipitación efectiva mes de Diciembre</i>	66
Figura 48. Mapa Litológico de la cuenca de estudio.	68
Figura 49. Mapa del factor de Humedad (Sh) de la cuenca de estudio.	70
Figura 50. Mapa de pendiente de la cuenca de estudio.....	71
Figura 51. Mapa de sismicidad de la cuenca de estudio.	74
Figura 52. Mapa de Precipitación de la cuenca de estudio.	76
Figura 53. Mapa de sismicidad de la cuenca de estudio.	78
Figura 54. Mapa del Q (Precipitación efectiva) vs H (Susceptibilidad a deslizamientos) de la cuenca de estudio.	79
Figura 55. Comparación de los valores obtenidos por Mora-Vahrson y Sistema de Conservación de Suelos.	79
Figura 56. Mapa de la geomorfología vs Susceptibilidad por deslizamientos.	81
Figura 57. Mapa de la geología vs modelo de elevación digital.....	82

Anexos

- Anexo 1. Localización del área de estudio.
- Anexo 2. Geología de la cuenca de estudio.
- Anexo 3. Geomorfología de la cuenca de estudio.
- Anexo 4. Cobertura vegetal de la cuenca de estudio.
- Anexo 5. Ubicación de las estaciones de la cuenca de estudio.
- Anexo 6. Precipitación enero de la cuenca de estudio.
- Anexo 7. Precipitación febrero de la cuenca de estudio.
- Anexo 8. Precipitación marzo de la cuenca de estudio.
- Anexo 9. Precipitación abril de la cuenca de estudio.
- Anexo 10. Precipitación mayo de la cuenca de estudio.
- Anexo 11. Precipitación junio de la cuenca de estudio.
- Anexo 12. Precipitación julio de la cuenca de estudio.
- Anexo 13. Precipitación agosto de la cuenca de estudio.
- Anexo 14. Precipitación septiembre de la cuenca de estudio.
- Anexo 15. Precipitación octubre de la cuenca de estudio.
- Anexo 16. Precipitación noviembre de la cuenca de estudio.
- Anexo 17. Precipitación diciembre de la cuenca de estudio.
- Anexo 18. Mapa de tipo de suelo de la cuenca de estudio.
- Anexo 19. Valor del número de curva de la cuenca de estudio.
- Anexo 20. Valor del factor s de la cuenca de estudio.
- Anexo 21. Precipitación efectiva mes de enero.
- Anexo 22. Precipitación efectiva mes de febrero.
- Anexo 23. Precipitación efectiva mes de marzo.
- Anexo 24. Precipitación efectiva mes de abril.

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Anexo 25. Precipitación efectiva mes de mayo.

Anexo 26. Precipitación efectiva mes de junio.

Anexo 27. Precipitación efectiva mes de julio.

Anexo 28. Precipitación efectiva mes de agosto.

Anexo 29. Precipitación efectiva mes de septiembre.

Anexo 30. Precipitación efectiva mes de octubre.

Anexo 31. Precipitación efectiva mes de noviembre.

Anexo 32. Precipitación efectiva mes de diciembre.

Anexo 33. Mapa del factor de humedad (sh), de la cuenca de estudio.

Anexo 34. Mapa de pendiente de la cuenca de estudio.

Anexo 35. Mapa de sismicidad de la cuenca de estudio.

Anexo 36. Mapa de precipitación de la cuenca de estudio.

Anexo 37. Mapa de susceptibilidad por movimiento en masa de la cuenca de estudio.

Anexo 38. Mapa litológico de la cuenca de estudio.

Anexo 39. Mapa del q vs h de la cuenca de estudio.

Anexo 40. Localización de los movimientos en el área de estudio.

Anexo 41. Geología vs modelo de elevación digital del área de estudio.

Anexo 42. Geomorfología vs susceptibilidad a deslizamientos.

1 Introducción

En Colombia los movimientos en masa, se presentan con mayor frecuencia ya que “por estar en una zona intertropical, sufre cambios intensos de humedad relativa y por su geomorfología un 25% de las formaciones rocosas son blandas o lodosas”(Universidad Nacional, 2010), además los diferentes cambios climáticos, asociando a los fenómenos del niño y de la niña, los cuales permiten que el suelo se torne un poco más débil generando así que las rocas se degraden y se produzcan los deslizamientos que pueden ocasionar cierres viales, daños a cultivos, daños en propiedades y ocasionar muertes.

Con el fin de generar una zonificación más detallada de los riesgos sobre las poblaciones de Pitalito y Campoalegre, se analizarán los estudios hidrológicos y geomorfológicos, de los deslizamientos ocurridos en estos municipios, por medio de la utilización de la herramienta ArcGIS, para esto se creará una geodatabase que parte de dos métodos, en primera instancia se evaluará la metodología del Numero de Curva (CN) planteada por el Sistema de Conservación de Suelos (SCS), en donde se evalúan los parámetros como tipo de suelo, cobertura vegetal y uso del suelo, con el fin de obtener el mapa de precipitación efectiva y en segunda estancia evaluar la metodología planteada por Mora-Vahrson en donde se tiene parámetros como la litología, pendientes del terreno, sismicidad y precipitación, con el fin de obtener el mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa.

De esta manera se combina la información obtenida de los dos métodos para la elaboración del modelo de amenaza asociado a la cuenca de estudio.

2 Alcance del proyecto

El presente proyecto se llevará a cabo en el departamento del Huila, en las cuencas hidrográficas de los municipios de Campoalegre y Pitalito, con el fin de identificar el comportamiento geomorfológico y hidrológico asociado a la amenaza por movimiento en masa, para determinar los principales eventos ocurridos entre los años de 1942 y 2019, con el fin de realizar una representación de las relaciones geográficas a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en donde se facilite la identificación de los sucesos presentados por los diferentes eventos, y de esta manera generar herramientas más contundentes en la generación de estrategias que permitan la mitigación de los riesgos ocasionados por los movimientos en masa, tales como, deslizamientos, reptaciones, volcamientos, propagación lateral y flujo, con el fin de dar beneficio a las dos comunidades en las que se efectuará el proyecto.

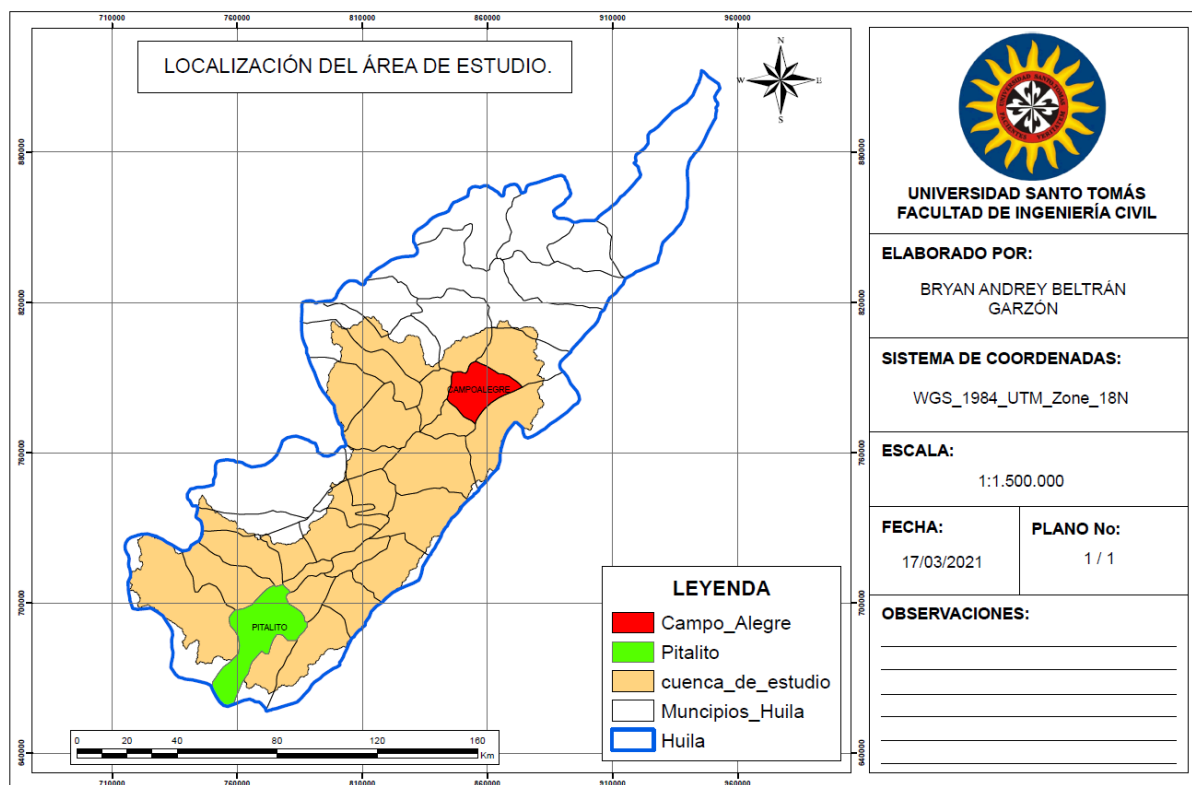
3 Localización

La zona de estudio posee un área total de 10390 km², comprende 32 municipios, de los cuales se busca hacer énfasis en las cuencas de los municipios de Campoalegre y Pitalito, Huila, Colombia.

El municipio de Pitalito está ubicado al sur del Departamento del Huila, en las coordenadas geográficas 1°51'13.4" N 76°03'02.6" W, con una altura media de 1.318 m.s.n.m., y a 188 km de Neiva, la capital del Huila. Cuenta con una extensión total de 666 Km², (ver figura 1 y Anexo 2).

Actualmente presenta una población de 124.359 personas, según el último censo DANE 2018, distribuidas de la siguiente manera, en el área urbana 73.319 personas y en el área rural 51.040 personas, está conformado por 136 veredas, representando cerca del 11.5% de la población total del departamento del Huila.

Figura 1. Localización del área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

El municipio de Campoalegre se encuentra localizado en la Subregión Norte, al oriente del Departamento del Huila, en las coordenadas geográficas 2°41'05.6" N 75°19'23.2" W, hace parte de la región Andina, concretamente situado en el valle del alto Magdalena, al occidente de la cordillera Oriental. Su altitud es de 525 m.s.n.m., y se encuentra a 30 Km de Neiva, la capital del Huila. Cuenta con una extensión total de 661 Km², como se muestra en la figura 1.

Actualmente presenta una población de 31.087 personas, según el último censo DANE 2018, distribuidas de la siguiente manera, en el área urbana 23.787, y en el área rural 7.300 personas, representando cerca del 3% de la población total del departamento del Huila.

4 Planteamiento del problema

4.1 Descripción del problema

En Colombia los movimientos en masa, se presentan con mayor frecuencia ya que presenta diferentes cambios climáticos, asociándolos a los fenómenos del niño y de la niña, los cuales permiten que el suelo se torne un poco más débil generando así que las rocas se degraden y se produzcan los deslizamientos que pueden ocasionar cierres viales, daños a cultivos, daños en propiedades y ocasionar muertes.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), son entidades que estudian las amenazas geológicas hace más de 30 años. Para realizar este estudio existen diferentes propuestas metodológicas y herramientas que varían dependiendo del nivel de complejidad de los datos y las características de los mismos (SGC, 2017).

En este orden de ideas el SGC, ha estudiado este problema mediante la realización de estudios de zonificación a escala nacional, regional y local, brindando una guía para los estudios de amenaza por movimiento en masa a escala 1:25.000, conocida con el nombre de “Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000” (SGC, 2017).

Con el fin de generar una zonificación más detallada de los riesgos sobre las poblaciones de Pitalito y Campoalegre, se analizarán los estudios hidrológicos y geomorfológicos, por medio de la utilización de la herramienta ArcGIS, y así determinar la ubicación de cada fenómeno reportado, sus causas y posibles afectaciones que le haya producido a la población, de manera que se obtendrá como producto un mapa en donde se evidencien estos desastres.

4.2 Formulación del problema

¿Cuáles son los factores de los deslizamientos ocurridos en los municipios de Pitalito y Campoalegre, teniendo en cuenta su ubicación y clasificación?

5 Justificación

Este proyecto de grado pretende analizar la información obtenida de las entidades públicas y privadas (SIMMA, UNGRD, SGC, IGAC), en donde se muestra información de la mayoría de eventos registrados en los municipios de Pitalito y Campoalegre con el fin de ubicar, clasificar y reportar los daños ocasionados por los movimientos en masa, generando un modelo más detallado de las amenazas y así comprender la importancia y consecuencias que tiene un deslizamiento para la comunidad, permitiendo gestionar los riesgos y de esta manera contribuir al bienestar social de la población y disminuir las amenazas de la población vulnerable a este tipo de fenómenos.

Esto se logra mediante las metodologías del Número de curva (CN) y la planteada por Mora – Vahrson, con el fin de obtener el modelo de amenaza para el área de estudio.

6 Objetivos

6.1 Objetivo general

Analizar los principales factores hidrológicos y geomorfológicos para la identificación de la amenaza por movimiento en masa, de las cuencas hidrográficas de los municipios de Pitalito y Campo Alegre, Huila.

6.2 Objetivos específicos

- Recolectar la información disponible para el análisis hidrológico y el estudio de remoción en masa para los municipios de Pitalito y Campoalegre, Huila.
- Examinar los parámetros hidrológicos y geomorfológicos de los municipios de Pitalito y Campoalegre, Huila.
- Elaborar un modelo de amenaza hidrológico y geomorfológico mediante el uso de la herramienta ArcGIS.

7 Estado del arte

A lo largo de los últimos años el Servicio Geológico Colombiano, ha realizado guías para identificar las amenazas, riesgos y vulnerabilidades por movimientos en masa a las que se encuentra expuesto el territorio colombiano, por consiguiente, se han tomado algunas de las metodologías mencionadas allí para el desarrollo de este proyecto.

Los movimientos en masa dependen de las características ambientales tales como la humedad, la estructura y temperatura del suelo (Persichillo, et al., 2017) esta situación puede generar afectación a las viviendas en su parte estructural, también generar pérdida de la cobertura vegetal, daño en la infraestructura vial y en situaciones más graves puede llegar a ocasionar pérdidas de vida (Galindo Serrano & Alcántara-Ayala, 2015).

En este orden de ideas, la amenaza presentada por los movimientos en masa tiene que ver con la susceptibilidad del terreno, según Obregón y Lara (2014) es la propensión o tendencia de una zona a ser afectada bajo la influencia de un proceso determinado, que se establecen a partir de la correlación de los factores intrínsecos que contribuyen a la formación de movimientos en masa, tales como la hidrología y la geomorfología de la zona.

Según Vega y Hidalgo, (2016), Colombia está ubicada entre los trópicos húmedos y esto hace referencia al qué país se vea influenciado por la Zona de Convergencia Intertropical generando abundantes precipitaciones que se distribuyen de manera bimodal, las cuales se dividen en dos periodos de lluvias por año, marzo - mayo y septiembre - noviembre.

El departamento del Huila se encuentra ubicado en una zona de alto riesgo sísmico, haciendo evidente la presencia de dos fallas geológicas, la primera es la Falla de Algeciras – Suaza, la produce los agrietamientos que provocan movimientos telúricos y la segunda es la Falla de Caguán – Suaza, está corresponde a una tectónica Plioceno, es decir, pone en

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

contacto rocas intrusivas Jurásicas con rocas de edad terciaria de formación gigante,
(Municipio de Campoalegre, 2016).

8 Marco de Referencia

Es necesario tener conocimiento de la información obtenida, por tal motivo se darán los conceptos previos básicos, teorías y algunas de las características asociadas a la zona de estudio del proyecto de grado, tales como la geomorfología, deslizamientos y la herramienta SIG que permitirá realizar el modelo de amenazas.

8.1 Marco Teórico

8.1.1 Tipos de Movimientos en masa

Derrumbes, desprendimientos o desplazamientos de suelos, rocas o ambos, por efectos de la gravedad, se les denomina en general movimientos en masa (Cruden, 1991). De acuerdo con (Varnes, 1978), el principal criterio para clasificar los movimientos en masa es el tipo de movimiento que sigue el material que se desplaza, los cuales se dividen en cinco grupos principales tales como caídas, volcamientos, deslizamientos, propagaciones, flujos y además cierto tipo de deformaciones gravitacionales profundas como se observa en la Tabla 1. Además, los materiales se dividen en dos clases: rocas y suelos de ingeniería; éstos últimos subdivididos en detritos y tierra.

Estos movimientos en masa se pueden clasificar según el intervalo de velocidad, como se observa en la Tabla 2, cabe destacar que el intervalo de velocidad varía de extremadamente rápido a extremadamente lento, los primeros tienen su origen en zonas que presentan pendientes altas, en donde predomina la caída de rocas y los residuos que al acumularse forman los taludes.

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Tabla 1. *Tipos de movimientos en masa.*

Tipo	Subtipo
Caídas	Caída de roca (detritos o suelo)
Volcamiento	Volcamiento de roca (bloque) Volcamiento flexural de roca o del macizo rocoso
Deslizamiento de roca o suelo	Deslizamiento traslacional, deslizamiento en cuña Deslizamiento rotacional
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral por licuación (rápida)
Flujo	Flujo de detritos Crecida de detritos Flujo de lodo Flujo de tierra Flujo de turba Avalancha de detritos Avalancha de rocas Deslizamiento por flujo o por licuación
Reptación	Reptación de suelos Solifluxión, gelifluxión (en permafrost)
Deformaciones gravitacionales profundas	

Nota: los siete grupos principales en los que se dividen los movimientos en masa. Grupo de estándares para movimientos en masa Gemma, G. (2007). Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias Para Las Comunidades Andinas, 4(1), 432.

<https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/2792;jsessionid=C32BB059DADA39F4482C9DACA6D4C2D4>

Tabla 2. *Escala de velocidad.*

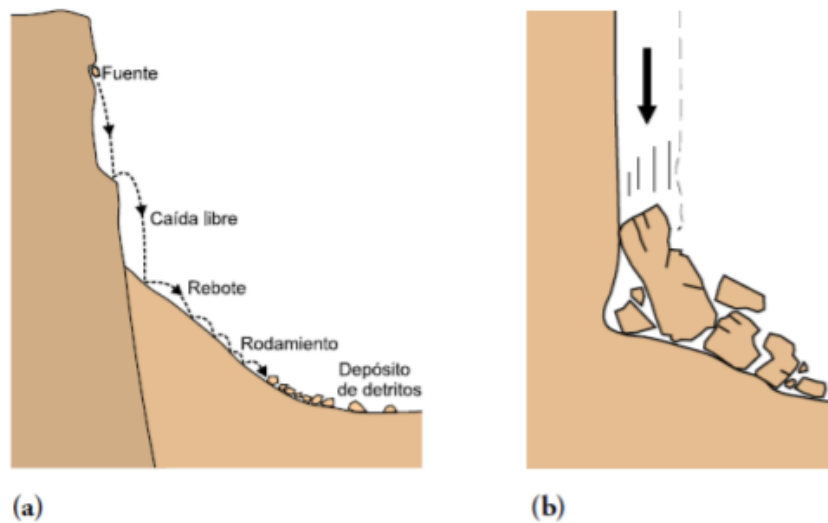
Clases de velocidad	Descripción	Velocidad (mm/s)	Velocidad típica
7	Extremadamente rápido	5×10^3	5 m/s
6	Muy rápido	5×10^1	3 m/min
5	Rápido	5×10^{-1}	1,8 m/h
4	Moderado	5×10^{-3}	13 m/mes
3	Lenta	5×10^{-5}	1,6 m/año
2	Muy lenta	5×10^{-7}	16 mm/año
1	Extremadamente lenta		

Nota: escalas de velocidad con la que se clasifican los movimientos en masa. Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides: Investigation and mitigation. chapter 3-landslide types and processes. Transportation Research Board Special Report, (247). <https://trid.trb.org/view/462501> Cruden, Varnes (1996) Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds) Landslides investigation and mitigation. Transportation research board, US National Research Council. Special Report 247, Washington, DC, Chapter 3, pp. 36–75.

8.1.1.1 Caída

Es un tipo de movimiento en masa, en la que uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera. El material que se desprende cae desplazándose principalmente por el aire efectuando golpes y rebotes (Varnes, 1978). El movimiento se clasifica en la escala de muy rápido a extremadamente rápido (Cruden & Varnes, 1996), con una velocidad mayor a 5×10^1 mm/s.

Figura 2. (a) Esquema de la caída de rocas (b), movimiento definido como “colapso”.



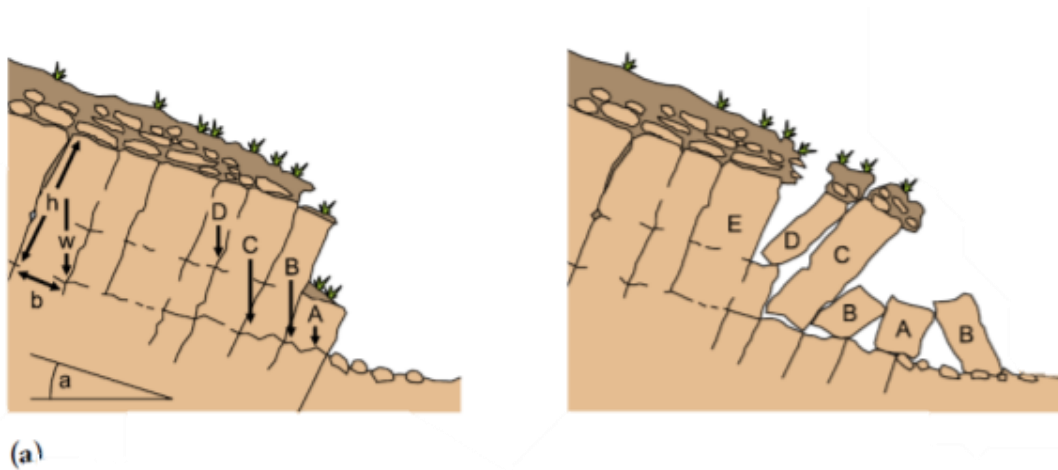
Fuente: Gemma, G. (2007). *Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias Para Las Comunidades Andinas*, 4(1), 432.

8.1.1.2 Volcamiento

Es un tipo de movimiento en masa, en el que se presenta una rotación con dirección casi siempre hacia delante de uno o varios bloques de suelo o roca, entorno de un punto de giro en su parte inferior; ocurre por acción de la gravedad o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978). Este movimiento puede ser en bloque, flexional y flexional del macizo rocoso.

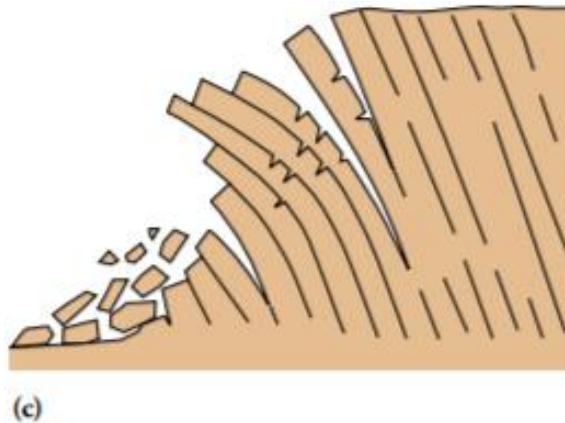
Según Goodman y Bray, (1976), la diferencia entre vuelco de bloque y el flexural, es que el primero ocurre por la pérdida de estabilidad de uno o varios bloques entorno a un punto en su base (Figura 3), generalmente presenta una velocidad alta. En cambio, el vuelco flexural, ocurre por el doblamiento de rocas delgadas, para este tipo de vuelco su velocidad es lenta (Figura 4).

Figura 3. Esquema del vuelco en bloque.



Fuente: Gemma, G. (2007). Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias Para Las Comunidades Andinas, 4(1), 432.

Figura 4. Esquema de vuelco por flexión.



Fuente: Gemma, G. (2007). Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias Para Las Comunidades Andinas, 4(1), 432.

8.1.1.3 Deslizamiento

Este tipo de movimiento se presenta ladera abajo y se da cuando una roca o masa de suelo muestra un desplazamiento a lo largo de la superficie de falla, es decir, en esa zona se presenta una capa delgada de suelo en donde experimenta una deformación cortante.

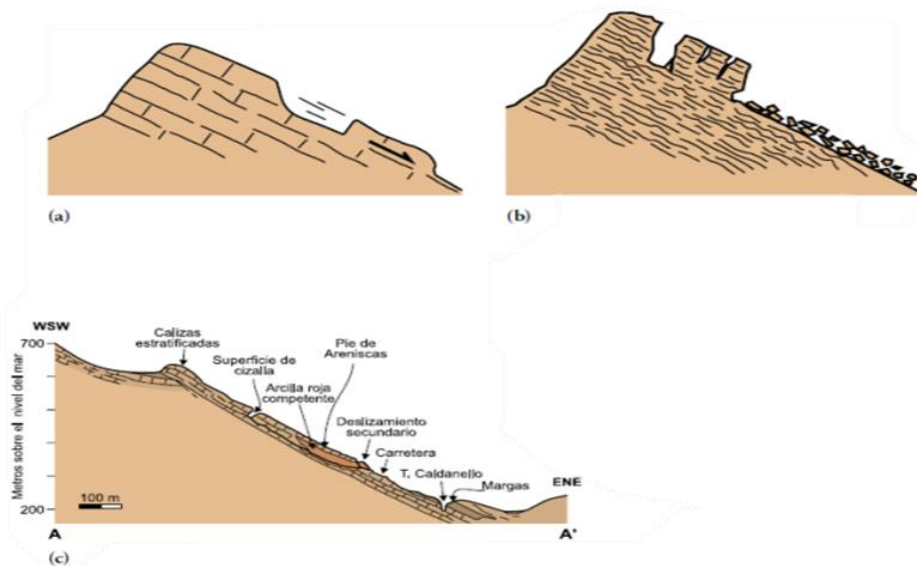
8.1.1.4 Deslizamiento Traslacional

Este deslizamiento se presenta a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada. Por lo general, estos movimientos son más superficiales y el desplazamiento ocurre con frecuencia a lo largo de discontinuidades como fallas, diaclasas, planos de contacto entre la roca y el suelo residual que yace sobre ella (Cruden & Varnes, 1996).

En un macizo rocoso, este mecanismo de falla ocurre cuando una discontinuidad geológica tiene una dirección aproximadamente paralela a la de la cara del talud y buza hacia esta con un ángulo mayor que el ángulo de fricción (Hoek & Bray, 1981), (Figura 5). Los deslizamientos están delimitados por dos planos discontinuos que se interceptan entre sí, por tal motivo el cuerpo se desplaza siguiendo la línea de intersección de ambos planos (Figura 6).

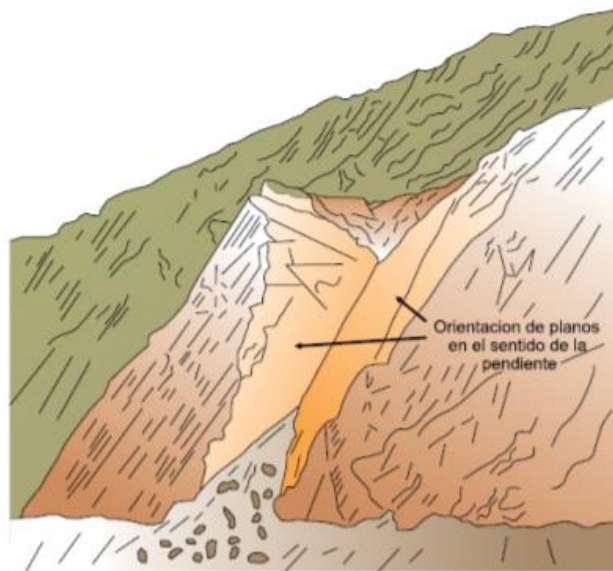
Cabe resaltar que la velocidad para el caso de los deslizamientos traslaciones puede variar de rápida a extremadamente rápida.

Figura 5. Deslizamientos traslacionales.



Fuente: Gemma, G. (2007). Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias Para Las Comunidades Andinas, 4(1), 432.

Figura 6. Deslizamientos en cuña.



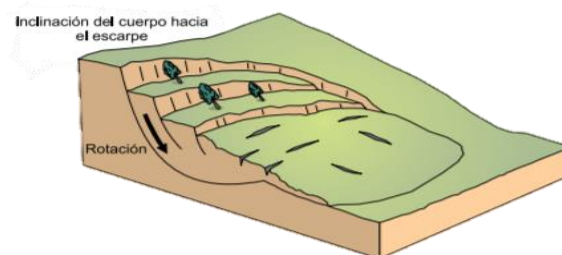
Fuente: Gemma, G. (2007). *Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias Para Las Comunidades Andinas*, 4(1), 432.

8.1.1.5 Deslizamientos Rotacionales

El deslizamiento rotacional, ocurre cuando la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava, estos movimientos rotacionales muestran una morfología distintiva, pues se caracterizan por presentar un escarpe principal y a su vez una contrapendiente que antecede el escarpe principal (Figura 7).

Para este caso la velocidad puede ir de lenta a rápida, pues están suelen ser menores a 1 m/s.

Figura 7. Deslizamiento rotacional, mostrando rasgos morfológicos.



Fuente: Gemma, G. (2007). *Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias Para Las Comunidades Andinas*, 4(1), 432.

8.1.1.6 Deslizamiento Compuestos

La superficie de ruptura se desarrolla a lo largo de planos de plegamiento, o por la intersección de varias discontinuidades planares o por la combinación de superficies de ruptura y de planos de debilidad de la roca. El movimiento a lo largo de superficies de deslizamiento compuestas no es cinemáticamente posible sin que ocurra cizalla interna significativa en el cuerpo del deslizamiento (Hutchinson, 1988).

Figura 8. Deslizamiento compuesto, zona urbana.

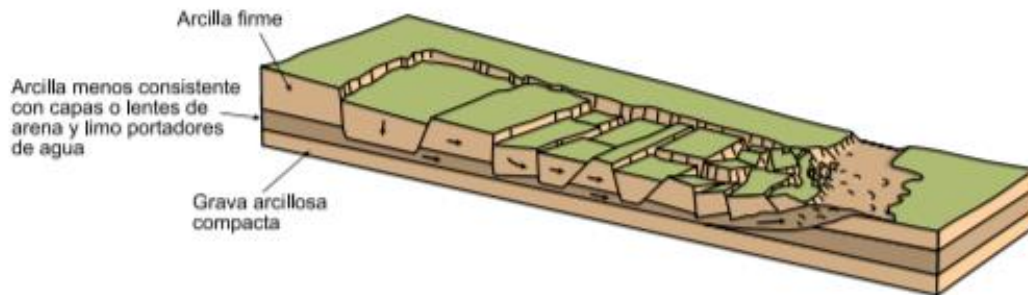


Fuente: Gemma, G. (2007). Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias Para Las Comunidades Andinas, 4(1), 432.

8.1.2 Propagación lateral

Se define como un proceso de dilatación o extensión lateral de masas rocosas o suelos cohesivos que sobreyacen a materiales que han sufrido licuefacción o a materiales en flujo plástico (Cruden & Varnes, 1996). Existen dos casos de propagación lateral, uno es en bloque y el otro por licuación.

Figura 9. Propagación lateral.



Fuente: Gemma, G. (2007). Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias Para Las Comunidades Andinas, 4(1), 432.

8.1.3 Flujo

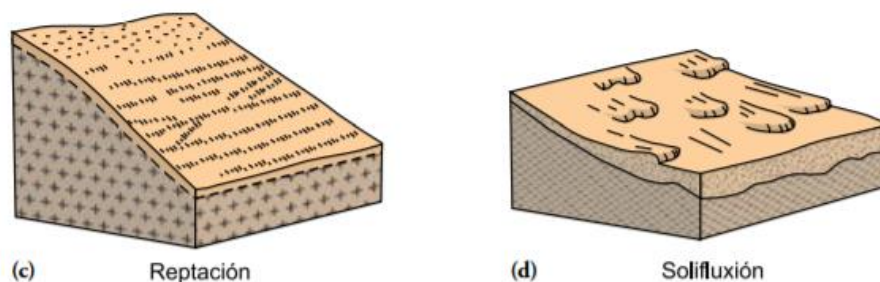
Es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978).

8.1.4 Reptación

Son aquellos movimientos en donde no se puede observar la falla en la superficie. Se pueden presentar dos tipos de reptaciones, la primera de tipo estacional asociada a cambios climáticos y verdadera cuando se presenta un desplazamiento relativamente continuo (Gemma, 2007) (Figura 10).

Dentro de la reptación se incluyen la solifluxión y gelifluxión, la primera contribuye a la formación de capas delgadas a lo largo de las laderas y la segunda se presenta en ambientes peri glaciales.

Figura 10. Esquemas de reptación y solifluxión.



Fuente: Gemma, G. (2007). *Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias Para Las Comunidades Andinas*, 4(1), 432.

8.2 Tipos de movimientos en masa presentes en Pitalito y Campoalegre

En el municipio de Pitalito se presentó el primer deslizamiento en 1942 en la vereda Guacacallo, del cual no se tienen registros de personas afectadas, en el municipio se han presentado distintos movimientos en masa entre los cuales se destacan deslizamientos, flujo, reptación y caída; en total se han registrado 61 movimientos, de los cuales solo se tiene información de 15 (ver Tabla 3), que han dejado un saldo de 740 personas y 5 familias afectadas (SGC, 2015). Ver Figura 11 (Anexo 40).

Tabla 3. Movimientos Pitalito.

CANTIDAD	LONGITUD	LATITUD	ELEVACIÓN	TIPO EVENTO	VEREDA	IMPORTANCIA	FECHA
1	779547,4	703004,4	1450	Deslizamiento	Guacacallo	Baja	12/10/1942
2	761607,1	677970,9	1977	Reptación	Pitalito	Media	12/07/2012
3	773433,4	709803,7	1450	Deslizamiento	La laguna	Alta	12/07/2007
4	761792,5	677878,4	1977	Deslizamiento	Montecristo	Media	12/07/2007
5	782152,1	686093,7	1676	Caída	Pitalito	Baja	12/07/2007
6	761050,2	677817,8	2017	Flujo	Montecristo	Media	12/07/2007
7	761594,6	677989,3	1990	Reptación	Pitalito	Media	12/07/2007
8	763958,9	678982,6	1833	Caída	Pitalito	Media	12/07/2007
9	766883,2	694009,4	1380	Reptación	Bruselas	Baja	12/07/2007
10	781688,7	686616,6	1653	Caída	Pitalito	Baja	12/07/2007
11	761037,7	677821,0	2100	Flujo	Pitalito	Alta	12/07/2007
12	761783,3	677893,8	2010	Deslizamiento	Pitalito	Alta	12/07/2007
13	778121,9	707608,8	1170	Deslizamiento	La laguna	Baja	12/07/2007
14	780422,4	688185,4	1480	Flujo	Pitalito	Baja	12/07/2007
15	771403,2	698184,2	1266	Reptación	Criollo	Baja	11/07/2007

Nota: Tipos de movimientos presentes en el municipio de Pitalito, con su respectiva localización, elevación, importancia y fecha del suceso. Fuente: Servicio Geológico Colombiano [SGC] (2015). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa Servicio Geológico Colombiano-SGC.

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

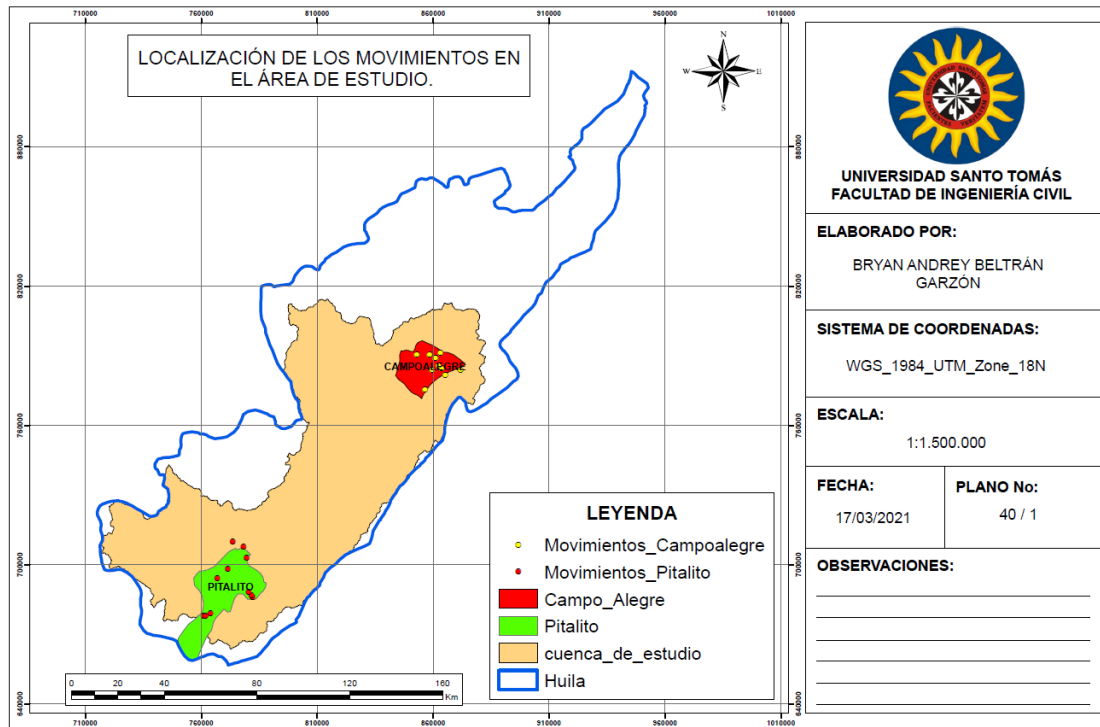
En Campoalegre, se tienen registros desde el año 1960, del cual no se tiene información de personas afectadas, se han presentado varios movimientos en masa entre los cuales se destacan deslizamientos, flujo y propagación lateral; en total se han registrado 13 movimientos, de los cuales solo se tiene información de 11 (ver Tabla 4), que han dejado un saldo de 2000 persona afectadas (SGC, 2015). Ver Figura 11 (Anexo 40).

Tabla 4. Movimientos Campoalegre.

CANTIDAD	LONGITUD	LATITUD	ELEVACIÓN	TIPO EVENTO	VEREDA	IMPORTANCIA	FECHA
1	863497,2	784413,7	531	Flujo	Campoalegre	Media	19/11/2018
2	863104,3	791177,3	531	Flujo	Campoalegre	Media	9/05/2017
3	862284,8	785447,7	590	Propagación Lateral	Campoalegre	Alta	3/03/2017
4	861116,3	788855,4	560	Deslizamiento	Campoalegre	Media	21/04/2011
5	852929,9	790400,3	620	Deslizamiento	Campoalegre	Baja	13/02/2011
6	859597,2	783757,0	570	Deslizamiento	Campoalegre	Baja	6/01/2011
7	871831,4	783745,1	2280	Deslizamiento	Campoalegre	Baja	18/12/2010
8	858491,6	790394,3	510	Deslizamiento	Campoalegre	Baja	4/12/2010
9	865155,9	781539,4	1410	Deslizamiento	Campoalegre	Baja	22/11/2010
10	860900,0	788947,8	550	Deslizamiento	Campoalegre	Baja	9/02/1960
11	856436,8	775403,3	721	Deslizamiento	Campoalegre	Media	3/10/2013

Nota: Tipos de movimientos presentes en el municipio de Campoalegre, con su respectiva localización, elevación, importancia y fecha del suceso. Fuente: Servicio Geológico Colombiano [SGC] (2015). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa Servicio Geológico Colombiano-SGC.

Figura 11. Localización de los movimientos en el área de estudio.



Fuente: por autor, 2021.

8.3 Sistema de información geográfica

Los sistemas de información geográfica según Wolf (2009), “son datos y estructura organizacional para recolectar, almacenar, manipular y analizar especialmente datos georreferenciados y exhibir la información resultante de esos procesos” (p. 839).

Cabe resaltar que los sistemas de información geográfica combinan bases de datos espaciales, que posteriormente permiten almacenar, superponer y recuperar un conjunto de datos que están relacionados espacialmente; finalmente los SIG son la clave a la hora de planear, diseñar y evaluar los diferentes impactos mediante mapas ya sean geológicos, topográficos entre otros.

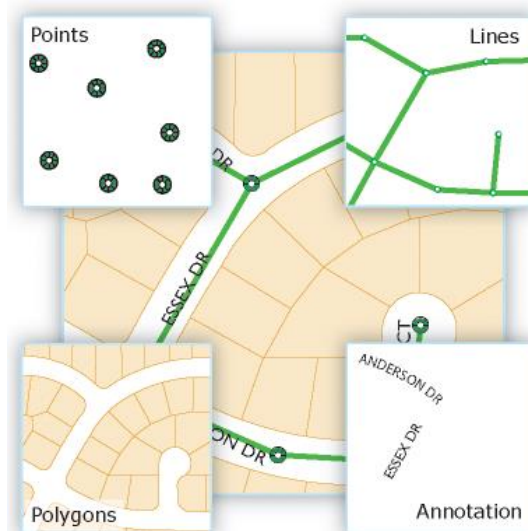
8.3.1 Tipos de datos

8.3.1.1 Vector

El modelo vectorial constituye una codificación de los datos geográficos en la que se representa una variable geográfica por su geometría, independientemente de su escala y son almacenados con un formato digital fácilmente convertible en un dibujo; las porciones del territorio y su representación digital suelen constituir una lista de coordenadas de puntos y vértices que definen la geometría de los elementos. Su codificación se realiza a través de una base de datos de tipo relacional asociada a la representación gráfica (SIG, 2015).

En este proyecto se encuentra datos de tipo vectorial, como lo son los polígonos y que a su vez representan al departamento, los municipios de estudio, la geomorfología y algunos embalses situados al interior de estos. Las líneas que representan las curvas de nivel y los ríos, finalmente encontramos los puntos que hacen alusión a las estaciones meteorológicas e hidrológicas y la ubicación de los movimientos en masa registrados.

Figura 12. Representación de un vector.



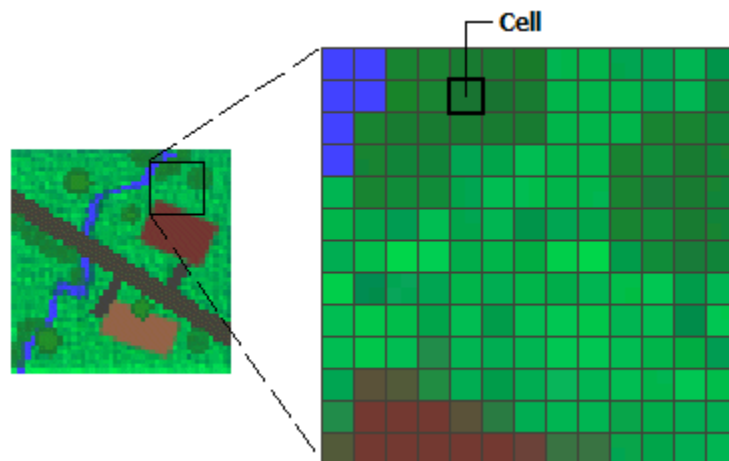
Fuente: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/geodatabases/feature-class-basics.htm>.

8.3.1.2 Ráster

Es una imagen digital representada en mallas, en donde esta malla contiene celdas con cierto tipo de valores. La posición de cada celda está definida por una columna y un renglón. El valor de cada celda indica el valor del atributo o características que representa (SIG, 2015).

Los ráster para este proyecto se obtuvieron en primera instancia a partir del DEM, de donde se obtuvieron los mapas temáticos tales como mapa de pendientes, clasificación del suelo, cuencas y subcuencas.

Figura 13. Representación de un raster.



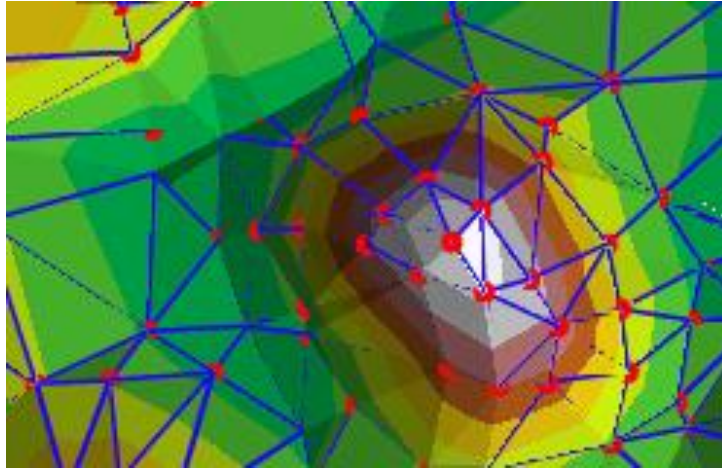
Fuente: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>.

8.3.1.3 TIN (Triangular Irregular Network)

Un TIN es una recopilación de datos geográficos digitales que están basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de puntos, estos están conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos, es utilizado para representar la morfología del terreno.

En el proyecto se obtuvo un TIN, que da una clara percepción de la topografía que tiene el departamento del Huila, el cual se generó mediante las curvas de nivel, que a su vez se obtuvieron de los DEM.

Figura 14. Representación de un TIN.

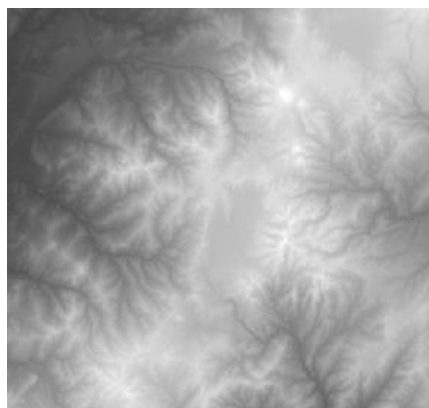


Fuente: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm>.

8.3.1.4 DEM (Digital Elevation Model)

A partir de un DEM, son innumerables las herramientas SIG que se pueden aplicar, para obtener valiosísimas superficies de información además de los tradicionales contornos vectoriales o curvas de elevación, como: mapas de pendiente, de orientación de laderas, sombreados, cuencas visuales, cálculo de volúmenes, entre otros. (SIC, 2015).

Figura 15. Representación de un DEM,



Fuente: por autor, 2021.

8.4 Recolección de la información

Como primera instancia se acudió el día 10 de febrero del 2020 a la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), con el motivo de solicitar información acerca de todos los eventos multiamenaza, obteniendo una base de datos que data la mayoría de los eventos por remoción en masa ocurridos en los municipios de Campoalegre y Pitalito, Huila.

Para el día 17 de febrero se acudió al Servicio Geológico Colombiano (SGC), con el fin de pedir información de tipo geomorfológica de las áreas de estudio, en donde se hizo entrega de copias de las memorias explicativas de los municipios con el fin de realizar una investigación confiable.

En la semana 4 del mes de febrero del 2020, se acudió al IDEAM con motivo de agilizar la entrega de la solicitud de la información hidrológica de cada una de las estaciones que hacen parte de las zonas a estudio, para este caso se hizo presencialmente ya que la información la entregan más rápido y concisa.

Finalmente, el resto de información se obtuvo mediante sitios web (bases de datos), como lo fue el caso de los Modelos Digitales de Elevación (DEM), que se obtuvieron mediante la página de la Nasa, la cual permite tener libre acceso a la información que se registra en el satélite Alaska Satellite Facility, y de esta manera descargar los modelos que ayuden a precisar la información que se recopiló con anterioridad, cabe destacar que se obtuvieron 15 Modelos de elevación digital de tipo geográfico, todos con una resolución fina (FBS) de alrededor de 10 m y con una cobertura transversal de 70 Km. Adicionalmente se obtuvo otro modelo de elevación digital del sitio web Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), el cual sería utilizado por el método del Servicio de Conservación de Suelos de

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Estados Unidos (SCS), que tiene como objetivo calcular la escurrimiento a través de un número hidrológico o número de curva (CN) agregado de la cuenca.

De ese modo, se ingresó al Geoportal del SGC, de donde se obtuvieron los mapas de amenaza sísmica, usos de suelo y las planchas de cada uno de los municipios. Cabe resaltar que la información multiamenaza, es decir, los registros históricos de incendios forestales, inundaciones, avenidas torrenciales, movimientos en masa, sequías, erosión y vendavales, se obtuvieron de entidades como DesInventar e INGENIAR denominadas los atlas de riesgos de Colombia.

8.5 Marco Geológico

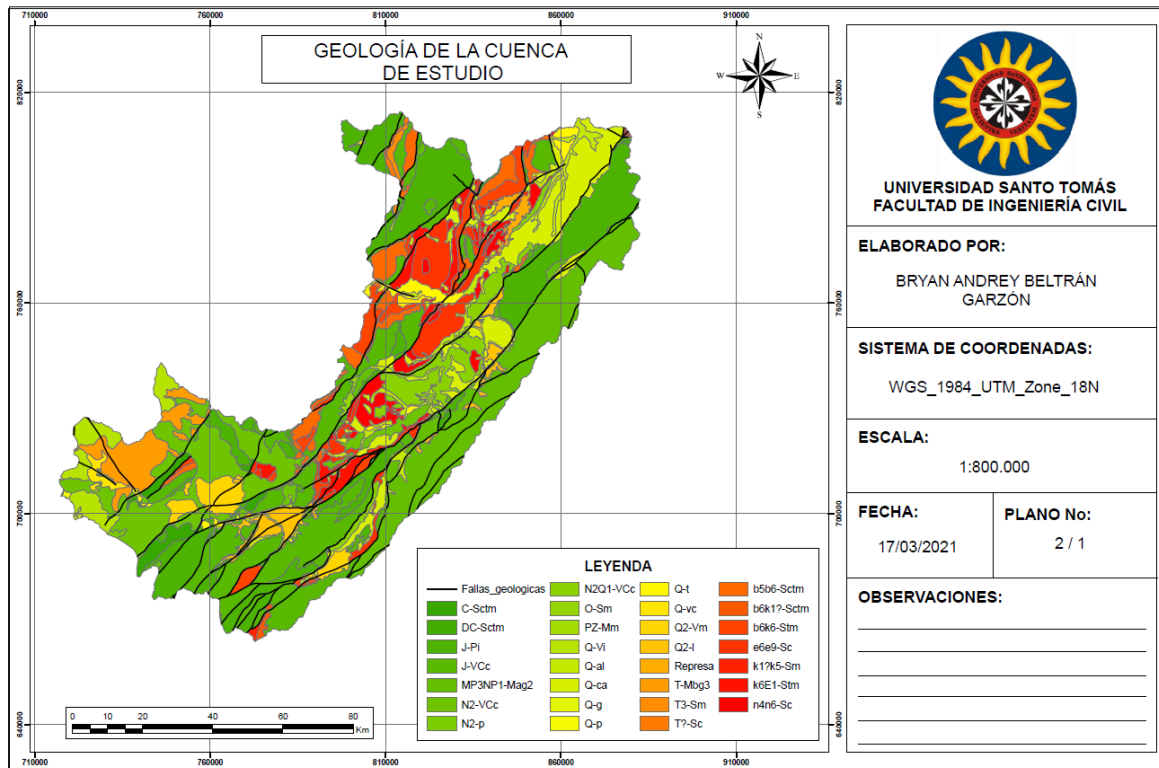
De acuerdo a la geología de la zona de estudio elaborada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), se obtuvo el mapa geológico a una escala de 1: 800.000 (ver figura 16 y Anexo 2), este se realizó mediante el modelo de elevación digital (DEM), y a su vez con la cartografía presentada por el SGC.

En la figura 16, se observan las unidades geológicas asociadas a las eras Cenozoica, Mesozoica, Paleozoica, ordenadas desde la más antigua a la más joven: lodolitas y calizas de granadillo (C-Sctm), paleozoico de La Jagua (DC-Sctm), formación el hígado (O-Sm), monzodiorita y monzogranito (J-Pi), formación Saldaña (J-VCc), esquistos de mazamoras (T-Mbg3), formación luisa (T?-Sc), formación payandé (T3-Sm), formación de caballos (b5b6-Sctm), formación hondita (b6k6-Stm), bartoniano (e6e9-Sc), formación Villeta (k1?k5-Sm), formación seca (k6E1-Stm), migmatitas del pital y gneis de guapotón (MP3NP1-Mag2), burdigaliano (N2-p), formación guacacayo (N2-VCc), formación gigante (N2Q1-VCc), grupo honda (n4n6-Sc), complejo aleluya (PZ-Mm), llanuras aluviales (Q-al), depósitos coluviales (Q-ca), depósitos glaciares (Q-g), depósitos de ceniza (Q-p),

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

terrazas aluviales (Q-t), flujos volcánicos constituidos por piroclastos (Q-vc), formación coconucos (Q-Vi), depósitos paulales (Q2-l), basaltos de acevedo (Q2-Vm).

Figura 16. Geología de la cuenca de estudio.



Fuente: por autor, 2021.

8.6 Marco Geomorfológico

Es el estudio de las formas de la superficie terrestre, investiga el origen y evolución de las formas del terreno (Carvajal, 2012). Los procesos geomorfológicos representan los cambios que se han presentado a lo largo del origen del suelo, es decir, corresponde a los cambios que se han podido originar en su interior y también los que suceden en la superficie.

El estudio geomorfológico se puede dividir en cuatro partes, la primera hace referencia a la morfogénesis, encargada de estudiar el origen del relieve, la segunda se conoce como morfometría y se encarga de analizar las características del terreno, la tercera

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

se conoce como morfodinámica que estudia los modelos internos y externos de la superficie, finalmente la morfología es la encargada de explicar las geoformas, (Carvajal, 2012).

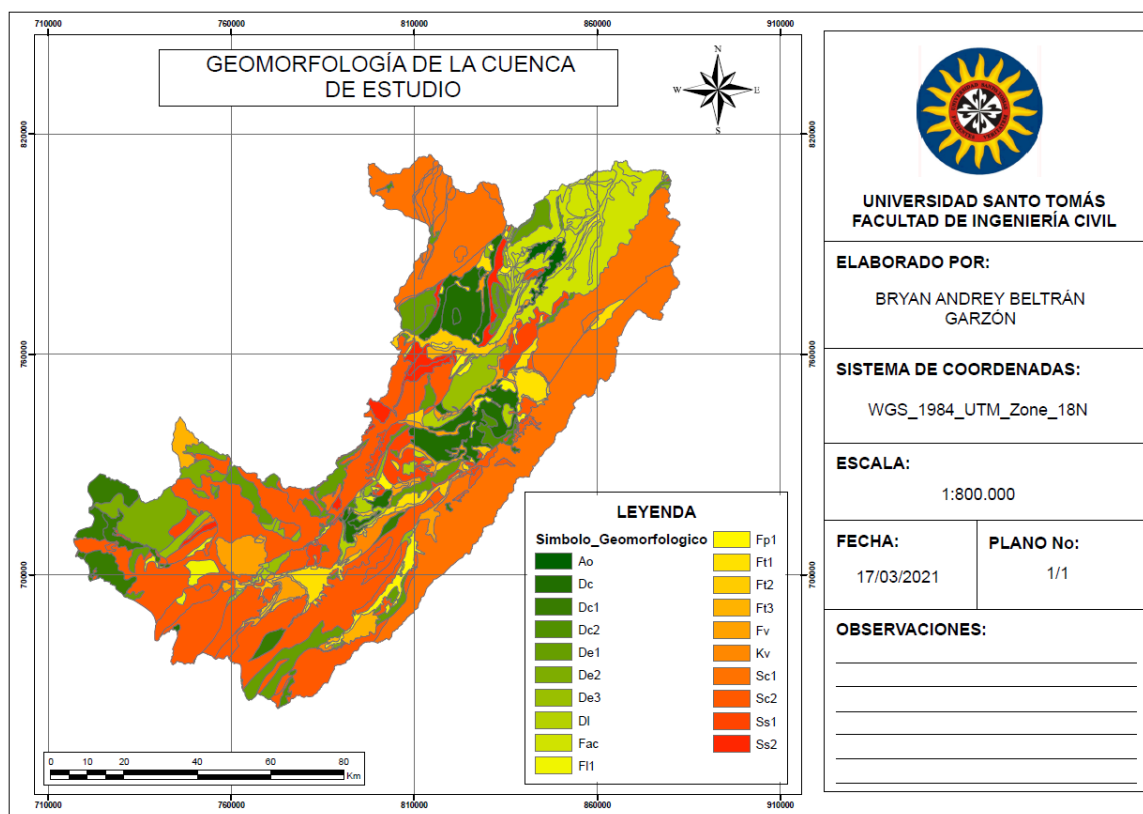
El departamento de Huila, se caracteriza por tener en su territorio dos cadenas montañosas, las cuales pertenecen a la cordillera de los Andes, la central y la oriental, estas áreas montañosas son susceptibles a los movimientos en masa ya que presentan una topografía accidentada, lluvias intensas y además el tipo de roca que las conforman presentan un grado de descomposición elevado.

Para realizar el mapa geomorfológico se tuvo en cuenta la información brindada por el SGC, en formato shp.

En primer lugar, se estudió la morfología de la zona de trabajo, que se relacionaría con la información obtenida de la geología elaborada, con el fin de identificar las unidades geomorfológicas presentes en esta, (SGC, 2015). Las unidades geomorfológicas se dividieron en tres grandes grupos, geoformas de origen denudacional, geoformas de origen fluvial y procesos morfodinámicos; seguido de esto se dibujaron las diferentes geoformas utilizando shapes (shp), los cuales serían calculados con la herramienta Map Algebra, en donde se suman los mapas de pendientes y geología. Una vez identificada la geoforma se procede añadir un nuevo campo en la tabla de atributos del shp, en donde se le dará nombre a esta (ver figura 17 y Anexo 3). En la Tabla 5, se describen las unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio.

Cabe resaltar que, para llevar una buena identificación, se siguen los pasos estipulados en la guía metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos del IDEAM.

Figura 17. Geomorfología de la cuenca de estudio.



Fuente: por autor, 2021.

Tabla 5. Unidades geomorfológicas

Unidad geomorfológica	Descripción
Ao	Embalses o lagos artificiales
Dc	Colina Residual
Dc1	Escarpe estructural, Colina coluvial baja
Dc2	Ladera Estructura, Colina coluvial media
De1	Ladera denudacional estable
De2	Ladera denudacional activa
De3	Ladera denudacional muy activa
DI	Ladera Coluvial
Fac	Valle coluvio aluvial
FI1	Valle lateral activo
Fp1	Abanico aluvial creciente

Unidad geomorfológica	Descripción
Ft1	Terraza aluvial reciente
Ft2	Terraza aluvial subreciente
Ft3	Terraza aluvial antigua
Fv	Vega de divagación
Kv	Valles cársticos
Sc1	Ladera Estructura
Sc2	Escarpe estructural
Ss1	Escarpes activos
Ss2	Escarpes poco activos

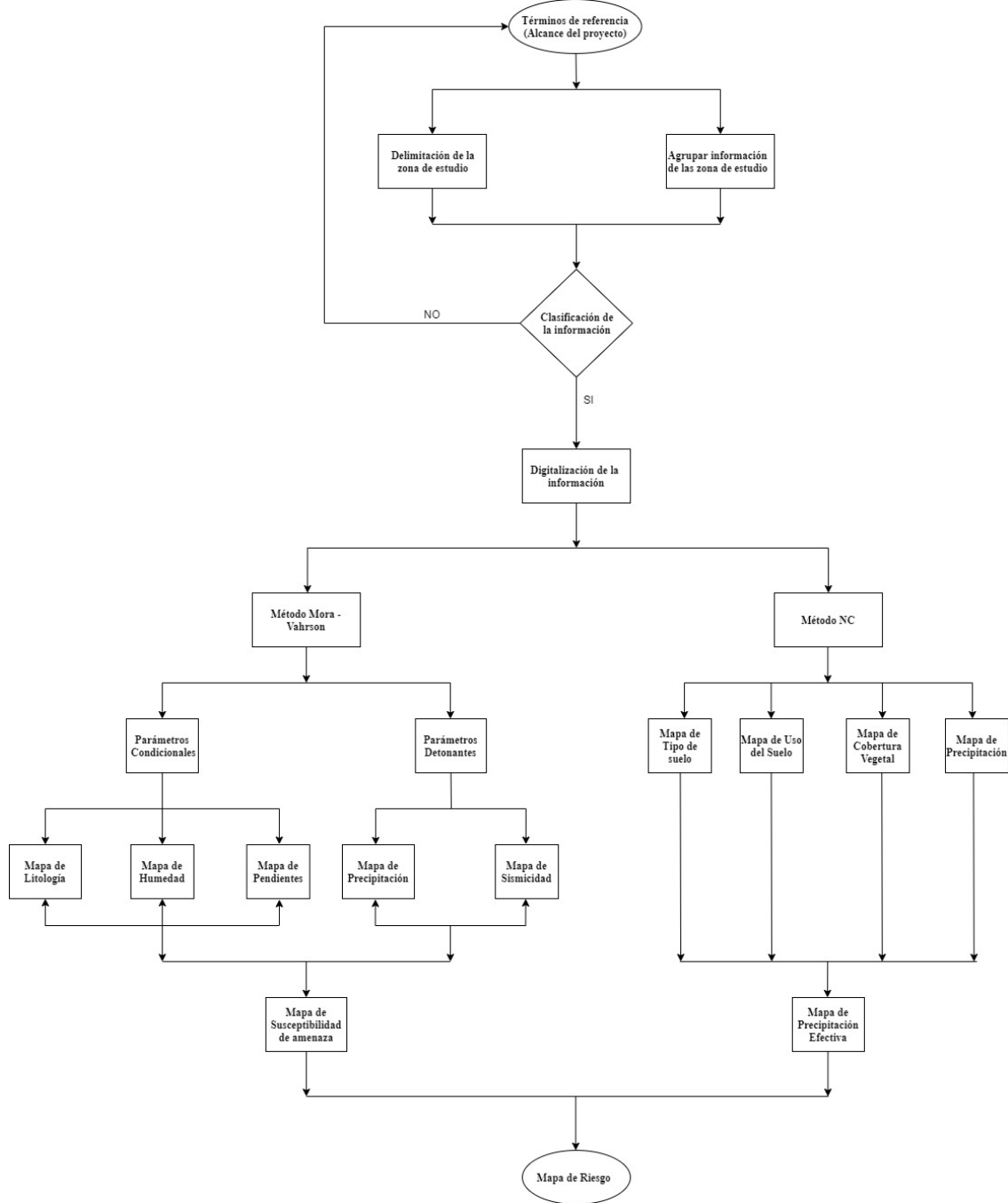
Fuente: Elaboración propia

9 Metodología

Para el presente proyecto se plantea una metodología de modo práctico y analítico. En primera instancia se agrupará la información de las zonas de estudio, entre las cuales destacan los modelos digitales de elevación geográfica, imágenes de satélites y datos obtenidos del SIMMA (Sistema de Información de Movimientos en Masa) de cada municipio. Posteriormente se analizará la información obtenida con el fin de reconocer algunas características principales de la zona de estudio como drenajes, geomorfología, litología y delimitación de esta, seguido de esto se analizarán los datos obtenidos mediante dos métodos. Seguido de esto, se aplicará el método de Número de Curva (CN) el cual arrojará como resultado la precipitación efectiva y finalmente, se aplicará el método de Mora - Vahrson, el cual es el encargado de brindar el mapa de susceptibilidad a deslizamientos, cabe resaltar que todo se hará en la herramienta de ArcMap.

Finalmente se realizará un mapa utilizando los resultados arrojados por los dos métodos (ver figura 18).

Figura 18. Esquema conceptual de la metodología,



Fuente: por autor, 2021.

9.1 Método del Sistema de Conservación de Suelos (SCS):

Este método es un modelo empírico, que fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de EEUU, el cual determina la escorrentía a través de un número hidrológico o número de curva (CN). El Numero de Curva se representa con un valor de 0 a 100 según su capacidad de producir escorrentía superficial. Para los valores cercanos a 0 se tienen condiciones de permeabilidad muy alta, es decir, la mayoría de lluvia se infiltra a través del suelo, mientras que valores cercanos a 100 tienen condiciones de impermeabilidad, es decir, muy poca lluvia se infiltra a través del suelo si no que por el contrario todo se escurre.

El Número de Curva (Curve Number), depende de la siguiente información:

- 1) Mapa de tipo de suelos
- 2) Mapa de uso del suelo
- 3) Mapa de cobertura vegetal
- 4) Precipitación

Según el método del SCS, la escorrentía (Q) o también conocida como precipitación efectiva, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,85S)} \quad (1)$$

Donde:

Q: Escorrentía directa o precipitación efectiva (mm).

P: Precipitación (mm)

S: Retención máxima potencial

Según los estudios empíricos realizados por el SCS permitieron correlacionar la retención máxima potencial (S), con el número de curva (CN), (Montserrat, Joaquín, & Teodoro, 1995).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Donde:

CN: Número de Curva

S: Retención máxima potencial (mm)

9.1.1 Parámetros del modelo:

9.1.1.1 Tipo de suelo hidrológico

En esta sección, se debe tener una clasificación de suelos, en donde se fijan condiciones de escorrentía superficial, por lo tanto, se ajusta la condición hidrológica del suelo mediante los usos que este presenta. Esta clasificación se realizó mediante la tabla “Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0,2S$)”, descrita por Ven Te Chow (Ven Te Chow, Maidment, & Mays, 1994). Para este caso se realizó una reclasificación de los parámetros descritos en la tabla de Ven Te Chow, con el fin de simplificar de una manera correcta la información (ver Tabla 6).

Tabla 6. *Uso del suelo.*

Clasificación original NLCD		Clasificación revisada (reclasificación)	
Número	Descripción	Número	Descripción
11	Agua a cielo abierto	1	Agua
90	Humedales leñosos		
95	Humedales herbáceos emergentes		

Clasificación original NLCD		Clasificación revisada (reclasificación)	
21	Poblados en espacios abiertos	2	Residencial media
22	Poblados de baja intensidad		
23	Poblados de mediana densidad		
24	Poblados de alta densidad		
41	Bosques secos	3	Bosque
42	Bosques verdes		
43	Bosques mixtos		
31	Tierra infértil	4	Agricultura
52	Arbustos/matorrales		
71	Pastizales/herbáceas		
81	Pasto/heno		
82	Cultivos		

Nota: Uso del suelo. Villegas, P. (2017, 22 de enero). Calcular número de curva con arcgis. Agua y SIG. <https://aguaysig.com/calcular-numero-de-curva-con-arcgis/>

Una vez se identifica el uso del suelo se procede a clasificarlo en los grupos hidrológicos que establece el SCS (Tabla 7).

Tabla 7. Grupos hidrológicos del suelo.

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración cuando están muy húmedos	Características	Textura
A	Rápida	Alta capacidad de Infiltración > 76 mm/h	Arenosa Arenosa - limosa
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76 - 38 mm/h	Franca Franco - arcillosa - arenosa Franco - limosa
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36 - 13 mm/h	Franco - arcillosa Franco - arcillo - limosa Arcillo - arenosa
D	Muy lenta	Capacidad de infiltración < 13 mm/h	Arcillosa

Nota: Grupos hidrológicos del suelo. Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides: Investigation and mitigation. chapter 3-landslide types and processes. Transportation Research Board Special Report, (247).

9.1.1.2 Precipitación

Para esta metodología se utiliza los valores mensuales de precipitación, con el objetivo de evaluar los caudales máximos o crecientes. En esta ocasión se utilizará para obtener el valor de la precipitación efectiva o escorrentía directa, que permitirá identificar cual es la oferta hídrica para la zona de estudio.

9.2 Método Mora - Vahrson:

El método Mora - vahrson es un método cualitativo, donde se combina información sobre diferentes parámetros morfodinámicos y su distribución espacial con el fin de obtener un modelo de susceptibilidad a deslizamientos. Nació en 1991 por Sergio Mora y Wilhem-Guenther Vahrson en el país de Costa Rica (Figueroa Quiroga, 2016), debido a un terremoto que hubo en dicho lugar. Este método es utilizado con mayor frecuencia en Centro América sin embargo se ha ido utilizando en diferentes países de América Latina debido a que este método evalúa grandes áreas, es sencillo y su modelo final predice con proximidad los deslizamientos que se pueden ocasionar.

El modelo final donde se evalúa la susceptibilidad a deslizamientos presenta indicadores cualitativos de los niveles de amenaza que se puedan encontrar en una zona, de igual manera para realizar la respectiva clasificación es necesario emplear los sistemas de información geográfica con el fin de contribuir en la evaluación de cinco factores principales para la obtención de dichos modelos, los cuales se dividen en dos grupos como se ilustra en la ecuación (3),

$$H = P * D \quad (3)$$

Donde:

H: Es la susceptibilidad a deslizamientos de una zona.

P: Parámetros condicionantes o pasivos.

D: Parámetros detonantes o activos.

Por una parte, están los factores condicionantes o también llamados pasivos (P), (Román & Feoli-Boraschi, 2018), los cuales están constituidos por el producto de tres parámetros que son la litología (Pl), humedad del suelo (Ph) y pendiente (Pp) del lugar de estudio también son encontrados en la literatura como parámetros geológicos en el caso de la litología y topográficos en caso de la pendiente; todos aquellos parámetros conllevan a que no haya una estabilidad en la ladera (Barrantes Castillo, et al., 2011).

En la ecuación (4), se evidencia el respectivo cálculo para calcular el valor de este primer grupo.

$$P = Pl * Ph * Pp \quad (4)$$

Donde:

P: Hace referencia a los parámetros condicionantes o pasivos, como se había nombrado anteriormente.

Pl: Valor del parámetro de la litología.

Ph: Valor del parámetro de la humedad del suelo.

Pp: Valor del parámetro de la pendiente.

Por otra parte, están los factores detonantes o llamados activos (Román & Feoli-Boraschi, 2018), estos están compuestos por la suma entre la sismicidad y la precipitación, también encontrada en la literatura como intensidad de lluvias, estos parámetros son aquellos que conducen de manera activa a producir los fenómenos de remoción en masa ya sean de intensidad alta o baja (Mora & Vahrson, 1993), en la ecuación (5), se evidencia la manera de determinar los factores detonantes.

$$D = Ds * Dll \quad (5)$$

Donde:

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

D: Hace referencia al valor de los parámetros detonantes.

Ds: Valor del parámetro de sismicidad o actividad sísmica.

DII: Valor del parámetro de precipitación o intensidad de lluvias.

Mora - Vahrson clasifica cada parámetro mencionado anteriormente dentro de unos determinados rangos de valores, con el fin de definir en qué grado se encuentra cada parámetros descrito anteriormente de la zona de estudio, es decir, si se encuentra en muy bajo, bajo, moderado, medio, alto , muy alto; para ello es importante el uso de un Software que permita realizar los diversos mapas para obtener con ayuda de datos espaciales el valor real de cada factor según el método descrito por los autores. En la Tabla 8 se evidencia la clasificación que los autores proponen para obtener el peso o el potencial a deslizamientos que presenta un lugar al realizar el respectivo cálculo de los factores condicionantes y detonantes.

Tabla 8. *Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento.*

Clasificación	Potencial de deslizamiento	Factor
I	Muy bajo	Sectores estables, no se requiere medidas correctivas, se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc.
II	Bajo	Sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de infraestructura de gran envergadura, se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Clasificación	Potencial de deslizamiento	Factor
		educativos, estaciones de policía, bomberos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado.
III	Moderado	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, bioestabilización de terrenos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado. Recomendado para usos urbanos de baja densidad.
IV	Alto	Probabilidad de deslizamientos alta (<50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Para su utilización se deben realizar estudios de estabilidad a detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.
V	Muy alto	Probabilidad de deslizamientos muy alta (>50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Prohibido su uso con fines urbanos, se recomienda usarlos como áreas de protección.

Nota: Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento. Mora, S., & Vahrson, W. G. (1993). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. Tecnología ICE, 3(1), 32-42.

9.2.1 Parámetros pasivos:

9.2.1.1 Litología (SI)

Este parámetro abarca parte de las condiciones geológicas de la zona, donde específicamente se caracteriza por la resistencia, la composición, grado de meteorización, permeabilidad, entre otras de las rocas y de los suelos (Almeida, et al., 2014); es decir, en

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

cuanto a las rocas, se caracteriza el tipo de roca, la estructura y sus minerales, puesto que litología se implica directamente en cómo se encuentran las condiciones o estabilidad de la ladera. Este factor o parámetro es uno de los más difíciles de evaluar debido a que se puede presentar datos geotécnicos faltantes, por lo que se debe basar en información o descripciones que ya se dispongan (Mora & Vahrson, 1993).

Los autores ofrecen una clasificación litológica con el fin de determinar en qué grado de susceptibilidad y que valor o que peso litológico es asignado, de acuerdo a la localización de la zona, por lo que, de acuerdo con la litología encontrada, esta debe reclasificarse según la Tabla 9, para poder realizar un modelo con los pesos correspondientes.

Tabla 9. *Clasificación Litológica.*

Litología	Características Físico - mecánicas	Grado de susceptibilidad	Valor factor SI
Aluviones: gruesos, permeables, compactos, con nivel freático bajo. Calizas: duras, permeable Intrusivos: poco fisurados, bajo nivel freático. Basaltos, andesita, ignimbritas y similares, sanas, permeables y poco fisuradas. Rocas metamórficas sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo.	Sanos con poca o ninguna meteorización, Resistencia a la corte elevada, fisuras sanas sin rellenos.	Bajo	1
Rocas sedimentarias poco alteradas, estratificación maciza, poco fisuradas, nivel freático bajo. Rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas o metamórficas medianamente fisuradas o alteradas, nivel freático a	Resistencia al corte media a elevada, fracturas cizallables.	Moderado	2

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Litología	Características Físico - mecánicas	Grado de susceptibilidad	Valor factor SI
profundidades intermedias.			
Rocas sedimentarias, rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas, tobas poco soldadas o metamórficas medianamente alteradas. Coluvios, lahares, arenas, suelos regoliticos levemente compactados, drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos.	Resistencia al corte moderada a media, fracturación importante.	Medio	3
Aluviones fluviolacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas con estratificación y foliaciones a favor de la pendiente, con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros.	Resistencia al corte moderada a baja.	Alto	4
Materiales aluviales, coluviales y regoliticos de muy baja calidad mecánica con estado de alteración Avanzado, drenaje pobre, se incluyen las categorías 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradientes hidrodinámicos muy elevados,	Resistencia al corte muy baja, materiales blandos con muchos finos.	Muy alto	5

Nota: Clasificación Litológica, Mora, S., & Vahrson, W. G. (1993). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. Tecnología ICE, 3(1), 32-42.

9.2.1.2 Humedad del suelo (Sh)

La humedad o contenido de agua es un fenómeno natural, el cual es de gran relevancia en el comportamiento del suelo, puesto que influye en las propiedades físicas y químicas de este; la humedad del suelo se puede alterar de forma veloz ya sea en minutos u

horas, pero por el contrario puede tardar hasta meses en secar, esto sucede por la evaporación y transpiración debido a la combinación de agua y energía que se genera entre la superficie y la atmósfera (Hernández Pereira & Medina González, 2012).

Para obtener el contenido de humedad del suelo es importante ir al sitio de estudio y realizar muestreos, posterior a esto es recomendable realizar un balance hídrico (Chaverri-Molina, 2016); sin embargo, por falta de recursos o impedimentos de realizar estudios en la zona, Mora -Vahrson estima la humedad del suelo mediante datos de precipitación media mensual de estaciones meteorológicas que contengan información de varios años para llegar a un valor aproximado.

Para determinar el modelo de contenido de humedad según los autores, en primera instancia se procede a clasificar el valor de precipitación media mensual en milímetros de cada estación según la Tabla 10 para obtener valores de índices de 0 a 2; para ello se realiza un balance hídrico, en el cual se toma una evapotranspiración potencial de 125 mm por mes, por lo que los valores de precipitación menores no incrementan la humedad de la zona (Camacho, Chaves, & Murillo, 2005).

Tabla 10. *Clasificación de los promedios mensuales máximos de la precipitación.*

Promedio mensual de precipitaciones (mm/mes)	Valor
< 125	0
125 - 250	1
250 <	2

Nota: Clasificación de los promedios mensuales máximos de la precipitación. Mora, R., Mora, S. & Vahrson, W. (1992). Macrozonificación de la amenaza de deslizamientos y resultados obtenidos en el área del valle central de Costa Rica.- Escala 1:286 000. Cepredenac.

Posteriormente se realiza la sumatoria de los doce valores obtenidos por cada mes para obtener un valor total que debe estar entre 0 a 24, el cual debe nuevamente clasificarse

según la Tabla 11 y de esta manera obtener el valor que se le da a la humedad del suelo de la zona de estudio (Almeida, 2014).

Tabla 11. Clasificación del factor de humedad.

Valor acumulado de índice de precipitación	Clasificación	Factor Sh
0 – 4	Muy bajo	1
5 - 9	Bajo	2
10 - 14	Medio	3
15 - 29	Alto	4
20 - 24	Muy alto	5

Nota: Clasificación del factor de humedad. Mora, R., Mora, S. & Vahrson, W. (1992). Macrozonificación de la amenaza de deslizamientos y resultados obtenidos en el área del valle central de Costa Rica.- Escala 1:286 000. Cepredenac.

9.2.1.3 Pendiente (Sp)

La pendiente se entiende cómo la inclinación que varía entre 0 a 90° de un plano con respecto a la horizontal (García Álvarez & Rache Rodríguez, 2018), este factor está enlazado con la topografía y el relieve que posea el sitio, que puede obtenerse mediante un modelo de elevación digital (DEM).

Según el método este factor es uno de los más relevantes puesto que altera la estabilidad de la ladera de acuerdo a su grado de inclinación, por lo que entre más inclinado esté, la gravedad en el sitio aumentará generando así mayor amenaza a deslizamientos (Figueroa Quiroga, 2016), además que está estrechamente relacionado con “las tensiones de corte tangenciales y normales en los materiales superficiales”, además que también es afectado por el agua que se encuentra en la ladera (García Álvarez & Rache Rodríguez, 2018).

Mora - Vahrson incluyen este factor con el fin de poder estudiar la rugosidad de la zona (Almeida, 2014), donde se clasifica en 5 índices como se ilustra en la Tabla 12, allí se

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

evidencia los rangos y valores que se le da a la pendiente de acuerdo a su inclinación, donde el valor de cero expuesto en la tabla hace referencia a terrenos planos o casi plano, cabe resaltar que este valor de cero únicamente es visto en este parámetro (Mora & Vahrson, 1993).

Tabla 12. *Clasificación del factor pendiente según los rangos obtenidos.*

Equivalencia en grados	Clasificación	Factor
0 – 4,29	Muy bajo	0
4,3 – 9,93	Bajo	1
9,94 – 16,7	Moderada	2
16,71 – 26,57	Media	3
23,58 – 38,66	Alta	4
>38,66	Muy alta	5

Nota: Clasificación del factor pendiente según los rangos obtenidos. Mora, S., & Vahrson, W. G. (1993). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. Tecnología ICE, 3(1), 32-42.

9.2.2 Parámetros detonantes:

9.2.2.1 Sismicidad (Ds)

Este parámetro se genera en lo profundo de la tierra, lo cual de manera natural se propaga en rumbos distintos, producto de una aceleración pico presentada en el sitio, con ayuda de movimientos y diversas características que posee el terreno, lo cual ocasiona fenómenos de remoción en masa (García Álvarez & Rache Rodríguez, 2018).

Para determinar la sismicidad es importante contar con información sobre los fenómenos en masa provocados por sismos o terremotos con el fin de tener una base sobre el dominio de las diferentes magnitudes sísmicas presentadas (Román & Feoli-Boraschi, 2018). Mora - Vahrson determina este parámetro como un factor de disparo puesto, ya que se puede ocasionar en cualquier momento un deslizamiento, bajo o extremadamente alto según sea su intensidad en concordancia a la escala de Mercalli.

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

De acuerdo a lo descrito anteriormente la sismicidad es clasificada en 10 rangos como se evidencia en la Tabla 13 donde se evalúa la aceleración PGA en m/s^2 que corresponde a la misma aceleración pico, con la diferencia que esta última está dada en porcentaje de la gravedad, por lo que para llegar a la aceleración PGA es necesario multiplicar la aceleración pico por $9,81 m/s^2$ que es el valor de la gravedad y así obtener el valor del índice de sismicidad que ofrece Mora - Vahrson.

Tabla 13. *Actividad Sísmica.*

Intensidad	Aceleración Pico (%g)	Aceleración PGA (m/s^2)	Clasificación	Valor Ds
III	1 – 12	0,098 – 1,226	Leve	1
IV	13 – 20	1,227 – 2,011	Muy Bajo	2
V	21 – 29	2,012 – 2,894	Bajo	3
VI	30 – 37	2,895 – 3,679	Moderado	4
VII	38 – 44	3,680 – 4,365	Medio	5
VIII	45 – 55	4,366 – 5,445	Elevado	6
IX	56 – 65	5,446 – 6,426	Fuerte	7
X	66 – 73	6,427 – 7,210	Bastante	8
XI	74 – 85	7,211 – 8,388	Fuerte	9
XII	>85	>8,389	Muy Fuerte Extremadamente Fuerte	10

Nota: Actividad Sísmica. Mora, S., & Vahrson, W. G. (1993). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. Tecnología ICE, 3(1), 32-42.

9.2.2.2 Intensidad de lluvias (D_{LL})

Este fenómeno se refiere a la cantidad de agua que cae desde la atmósfera hasta la superficie (García Álvarez & Rache Rodríguez, 2018) y de acuerdo con la intensidad y distribución con la que precipita se pueden desencadenar fenómenos de remoción en masa, por lo que, a mayor intensidad de lluvia, mayor será la saturación del suelo generando una alta probabilidad de deslizamiento debido a las presiones que se presentan.

La duración e intensidad, son factores que pueden generar eventos no favorables, es decir, entre mayor sea la intensidad y duración de la lluvia, más fuerte será el movimiento en masa, por lo que entre una corta duración al igual que la intensidad, la zona es propensa a que se presenten sucesos superficiales (García Álvarez & Rache Rodríguez, 2018). De acuerdo con esto Mora - Vahrson clasifica la intensidad de precipitación máxima en 24 horas en cinco rangos como se ilustra en la Tabla 14.

Tabla 14. *Valoración del parámetro de disparo por lluvias.*

Valor acumulado de índice de precipitación	Clasificación	Valor del parámetro D_{LL}
< 100	Muy bajo	1
101 - 200	Bajo	2
201 - 300	Medio	3
301 – 400	Alto	4
> 400	Muy alto	5

Nota: Valoración del parámetro de disparo por lluvias. Mora, S., & Vahrson, W. G. (1993). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. Tecnología ICE, 3(1), 32-42.

10 Desarrollo

10.1 Obtención del número de curva para la zona de estudio

10.1.1 Generación del mapa de cobertura vegetal

El mapa de cobertura vegetal se obtuvo gracias a la información dada por el Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) y a los modelos de elevación geográfica y a las imágenes satelitales, cabe resaltar que para la elección de estas imágenes se debe tener en cuenta un porcentaje de error mínimo.

10.1.1.1 Clases de Coberturas

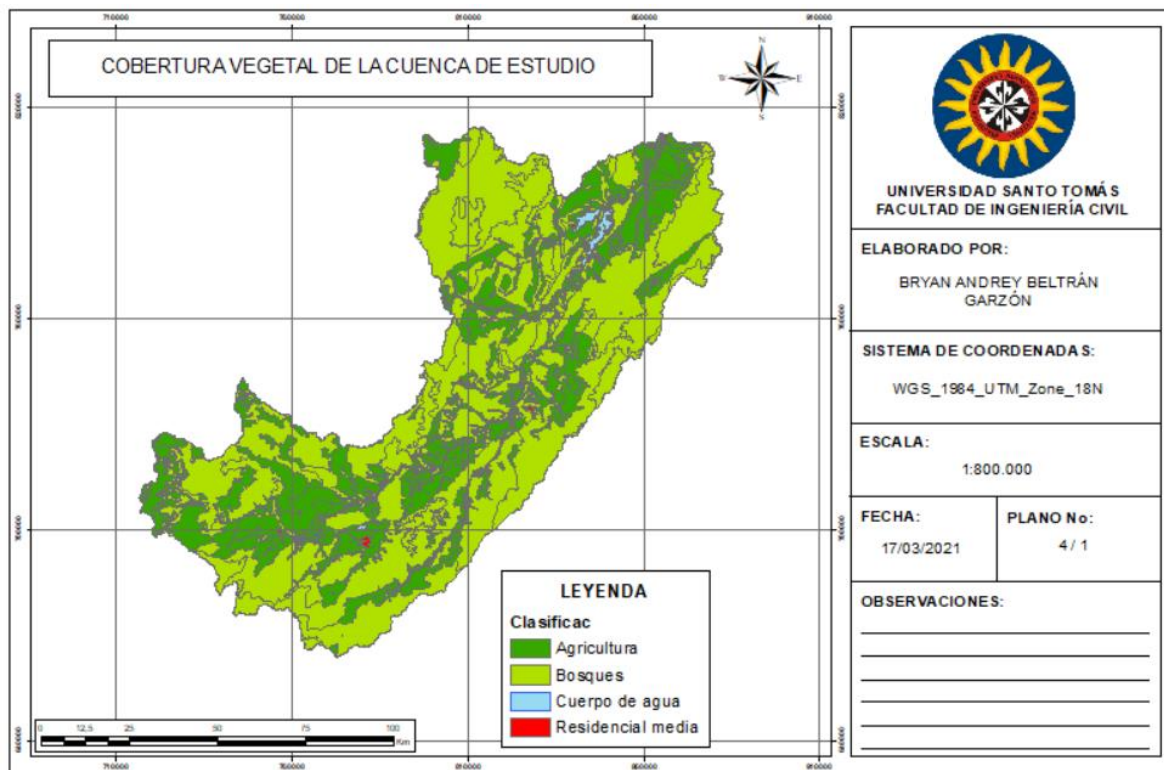
En la obtención del mapa se tuvieron en cuenta 4 tipos de coberturas (ver Tabla 6), clasificadas de la siguiente manera:

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

- Cuerpos de agua
- Residencial media
- Bosques
- Agricultura

Cabe resaltar que solo se tuvieron en cuenta los parámetros mencionados antes, es decir, no se tuvieron en cuenta otros tipos de cobertura vegetal.

Figura 19. Cobertura vegetal de la cuenca de estudio.



Fuente: por autor, 2021.

Como se observa en la figura 19 y en la Tabla 15, la cuenca cuenta con un área de 10390,30 Km², es decir que el 64,91% del área de la cuenca está ocupada por bosques, seguido del 33,84% perteneciente a la agricultura, por otra parte, los cuerpos de agua representan el 1,02% y finalmente el 0,22% de ocupación pertenecen a la zona residencial media.

Tabla 15. Cobertura vegetal de la cuenca.

Área de la cuenca (Km ²)	Cobertura	Área (Km ²)	Porcentaje de ocupación
10390,30	Bosques	6744,75	64,91%
	Agricultura	3516,45	33,84%
	Cuerpos de agua	105,97	1,02%
	Residencial media	23,02	0,22%
	Total	10390,30	

Nota: Área de la cuenca, Cobertura vegetal y área de ocupación. Elaboración propia.

10.1.2 Características hidrológicas

Es importante resaltar que el estudio de los patrones de lluvia y las alteraciones que estos presentan se asocian al efecto del cambio climático. Por tal motivo, a partir de los últimos siglos (XX-XXI), se han desarrollado investigaciones para evaluar los respectivos escenarios en los que estos varían.

10.1.2.1 Recopilación de la información

Se adquirió la información de las estaciones hidrometeorológicas presentes en el proyecto, mediante el portal del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Para el estudio de la cuenca se obtuvieron 8 estaciones, las cuales se mencionan en la Tabla 16, en donde se clasifican por nombre, código, tipo, periodo de registro y su respectiva localización. En la figura 20, se puede observar su localización, (Anexo 5).

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Tabla 16. Localización de las estaciones de la cuenca.

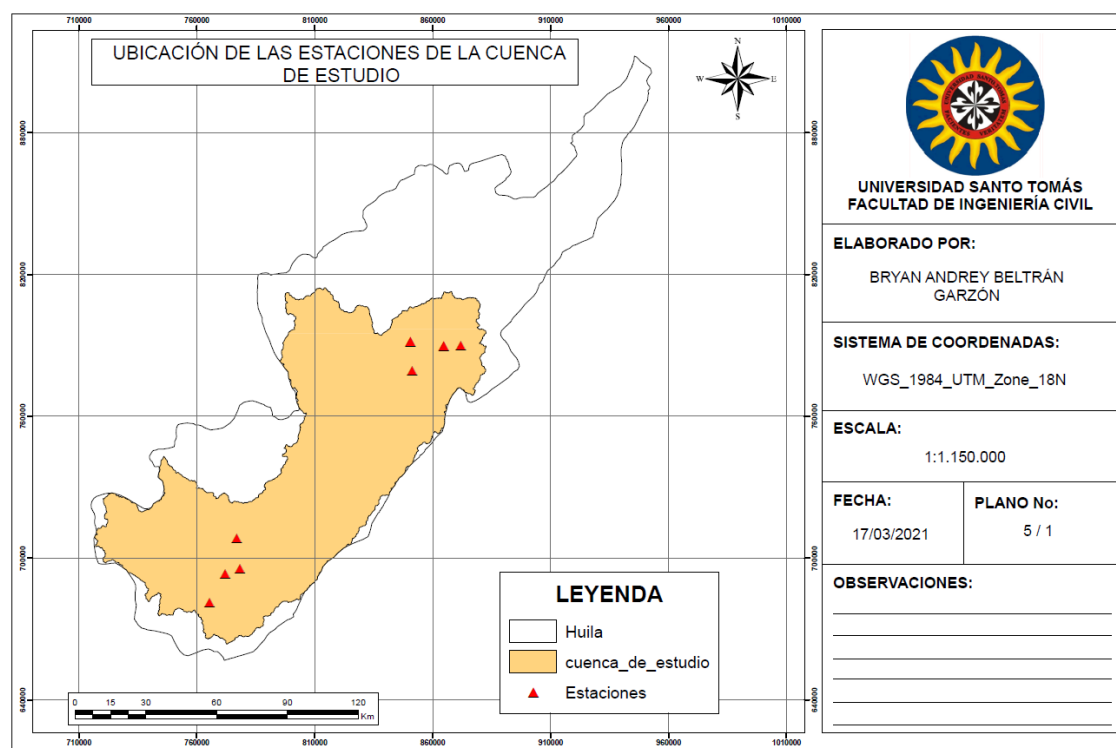
ESTACIÓN			PERIODO DE REGISTRO		Coordenadas Geográficas		
CÓDIGO	NOMBRE	CATEGORIA	AÑO	ESTADO	LATITUD	LONGITUD	MUNICIPIO
21010210	MONTECRISTO	PM	1980 - 2021	Activa	1,71	-76,19	Pitalito
21015020	SEVILLA	CP	1971 - 2021	Activa	1,82	-76,13	Pitalito
21010110	INSFOPAL	PM	1971 - 2021	Activa	1,84	-76,07	Pitalito
21010040	LAGUNA LA	PM	1963 - 2021	Activa	1,96	-76,09	Pitalito
21105050	ROSALES LOS	CP	1973 - 2021	Activa	2,60	-75,42	Campoalegre
21105040	POTOSI HACIENDA	CO	1986 - 2021	Activa	2,70	-75,30	Campoalegre
21105060	HIDROBETANIA	CP	1990 - 2014	Suspendida	2,71	-75,42	Campoalegre
21100120	PALCO EL	PM	1976 - 2002	Suspendida	2,70	-75,23	Campoalegre

Donde: PM : Pluviométrica
CP: Climatológica Principal
CO: Climatológica Ordinaria

Nota: Ubicación geográfica, códigos, nombres y periodo de registro de las estaciones hidrológicas, información del IDEAM. Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 16, se encuentran 2 estaciones suspendidas pertenecientes al municipio de Campoalegre y 6 estaciones activas pertenecientes a los municipios de estudio.

Figura 20. Ubicación de las estaciones de la cuenca de estudio,



Fuente: por autor, 2021.

10.1.2.2 Precipitación

En la Tabla 17 se pueden observar los datos de precipitación mensual extraídos de la información suministrada por el IDEAM.

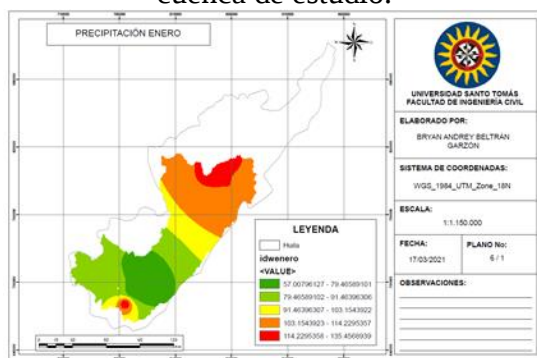
Tabla 17. *Precipitación media mensual de las estaciones de la cuenca.*

NOMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
POTOSI HACIENDA	110,18	162,84	159,31	146,74	108,56	47,71	42,99	22,99	40,04	169,42	215,86	155,68
ROSALES LOS	107,59	111,19	158,08	143,93	104,29	40,71	34,09	23,42	45,81	155,52	212,73	172,82
HIDROBETANIA	135,48	132,54	176,42	141,89	124,71	38,12	34,31	23,75	47,39	159,74	257,08	178,27
INSFOPAL	56,96	95,62	118,75	145,68	153,92	43,81	48,78	48,56	55,75	52,00	116,53	94,07
MONTECRISTO	123,41	140,26	192,23	222,65	237,33	56,73	49,14	50,66	45,35	56,86	164,14	141,80
LAGUNA LA	72,74	107,80	123,36	145,78	146,19	53,72	49,10	52,32	56,43	53,76	123,91	95,10
SEVILLA	58,7	82,64	107,47	134,59	138,42	136,27	130,99	98,24	82,76	96,44	97,82	79,22
PALCO EL	117,75	135,52	164,60	144,19	112,52	42,18	37,13	23,39	44,41	161,56	228,56	168,92

Fuente. *Elaboración propia con base en los datos del IDEAM.*

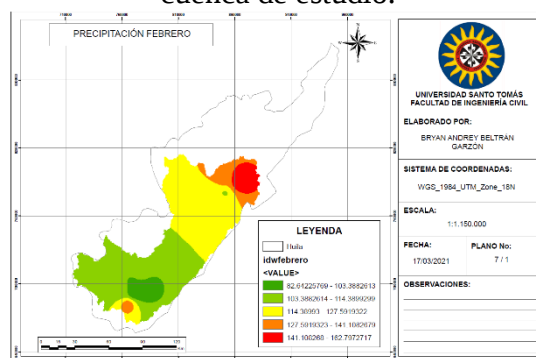
Para transformar la información, se utilizó el método de ponderación (IDW), el cual consiste en la ubicación de las diferentes estaciones, con sus respectivos valores medidos. Los resultados se obtuvieron para cada mes como se puede observar de la figura 21 a la figura 32, (Anexos 6 a 17).

Figura 21. Precipitación Enero de la cuenca de estudio.



Fuente: *por autor, 2021.*

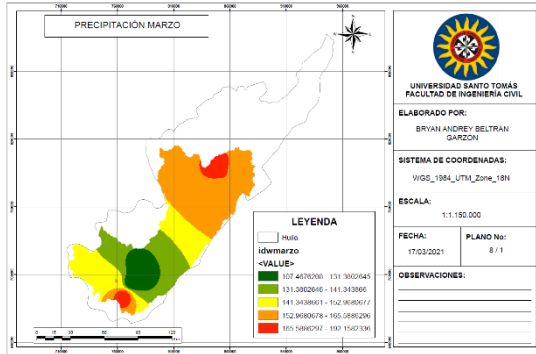
Figura 22. Precipitación Febrero de la cuenca de estudio.



Fuente: *por autor, 2021.*

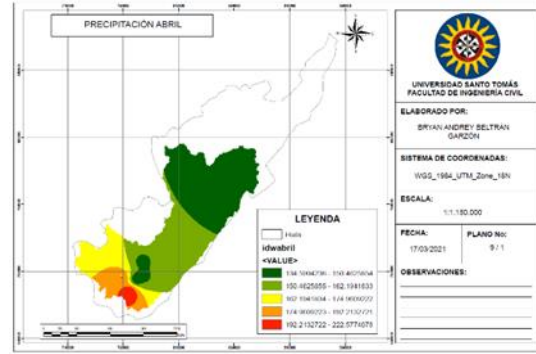
ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Figura 23. Precipitación Marzo de la cuenca de estudio.



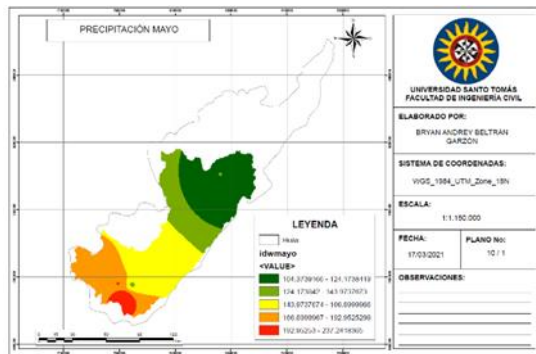
Fuente: por autor, 2021.

Figura 24. Precipitación Abril de la cuenca de estudio.



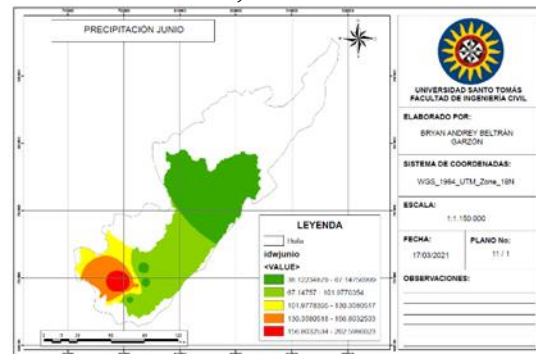
Fuente: por autor, 2021.

Figura 25. Precipitación Mayo de la cuenca de estudio



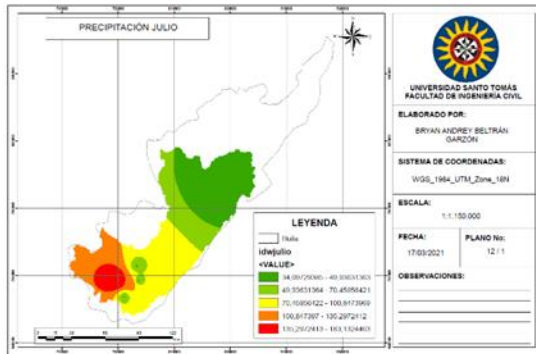
Fuente: por autor, 2021.

Figura 26. Precipitación Junio de la cuenca de estudio,



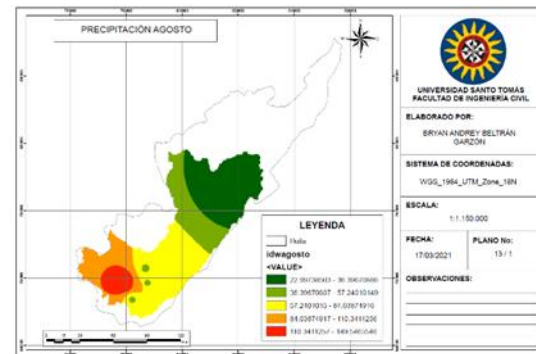
Fuente: por autor, 2021.

Figura 27. Precipitación Julio de la cuenca de estudio.



Fuente: por autor, 2021.

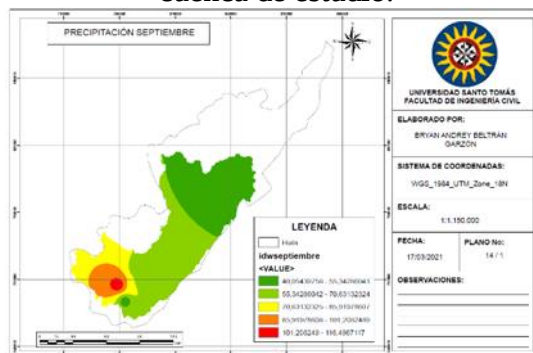
Figura 28. Precipitación Agosto de la cuenca de estudio.



Fuente: por autor, 2021.

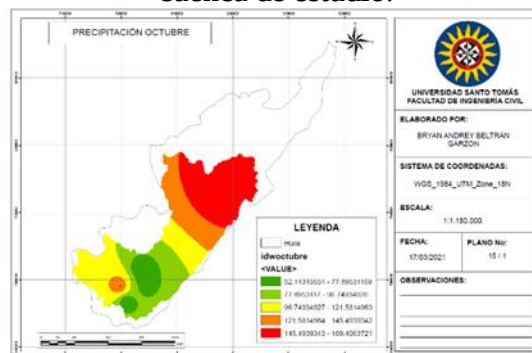
ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Figura 29. Precipitación Septiembre de la cuenca de estudio.



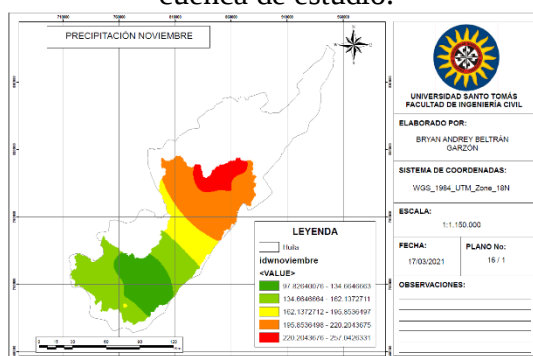
Fuente: por autor, 2021.

Figura 30. Precipitación Octubre de la cuenca de estudio.



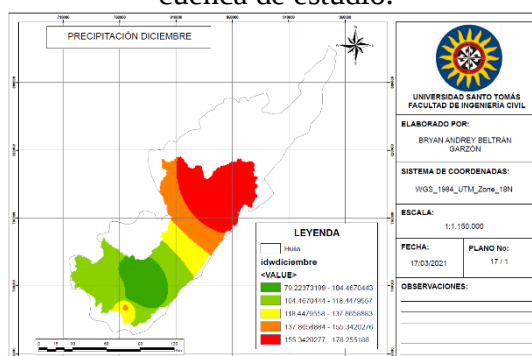
Fuente: por autor, 2021.

Figura 31. Precipitación Noviembre de la cuenca de estudio.



Fuente: por autor, 2021.

Figura 32. Precipitación Diciembre de la cuenca de estudio.

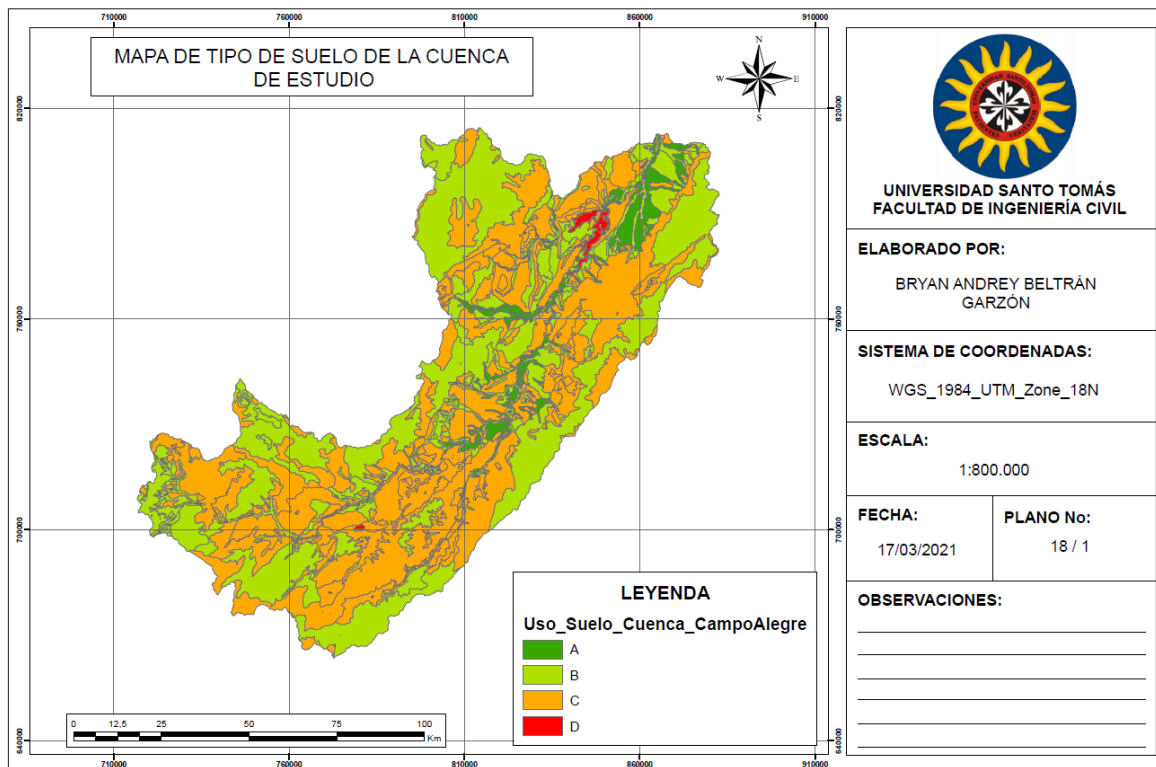


Fuente: por autor, 2021.

10.1.3 Mapa de tipo de suelo

Para generar el mapa de tipo de suelos de la cuenca se trabajó con la información suministrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), figura 33, (Anexo 18), el cual se reclasificó mediante la información descrita en la Tabla 6 y Tabla 7.

Figura 21. Mapa de tipo de suelo de la cuenca de estudio.



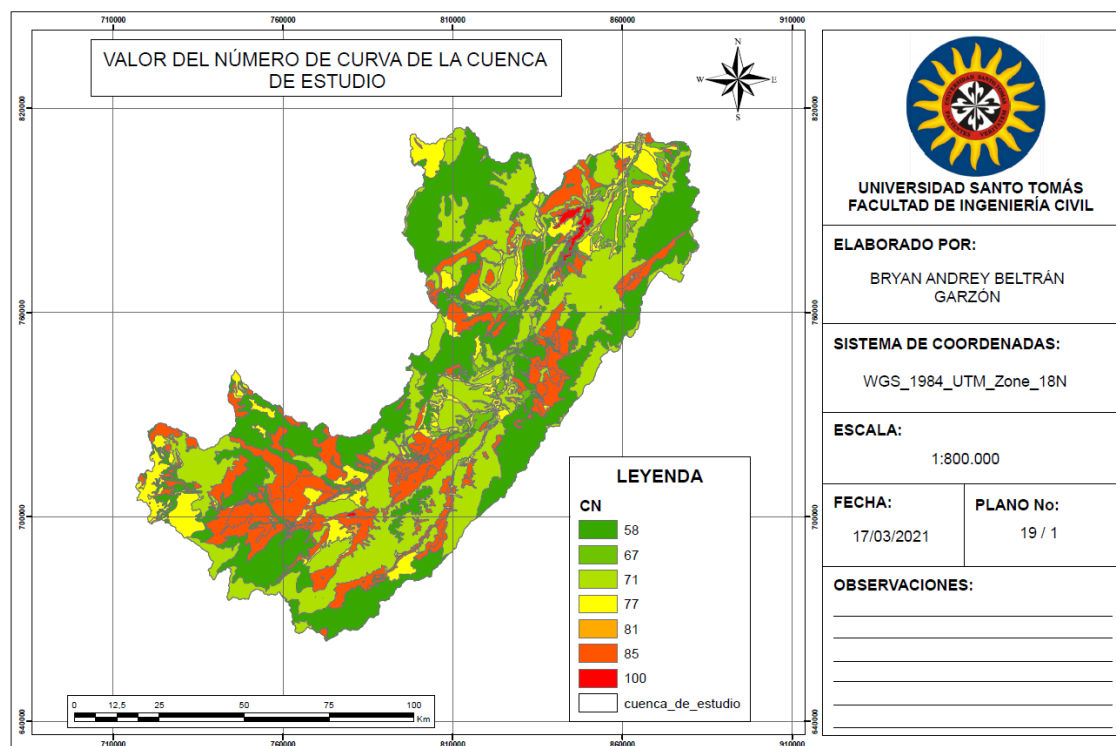
Fuente: por autor, 2021.

En la figura 33, se puede ver que la cuenca de estudio en su mayor parte presenta un suelo tipo C, el cual describe un suelo franco – arcilloso (ver Tabla 7).

10.1.4 Generación del número de curva

Al operar las variables (Tipo de suelo y Cobertura vegetal), se reclasificó el mapa resultante obteniendo el número de curva (CN). El resultado de la operación se puede ver en la figura 34 (Anexo 18) y en la Tabla 18. Cabe resaltar que el CN ponderado para la cuenca de estudio es igual a 70.

Figura 22. Mapa del valor del número de curva de la cuenca de estudio.



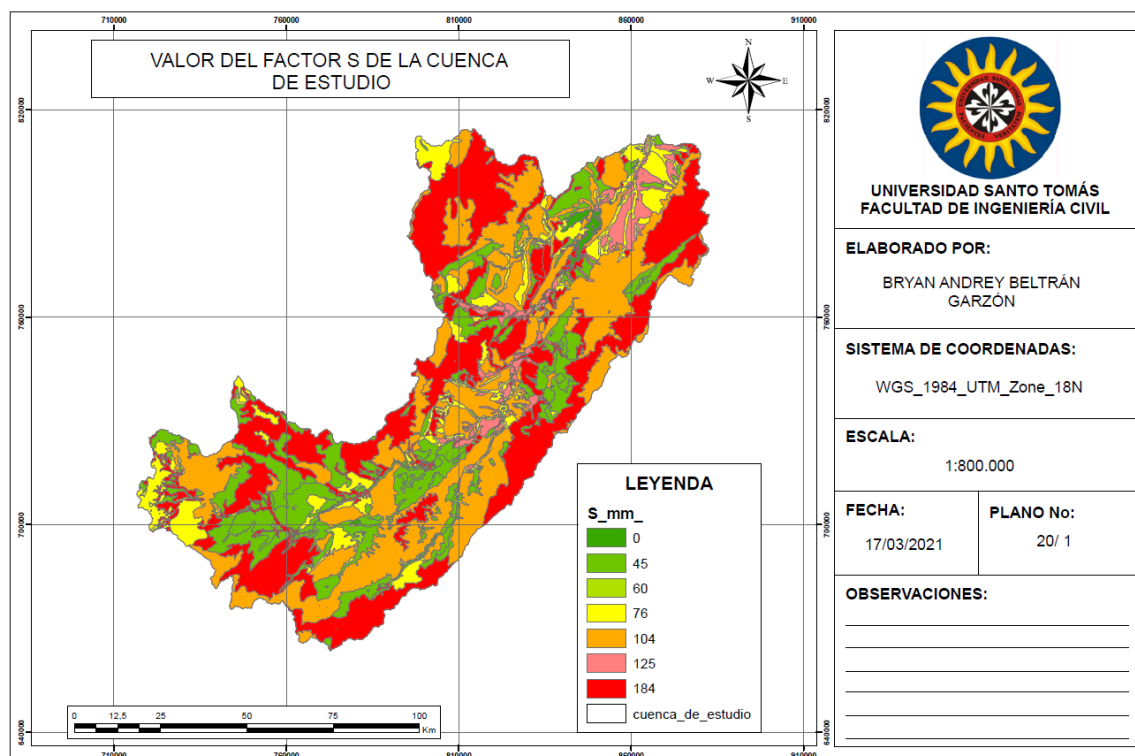
Fuente: por autor, 2021.

Tabla 18. Valor número de curva para la cuenca de estudio.

CN	ÁREA (ha)	PORCENTAJE
58	355222,40	34,19%
67	40238,69	3,87%
71	319252,17	30,73%
77	103544,00	9,97%
81	2302,42	0,22%
85	207862,78	20,01%
100	10597,10	1,02%

Finalmente, el CN se operó mediante la Ecuación No. 2, utilizando el álgebra de mapas en ArcMap. Se obtuvo como resultado el mapa del factor S (retención máxima potencial), el cual representa la pérdida de escorrentía por infiltración y la acumulación superficial (ver figura 35 y Anexo 20).

Figura 23. Mapa del factor S de la cuenca de estudio.



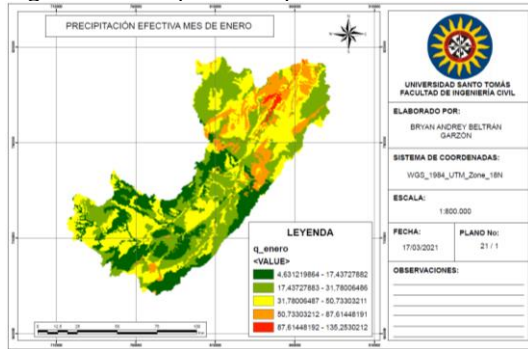
Fuente: por autor, 2021.

10.1.5 Precipitación efectiva

Al obtener el ráster del CN y el factor S, se realizó el cálculo de la precipitación efectiva (ver figura 36 - 47 y Anexos 21 - 32), mediante la aplicación de la Ecuación No.1.

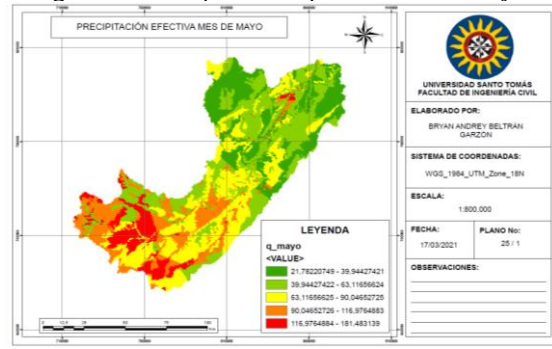
ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Figura 24. Precipitación efectiva mes de Enero.



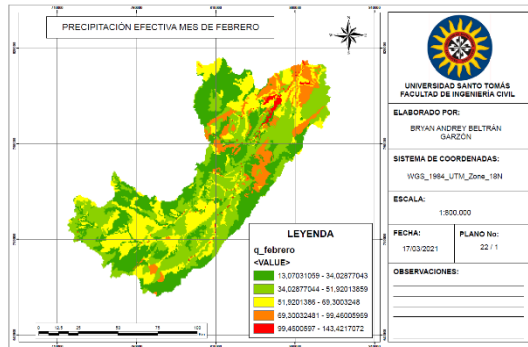
Fuente: por autor, 2021.

Figura 28. Precipitación efectiva mes de Mayo.



Fuente: por autor, 2021.

Figura 25. Precipitación efectiva mes de Febrero.



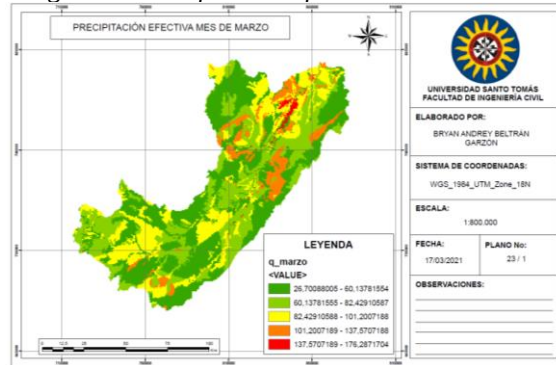
Fuente: por autor, 2021.

Figura 29. Precipitación efectiva mes de Junio.



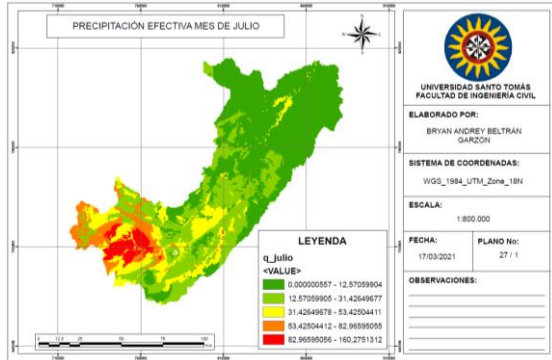
Fuente: por autor, 2021.

Figura 26. Precipitación efectiva mes de Marzo.



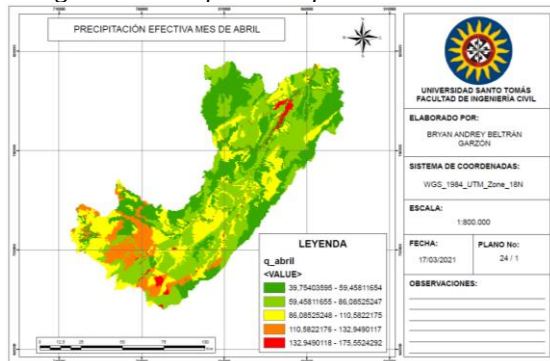
Fuente: por autor, 2021.

Figura 30. Precipitación efectiva mes de Julio.



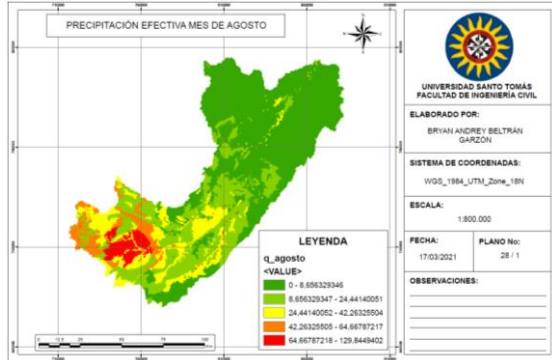
Fuente: por autor, 2021.

Figura 27. Precipitación efectiva mes de Abril.



Fuente: por autor, 2021.

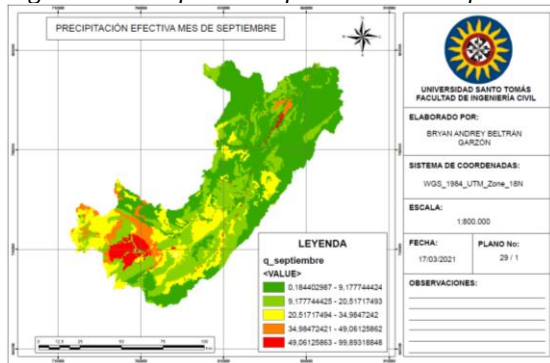
Figura 31. Precipitación efectiva mes de Agosto.



Fuente: por autor, 2021.

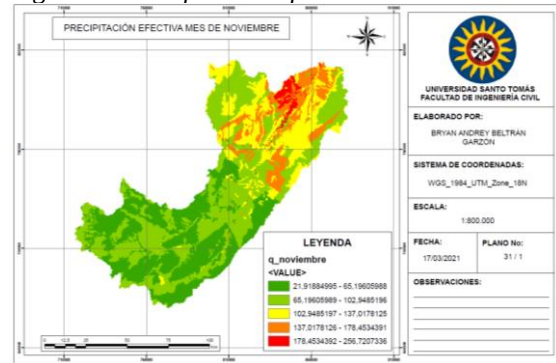
ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Figura 32. Precipitación efectiva mes de Septiembre.



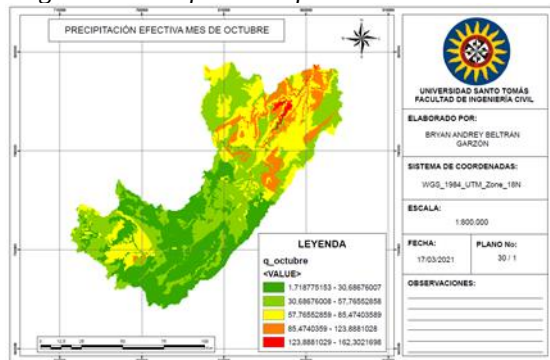
Fuente: por autor, 2021.

Figura 34. Precipitación efectiva mes de Noviembre.



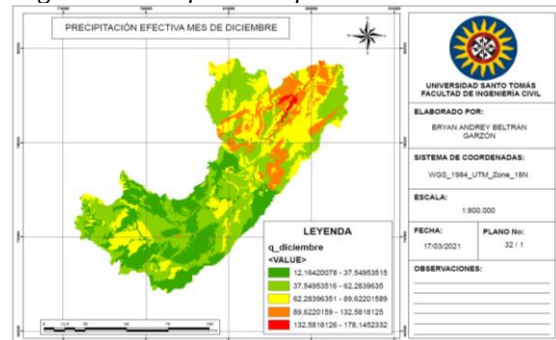
Fuente: por autor, 2021.

Figura 33. Precipitación efectiva mes de Octubre.



Fuente: por autor, 2021.

Figura 35. Precipitación efectiva mes de Diciembre.



Fuente: por autor, 2021.

10.2 Obtención del mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos

10.2.1 Litología (SI)

Para la elaboración del mapa litológico, se tuvo en cuenta la información suministrada por Servicio Geológico Colombiano (SGC), en el atlas geológico del departamento del Huila. En la Tabla 19 se encuentra la respectiva litología asignada para la cuenca.

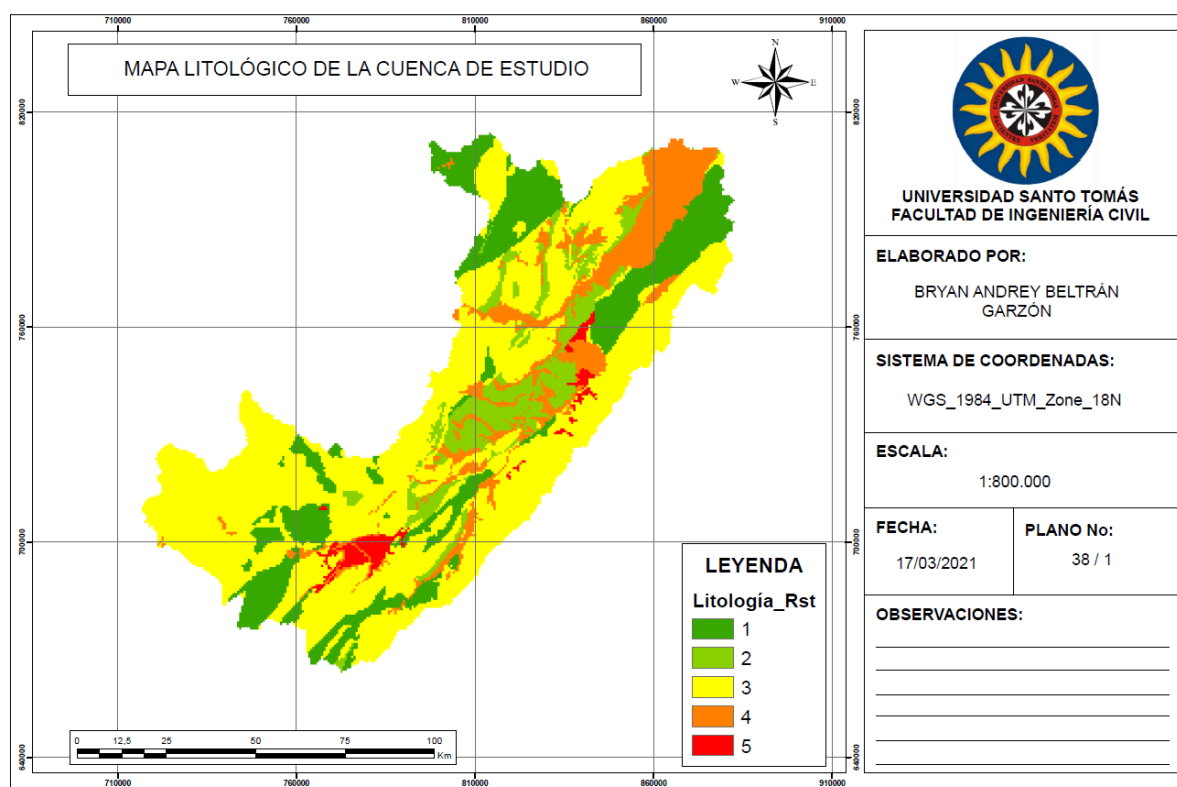
Una vez se introduce la información al software se clasifica de acuerdo con la Tabla 9, con el fin de seguir el método dado por Mora Vahrson.

Tabla 19. *Geología y Litología de la cuenca de estudio.*

GEOLOGÍA	LITOLOGÍA	GEOLOGÍA	LITOLOGÍA
b5b6-Sctm	Roca volcanoclastica de ambiente continental	N2-p	Tobas de cenizas y lapilli intercaladas con lavas de composición andesítica
b6k1?-Sctm	Roca volcanoclastica de ambiente continental	N2Q1-VCc	Roca volcanoclastica de ambiente continental
b6k6-Stm	Roca sedimentaria continental – transicional - marítima	N2-VCc	Roca volcanoclastica de ambiente continental
C-Sctm	Roca sedimentaria continental – transicional - marítima	n4n6-Sc	Roca sedimentaria de ambiente continental
DC-Sctm	Cuarzoarenitas, arcillolitas, lodolitas grises y, ocasionalmente, calizas y conglomerados.	O-Sm	Formación El Hígado
e6e9-Sc	Roca sedimentaria de ambiente continental	PZ-Mm	Complejo Cajamarca
J-Pi	Roca ígnea plutónica de composición intermedia	Q2-l	Depósito paudal
J-VCc	Roca volcanoclastica de ambiente continental	Q2-Vm	Basaltos y andesitas basálticas
k1?k5-Sm	Lodolitas y margas con intercalaciones de calizas, cuarzoarenitas y limolitas silíceas	Q-al	Depósito de aluvión
k6E1-Stm	Formación Pepino	Q-ca	Depósito de abanico
MP3NP1-Mag2	Roca metamórfica de alto grado	Q-g	Depósito glaciar
		Q-p	Depósito paudal
		Q-t	Depósito de terraza
		Q-vc	Formación Popayán, Conjunto Superior
		Q-Vi	Andesitas porfiríticas
		Represa	Cuerpo de agua
		T?-Sc	Formación Payandé
		T3-Sm	Formación Payandé
		T-Mbg3	Esquistos de Mazamorra

Fuente: Elaboración propia

Figura 36. Mapa Litológico de la cuenca de estudio.



Fuente: por autor, 2021.

Al realizar la clasificación, se realiza el mapa litológico (ver figura 48 y Anexo 38) y se obtiene los valores de SI 1, 2, 3, 4, 5, es decir, la cuenca de estudio tiene un valor de susceptibilidad de bajo a muy alto.

10.2.2 Humedad del suelo (Sh):

Para determinar la humedad del suelo, en primera instancia se hizo uso de la precipitación media mensual de las estaciones (ver Tabla 17) brindadas por el IDEAM, posteriormente mediante el software ArcGIS se realizó la clasificación de los valores medios mensuales de las estaciones con el fin de darle un valor entre cero a dos como se muestra en la Tabla 10, esto se obtuvo insertando una tabla de excel con información de las estaciones como el nombre, la longitud, latitud y el valor medio mensual de la precipitación.

Mediante la tabla adjuntada en el software, se procede a utilizar la herramienta Reclassify, con el fin de clasificar los datos directamente en ArcGIS, este proceso debe

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

realizarse 12 veces, puesto que son 12 mapas que se generan, de enero a diciembre.

Obteniendo los valores, se procede a realizar una suma de los mapas reclasificados mediante la herramienta Raster Calculator con el fin de obtener valores de 0 a 24, en la

Tabla 20 se ilustra los valores asignados para cada mes, según la Tabla 11.

Tabla 20. *Valores de Humedad para cada mes.*

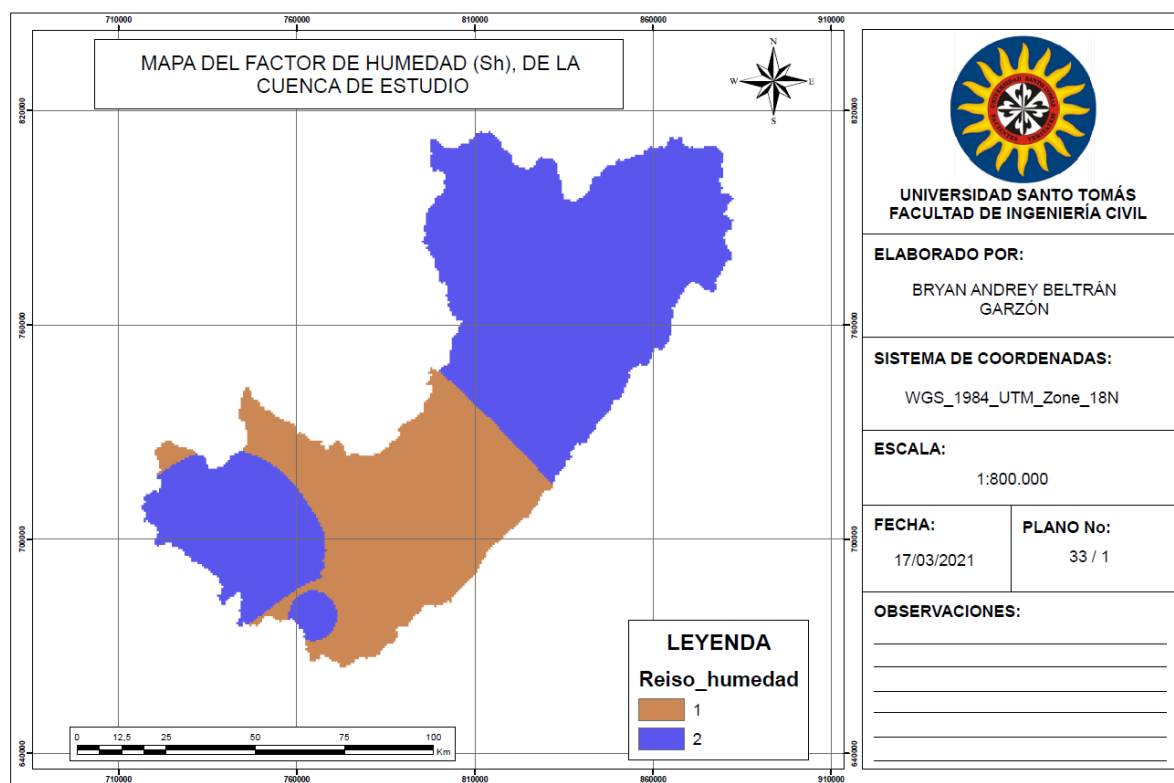
MES	VALOR Sh
ENERO	0 - 1
FEBRERO	0 - 1
MARZO	0 - 1
ABRIL	1
MAYO	0 - 1
JUNIO	0 - 1
JULIO	0 - 1
AGOSTO	0 - 1
SEPTIEMBRE	0
OCTUBRE	0 - 1
NOVIEMBRE	0 - 1 - 2
DICIEMBRE	0 - 1

Nota: Valores de la humedad por cada mes reclasificados según el método propuesto por Mora Vahrson (ver Tabla 12). Elaboración propia.

Mediante los valores obtenidos se procede nuevamente a volver a clasificar el mapa según la Tabla 11 para obtener el valor final de este parámetro, en la figura 49 (Anexo 33).

Se ilustra el modelo final con su respectivo valor que varía de 1 a 2 según el autor Mora Vahrson, estos valores significan que en la cuenca se presentan humedades muy bajas y bajas.

Figura 37. Mapa del factor de Humedad (Sh) de la cuenca de estudio.



Fuente: por autor, 2021.

10.2.3 Pendiente (Sp)

Para evaluar el valor de la pendiente de la cuenca, la cual abarca los dos municipios de estudio se requiere el uso de un DEM obtenido de la página de la Nasa, este debe cargarse en el software, puesto que brinda información de elevaciones del sitio a analizar. Una vez se obtiene, se crean capas base con ayuda de Toolboxes en la sección Spatial Analyst Tools como Fill, flow direction, Flow accomulation.

Para establecer los flujos de agua presente en los municipios, se hace uso de MapAlgebra, de tal manera que realice iteraciones para encontrar otras corrientes de agua, para esto se crea un Raster y se determinan tanto los ríos principales como los ríos secundarios, sin embargo, para obtener los afluentes pertenecientes a una cuenca, se determina el punto de cierre de este creando un Shapefile llamado punto de cierre con unas coordenadas (WGS 1984 zona 18N) y mediante la función Watershed se realiza la delimitación de la cuenca.

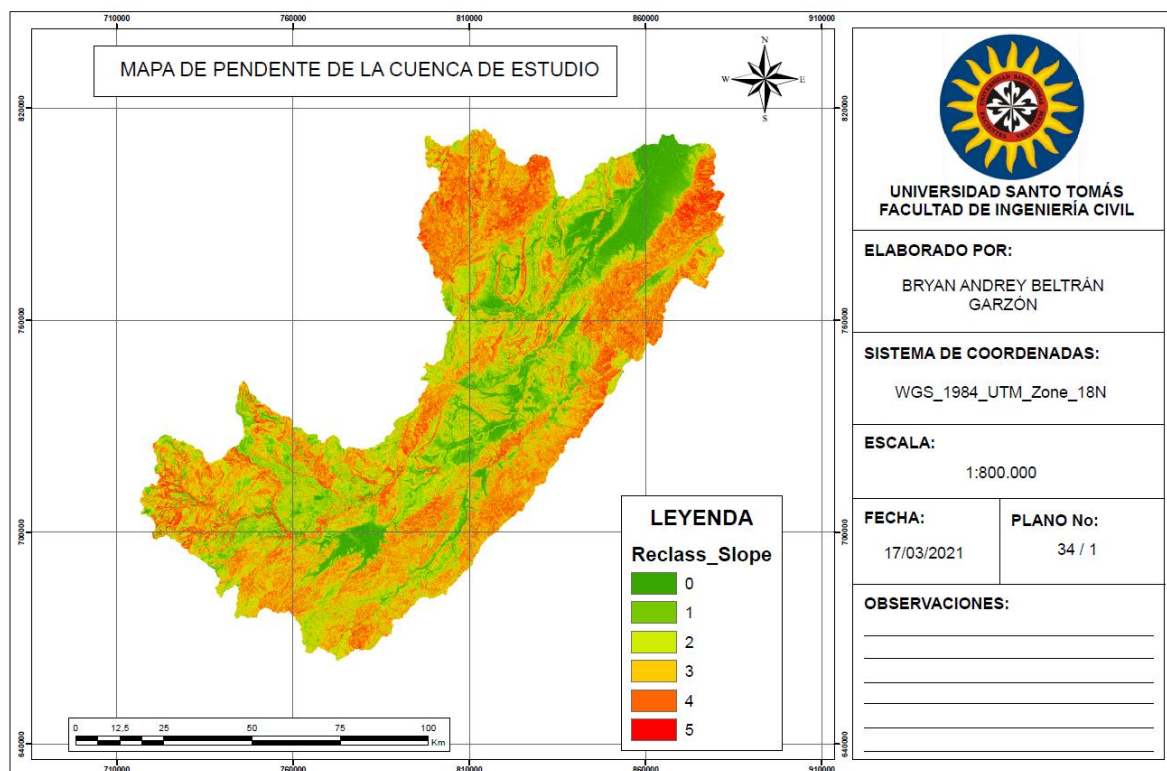
ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Lo obtenido de la delimitación de la cuenca se debe pasar a Raster para proceder a obtener las características morfométricas, donde se puede analizar el comportamiento de las corrientes de agua, y características físicas de estas, de igual manera se puede estimar el comportamiento de estos eventos hidrológicos en la cuenca.

Posterior a esto, se genera la triangulación mediante la creación de curvas de nivel con ayuda de un TIN para definir la parte montañosa y a partir del modelo obtenido, se hizo uso de la función Interpolate Shapes que sirve para correlacionar el TIN con la información de las cuencas.

Para obtener el valor final correspondiente a la pendiente se hizo uso de la opción Slopes, el cual brinda la información del relieve de la cuenca, sin embargo, estos valores obtenidos se modifican o se reclasifican y posteriormente se ponen los rangos que se definen para la pendiente en el método Mora-Vahrson, logrando así el modelo final de pendientes como se observa en la figura 50 (ver Anexo 34).

Figura 38. Mapa de pendiente de la cuenca de estudio.



Fuente: por autor, 2021.

10.2.4 Sismicidad (Ds)

El Instituto Geológico Colombiano brinda diversos mapas, para poder determinar la actividad sísmica de la cuenca, teniendo en cuenta que la cuenca abarca varios municipios se requiere obtener información de cada uno de ellos, por lo que al dar clic en cada municipio se obtiene información como lo es la aceleración pico efectiva (Aa), la cual es obtenida mediante el mapa de sobre amenazas de la Norma Técnica Colombiana (NSR-10), en la siguiente Tabla 21 se ilustra el valor de Aa de cada municipio que contiene la cuenca.

Tabla 21. *Valores de aceleración pico efectiva.*

MUNICIPIO	Aa	MUNICIPIO	Aa
Yaguara	0,25	Altamira	0,3
Hobo	0,3	Guadalupe	0,3
Campoalegre	0,3	La argentina	0,25
Algeciras	0,3	Oporapa	0,3
Rivera	0,3	Neiva	0,25
Palermo	0,25	Santa Maria	0,25
Teruel	0,25	La plata	0,25
Iquira	0,25	Suaza	0,3
Nataga	0,25	Pitalito	0,3
Tesalia	0,25	San Agustin	0,25
Gigante	0,3	Isnos	0,25
Paicol	0,25	Soladoblanco	0,25
Agrado	0,3	Elias	0,3
Garzon	0,3	Timana	0,3
Pital	0,3	Acevedo	0,3
Tarqui	0,3	Palestina	0,3

Nota: Valores de aceleración pico efectiva. Mora, S., & Vahrson, W. G. (1993). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. Tecnología ICE, 3(1), 32-42.

En el software Arcgis, se inserta la tabla y con la ayuda de la herramienta interpolation con la función IDW se interpolan los datos para obtener el valor de Aa en la cuenca oscila entre 2,45 a 3. De acuerdo con la Tabla 22, tanto Pitalito como Campoalegre que son los municipios de estudio poseen una aceleración pico efectiva de 0,3, por lo que poseen una amenaza sísmica alta.

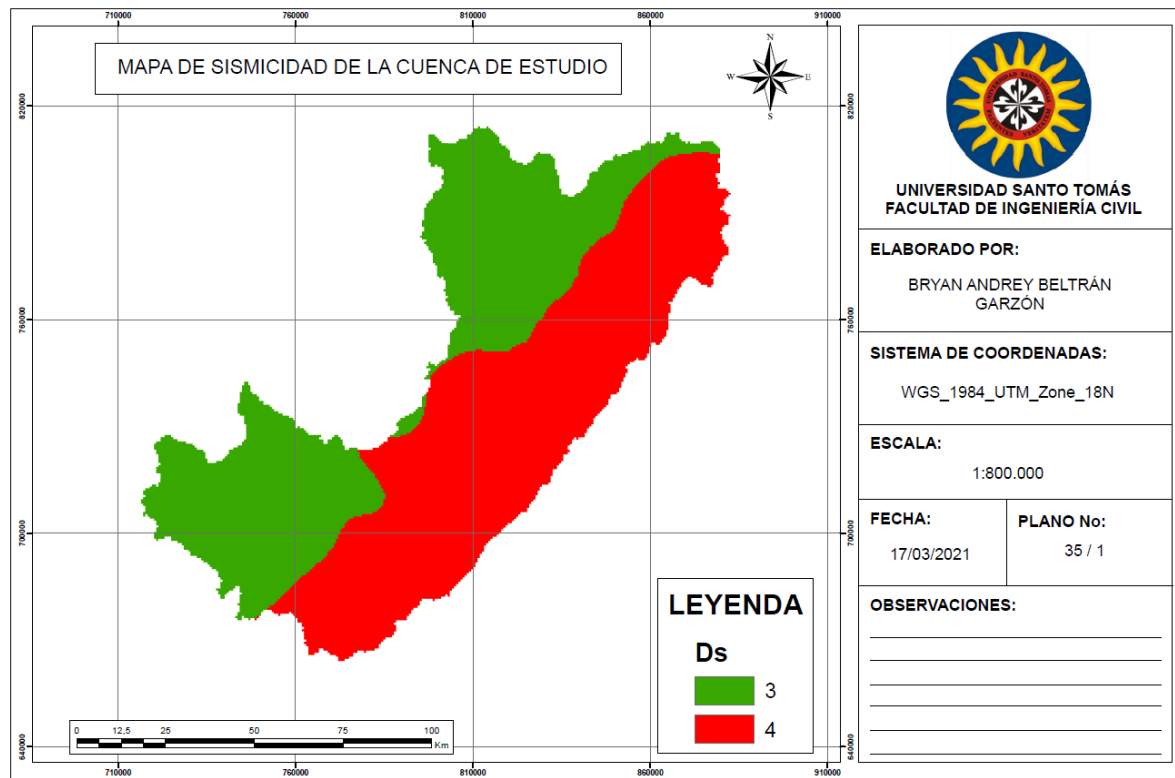
Tabla 22. Valores de Ds y Ts.

MUNICIPIO	Aa	Ts	Ds	MUNICIPIO	Aa	s	Ds
Yaguara	0,25	2,45	3	Altamira	0,30	2,94	4
Hobo	0,30	2,94	4	Guadalupe	0,30	2,94	4
Campoalegre	0,30	2,94	4	La argentina	0,25	2,45	3
Algeciras	0,30	2,94	4	Oporapa	0,30	2,94	4
Rivera	0,30	2,94	4	Neiva	0,25	2,45	3
Palermo	0,25	2,45	3	Santa Maria	0,25	2,45	3
Teruel	0,25	2,45	3	La plata	0,25	2,45	3
Iquira	0,25	2,45	3	Suaza	0,30	2,94	4
Nataga	0,25	2,45	3	Pitalito	0,30	2,94	4
Tesalia	0,25	2,45	3	San Agustin	0,25	2,45	3
Gigante	0,30	2,94	4	Isnos	0,25	2,45	3
Paicol	0,25	2,45	3	Soladoblanco	0,25	2,45	3
Agrado	0,30	2,94	4	Elias	0,30	2,94	4
Garzon	0,30	2,94	4	Timana	0,30	2,94	4
Pital	0,30	2,94	4	Acevedo	0,30	2,94	4
Tarqui	0,30	2,94	4	Palestina	0,30	2,94	4

Nota: Valores de Ds y Ts. Mora, S., & Vahrson, W. G. (1993). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. *Tecnología ICE*, 3(1), 32-42.

Para obtener el valor final de este factor se realiza el producto entre la aceleración Aa con la gravedad de $9,81 \text{ m/s}^2$, con el fin de pasar Aa que está en porcentaje a m/s^2 , para obtener el resultado en ArcGIS se hace uso de Raster Calculator, donde el mapa obtenido de Aa se multiplica por el valor de la gravedad, teniendo así que el valor del detonante sísmico (Ds) varía entre 3 y 4, según la Tabla 13 con una clasificación entre baja y moderada según Mora – Vahrson en toda la cuenca, como se evidencia en la figura 51 (ver Anexo 35).

Figura 39. Mapa de sismicidad de la cuenca de estudio.



Fuente: por autor, 2021.

10.2.5 Intensidad de lluvias (DII)

La intensidad de lluvias se determina mediante el valor de la precipitación máxima en 24 horas de las estaciones solicitadas al IDEAM (ver Tabla 16), como las estaciones cuentan con información mayor a diez años, se requiere utilizar el método de Gumbel, para un periodo de retorno de 100 años.

El método de Gumbel consiste en determinar el valor de X , que se obtiene mediante la ecuación 6, y que representa la precipitación para cada estación con un periodo de retorno de 100 años.

$$X = -\ln(-\ln(F(x))) * \alpha + u \quad (6)$$

Donde:

$F(x)$: Probabilidad de que se presente un valor igual o menor que x .

α : Depende de la desviación estándar y de σ_y .

u: Depende de la media aritmética, μ_y y de α .

Mediante la ecuación 7, se procede a calcular la expresión α que depende de las variables σ_y y S_x (desviación estándar de la muestra). Cabe aclarar que los valores de σ_y y μ_y , se obtiene de la Tabla 23, donde se debe identificar el número de datos con los que se cuenta o se tenga información y ubicarlo en la tabla; si se tiene un número de datos que no se encuentra en la tabla se deberá interpolar los valores, con el fin de encontrar el valor exacto.

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{S_x} \quad (7)$$

Finalmente, para el cálculo de la expresión (u), se utiliza la ecuación 8 que depende de la media aritmética $\bar{x}$, μ_y y de α .

$$u = \bar{x} - \frac{\mu_y}{\alpha} \quad (8)$$

Tabla 23. *Valores de las variables σ_y y μ_y .*

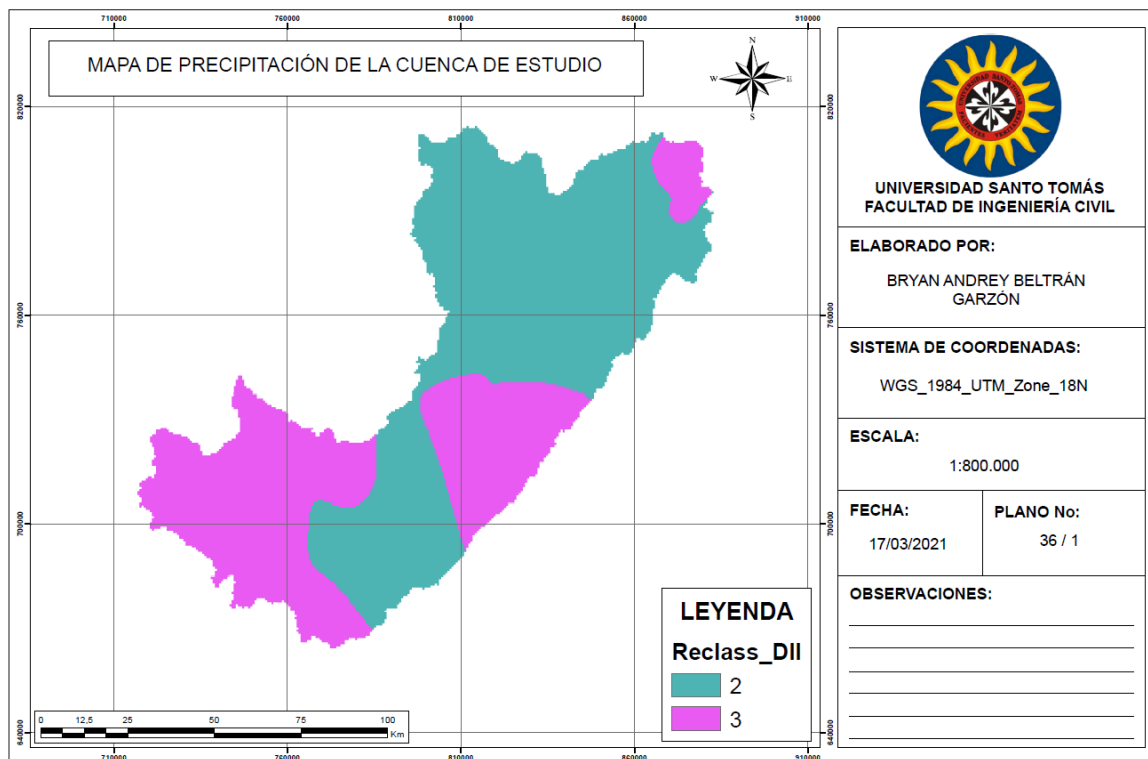
No. DATOS	σ_y	μ_y
10	0,4952	0,9496
15	0,5128	1,0206
20	0,5236	1,0628
25	0,5309	1,0914
30	0,5362	1,1124
35	0,5403	1,1285
40	0,5436	1,1413
45	0,5463	1,1518
50	0,5485	1,1607
55	0,5504	1,1682
60	0,5521	1,1747
65	0,5535	1,1803
70	0,5548	1,1854
75	0,5559	1,1898
80	0,5569	1,1938
85	0,5578	1,1974
90	0,5586	1,2007

No. DATOS	σ_y	μ_y
95	0,5593	1,2037
100	0,5600	1,2065

Nota: Valores de las variables σ_y y μ_y . Sánchez, J. (2013). Cálculos estadísticos en hidrología. Universidad de Salamanca).

Una vez se obtenga el valor de X, se clasifica según la Tabla 14, para así generar el mapa de intensidad de lluvia. Para poder realizar este mapa, se inserta la tabla de precipitación en 24 horas para cada una de las estaciones en el software ArcGIS, seguido de esto se generan las isoyetas, para posteriormente reclasificarlo mediante la herramienta Reclassify. Finalmente se obtiene el resultado para la cuenca de estudio la cual tiene un factor de 2 clasificado (ver figura 52 y Anexo 36).

Figura 40. Mapa de Precipitación de la cuenca de estudio.



Fuente: por autor, 2021.

10.2.6 Susceptibilidad a deslizamientos (H)

Para identificar la cuenca en qué potencial a deslizamiento se encuentran, se realiza el producto ilustrado en la ecuación 3, donde se ilustra la manera de determinar la susceptibilidad a deslizamientos según Mora - Vahrson, para realizar el respectivo cálculo, se utiliza la herramienta Raster Calculator en el software.

Una vez realizado el cálculo, se deben clasificar los valores según la Tabla 24 mediante la herramienta Reclassify, obteniendo así valores de susceptibilidad de que van desde 1 hasta 4, es decir la cuenca según la Tabla 8, presenta un grado de susceptibilidad a movimientos en masa de muy bajo a alto como se evidencia en la figura 53 (Anexo 37), que es el modelo final de la susceptibilidad de la cuenca.

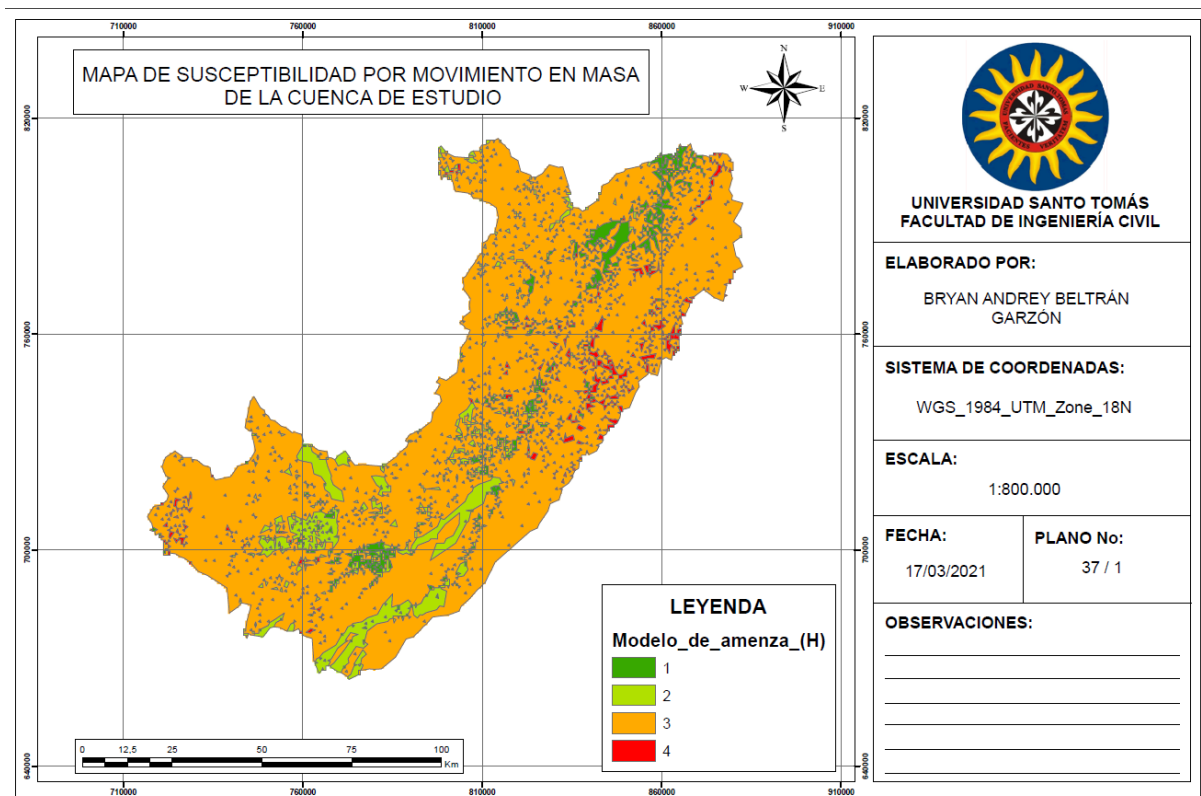
Tabla 24. *Clasificación de los valores para susceptibilidad de deslizamiento.*

Valor de la ecuación (H)	Clase	Clasificación
< 6	I	Muy bajo
7 – 32	II	Bajo
33 – 162	III	Moderado
163 – 512	IV	Alto
>512	V	Muy alto

Nota: Unidades geomorfológicas presentes en un grado de susceptibilidad alto (H). Mora, S., & Vahrson, W. G. (1993). "Determinación a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. Tecnología ICE, 3(1), 32-42.

Cabe destacar que en la zona de estudio se debe tener cuidado a la hora de adelantar obras civiles, ya que las condiciones del terreno se pueden ver alteradas generando así posibles deslizamientos debido a el cambio en los esfuerzos del suelo.

Figura 41. Mapa de sismicidad de la cuenca de estudio.



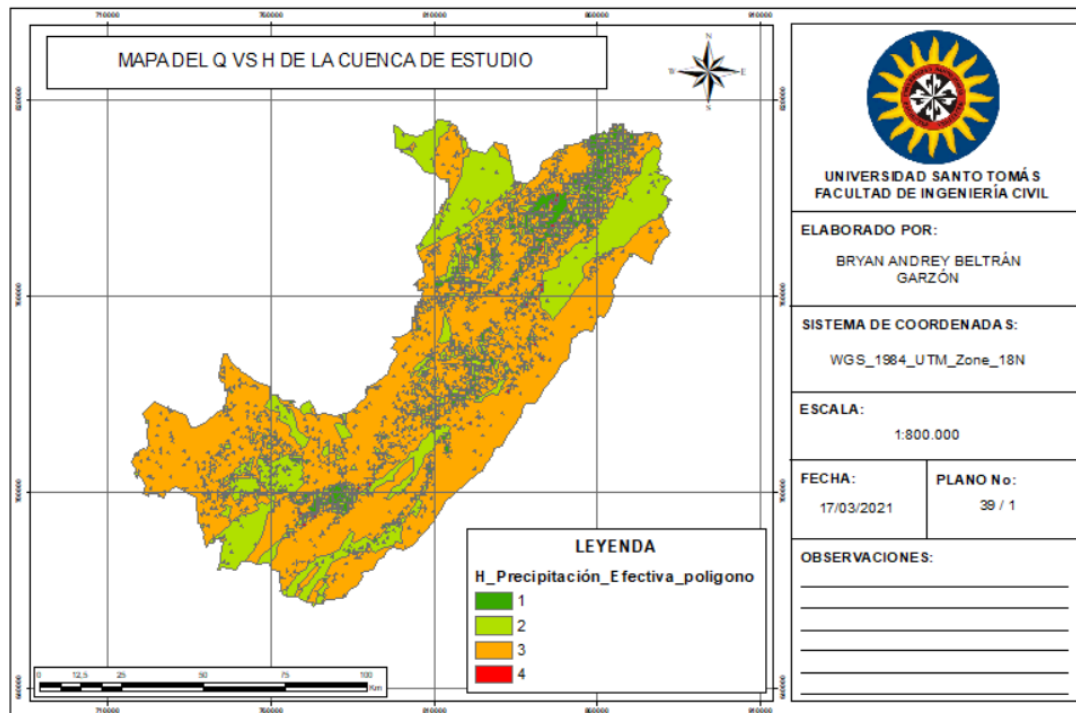
Fuente: por autor, 2021.

10.3 Precipitación Efectiva vs Susceptibilidad a Deslizamientos (H)

Al combinar la información de los métodos de número de curva y el método de Mora – Vahrson, se pudo analizar, que el modelo de amenaza presenta una disminución significativa del potencial del deslizamiento, pues en la figura 53 en donde solo se analiza el metodología de Vahrson, obtuvo un valor máximo de 293,92, mientras en la figura 54, al unir la información de los dos métodos, se obtuvo un valor máximo de 184,59, presentando un disminución de 109,33 como se muestra en la figura 55, es decir, que el potencial de deslizamiento disminuye debido a que la escorrentía directa, se le resta a la humedad planteada por Mora Vahrson, pues no todo lo que se precipita se infiltra a través del suelo.

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

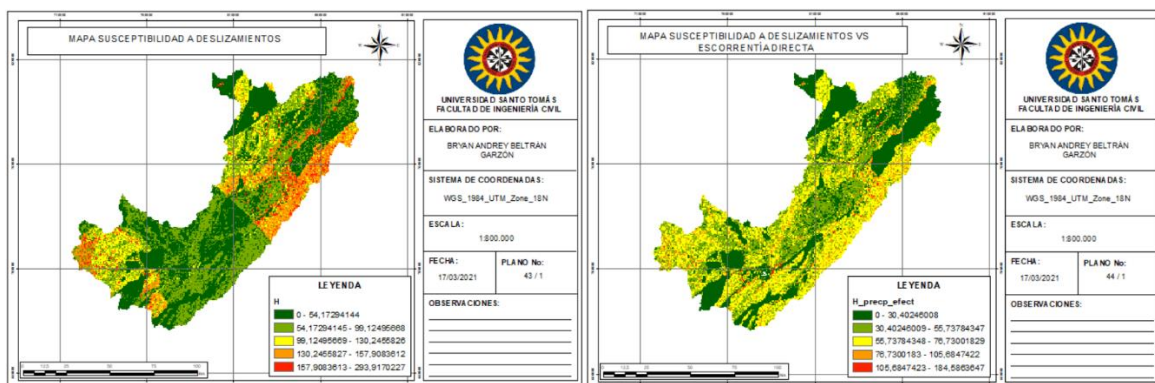
Figura 42. Mapa del Q (Precipitación efectiva) vs H (Susceptibilidad a deslizamientos) de la cuenca de estudio.



Fuente: por autor, 2021.

En la figura 55, en el mapa de la izquierda se observan los valores obtenidos para el modelo de susceptibilidad a deslizamientos y en la imagen de la derecha los valores de la unión de los dos métodos (SCS y Mora-Vahrson), antes de reclasificarlo según Mora-Vahrson.

Figura 43. Comparación de los valores obtenidos por Mora-Vahrson y Sistema de Conservación de Suelos.



Fuente: por autor, 2021.

10.4 Geomorfología vs Susceptibilidad a deslizamientos

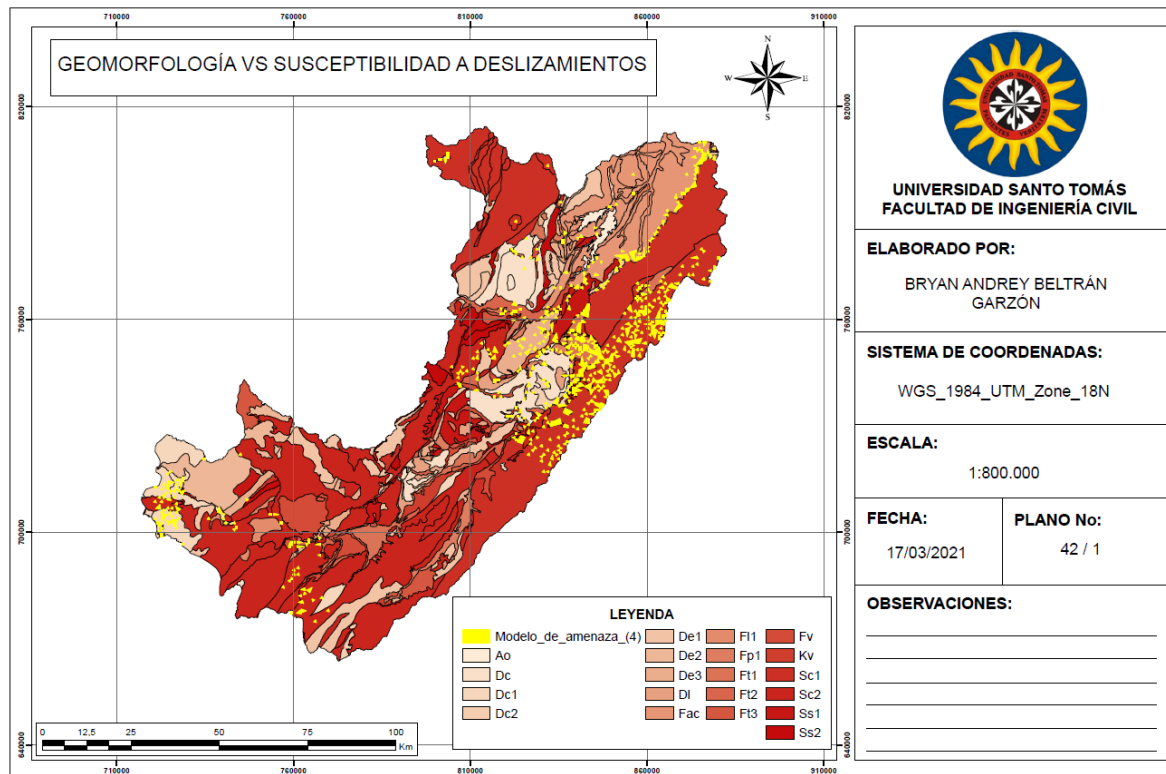
En la figura 55 (Anexo 42), se observan los valores en amarillo, los cuales corresponden a una susceptibilidad alta en donde se obtuvo un valor máximo de 4, como se puede ver en la figura 53. Desde el punto de vista geomorfológico se puede ver que las unidades que presentan un riesgo de deslizamiento más alto son las mencionadas en la Tabla 25.

Tabla 25. Unidades geomorfológicas presentes en grado de susceptibilidad alto.

H	UNIDAD GEOMORFOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
4	Dc1	Escarpe estructural, Colina coluvial baja.
	Dc2	Ladera Estructura, Colina coluvial media.
	De1	Ladera denudacional estable.
	De3	Ladera denudacional muy activa.
	Fac	Valle coluvio aluvial.
	Fp1	Abanico aluvial creciente, Escarpe estructural.
	Ft1	Terraza aluvial reciente.
	Ft2	Terraza aluvial subreciente.
	Ft3	Terraza aluvial antigua.
	Fv	Vega de divagación.
	Sc1	Ladera Estructura.
	Sc2	Escarpe estructural.

Nota: Unidades geomorfológicas presentes en un grado de susceptibilidad alto (H). Elaboración propia.

Figura 44. Mapa de la geomorfología vs Susceptibilidad por deslizamientos.



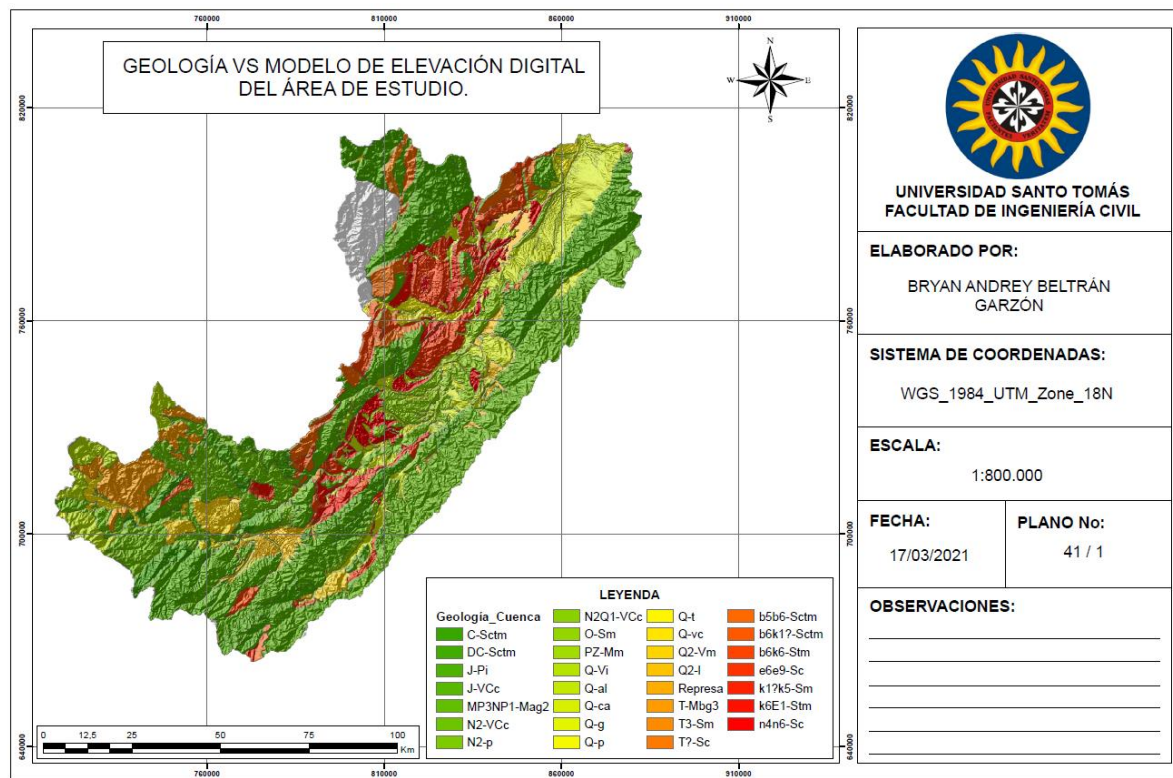
Fuente: por autor, 2021.

10.5 Geología vs modelo de elevación digital del área de estudio

Al superponer la capa de la geología con la sombra del DEM, la cual se obtuvo a partir de la herramienta Spatial analyst tools en el apartado de Surface, se selecciona la opción Hillshade, la cual permite dar una posición apropiada del sol. Al realizar esta acción se obtiene una forma más detallada (real) la geología del terreno como se puede ver en la figura 56 (Anexo 41).

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Figura 45. Mapa de la geología vs modelo de elevación digital.



Fuente: por autor, 2021.

11 Conclusión

El área de estudio se extiende a lo largo del departamento del Huila, como se ve en la figura 1. La cuenca posee una extensión de 10390 km², es decir ocupa el 51,14% del área del departamento del Huila. En su geomorfología presenta 20 tipos de unidades geomorfológicas, entre las cuales 12 de ellas presentan una susceptibilidad alta a deslizamientos, como se puede observar en la figura 56 y en la Tabla 25.

El número de curva analiza las condiciones en las que se encuentra un territorio, acorde a su hidrología. Este método puede ser utilizado con un indicador de impacto ambiental. Este método, hace que la esorrentía directa o precipitación efectiva sea más precisa. Este parámetro se calcula en función de cuatro variables importantes, las cuales están directamente relacionadas con los movimientos en masa, estas variables son el tipo de suelo, el uso del suelo, cobertura vegetal y finalmente la precipitación.

El número de curva, medio de la cuenca arrojó un resultado de 70, es decir, que estas condiciones favorecen a los procesos erosivos reduciendo la productividad del suelo, pues al obtener un alto grado de esorrentía, se presenta mayor pérdida de sedimentos, nutrientes y humedad.

Por otro lado, la metodología de Mora – Vahrson, está asociada a los factores que desarrollan un papel importante a la hora de los movimientos en masa, estos factores ayudan a realizar un análisis morfodinámico en la zona de estudio. Para este caso los factores que permiten calcular la susceptibilidad por deslizamientos son la litología del terreno, la humedad, la pendiente, la sismicidad y la intensidad de lluvia; cabe resaltar que este método es una aproximación a lo que pueda suceder no es del todo verídico.

En la figura 54, al unir la información de los dos métodos, se obtuvo un valor de susceptibilidad por deslizamiento máximo de 184,59, el cual presenta una reducción de 109,33 con respecto al presentado en la figura 53, es decir, que el potencial de

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

deslizamiento disminuye debido a que la esorrentía directa se le resta a la humedad planteada por Mora Vahrson, pues no todo lo que se precipita se infiltra a través del suelo.

Al observar la figura 53, se analiza que los extremos de la cuenca son los que presentan más riesgo de deslizamiento pues presenta el mayor rango de calificación obtenido por este modelo de susceptibilidad, donde el riesgo se considera como alto.

12 Referencias

- Almeida, O. P., D'howitt, M. C., & Castelo, C. A. J. (2014). *Determinación de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos aplicando lógica fuzzy vs mora vahrson, en el área monjas–itchimbía–panecillo, del distrito metropolitano de quito, (dmq) y simulación en 3d. Universidad de las Fuerzas Armadas.*
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8231/1/AC-GMA-ESPE-047846.pdf>
- Barrantes Castillo, G., Barrantes Sotela, O. & Nuñez Román, O. (2011). *Efectividad de la metodología mora-vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de cinchona, costa rica. Revista Geográfica De América Central, 42(2), 141-162.*
<https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/3970>
- Camacho, D., Chaves, J., & Murillo, D. (2005). *Diagnóstico de la susceptibilidad al deslizamiento e inundación, análisis del contexto sísmico y reconocimiento de peligros volcánicos para el cantón de montes de oca: Una contribución al plan regular del municipio. Revista Geológica de América Central, (32), 79-80.*
<https://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/CEDO-CRID%20V4/pdf/spa/doc2978/doc2978.htm>
- Carvajal, J. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Colección de Guías y Manuales. Servicio Geológico Colombiano.*
<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/Propuesta%20de%20estandarizacion.PDF>
- Chaverri-Molina, I. F. (2016). *Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología mora-vahrson, en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica.*

https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/7054/Zonificacion_susceptibilidad_deslizamiento_metodologia_mora_vahrson.pdf?sequence=1&isAllowed=

Corominas, J. & García Yagüe A. (1997). Terminología de los movimientos de ladera. I V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Cuarto Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. Granada, España, 3, 1051-1072.

Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin De L'Association Internationale De Géologie De L'Ingénieur, 43(1), 27-29. Doi: 10.1007/BF02590167.

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides: Investigation and mitigation. chapter 3-landslide types and processes. Transportation Research Board Special Report, (247). <https://trid.trb.org/view/462501>

Figuerola Quiroga, L. P. (2016). Diseño de un sistema de información geográfico en arcgis permiso de estudio del recurso hídrico en jurisdicción de la oficina territorial zenufana, corantioquia. [tesis de pregrado]. Areanadina. <https://digitk.areandina.edu.co/handle/areandina/1018?show=full>

Galindo Serrano, J., Alcántara-Ayala, I. (2015). Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: Análisis de susceptibilidad en la sierra nororiental de puebla, méxico. Investigaciones Geográficas, n° (88), pp. 11-21. Doi:10.14350/rig.43790.

García Álvarez, G. A., & Rache Rodríguez, J. A. (2018). Zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa en la microcuenca tabacal-municipio de la palma, departamento de Cundinamarca. [Tesis de Especialistas en Sistemas de Información Geográfica]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/14674/Garc%C3%ADa%20%C3%81lvarezGustavoAdolfo2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Gemma, G. (2007). *Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias Para Las Comunidades Andinas*, 4(1), 432.
<https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/2792;jsessionid=C32BB059DA DA39F4482C9DACA6D4C2D4>
- Goodman, R. E. & Bray, J. W., (Boulder, CO: American Society of Civil Engineers.), 1976. *Toppling of rock slopes, Proceedings of the specialty conference rock engineering for foundations and slopes*, pp. 201-234.
- Hernández Pereira, Y., & Medina González, H. (2012). *Estimación de la humedad del suelo mediante técnicas de asimilación de datos. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(4), 30-35.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2071-00542012000400005&lng=es&nrm=iso
- Hoek, E. and Bray, J.W., 1981. *Rock slope engineering. Institution of Mining and Metallurgy, London.*
- Hutchinson, J. N. (1988). *General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: C. Bonnard (ed.), Proceedings Fifth International Symposium on Landslides 1: 3–35. Balkema.*
- Montserrat, F., Joaquín , R., & Teodoro, E. (1995). *Generación Automática del Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica. Ingeniería del Agua*, 43-58.
https://www.researchgate.net/publication/39431260_Generacion_automatica_del_numero_de_curva_con_sistemas_de_informacion_geografica
- Mora, R., Mora, S. & Vahrson, W. (1992). *Macrozonificación de la amenaza de deslizamientos y resultados obtenidos en el área del valle central de Costa Rica.- Escala 1:286 000. Cepredenac.*

https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/7054/Zonificacion_susceptibilidad_deslizamiento_metodologia_mora_vahrson.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Mora, S., & Vahrson, W. G. (1993). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. *Tecnología ICE*, 3(1), 32-42.
https://www.researchgate.net/publication/283730363_Determinacion_a_priori_de_la_amenaza_de_deslizamientos_utilizando_indicadores_morfodinamicos

Municipio de Campoalegre. (2016). Reformulación Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT). Municipio de Campoalegre, Huila. <https://www.campoalegre-huila.gov.co/Transparencia/Plan%20basico%20Ordenamiento/PBOT/04%20FORMULACION%20PBOT%20CAMPOALEGRE%202016.pdf>

Obregón, C., & Lara, J. (2014). Aplicación del mapa de susceptibilidad por procesos de geodinámica superficial a la gestión territorial. *Revista Del Instituto De Investigación De La Facultad De Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica Y Geográfica*, 17(33).
<https://doi.org/10.15381/iigeo.v17i33.11500>

Persichillo, M. G., Bordini M. & Meisina, C. (2016). The role of land use changes in the distribution of shallow landslides. *Science of the Total Environment, Department of Earth and Environmental Sciences, University of Pavia*. 924-938.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27665452/>

Román, A. Q., & Feoli-Boraschi, S. (2018). Comparación de la metodología mora-vahrson y el método morfométrico para determinar áreas susceptibles a deslizamientos en la microcuenca del río macho, costa rica. *Revista Geográfica De América Central*, 2(61), 17-45.
<https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/10677>

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Sánchez, J. (2013). *Cálculos estadísticos en hidrología*. Universidad de Salamanca).

<https://docplayer.es/25578326-Calculos-estadisticos-en-hidrologia.html>

Servicio Geológico Colombiano [SGC] (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano, SGC.

https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/1642_Guia-Metodologica-27-07-2016-SinGuias.pdf

Servicio Geológico Colombiano [SGC] (2017). *Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1: 25.000*. Servicio Geológico Colombiano, SGC. [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf)

Sistemas de Información geográfica. [SIG]. (2015). *¿Qué son geodatos? Sistemas de Información geográfica*. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/main/manage-data/what-is-geodata.htm>

Universidad Nacional de Colombia. (2010). *Deslizamientos, producto de los cambios climáticos*. Agencia de Noticias. Universidad Nacional de Colombia. de: <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/deslizamientos-producto-de-los-cambios-climaticos.html>

Varnes D.J. (1978). *Slope movement types and processes*. Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, pp.11-33. <https://onlinetpubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>

Vega, J. A., & Hidalgo, C. A. (2016). *Quantitative risk assessment of landslides triggered by earthquakes and rainfall based on direct costs of urban buildings*. *Geomorphology*, 273, pp. 217-235. Doi: <https://doi-org.craigital.usantotomas.edu.co/10.1016/j.geomorph.2016.07.032>

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HIDROLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Ven Te C., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada (Traducción al español ed.)*. Nomos S.A. <https://baixardoc.com/documents/hidrologia-aplicada-ven-te-chow-5cae52662105a>

Villegas, P. (2017, 22 de enero). *Calcular número de curva con arcgis*. Agua y SIG. <https://aguaysig.com/calcular-numero-de-curva-con-arcgis/>

Wolf, P. R. (2009). *Topografía*. Alfaomega.