



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y  
AMBIENTALES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES  
RENOVABLES**

**ANÁLISIS DE UMBRALES DE PRECIPITACIÓN EN PROCESOS DE  
DESLIZAMIENTO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO MATAQUÍ -  
CANTÓN PIMAMPIRO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO/A EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

**AUTORES:**

Genesis Victoria Robles Ayala

Mauricio Guiseppe Rosero Castillo

**DIRECTOR:**

Ing. Darío Paúl Arias Muñoz MSc.

Diciembre, 2022



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución N°. 173-SE-33-CACES-2020  
Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales  
**Carrera Recursos Naturales Renovables**

**CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Ibarra, 2 de diciembre de 2022

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: "ANÁLISIS DE UMBRALES DE PRECIPITACIÓN EN PROCESOS DE DESLIZAMIENTO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO MATAQUÍ - CANTÓN PIMAMPIRO.", de autoría que los señores ROBLES AYALA GENESIS VICTORIA y ROSERO CASTILLO GUISEPPE MAURICIO estudiantes de la Carrera de INGENIERÍA RECURSOS NATURALES RENOVABLES el tribunal tutor CERTIFICAMOS que los autor/a o autores ha procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

**TRIBUNAL TUTOR**

**FIRMA**

Ing. Paúl Arias, MSc.  
**DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN**

Ing. Gabriel Jácome, MSc.  
**MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN**

Ing. Juan Guaman, MSc.  
**MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TRITULACIÓN**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

| DATOS DE CONTACTO    |                               |                 |            |
|----------------------|-------------------------------|-----------------|------------|
| CÉDULA DE IDENTIDAD: | 1004012488                    |                 |            |
| APELLIDOS Y NOMBRES: | Robles Ayala Genesis Victoria |                 |            |
| DIRECCIÓN:           | Mojanda 9-77 y Cunro          |                 |            |
| EMAIL:               | gvroblesa@utn.edu.ec          |                 |            |
| TELÉFONO FIJO:       | -                             | TELÉFONO MÓVIL: | 0995823295 |

| DATOS DE CONTACTO    |                                  |                 |            |
|----------------------|----------------------------------|-----------------|------------|
| CÉDULA DE IDENTIDAD: | 0402018212                       |                 |            |
| APELLIDOS Y NOMBRES: | Rosero Castillo Guisepe Mauricio |                 |            |
| DIRECCIÓN:           | Hernan Gonzáles y Cory Cory      |                 |            |
| EMAIL:               | gmroseroc@utn.edu.ec             |                 |            |
| TELÉFONO FIJO:       | -                                | TELÉFONO MÓVIL: | 0939397622 |

| DATOS DE LA OBRA            |  |
|-----------------------------|--|
| TÍTULO:                     | ANÁLISIS DE UMBRALES DE PRECIPITACIÓN EN PROCESOS DE DESLIZAMIENTO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO MATAQUÍ – CANTÓN PIMAMPIRO. |
| AUTOR (ES):                 | GENESIS VICTORIA ROBLES AYALA<br>GUISEPPE MAURICIO ROSERO CASTILLO   |
| FECHA: DD/MM/AAAA           | 02/12/2022   |
| SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO |  |
| PROGRAMA:                   | <input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO   |
| TÍTULO POR EL QUE OPTA:     | INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES  |
| ASESOR /DIRECTOR:           | MSc. Paúl Arias  |

## 2. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 2 días del mes de diciembre de 2022

### LOS AUTORES:



Robles Ayala Victoria Robles  
CI: 1004012488



Giuseppe Mauricio Rosero Castillo  
CI: 0402018212

## ***Agradecimiento***

*A nuestras familias, por ser la guía y el soporte en cada uno de nuestros días como estudiantes. Existieron días en que todo parecía oscuro, pero ellos, siempre estuvieron ahí. Un gracias no es suficiente, esperamos que este logro académico, sea un sinónimo de nuestra gratitud hacia ustedes.*

*A la Universidad Técnica del Norte, por abrirnos las puertas de su institución y otorgarnos los conocimientos, imprescindibles en nuestra vida profesional.*

*También a los docentes y personal administrativo de la casona versitaria.*

*Al MSc Paul Arias, por todo su apoyo como docente, no solamente como director de tesis, sino a lo largo de toda la carrera. Gracias por su apoyo en el Congreso Redu y por guiarnos en la publicación de nuestro proyecto de jabón ecológico. Es un gran docente y que la fuerza lo acompañe maestro.*

*Al Bio. Renato Oquendo, coordinador de la carrera, sin duda uno de los mejores docentes que hemos tenido el agrado de conocer. Su responsabilidad, cumplimiento y entrega a la carrera, es digno de admirar. Le deseamos lo mejor.*

*A nuestros asesores, MSc Gabriel Jácome, le agradecemos su rectitud y severidad, sabemos que toda su exigencia está orientada a hacernos mejores profesionales. Msc Juan Guamán, por toda su ayuda en la parte técnica de la tesis.*

*A todas y cada una de las personas que hicieron que esta investigación sea posible.*

***Genesis Victoria Robles Ayala***

***Guisepe Mauricio Rosero Castillo***

## ***Dedicatoria***

*¡Mira mami, lo logramos!*

*Esta investigación se la dedico a mi madre María, quién me enseñó a salir adelante y siempre luchar por mis sueños. Has sido y serás siempre mi más grande inspiración, contigo aprendí que todo es posible por más difícil que sea y que juntas podemos todo. A la mujer que más respeto y admiro, por ti y para ti, Madre mía.*

*A mis hermanos Estefanía y Steven, mi sobrino Dante, quienes siempre aportaron para que yo alcance este sueño. Y de manera especial, a mi pequeño ángel del cielo. Ustedes han sido parte fundamental de este sueño, hemos estado en las buenas y malas, hemos salido adelante por más golpes que nos ha dado la vida, aquí estamos, seguimos y seguiremos.*

*A mi padre Pepe, por todo lo que de ti aprendí, por darme tu mano cuando he necesitado y por enseñarme las más grandes lecciones de vida. Y aprovecho para disculparme por todo. Papi, lo estamos logrando sin ti.*

*A mi familia entera, de manera especial a mi tía Luisa Ayala y toda su familia y a mi tía Alba Ayala. Les agradezco por todo su apoyo, sepan que sin su ayuda no lo hubiera logrado.*

*Alexander, por su apoyo incondicional en estos últimos 2 años a lograr esto y a su familia por siempre brindarme una mano. ¡Alex, vamos por más!*

*Y para todas aquellas personas que formaron parte de mi vida y que aportaron en mi educación, cada acción que realizaron fue de mucha importancia.*

*A mis amigos: Karen, Toño, Nicolás, Nicole Riv. y al mejor clan que la universidad me pudo dar, Rosero – Simbaña.*

*A mi compañero de tesis Mauricio, aunque tenemos distintos pensamientos, hemos logrado culminar esta etapa. ¡Suerte en tu vida!*

*De manera especial, a mi tutor Ing. Paul Arias por ser un guía durante todo este proceso de investigación y aprendizaje.*

***Genesis Victoria Robles Ayala***

## ***Dedicatoria***

*Dedico esta investigación a mi hermana, Diana Rosero, sin duda no sería la persona que soy, si no fuera por ella. No puedo creer que ya no estés aquí, pero cada día que pasa, me esfuerzo por ser el hombre que siempre quisiste que sea. Ojalá estuvieras aquí ahora, en este momento, viendo este triunfo. Te extraño mucho.*

*A mi madre Martha y mi hermana Micaela. Todo lo que hago, lo hago por ustedes. Hemos soportado momentos muy difíciles, algunos que nos marcaron para siempre. Pero dicen que la noche es más oscura justo antes del amanecer, y hemos sabido salir adelante a pesar de todo. Son mi vida entera, no lo hubiese logrado sin ustedes.*

*A mis sobrinos, Arleth y Joshua, son el legado de mi hermana, sus cualidades y sus fortalezas están impregnadas en ustedes. A mi cuñado Patricio, a quien siempre admirado, es mi ejemplo a seguir. A mi abuelita Clara, mi tía Mónica y mi tío Miguel, siempre los llevo conmigo, los quiero mucho.*

*A mis amigos, mis hermanos de otra madre, Alexander, Juan Pablo, Darío, Melanee, Christopher y Nilo. Que, aunque la distancia y el tiempo nos han separado, siempre están presentes. También a mis amigos de la universidad, los miembros del clan Rosero-Simbaña, son los mejores. Pero sobre todo a Fátima y Nicole R., las quiero un montón. Y por supuesto, a mi compinche de Natural Friends, Stefany.*

*Y finalmente, a mi compañera de tesis Génesis. Aunque tenemos diferente manera de ver y hacer las cosas, logramos hacer un buen trabajo de investigación. Sé, que en el futuro serás una gran profesional.*

*“A veces la ciencia es más arte que ciencia. Mucha gente no entiende eso”  
(Rick Sánchez).*

**Guiseppe Mauricio Rosero**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

| Contenido   | Páginas |
|---|---------|
| <b>Capítulo I</b> .....                             | 1       |
| <b>Introducción</b> .....                           | 1       |
| 1.1 Revisión de antecedentes .....                  | 1       |
| 1.2 Problema de investigación y justificación.....  | 4       |
| 1.3 Preguntas directrices de la investigación ..... | 5       |
| 1.4 Objetivos .....                                 | 6       |
| 1.3.1. Objetivo general .....                       | 6       |
| 1.3.2 Objetivos específicos .....                   | 6       |
| 1.5 Hipótesis.....                                  | 6       |
| <b>Capítulo II</b> .....                            | 7       |
| <b>Revisión de literatura</b> .....                 | 7       |
| 2.1 Marco teórico referencial .....                 | 7       |
| 2.1.1. Deslizamientos .....                         | 7       |
| 2.1.2. Susceptibilidad a deslizamientos.....        | 12      |
| 2.1.3. Umbrales de precipitación.....               | 14      |
| 2.1.4 Sistema de alerta temprana.....               | 15      |
| 2.2. Marco legal.....                               | 18      |
| <b>Capítulo III</b> .....                           | 20      |
| <b>Metodología</b> .....                            | 20      |
| 3.1 Descripción del área de estudio.....            | 20      |
| 3.1.1 Ubicación geográfica .....                    | 20      |
| 3.1.2 Climas .....                                  | 21      |



|  |    |
|--|----|
| 3.1.3 Ecosistemas .....  | 22 |
| 3.1.4 Cobertura y uso de suelo .....                                     | 23 |
| 3.1.5 Geología .....   | 24 |
| 3.1.6 Geomorfología .....  | 24 |
| 3.1.7 Fallas geológicas .....  | 24 |
| 3.2 Métodos.....   | 25 |
| 3.2.1 Determinación de susceptibilidad a deslizamientos.....             | 26 |
| 3.2.2. Establecimiento de los umbrales de precipitación .....            | 39 |
| 3.2.3 Diseño de una propuesta de un sistema de alerta temprana .....     | 42 |
| 3.2. Materiales y métodos .....  | 46 |
| <b>Capítulo IV</b> .....   | 47 |
| <b>Resultados y discusión</b> .....                                      | 47 |
| 4.1 Susceptibilidad a deslizamientos.....                                | 47 |
| 4.1.1 Inventario de deslizamientos.....                                  | 47 |
| 4.1.2 Factores condicionantes y detonantes .....                         | 48 |
| 4.1.3 Método de Radiofrecuencia .....                                    | 59 |
| 4.1.4 Validación de niveles de susceptibilidad .....                     | 68 |
| 4.2. Establecimiento de umbrales de precipitación.....                   | 69 |
| 4.2.1. Datos de pluviosidad.....   | 69 |
| 4.2.2 Inventario de ocurrencia de deslizamientos .....                   | 70 |
| 4.2.3. Umbrales de precipitación de la Estación Pimampiro .....          | 71 |
| 4.2.4 Umbrales de precipitación de la Estación Chugá.....                | 73 |
| 4.2.5 Umbrales de precipitación en la Estación Nueva América.....        | 78 |
| 4.3. Diseño de una propuesta de un sistema de alerta temprana (SAT)..... | 79 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Capítulo V</b> .....                     | 82 |
| <b>Conclusiones y recomendaciones</b> ..... | 82 |
| 5.1 Conclusiones .....                      | 82 |
| 5.2 Recomendaciones.....                    | 84 |
| Referencias bibliográficas .....            | 85 |
| Anexos .....                                | 97 |

## ÍNDICE DE TABLAS

| Contenido  | Páginas |
|--|---------|
| Tabla 1 Clasificación de deslizamientos según el tipo de movimiento y material.  | 9       |
| Tabla 2 Factores desencadenantes de los deslizamientos .....   | 10      |
| Tabla 3 Principales factores detonantes y condicionantes de un movimiento en masa.....   | 11      |
| Tabla 4 Métodos para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos.....  | 13      |
| Tabla 5 Tipos y nomenclatura de umbrales de precipitación.....   | 16      |
| Tabla 6 Factores condicionantes y detonantes dentro de la subcuenca del río Mataquí. ....  | 29      |
| Tabla 7 Clasificación en intervalos de la pendiente.....   | 31      |
| Tabla 8 Clasificación de la curvatura del terreno.....   | 32      |
| Tabla 9 Rangos de clasificación de la variable aspecto. ....   | 32      |
| Tabla 10 Clasificación del TWI. ....   | 34      |
| Tabla 11 Clasificación para la variable precipitación .....  | 35      |
| Tabla 12 Intervalos para distancias a fallas, ríos y vías. ....  | 35      |
| Tabla 13 Coordenadas y fechas de instalación de los equipos de medición.....   | 39      |
| Tabla 14 Materiales utilizados durante la investigación.....   | 46      |
| Tabla 15 Resultado del cálculo del índice Kappa .....  | 52      |
| Tabla 16 Datos para la reclasificación, método de radiofrecuencia.....   | 60      |
| Tabla 17 Ponderación de factores influyentes en la susceptibilidad a deslizamientos (RF). ....   | 63      |
| Tabla 18 Niveles de susceptibilidad a deslizamientos de la subcuenca del río Mataquí. ....   | 64      |
| Tabla 19 Resumen de los datos obtenidos en las estaciones pluviométricas.....  | 69      |
| Tabla 20 Inventario de ocurrencia de deslizamientos.....   | 70      |
| Tabla 21 Calculo de variables de precipitación para los días en los que se registraron deslizamientos, en el área de influencia de la Estación Pimampiro. .. | 72      |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 22 Cálculo de variables de precipitación para los días en los que se registraron deslizamientos, en el área de influencia de la Estación Chugá..... | 77 |
| Tabla 23 Sistema de colores para cada tipo de alerta, con sus respectivos indicadores y medidas de respuesta. ....  | 81 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

| <b>Contenido</b>   | <b>Páginas</b> |
|--|----------------|
| Figura 1 Nomenclatura de los deslizamientos .....  | 7              |
| Figura 2 Tipos de movimientos en masa. ....  | 8              |
| Figura 3 Elementos esenciales que componen un SAT. ....  | 17             |
| Figura 4 Sustento legal de investigación referente a la Gestión de Riesgos en el Ecuador – Servicio Nacional de Gestión de Riesgo..... | 19             |
| Figura 5 Mapa de ubicación de la subcuenca del río Mataquí.....  | 20             |
| Figura 6 Climas según Pourrut de la subcuenca del río Mataquí.....   | 21             |
| Figura 7 Zonas de vida según Holdridge de la subcuenca del río Mataquí .....   | 22             |
| Figura 8 Cobertura vegetal de la subcuenca del río Mataquí.....  | 23             |
| Figura 9 Fallas geológicas dentro de la subcuenca del río Mataquí .....  | 25             |
| Figura 10 Esquema metodológico para el análisis de umbrales de precipitación en procesos de deslizamientos. ....                       | 27             |
| Figura 11 Procedimiento para obtener el inventario de deslizamientos. ....   | 28             |
| Figura 12 Curvatura del terreno. ....  | 31             |
| Figura 13 Metodología para establecer niveles de susceptibilidad.....  | 36             |
| Figura 14 Curva Receiver Operating Characteristics.....  | 38             |
| Figura 15 Elementos y componentes del Sistema de Alerta Temprana (SAT).....  | 43             |
| Figura 16 Niveles de alerta del COE Nacional antes desastres. ....   | 44             |
| Figura 17 Inventario de deslizamientos de la subcuenca del río Mataquí .....   | 48             |
| Figura 18 Precipitación media anual de la subcuenca del río Mataquí.....   | 49             |
| Figura 19 Distancia a fallas geológicas de la subcuenca del río Mataquí.....   | 50             |
| Figura 20 Cobertura y uso de suelo de la subcuenca del río Mataquí.....  | 51             |
| Figura 21 Pendientes de la subcuenca del río Mataquí .....   | 53             |

|  |    |
|--|----|
| Figura 22 Litología de la subcuenca del río Mataquí.....   | 54 |
| Figura 23 Orientación del terreno de la subcuenca del río Mataquí .....                          | 55 |
| Figura 24 Distancia a ríos de la subcuenca del río Mataquí .....                                 | 56 |
| Figura 25 Distancia a vías de la subcuenca del río Mataquí .....                                 | 57 |
| Figura 26 Humedad de la subcuenca del río Mataquí.....   | 58 |
| Figura 27 Curvatura de la subcuenca del río Mataquí .....  | 59 |
| Figura 28 Reclasificación de los factores causales mediante el método de<br>radiofrecuencia..... | 63 |
| Figura 29 Niveles de susceptibilidad de la subcuenca del río Mataquí. ....                       | 64 |
| Figura 30 Curva ROC de validación del modelo de susceptibilidad a<br>deslizamientos.....         | 68 |
| Figura 31 Registro de Precipitación y Deslizamientos de la Estación Pimampiro.<br>.....          | 71 |
| Figura 32 Registro de precipitación y deslizamientos de la Estación Chugá .....                  | 73 |
| Figura 33 Registro de lluvia acumulada (E) e Intensidad (I).....                                 | 74 |
| Figura 34 Relación entre lluvia acumulada y duración.....  | 75 |
| Figura 35 Relación entre intensidad y duración.....  | 76 |
| Figura 36 Relación entre intensidad y lluvia acumulada. ....                                     | 76 |
| Figura 37 Registro de Precipitación y Deslizamientos de la Estación Nueva<br>América.....        | 78 |
| Figura 38 Sistemas de colores de alarmas y su respectivo significado.....                        | 79 |
| Figura 39 Propuesta de un Sistema de Alerta Temprana. ....                                       | 80 |

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y**  
**AMBIENTALES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES**  
**RENOVABLES**

**ANÁLISIS DE UMBRALES DE PRECIPITACIÓN EN PROCESOS DE**  
**DESLIZAMIENTO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO MATAQUÍ –**  
**CANTÓN PIMAMPIRO**

Autores: Génesis Victoria Robles Ayala y Guisepe Mauricio Rosero Castillo

**RESUMEN**

Debido al acelerado crecimiento demográfico y la nula planificación territorial, los deslizamientos de tierra son un problema para el desarrollo de la vida humana y económica. Históricamente la subcuenca del río Mataquí ubicada en el cantón Pimampiro, es susceptible a movimientos en masa. Sin embargo, la respuesta para anticipar y minimizar los daños es insuficiente. La presente investigación determinó las zonas con mayor susceptibilidad a deslizamientos y la cantidad de lluvia que propicia la generación de un movimiento en masa. Para ello, se utilizó el método de radiofrecuencia, y así se estableció que el 6% del área de estudio presenta una susceptibilidad alta a deslizamientos, ubicadas principalmente en la cuenca baja y afectando a la vía principal que conecta la parroquia San Francisco de Sigsipamba con la ciudad de Pimampiro. El 39% representa a la categoría moderada y 55% corresponde a susceptibilidades bajas. Además, se determinaron dos umbrales de precipitación (ED) que generan deslizamientos, uno cuando presenta una lluvia acumulada de 81.16 mm en un evento de precipitación con duración menor o igual a 5 días, y otro cuando presenta una lluvia acumulada de 104.9 mm en un evento de 6 o más días. Los umbrales de precipitación y la cartografía de susceptibilidad a deslizamientos son la primera etapa de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) porque generan información sobre la posible ocurrencia de un deslizamiento. De este modo, el SAT se planteó empleando un sistema de colores (blanco, amarillo, naranja, rojo), donde los dos últimos representan la presencia inminente del movimiento en masa. Esto ayudará a las entidades gubernamentales en la toma de decisiones para anticipar y alertar a la población.

Palabras claves: Deslizamientos, Umbrales, Precipitación, Susceptibilidad

## SUMMARY

Due to the accelerated population growth and the lack of territorial planning, landslides are a problem for the development of human and economic life. Historically, the Mataquí river sub-basin, located in the Pimampiro canton, is susceptible to mass movements. However, the response to anticipate and minimize damage is insufficient. The present research determined the areas with the most significant susceptibility to landslides and the amount of rainfall that can cause a mass movement. The radiofrequency method was used to establish that 6% of the study area is highly susceptible to landslides, mainly in the lower basin. This susceptibility affects the main road that connects the parish of San Francisco de Sigsipamba with the city of Pimampiro. The 39% represent the moderate category, and 55% correspond to low susceptibility. In addition, two precipitation thresholds that generate landslides were determined. The first threshold occurs when there is an accumulated rainfall of 81.16 mm in a precipitation event lasting five days or less. Another occurs when an accumulated rainfall of 104.9 mm lasts six or more days. Precipitation thresholds and landslide susceptibility mapping are the first stage of an Early Warning System (EWS) with generation of information related to landslide occurrence. Therefore, the EWS was proposed in a color system (white, yellow, orange, red), where the last two represent the imminent presence of landslides. These proposal will help governmental entities to make decisions to anticipate and alert the population.

Keywords: Landslide, Threshold, Precipitation, Susceptibility



# Capítulo I

## Introducción

### 1.1 Revisión de antecedentes

Los desastres naturales son el resultado de fenómenos capaces de alterar la estructura económica y social de una comunidad (ONU, 2013). En las últimas décadas, a nivel mundial, ha aumentado la cantidad y gravedad de los desastres naturales, lo que se traducen en un grave problema para las economías de varios países (ONU, 2013). Estos eventos generan cuantiosas pérdidas económicas y vidas humanas, que en muchos casos sobrepasan la capacidad de reacción de entidades gubernamentales (UNDRR, 2017).

Los deslizamientos de tierra son procesos relacionados con la gravedad, donde una porción de la masa del terreno se desliza a un nivel inferior a la inicial (Suárez, 1998). Estos fenómenos naturales mantienen una estrecha relación con factores como la pendiente del terreno y zonas sin cobertura vegetal (Duque et al., 2015). La combinación de ambos, convierte a muchas zonas en áreas altamente susceptibles a deslizamientos, en especial, cuando existe la presencia de lluvias intensas o desplazamiento de fallas geológicas (SNGRE, 2020a). Otros factores importantes son los antrópicos: deforestación, construcciones con materiales pesados en terrenos débiles, excavaciones, minería, agricultura, entre otras, los cuales provocan desestabilidad en el suelo (Suárez, 1998).

Alrededor del mundo, existen numerosas investigaciones que buscan determinar umbrales de precipitación que originan deslizamientos, sobre todo, en áreas metropolitanas con insuficiente planificación territorial (Lee, M. et al., 2014). En regiones, como EEUU, también se han destinado recursos económicos en la investigación de umbrales de precipitación (Wilson, 1997). Por ejemplo, en las regiones montañosas de California, se ha aplicado un estudio con base en umbrales empíricos de precipitación, con muy buenos resultados. Sin embargo, los autores recomendaron realizar más estudios para comprobar y verificar sus resultados (Cannon et al., 2008).

A nivel regional, varios países latinoamericanos, han obtenidos avances importantes en este tema y también en el diseño de Sistemas de Alerta Temprana (SAT) (Candela y Aronica, 2016). Este es el caso de Chile, que cuenta con importantes avances. Un estudio muy innovador de López (2015), analiza un registro histórico diario desde 1990 hasta 2013 en laderas urbanizadas de la ciudad de Talcahuano, en donde se realizó un análisis de los umbrales de precipitación en base a la relación intensidad-duración. Es así, como obtuvo un umbral de precipitación mayor o igual a 85.1 mm/día (p. 98).

Colombia es uno de los países de la región que cuenta con numerosas investigaciones en materia de umbrales de precipitación y SAT. Por ejemplo: el estudio de Moreno et al., (2006), consigue relacionar la lluvia y movimientos en masa en Antioquía en el período 1929-1999; el estudio sirvió de base para investigaciones futuras en esa localidad del país. (p 60). En paralelo, en Bucaramanga, se analizaron datos históricos del año 2005, pero, se utilizó otra metodología: el árbol de decisiones, del cual se obtiene resultados prometedores (Suárez, 2008).

Investigadores colombianos como Ruales et al. (2020), efectuaron una investigación en la quebrada Manizales y determinaron que los deslizamientos de tierra en la zona, generaron cuantiosas pérdidas materiales, económicas y humanas. Solo en 2014, se reportaron 113 fallecidos a causa de deslaves (Alcaldía de Manizales, 2014). Ante estos eventos, la alcaldía desarrolló un Plan de Acción Inmediato (PAI) para toda la cuenca, el cual permitió una rápida respuesta a través de un SAT. En otra ciudad colombiana, un estudio de Ávila et al., (2015), aplicado en la cuenca del río Cali, se usó una metodología empírica, con base en datos históricos de lluvias relacionadas con la ocurrencia del evento, la magnitud y duración (pp. 4080-4095).

Según el SNGRE (2020), el territorio ecuatoriano es un país montañoso con fuertes pendientes, por ello, ocurren este tipo de movimientos en masa que se intensifican en épocas de lluvia. Durante el año 2020 existieron muchos deslizamientos, dejando incomunicadas a varias poblaciones, entre los cuales están:

Vía Lago Agrio – La Bonita (60 metros de longitud de la vía de primer orden en el sector La Prensa y 40 metros en El Guayabo), Vía de primer orden Cuenca-Molleturo-Naranjal, Loja, Zamora Chinchipe, Napo, Sucumbíos, Morona Santiago, Azuay (SNGRE, 2020b).

En el Ecuador, se han realizado investigaciones de evaluación de susceptibilidad, donde se puede citar: “Zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos por medio de sistemas de información geográfico, en la parroquia Bulán, cantón Paute” (Segarra & Montalván, 2022). Estos trabajos establecen la importancia y la factibilidad de ser aplicados en otras áreas dentro del país, donde la precipitación es el factor detonante. Sin embargo, no señalan algún tipo de investigación respecto a umbrales de precipitación que den lugar a deslizamientos.

La provincia de Imbabura, también cuenta con estudios relacionados a la investigación de movimientos en masa, como: “Valoración del impacto causado por riesgos a deslizamientos, donde se empleó el método de costo de reposición en el tramo de la vía Pimampiro – San Francisco de Sigsipamba, para la elaboración de un plan de manejo” (Mejía, 2018) y “Aplicación del modelo Fuzzy para la determinación de la Susceptibilidad a Deslizamientos: caso de la Subcuenca del río Mataquí, ubicada en la provincia Imbabura-Ecuador” (Escalante et al., 2020). Sin embargo, ninguno implementa o sugiere un plan de respuesta preventivo ante estos desastres naturales.

## **1.2 Problema de investigación y justificación**

Los desastres naturales desencadenados por precipitaciones, en todo el mundo, han ocasionado cuantiosas pérdidas económicas y humanas. El crecimiento demográfico, ha llevado consigo la expansión de los asentamientos humanos en zonas de alta peligrosidad y susceptibilidad a desastres, relacionados con movimientos en masa (Pereira et al., 2014; Tarolli et al., 2011). Estos efectos, se han incrementado en las últimas décadas, el cambio climático ha ocasionado una variabilidad sin precedentes, que provoca alteraciones de los patrones climáticos, sobre todo, en los hidrometeorológicos (IPCC, 2014).

A nivel nacional, el Ecuador ha dado pasos importantes en la gestión de riesgos, incluyéndola en la constitución del 2008 y en el Régimen del Buen Vivir. El Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE) proporciona lineamientos y estrategias para incluir la gestión del riesgo de desastres en los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) (SNGRE, 2014). De acuerdo con reportes del SNGRE (2021) en la provincia de Imbabura en el trimestre febrero-abril del 2021, se registraron 12 deslizamientos de tierra, sobre todo en la zona de Lita-San Lorenzo, de un total de 443 acontecimientos de esta índole a nivel nacional.

Los gobiernos autónomos descentralizados (GADs), carecen de estrategias y presupuesto, para una adecuada y oportuna gestión de riesgos (Guamán, G., 2012). Esto representa un grave problema para muchas poblaciones vulnerables en el país, ya que, los deslizamientos de tierra generan cuantiosas pérdidas económicas, estructurales y humanas, que se acentúan en los sectores rurales y pobres (Ruales et al., 2020).

De acuerdo con el PDOT (2014) del cantón Pimampiro, los deslizamientos de tierra son una de las principales amenazas naturales, que afecta a gran parte de la población (p. 222). Esta problemática, tiene su origen en las intensas precipitaciones y se potencia con la incidencia de otros factores, como: fallas geológicas y actividades antrópicas (CIPRADEC, 2014). La vulnerabilidad a deslizamientos de la subcuenca, además de los factores ya mencionados, se agrava

con la expansión demográfica, el cambio de uso de suelo y la variabilidad climática ocasionada por el cambio climático (Oliva y Gallardo, 2018).

Las parroquias Pimampiro y San Francisco de Sigsipamba, son dos de los sectores más afectados (CIPRADEC, 2014). Según las autoridades locales, al menos 18 comunidades son afectadas directa o indirectamente por la incidencia de deslizamientos de tierra. Si bien es cierto, no se han reportado víctimas mortales, pero los movimientos en masa ocasionaron que estos poblados, queden incomunicados, y a la vez, sus pobladores no puedan abastecerse y comercializar sus productos agrícolas (GAD Provincial de Imbabura, 2021). La parroquia Chugá también registra numerosos movimientos de tierra, que afecta gravemente a la economía de las comunidades de la parroquia, sobre todo, en épocas de lluvia (CIPRADEC, 2014).

El Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025, es la máxima directriz institucional y política del Ecuador, que a través del Gobierno Nacional, se ejecutarán objetivos de gran relevancia para el país (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2021). Uno de los ejes de este plan: el económico, consta de 16 objetivos, de los cuales resalta el objetivo 9: garantizar la seguridad ciudadana, orden público y gestión de riesgos. Esta meta, plantea impulsar la reducción de riesgos de desastres y atención preventiva eficaz de los mismos, por lo tanto, la presente investigación pretende otorgar a las autoridades competentes, las herramientas técnicas y metodológicas, que permitan la creación y diseño de un sistema de alerta temprana, ante deslizamientos en zonas de alto riesgo.

### **1.3 Preguntas directrices de la investigación**

- ¿Cuáles son los niveles de susceptibilidad a deslizamiento en la subcuenca del río Mataquí?
- ¿Cuál es el umbral de precipitación para deslizamientos de tierra en la subcuenca del río Mataquí?
- ¿Cuáles son los indicadores que contribuyen al SAT en la subcuenca del río Mataquí?

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1. Objetivo general***

- Analizar los umbrales de precipitación de procesos de deslizamiento para proponer un Sistema de Alerta Temprana en la subcuenca del río Mataquí, cantón Pimampiro.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- Determinar la susceptibilidad de deslizamiento en la subcuenca del río Mataquí.
- Establecer los umbrales de precipitación y su incidencia en el riesgo a deslizamiento.
- Proponer un sistema de alerta temprana para deslizamientos en la subcuenca del río Mataquí.

## **1.5 Hipótesis**

Ho: Existe un umbral de precipitación que genera riesgo de deslizamiento.

Ha: No existe un umbral de precipitación que genera riesgo de deslizamiento.

## Capítulo II

### Revisión de literatura

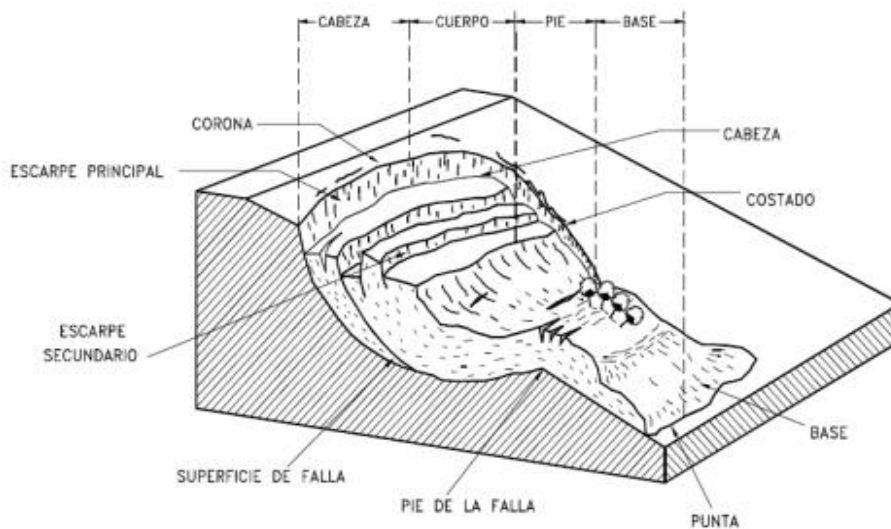
#### 2.1 Marco teórico referencial

##### 2.1.1. Deslizamientos

Son eventos geológicos considerados catástrofes, que trasgreden de forma negativa en la población humana y redes de infraestructura. También son conocidos como movimientos de masas rocosas, de residuos o de tierra, que se dirigen principalmente laderas abajo, lo que provoca gran daño en las áreas circundantes (Guamán, 2012). Los deslizamientos están estrechamente relacionados con fuerzas gravitatorias, donde las fuerzas desestabilizadoras superan a las estabilizadoras (Ávila et al., 2015).

#### Figura 1

*Nomenclatura de los deslizamientos*



Fuente: Tomado de *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (p 55) por Suárez (1998).

Los deslizamientos tienen una estrecha relación con las fuertes precipitaciones, usualmente, las lluvias torrenciales vienen acompañadas de movimientos en masa (Berti et al., 2012). Los fuertes aguaceros, provocan que las fuerzas desestabilizadoras reduzcan la resistencia del suelo a deslizarse (Garzón et al., 2012). Este tipo de proceso geológico puede tomar diversos nombres, como lo

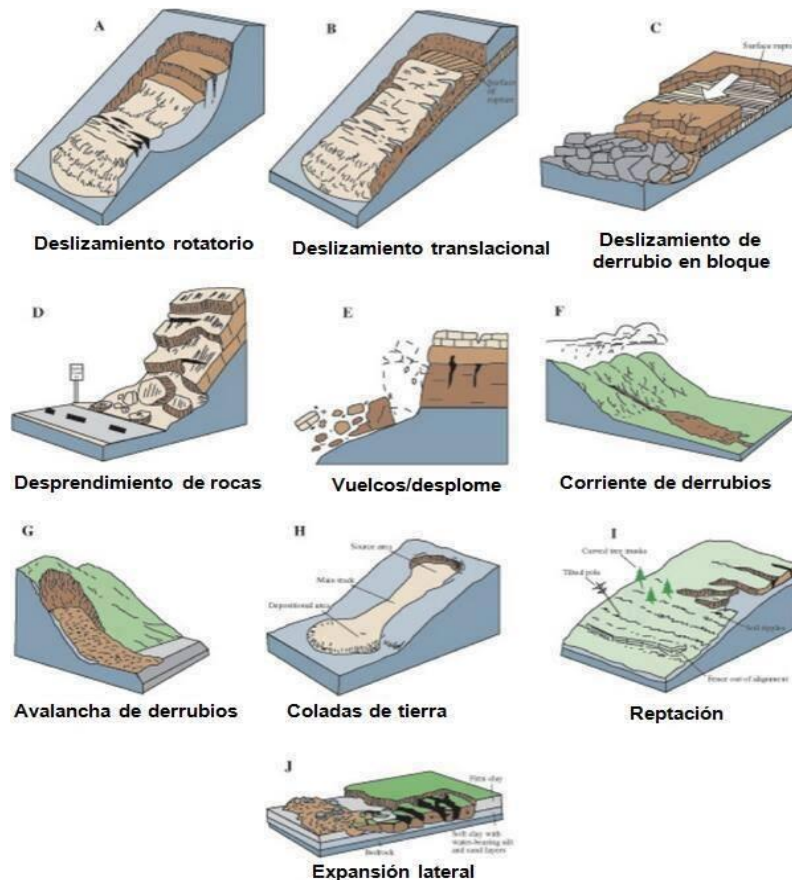
menciona Suárez, (1998): derrumbes, hundimientos, desprendimientos, solifluxión o desplomes, y depende del grado de algunas variables como: la velocidad del desplazamiento, el grado de saturación, profundidad de la masa desplazada y el grado de la pendiente del terreno; se los puede clasificar (p. 566).

### 2.1.1.2. Tipos de deslizamientos

López (2015), con base en una clasificación previa de La Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, clasifica a los movimientos en masa en tres grupos principales: derrumbes o volcamientos, que son básicamente desprendimientos de fragmentos o grandes bloques rocosos que caen por la gravedad; deslizamientos (una masa se mueve o desliza en dirección de la gravedad), y flujos que se refiere a la masa que se desliza, se rompe y disgrega en material viscoso (pp. 53-66), como se muestra en la Figura 2.

**Figura 2**

*Tipos de movimientos en masa.*



Fuente: Tomado de *Clasificación General de los Movimientos en Masa* (p.44). Por Varnes, (1984).



Existen otras clasificaciones de acuerdo con el lugar de estudio y el tipo de investigación. En un estudio de Lee et al. (2014), clasifica a los deslizamientos de acuerdo con el tipo de movimiento, roca y suelo, dentro de este último, considera también el tamaño de grano (fino o grueso). En la Tabla 1, se resume esta clasificación.

**Tabla 1**

*Clasificación de deslizamientos según el tipo de movimiento y material.*

| Tipo de movimiento |               | Tipo de material                  |                                |                              |
|--------------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
|                    |               | Roca                              | Suelo                          |                              |
|                    |               |                                   | Grano grueso                   | Grano fino                   |
| Caídas             |               | Caídas de roca                    | Caída de detritos              | Caídas de suelo              |
| Basculamiento      |               | Basculamiento de rocas            | Basculamiento de detritos      | Basculamiento de suelo       |
| Deslizamiento      | Rotacional    | Rotacional de rocas               | Rotacional de detritos         | Rotacional de suelos         |
|                    | Translacional | Translacional de rocas            | Translacional de detritos      | Translacional de suelos      |
| Separación lateral |               | Separación lateral en roca        | Separación lateral en detritos | Separación lateral en suelos |
| Flujo              |               | Flujo de rocas                    | Flujos de detritos             | Flujo de suelos              |
| Complejos          |               | La combinación de dos o más tipos |                                |                              |

*Nota.* Entiéndase a roca, como una estructura dura y firme; suelo, como la agrupación de partículas sueltas que no se consolidan o ligeramente cementado; detrito, es un suelo que posee entre 20 y 80% de fragmentos mayores a 2 mm; y suelo fino, conformado por más del 80% de fragmentos menores a 2 mm. Tomado de *Clasificación General de Deslizamientos* (p. 66), por Varnes, (1984).

### 2.1.1.3. Factores que influyen en la estabilidad de taludes

La estabilidad de las laderas según Medina (2017), está condicionada por una serie simultánea de diversos factores, los deslizamientos de estos lugares se producen gracias al desequilibrio entre las fuerzas que actúan sobre un determinado

volumen de terreno (p. 20). Es así como, estos factores pueden ser clasificados bajo varios criterios, que se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2**  
*Factores desencadenantes de los deslizamientos*

|                                       |                          |  |  |
|---------------------------------------|--------------------------|--|--|
|                                       |                          | Condicionan a:   | -Tipologías de deslizamiento<br>- Mecanismos<br>-Modelos de rotura   |
| <b>Origen</b>                         | <b>Internos</b>          | -Extrínsecas   | Relativas a las propiedades del material y a su resistencia.   |
|                                       |                          | -Intrínsecas   | Relacionadas con la morfología: geología, pendiente entre otros y las condiciones ambientales.             |
|                                       |                          |  | Actúan sobre el material y generan modificaciones en las condiciones iniciales del terreno.                |
|                                       | <b>Externos</b>          | Tipos de acciones:   | -Infiltración de agua<br>-Vibraciones<br>-Modificaciones antrópicas  |
| <b>Por la situación de equilibrio</b> | Condicionantes o pasivos | Son propios de los materiales naturales.                                 | - Geológicas<br>- Topográficos<br>- Geomorfológicos<br>- Hidrogeológicos<br>- Estructurales<br>- Edáficos  |
|                                       | Detonantes o activos     | Son factores externos que desencadenan finalmente el movimiento en masa. | - Antrópicas<br>- Climáticos<br>- Sobrecargas estáticas y cargas dinámicas<br>- Erosión<br>- Meteorización |

*Nota.* Tomado de *Zonificación de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra en la Cuenca del Río Patía-Departamento del Cauca* (p. 20), por Medina (2017); Geological Survey U.S., (1982) y Varnes (1985).

Existen dos tipos de factores, naturales y antrópicos. Los factores antrópicos más comunes que inciden en la ocurrencia de un deslizamiento son: el diseño y construcción impropia, incompetencia, mantenimiento defectuoso, pobre o deficiente, planificación en ordenamiento territorial y estimación errónea de los factores desencadenantes de deslizamientos de tierra (Jamaludin y Hussein, 2006). En otras palabras, la evaluación de los riesgos y peligros asociados a movimientos de tierra, deben realizarse antes y durante la planificación del uso de suelo (Guzzetti et al., 2007).

#### 2.1.1.4. Factores condicionantes y detonantes

En la Tabla 3 se detalla los factores condicionantes y detonantes de los movimientos en masa. La precipitación es el factor detonante más común en la mayoría de los deslizamientos. Los factores detonantes, son los que, mediante su incidencia directa, dan lugar a un deslizamiento, por su parte, los factores condicionantes son los que potencian las condiciones necesarias, para que tenga lugar un deslizamiento (Cherres, 2013)

**Tabla 3**  
*Principales factores detonantes y condicionantes de un movimiento en masa.*

| <b>Factor</b>             | <b>Tipo</b>   | <b>Clasificación</b> | <b>Definición</b>  |
|---------------------------|---------------|----------------------|--|
| Litología                 | Condicionante | Geológico            | Es el tipo de roca (suave o dura), su consistencia y la resistencia del material.  |
| Uso y cobertura de suelo  | Condicionante | Edáfico              | Habla sobre el uso actual que se le da al terreno, el tipo de vegetación o la ausencia de ella.  |
| Humedad del terreno       | Condicionante | Edáfico              | La humedad está representada por la cantidad de agua concentrada en un área de terreno que, puede ser roca, suelo, madera, etc.                              |
| Deslizamientos del pasado | Condicionante | Geomorfológico       | Son las cicatrices de deslizamientos que existieron en el pasado, los cuales, con el tiempo podrían dar lugar a un nuevo movimiento de tierra.               |
| Pendiente                 | Condicionante | Topográfico          | La pendiente es el ángulo que se forma entre el plano horizontal y el plano tangente a la superficie del terreno de un determinado punto. Es la inclinación. |

| <b>Factor</b>     | <b>Tipo</b>   | <b>Clasificación</b> | <b>Definición</b>   |
|-------------------|---------------|----------------------|---|
| Curvatura         | Condicionante | Topográfico          | La curvatura es la forma que adopta la pendiente, que puede ser cóncava, plana o convexa, tanto en el sentido transversal (curvatura de perfil), longitudinal (curvatura de plano) o una combinación de ambas |
| Aspecto           | Condicionante | Topográfico          | El aspecto muestra la orientación horizontal de la superficie y está representada en unidades grados.   |
| Precipitación     | Detonante     | Climático            | Es la cantidad de lluvia que se precipita sobre el terreno en un lapso.   |
| Fallas geológicas | Detonante     | Sísmico              | El fallamiento es el movimiento, ruptura o el deslizamiento de la superficie del terreno, que se da, por el movimiento diferencial en una falla geológica   |

*Nota.* Tomado de *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (p. 32), por Suárez (1998); *Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado*, por Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente de la Organización de Estados Americanos (1993).

### **2.1.2. Susceptibilidad a deslizamientos**

Según Chaverri (2016), la susceptibilidad a deslizamientos es la posibilidad que tiene un área determinada de terreno a presentar fenómenos de remoción en masa en el interior de dicha unidad, que dependen de las condiciones locales del lugar (p. 25). Hay que tener presente que la cartografía de susceptibilidad ayudan con información acerca de la posibilidad de ocurrencia en la distribución espacial (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

#### **2.1.2.1 Métodos de estimación de la susceptibilidad del terreno**

Para la evaluación del grado de susceptibilidad a deslizamientos de un área existen varias aproximaciones, basadas en su mayoría, en la determinación de los factores (Chaverri, 2016). Los factores influyen en las roturas de las laderas y consecuentemente en los movimientos en masa, mismos que se combinan y permiten identificar los grados de susceptibilidad para ser plasmados en cartografía (Medina, 2017).

A lo largo de los años se ha desarrollado diferentes procedimientos para la evaluación y realización de los mapas de susceptibilidad (Chaverri, 2016). Según Aristizábal y Yokota (2006), se clasifican en metodologías heurísticas, probabilísticas y determinísticas, como se indica en la Tabla 4 (p. 9). Sin embargo, Medina (2017), menciona que las metodologías probabilísticas se utilizan cuando existe información relevante y de calidad, tanto cualitativa como cuantitativa, para así, aplicar modelos estadísticos univariantes y multivariantes (p. 22).

**Tabla 4**

*Métodos para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos.*

|                 | <b>Heurísticos</b>  | <b>Probabilísticos</b>  | <b>Determinísticos</b>  |
|-----------------|---|---|---|
| Basada en:      | La comprensión de procesos geomorfológicos.<br>Factores que producen inestabilidad (ponderados según su importancia)  | Las predicciones estadísticas que combinan a factores y distribución deslizamientos tanto actuales como del pasado. | Modelos de estabilidad de una ladera<br>Equilibrio límite<br>Modelos numéricos        |
| Utilizada en:   | Mapeo:<br>-Deslizamientos<br>-Factores ambientales que tienen influencia en la estabilidad de taludes<br>Estimación:<br>-Relación entre factores y fenómenos de inestabilidad<br>Clasificación:<br>-Terrenos en regiones de diferente susceptibilidad | Evaluación:<br>-Susceptibilidad<br>-Amenaza   | -Amenaza  |
| Inconvenientes: | La información de los factores ambientales es subjetiva e inadecuada (Medina, 2017).  | Costo de adquisición de factores (Medina, 2017).  | No recomendado para zonificaciones rápidas y grandes áreas de estudio (Medina, 2017). |

*Nota.* Tomado de *A Procedure for Landslide Susceptibility Zonation by the Conditional Analysis Method* (p. 352), por A. Clerici et al., 2002 .

Dentro de este grupo de procedimientos se encuentran los métodos estadísticos y análisis de frecuencia de deslizamientos, los cuales, son indirectos debido a que los resultados pueden ser extrapolados (Cherres, 2013). El resultado es la estimación de la susceptibilidad, que toma en cuenta la homogeneidad de las condiciones geológicas y características climáticas entre áreas (Medina, 2017). El mismo autor, menciona, un cuarto método “geomorfológico”, y se basa en determinar las condiciones que provocan inestabilidad dentro de las laderas, mediante técnicas de tipo cartográficas, zonificación y geomorfológicas (p. 22).

### ***2.1.3. Umbrales de precipitación***

El umbral de precipitación o umbral de lluvia, es el límite de la condición hidrológica que cuando se alcanza o sobrepasa, da origen a un movimiento en masa (Salciarini et al., 2008; Gutierrez et al., 2018). Para analizar los umbrales, se toma en cuenta algunos parámetros, tales como: la precipitación antecedente, acumulada y la relación duración-intensidad (Borga et al., 2015).

El concepto de umbral de precipitación, en un inicio, fue adaptado por Caine (1980), el cual serviría para establecer la cantidad de lluvia que origina un desplazamiento de tierra en laderas (Montesarchio et al., 2015). Posteriormente, se mejoró la evaluación de peligro de deslizamientos, y se determinaron dos componentes principales: las probabilidades espaciales y las temporales, en ese sentido, el análisis de umbral es el componente independiente más importante dentro de la probabilidad temporal (AlThuwaynee et al., 2015).

Se han desarrollado muchas técnicas para determinar umbrales alrededor de todo el mundo, pero, es necesario aclarar que cada modelo arroja excelentes resultados, de acuerdo con el contexto actual de su área de estudio (AlThuwaynee et al., 2015). Guzzetti et al. (2007), mencionan que existe tres enfoques principales que se deben considerar para determinar los umbrales: modelos físicos, que son análisis a escala local; modelos empíricos, que son límites inferiores a la línea logarítmica o cartesiana de la condición de lluvia que conlleva a un deslizamiento (p. 248).

Los investigadores, no han logrado ponerse de acuerdo con la metodología y en las variables a utilizar, esto ocasiona que los resultados no se puedan comparar adecuadamente (Luca y Versace, 2016). En base a las mediciones de lluvia, los umbrales empíricos se clasifican en tres grandes categorías: umbrales para lluvias específicas combinadas con mediciones de precipitación, umbrales que recogen información de las condiciones antecedentes y otros umbrales (Instituto de Investigación para la Protección Hidrogeológica, 2021a).

Los umbrales empíricos, emplean una serie de combinaciones de mediciones de precipitación, se obtienen de los eventos de lluvia, individuales o múltiples, que desencadenan (o no) movimientos en masa, y a su vez se suelen dividir en cuatro subcategorías: umbrales de intensidad-duración (ID), umbrales basados en la precipitación total del evento, evento de lluvia – umbrales de duración (ED), y evento de lluvia – umbrales de intensidad (EI) (Aleotti, 2014). Los umbrales de intensidad-duración (ID), son los más usados en el mundo (Instituto de Investigación para la Protección Hidrogeológica, 2021b), sin embargo, existen muchos tipos, como se muestra en la Tabla 5.

#### ***2.1.4 Sistema de alerta temprana***

Según González y Gallardo (2018), un sistema de alerta temprana (SAT), es aquella acción que a través de un mecanismo tecnológico, se encarga de anticipar un desastre natural o humano, el cual, puede generar un desastre (p. 21). Estas medidas utilizan sistemas de comunicación integrados y tienen como objetivo, ayudar a las comunidades a prepararse ante los potenciales peligros que se relacionan con la variabilidad climática, la misma que ha tenido un repunte en los últimos años (ONU, 2021)

**Tabla 5***Tipos y nomenclatura de umbrales de precipitación.*

| <b>Tipo de Umbral</b> | <b>Código</b> | <b>Descripción</b>  |
|-----------------------|---------------|---|
| $A_{((d))}$           | A(d)          | Precipitación precedente ( $A_{((d))}$ )  |
| $A_{((d)), R}$        | A(d), R       | Precipitación precedente ( $A_{((d))}$ ), Precipitación diaria (R)                                    |
| $C_{MAP D}$           | CMAP-D        | Precipitación crítica normalizada ( $C_{MAP}$ ) – Duración de la lluvia (D): $C_{MAP D}$              |
| E                     | E             | Evento de precipitación acumulada (E)   |
| ED                    | E-D           | Evento de precipitación acumulada (E) - Duración de la lluvia (D)                                     |
| $E_{MAP}$             | EMAP          | Evento de precipitación acumulada normalizada ( $E_{MAP}$ )   |
| $E_{MAP D}$           | EMAP-D        | Evento de precipitación acumulada normalizada ( $E_{MAP}$ ) - Duración de la lluvia (D) $E_{MAP D}$   |
| $E_{MAP I}$           | EMAP-I        | Evento de precipitación acumulada normalizada ( $E_{MAP}$ )- Intensidad de la lluvia (I): $E_{MAP I}$ |
| IE                    | I-E           | Intensidad de la lluvia (I) - Evento de precipitación acumulada (E): IE                               |
| ID                    | I-D           | Intensidad de la lluvia (I) - Duración de la lluvia (D): ID   |

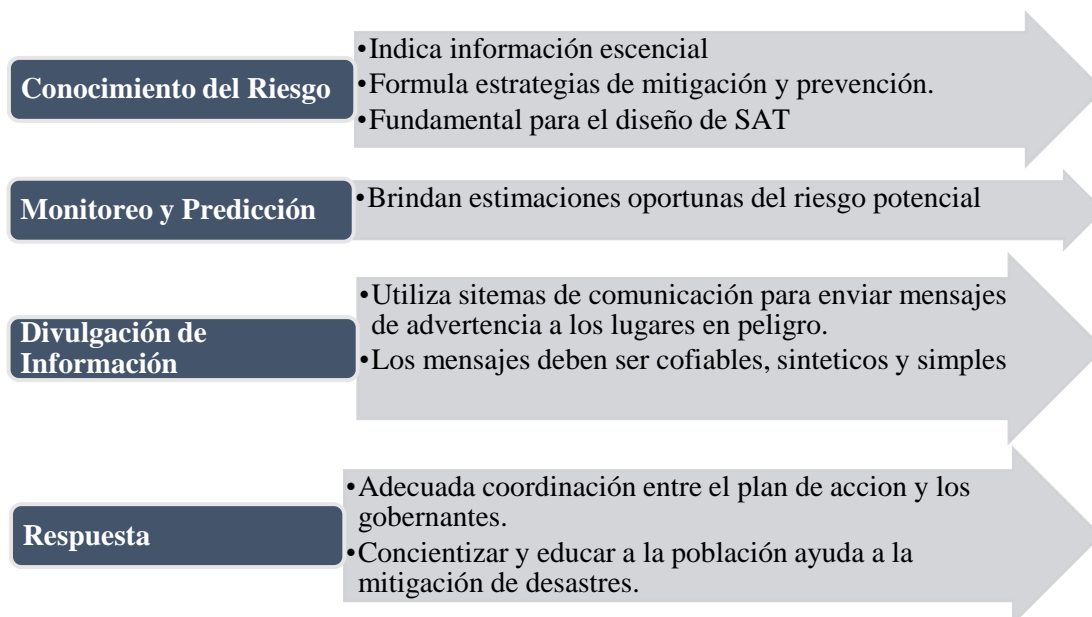
*Nota:* I es intensidad de lluvia, D es la duración de lluvia y E precipitación acumulada. Adaptada de *Thershold of Precipitation*, por El Instituto de Investigación para la Protección Hidrogeológica, (2021b).

Los sistemas de alerta temprana recopilan información, para ser administrada cuando va a suceder un posible desastre como movimientos en masa; lo que permite la comunicación efectiva y oportuna para que las autoridades actúen antes del suceso. Esto permite la toma de decisiones y alertar a la población (Cordero & Espinoza, 2012). Estos sistemas se ven integrados por 4 elementos esenciales que son mencionados en la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (ONU, 2010), que se muestran en la Figura 3.



### Figura 3

Elementos esenciales que componen un SAT.



Nota. Tomado de *Early Warning Systems: A State of the Art Analysis and Future Directions* (p. 120), por United Nations Environmental Programme, (2012).

#### 2.1.4.1 Alertas

En concordancia con el Manual para el diseño, instalación, operación y mantenimiento de sistemas comunitarios, elaborado por la OEA (2010), una alerta es el estado que se declara poco antes de la presencia de un determinado evento o fenómeno, que afecta a una zona determinada (p. 10). Las alertas, permiten que las autoridades locales ejecuten los planes de respuesta, previamente elaborados por personal calificado. Existen muchos tipos de alertas, pero para efectos de desastres naturales, consisten en sistemas tecnológicos que emiten una alarma (p. 11).

#### 2.1.4.2 Niveles de alerta

Los niveles de alerta permite a la población identificar el grado de peligro presente en el territorio, lo cual permitirá seguir protocolos o acciones de acuerdo con el nivel de alerta emitido por el SAT (Cordero y Espinoza, 2012). Los autores también mencionan, que no hay que confundir los tipos de alerta con niveles, ya que se refieren a diferentes etapas de un plan de emergencias. Cada evento o desastre natural, puede alcanzar un grado de intensidad y peligrosidad. Cada nivel

cuenta con ciertas condiciones cuantitativas o cualitativas, que al ser superadas, se pasa al siguiente nivel (OEA, 2010). Se detallan a continuación:

- **Alerta blanca:** Significa que se ha identificado la presencia de un fenómeno, pero que su peligrosidad es nula. Sin embargo, es necesario monitorear su actividad, trayectoria y evolución, hasta tener la seguridad que no representa un peligro.
- **Alerta verde:** simboliza la presencia de un evento que representa una posible amenaza para la gente, la misma que debe estar atenta a los canales de comunicación de su localidad.
- **Alerta amarilla:** este color simboliza que un evento representa una amenaza real al territorio, incluso, puede ocasionar daños a los bienes materiales y vidas humanas. Existe ya una movilización de recursos técnicos y logísticos.
- **Alerta roja:** significa que el evento es un peligro inminente, y afectará gravemente a las personas, ocasionando daños materiales y humanos importantes. Se requiere una respuesta inmediata, de acuerdo con un Plan de Emergencias.

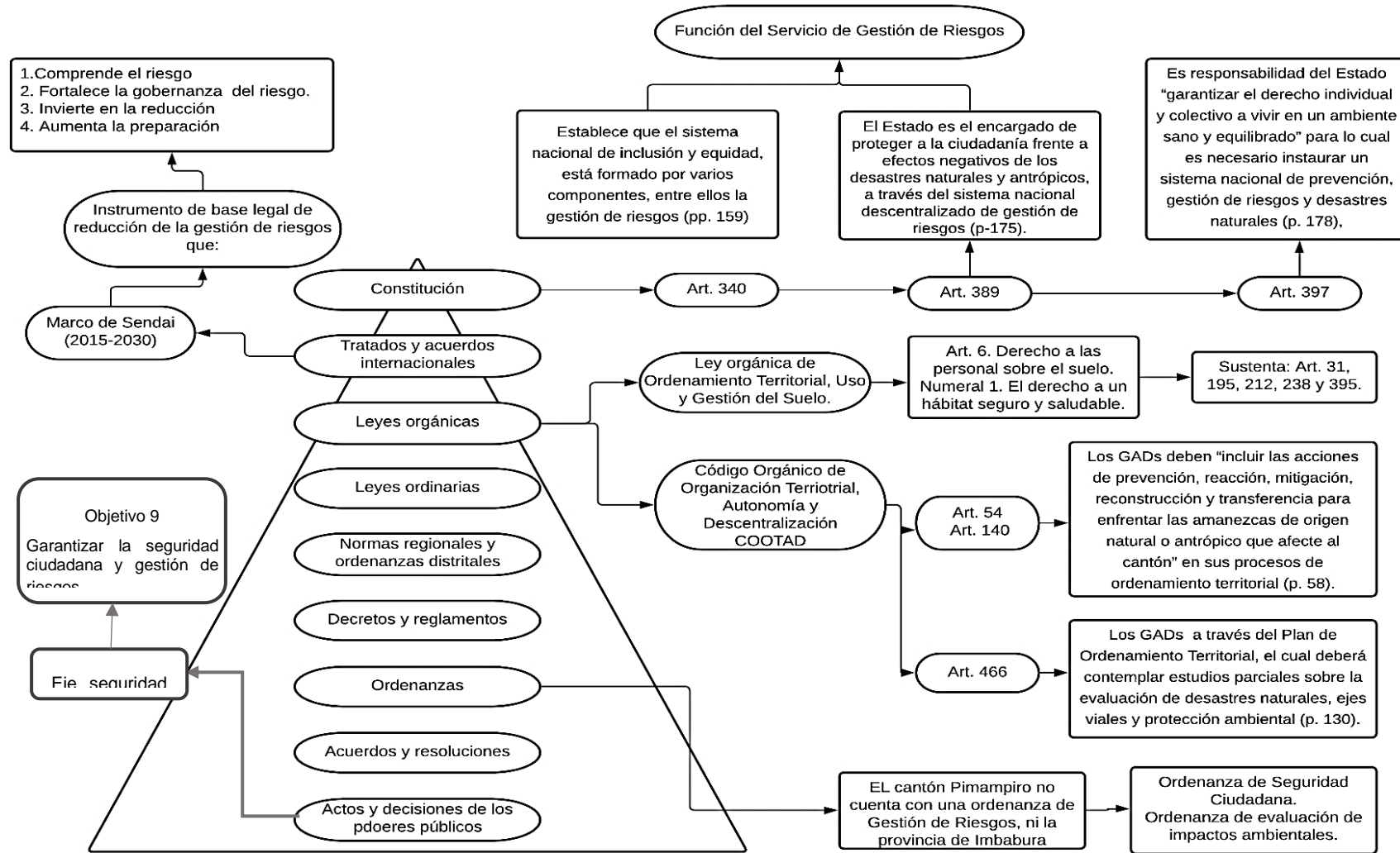
## 2.2. Marco legal

El Ecuador dispone de una amplia normativa que regula el funcionamiento del Estado. De acuerdo con lo establecido en el Art. 424 de la Constitución de la República aprobada en el año 2008, el orden jerárquico de aplicación de las normas es el siguiente: Constitución, tratados y convenios internacionales, leyes orgánicas, leyes ordinarias, normas regionales y ordenanzas distritales, decretos y reglamentos, ordenanzas, acuerdos y resoluciones, y demás actos y decisiones de los poderes públicos (Asamblea Nacional de la República del Ecuador, 2008).

Por lo tanto, el sustento legal de esta investigación referente a la Gestión de Riesgos, se establece mediante el análisis de los distintos componentes jerárquicos de la Pirámide de Kelsen, acorde al contexto nacional y a la realidad de la política administrativa del país. El marco legal. se muestra en la Figura 4.

**Figura 4**

*Sustento legal de investigación referente a la Gestión de Riesgos en el Ecuador – Servicio Nacional de Gestión de Riesgos.*



## Capítulo III

### Metodología

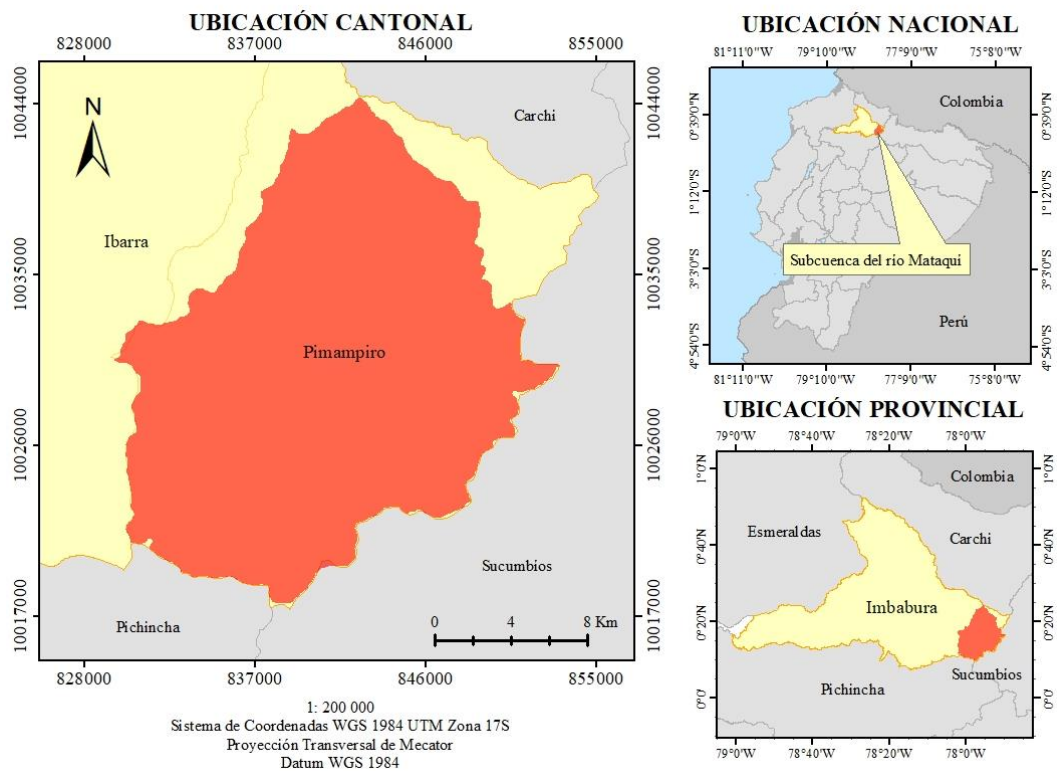
#### 3.1 Descripción del área de estudio

##### 3.1.1 Ubicación geográfica

La subcuenca del río Mataquí, se ubica en el cantón Pimampiro, provincia Imbabura (GAD Pimampiro, 2019). En la Figura 5 se presenta el mapa de ubicación. La subcuenca se encuentra en la región interandina de la cordillera de los Andes, la cual se formó en el Mioceno Medio y durante el Plioceno gracias a la deposición de sedimentos (Jacóme et. al. 2020). La subcuenca, engloba a las parroquias Mariano Acosta y San Francisco de Sigsipamba en su totalidad, Chugá y Pimampiro (urbana) se incluyen parcialmente. El río Mataquí tiene una longitud de 9.12 km y un caudal medio anual de 17.88 m<sup>3</sup>/s (Avellaneda y Villafuerte, 2008).

#### Figura 5

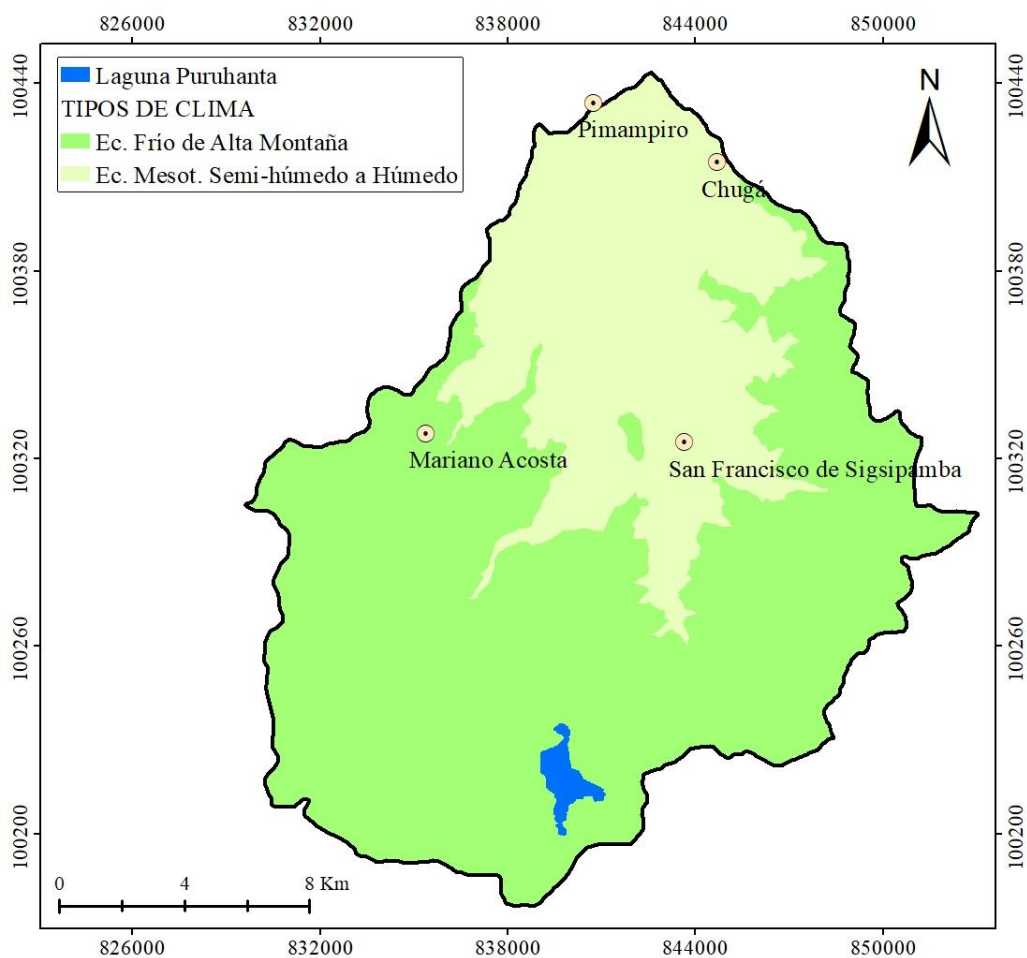
Mapa de ubicación de la subcuenca del río Mataquí.



### 3.1.2 Climas

Como se observa en la Figura 6, los climas característicos que presentan el área de estudio según Pourrut (1995) son: Ecuatorial Mesotérmico Semihúmedo a Húmedo, característico de la zona interandina, con precipitaciones entre 500 y 2000 mm/año (febrero a mayo y octubre a noviembre), temperaturas medias anuales de 12 a 20°C y una humedad relativa con valores comprendidos entre 65 y 85 %. Y el clima Ecuatorial Frío de Alta Montaña, ubicado en la zona interandina por encima de los 3000 msnm, con temperaturas que oscilan entre los 4 a 8°C, precipitación anual de 800 a 2000 mm y una humedad relativa superior al 80% (p. 22).

**Figura 6**  
*Climas según Pourrut de la subcuenca del río Mataquí.*

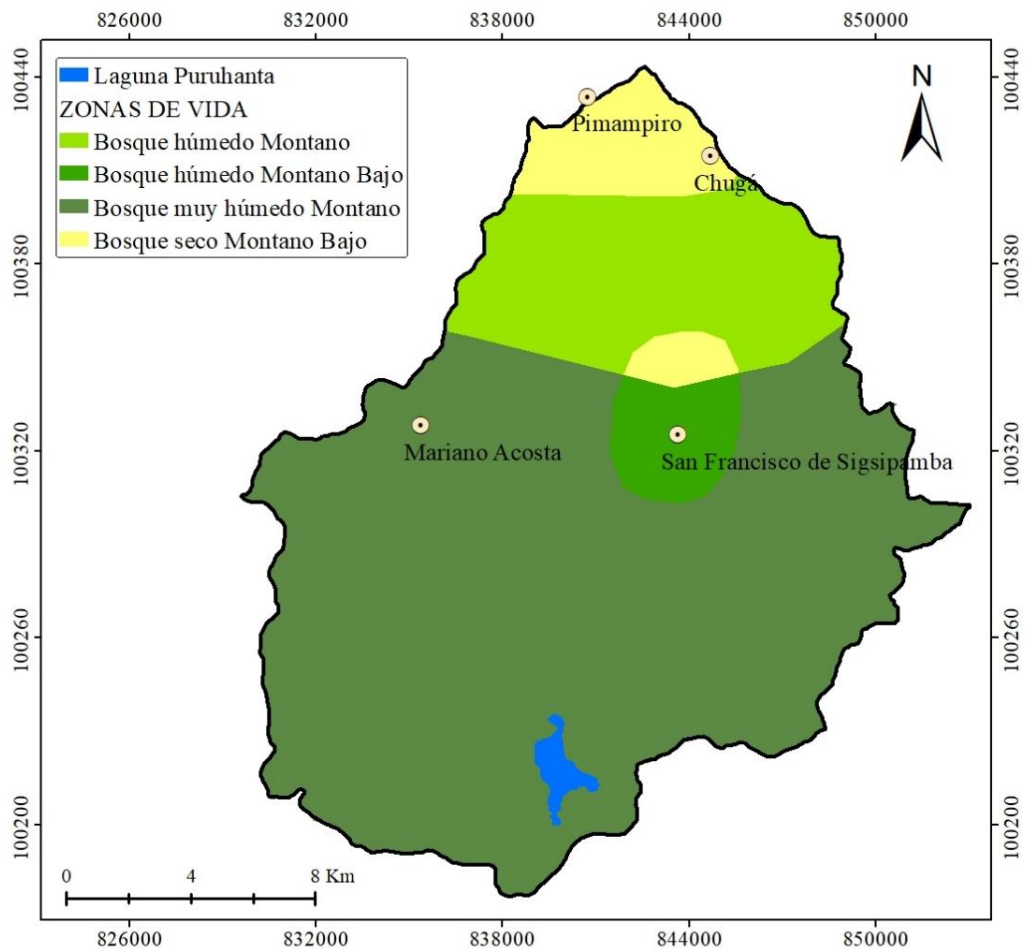


### 3.1.3 Ecosistemas

Según la clasificación de Holdridge (1982), la subcuenca se compone de las siguientes formaciones ecológicas: Bosque Húmedo Montano Bajo que se encuentra entre los 1 800 a 2 000 msnm, Bosque Seco Montano Bajo (2 000 a 3 000 msnm), Bosque Húmedo Montano (2 500 a 3 300 msnm) y Bosque muy Húmedo Montano, como se observa en el Figura 7. El área total es de 35 690.8 ha, de las cuales el 16.32% se compone por páramos, bosques 39.53%, vegetación arbustiva 26.15%, cuerpos de agua 0.81%, cultivos 4%, pastos 10.03%, área urbana 1.47% y área sin vegetación 1.69% (Figura 8). Estos valores están sometidos a un constante cambio, debido a la expansión agrícola-ganadera y a las permutas climáticas (Díaz y Encarnación, 2018).

**Figura 7**

*Zonas de vida según Holdridge de la subcuenca del río Mataquí*



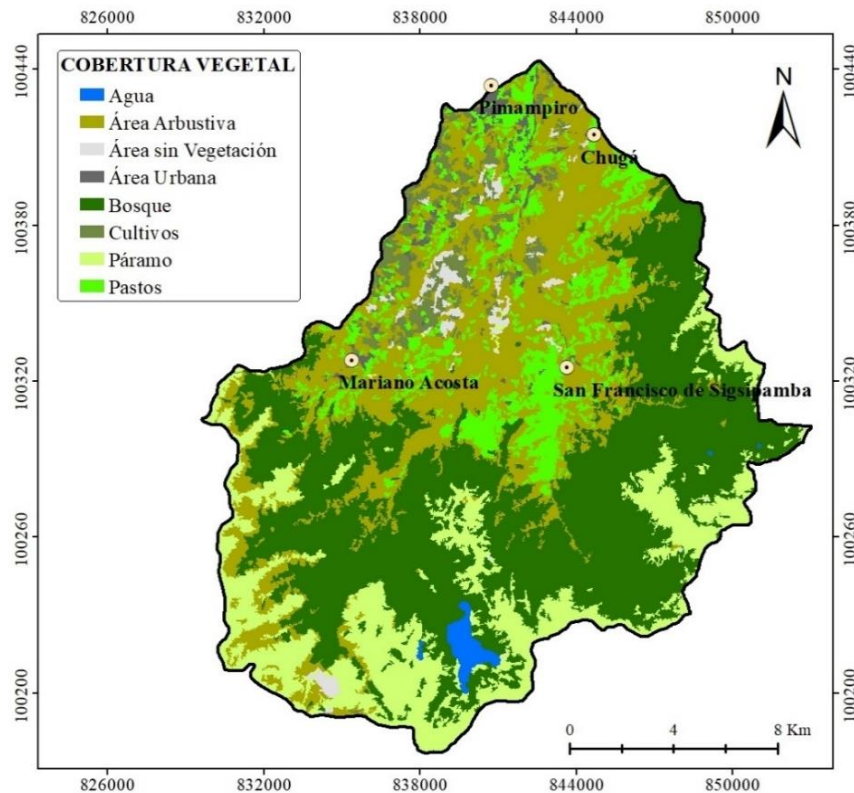
### 3.1.4 Cobertura y uso de suelo

La vegetación arbustiva seca se distribuye por todo el cantón Pimampiro y la vegetación arbustiva húmeda en las parroquias de Chugá y San Francisco de Sigsipamba donde predominan especies como: *Baccharis sp.*, *Salvia sp.* y *Cortaderia sp.* para el primer ecosistema y *Escallonia sp.*, *Barnadesia sp.* y *Polylepis sp.* para el segundo (Duque et al., 2015).

El bosque húmedo posee un porcentaje elevado de heterogeneidad de especies arbóreas (*Alnus acuminata*, *Oreopanax ecuadorensis*, *Valea stipularis*, *Hedyosmun cuatrecazanum*, *Myrcianthes fragrans*, entre otras) y una clara homogeneidad a nivel de familias (*Lauraceae* y helechos arborescentes de los géneros *Cyathea* y *Alsophila*). El páramo se caracteriza por *Stipa sp.*, *Azorella sp.*, *Bidens sp.*, *Geranium sp.*, *Silenesp.*, *Chuquiragua sp.*, *Hypericum sp.*, *Astragalus sp.*, *Werneria sp.*, *Hypochoeris sp.*, *Culcitium sp.*, *Baccharis sp.*, *Mortiño sp.*, *Brachyotum sp.*, *Gynoxys sp.* y *Buddleia sp.* (Duque et al., 2015).

### Figura 8

Cobertura vegetal de la subcuenca del río Mataquí.



### **3.1.5 Geología**

En el cantón Pimampiro, existen varias formaciones geológicas como son: Volcánicos de Angochagua caracterizado por rocas andesitas, brechas y aglomerados; Grupo Río Chota (conglomerados volcánicos, areniscas volcánicas y sedimentos tobáceos); Granito Tres Lagunas (pegmatitas); Unidad Agoyán (esquistos con minerales como: moscovita, granate y grafito); Unidad Monte Olivo (anfíbolitas basálticas); y otras formaciones no identificadas que se representan por granodioritas. Además, se registra la presencia de depósitos como: superficiales de ladera (derrumbe y coluviales), coluvio aluviales y aluviales, la litología dominante es de tipo heterogénea, de materiales finos y fragmentos angulares, arenas, limos, arcillas, gravas y bloques (Duque et al., 2015).

### **3.1.6 Geomorfología**

La geología influye en la geomorfología de la subcuenca, donde, existen geoformas de tipo fluvial (Ej. valle fluvial-llanura de inundación, terraza, valle en V, barranco); laderas (vertiente rectilínea, abrupta, escarpe de deslizamiento, coluvión, depósitos de deslizamiento); glaciar y periglacial (circo, cubeta, fondo de valle, vertiente de valle, morrena lateral); volcánico (meseta volcánica, relieve volcánico, superficie volcánica ondulada); tectónico- erosivo (relieve colinado y montañoso) y poligénicas (superficie inclinada, cimas redondeadas y estrechas) (Duque et al., 2015).

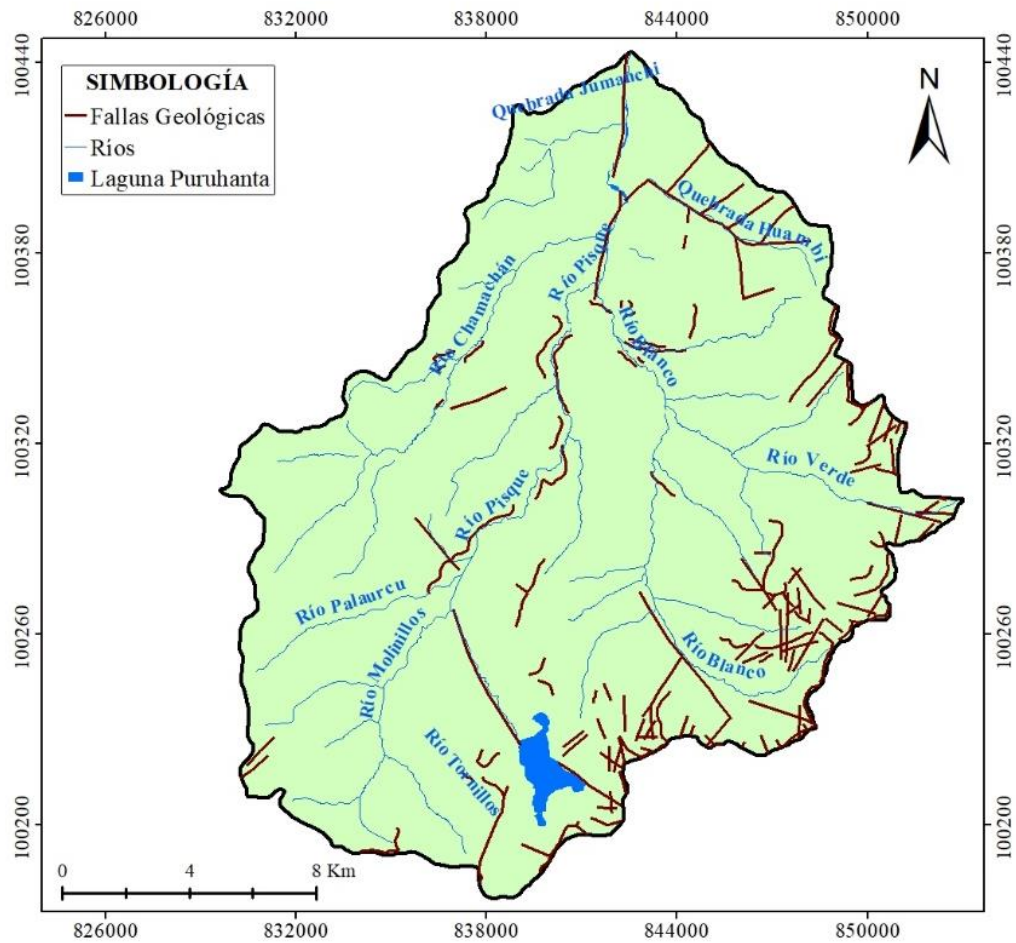
### **3.1.7 Fallas geológicas**

El cantón Pimampiro presenta fallas geológicas en todo el territorio y muchas de estas, siguen el cauce de varios ríos, como son: Mataquí (norte-sur), Blanco (norte-este), Pisque (norte-oeste), Chamachán (norte-sur) y río Verde, Quebrada Jumanchi (este-oeste), Huambi (norte-este) y la falla en el sector El Inca, sentido este-oeste (Núñez, 2008). Las fallas geológicas de la subcuenca se representan en la Figura 9.



**Figura 9**

*Fallas geológicas dentro de la subcuenca del río Mataquí*



*Fuente:* Instituto Geográfico Militar

### 3.2 Métodos

La metodología fue dividida en 3 fases con base en los objetivos de la presente investigación. La primera fase fue determinar las zonas que tienden a presentar mayor susceptibilidad a movimientos de masa. La segunda consistió en calcular el umbral de lluvia o cantidad de precipitación que se necesita para que tenga lugar un deslizamiento. Y, por último, en la tercera fase se propuso un sistema de alerta temprana para la subcuenca del río Mataquí con los datos obtenidos de las dos fases anteriores. Cabe mencionar, que la fase uno y dos, fueron elaboradas simultáneamente. La Figura 10 muestra la metodología usada por los testistas.

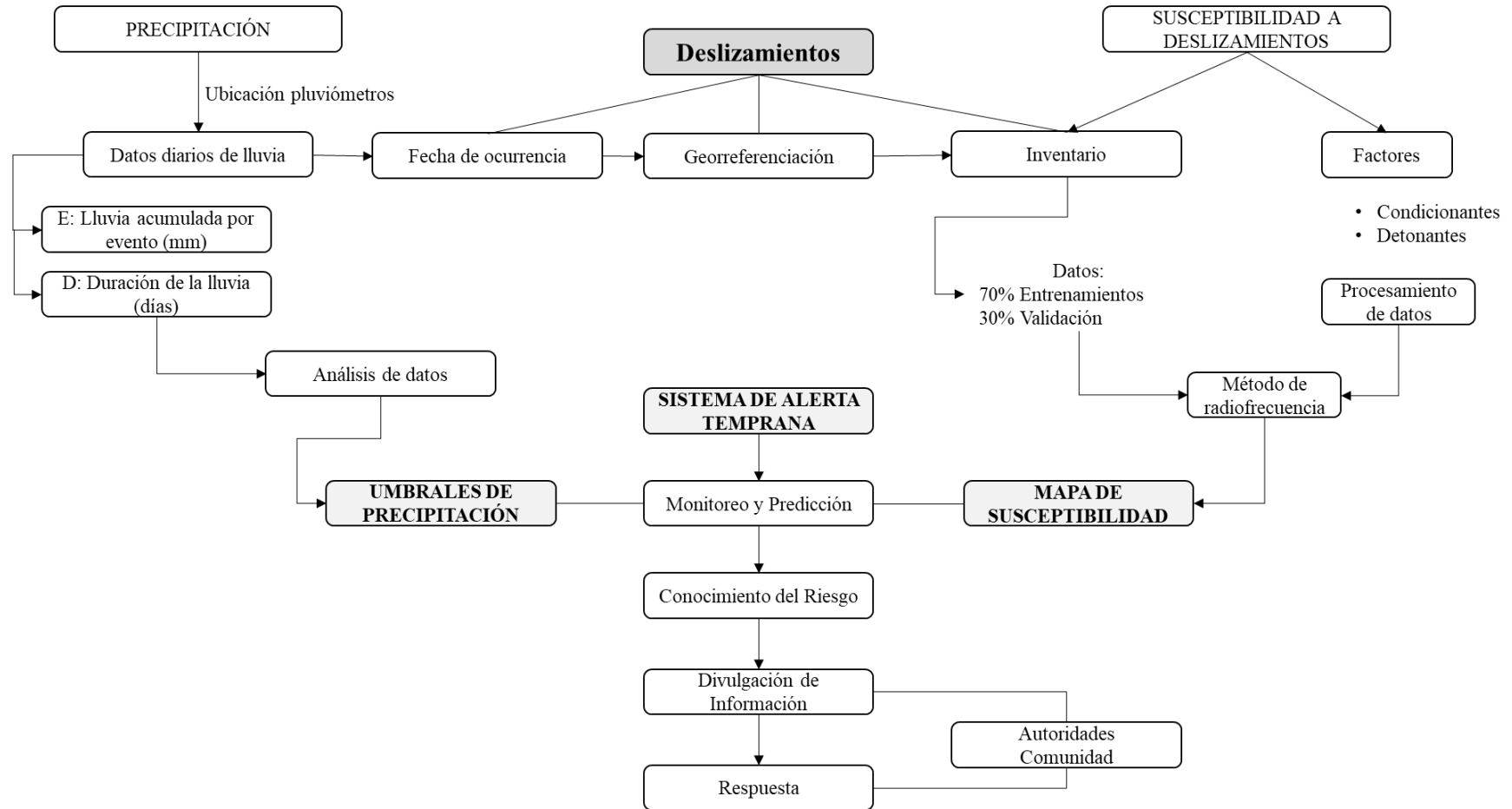
Como paso previo a las fases mencionadas, la subcuenta fue dividida en tres zonas con la finalidad de facilitar su estudio. La división se la hizo de acuerdo con la altitud del terreno: cuenca baja, media y alta. La primera, corresponde a las zonas circundantes de la parroquia urbana Pimampiro; la cuenca media, abarca zonas de las parroquias de Chugá y San Francisco de Sigsipamba, y finalmente, las zonas más altas, ubicadas principalmente en la parroquia Mariano Acosta, como se observa en el Anexo 2.

### ***3.2.1 Determinación de susceptibilidad a deslizamientos***

La representación de la susceptibilidad a deslizamientos, resultó de la relación e interacción entre los factores (condicionantes y detonantes) o variables, que intervienen en la ocurrencia de un movimiento en masa y un inventario de deslizamientos dentro del área de estudio (Escalante et al., 2020). El inventario, no es otra cosa, que un catálogo de puntos georreferenciados de los deslizamientos del área de estudio y/o el área circundante (AlThunwaynee et al., 2018). La metodología para lograr esta relación fue el Método de Radiofrecuencia, usado por AlThunwaynee et al. (2014), la cual es la que más se adapta a las condiciones del área de estudio. El resultado de esta metodología será la cartografía de susceptibilidad de la subcuenca, que será validada por la curva ROC.

**Figura 10**

*Esquema metodológico para el análisis de umbrales de precipitación en procesos de deslizamientos.*



### 3.2.1.1 Recopilación de Información

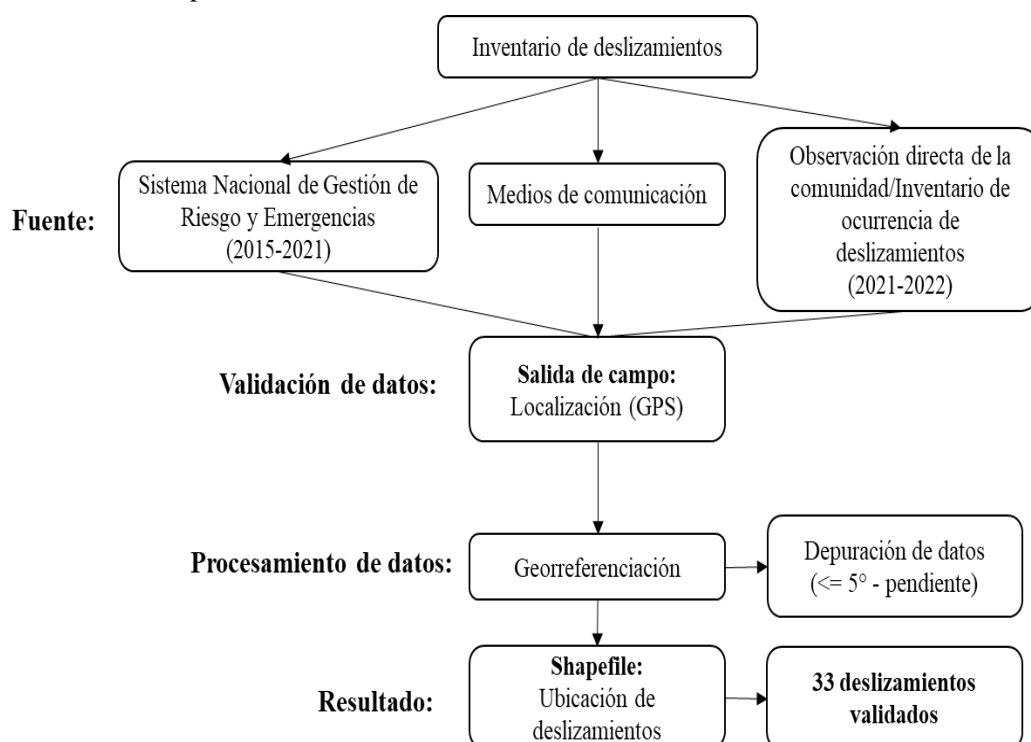
La metodología de radiofrecuencia precisa de dos elementos esenciales para poder construir un modelo de susceptibilidad: el inventario de deslizamientos correctamente georreferenciados y la información de los factores causales que intervienen en los procesos de movimientos en masa dentro de la subcuenca del río Mataquí.

- **Inventario de Deslizamientos**

Según el Servicio Geológico Colombiano (2017), los deslizamientos de tierra que se dieron en el pasado, pueden ser inventariados por medio de polígonos sobre un mapa de escala 1: 50 000, como también, por medio de la observación y registro dentro del área de estudio (p. 38). Para obtener este inventario de deslizamientos, se estableció la secuencia presentada en la Figura 11, misma que indica la utilización del inventario de fechas de ocurrencia de deslizamiento que se obtuvo en el objetivo: umbrales de precipitación.

**Figura 11**

*Procedimiento para obtener el inventario de deslizamientos.*



Los medios de comunicación y los servicios de gestión de riesgos (SNGRE), también ofrecen información, no solamente el lugar sino también de la fecha en los que se suscitaron movimientos en masa. Y, finalmente, la observación en campo de deslizamientos, como es el caso del Sector La Mesa con una escala referencial 1:194 (Anexo 6s) y la georreferenciación de estos puntos, permitieron estructurar el inventario de deslizamientos. La salida de campo también permitió validar la información otorgada por las fotos aéreas y los reportes de los medios de comunicación.

- ***Factores condicionantes y detonantes***

La metodología usada por AlThunwaynee et al. (2014) consistió en seleccionar los factores que más se adecuen al área de estudio, como se indica en la Tabla 6. Para ello, se tomó en cuenta las características geológicas, edáficas, climáticas y topográficas, de la subcuenca del río Mataquí (p. 23). Y como último paso, se recolectó la información vectorial y ráster de cada variable, que sirvió para cartografiar, en base a la metodología de radiofrecuencia.

Así mismo, se usó 2 variables detonantes que son determinantes en el área de estudio, debido a que el cantón Pimampiro, es susceptible a deslizamientos de tierra, debido a la presencia de fallas geológicas, sobre todo en la parte baja y media de la subcuenca, y a las altas precipitaciones, sobre todo en la parte media-alta (CIPRADEC, 2014)

**Tabla 6**  
*Factores condicionantes y detonantes dentro de la subcuenca del río Mataquí.*

| Tipo | Factor                   | Tipo de dato       | Fuente  | Descripción                             |
|------|--------------------------|--------------------|---|---|
| 1    | Litología                | Ráster             |   | Celda (10 m de resolución).             |
| 2    | Pendiente                | Ráster             | <a href="https://sni.gob.ec">https://sni.gob.ec</a>                 |   |
| 3    | Curvatura                | Ráster             |   | SRTM-DEM (10 m)                         |
| 4    | Aspecto                  | Ráster             |   |   |
| 5    | Cobertura y Uso de Suelo | Ráster y Vectorial | <a href="https://eos.com/landviewer">https://eos.com/landviewer</a> | Sentinel-2 Land Cover (10 m)/Marzo 2020 |

|    |               |                    |           |   |   |
|----|---------------|--------------------|-----------|---|---|
| 6  | Condicionante | Humedad del suelo  | Shapefile | <a href="http://www.inamhi.gob.ec">http://www.inamhi.gob.ec</a>               | Datos de temperatura INAMHI periodo (1986-2015) |
| 7  |               | Distancia a vías   |           | <a href="https://www.geoportaligm.gob.ec">https://www.geoportaligm.gob.ec</a> | Shp (escala 1:50.000)                           |
| 8  | Condicionante |                    | Shapefile | <a href="https://www.geoportaligm.gob.ec">https://www.geoportaligm.gob.ec</a> | Shp (escala 1:50.000)                           |
|    | Detonante     | Distancia a ríos   | Vectorial | Pluviómetros EcoWitt  | Datos de precipitación: ECOWITT (2021-2022)     |
|    |               |                    |           | <a href="http://www.inamhi.gob.ec">http://www.inamhi.gob.ec</a>               | INAMHI periodo (2021-2022)                      |
| 9  |               | Distancia a fallas |           | <a href="https://www.geoportaligm.gob.ec">https://www.geoportaligm.gob.ec</a> | Shp (escala 1:50.000)                           |
| 10 | Detonante     | Precipitación      | Shapefile | Pluviómetros EcoWitt  | Datos de precipitación: ECOWITT (2021-2022)     |
|    |               |                    | Vectorial | <a href="http://www.inamhi.gob.ec">http://www.inamhi.gob.ec</a>               | INAMHI periodo (2021-2022)                      |

*Nota.* Las variables utilizadas se adecúan a las condiciones del área de estudio, por ello, no se toma en cuenta otras variables como NDVI, rugosidad, entre otras.

Para cada variable se desarrolló cartografía temática de acuerdo con las características presentes en la subcuenca del río Mataquí. A continuación, se detalla cada uno de los factores condicionantes y detonantes, y la reclasificación que se le asignó en subcategorías, lo cual, será útil en el método de Radiofrecuencia.

### ***Litología***

La variable fue reclasificada de acuerdo con el tipo de roca existente, basado en la clasificación de Bowen y Schairer, (1956). Según el origen: rocas ígneas (plutónicas y volcánicas) y rocas sedimentarias (detríticas y químicas). De acuerdo con la textura: rocas metamórficas (foliadas y no foliadas). Dentro de esta clasificación antes mencionada, no se incluyó a los depósitos (sedimentarios y piroclásticos), sedimentos y flujos de lava.

## ***Pendiente***

Se realizó un mapa de pendientes, a través de un DEM de 10m. Con la herramienta *slope*, se obtiene el grado de las pendientes. Luego, se hizo una reclasificación a través de la herramienta *reclassify* de las pendientes en intervalos, que se muestran en la Tabla 7. Las pendientes más escarpadas, tienden a generar mayor riesgo a deslizamiento (Garzón, J. et al., 2012)

**Tabla 7**  
*Clasificación en intervalos de la pendiente.*

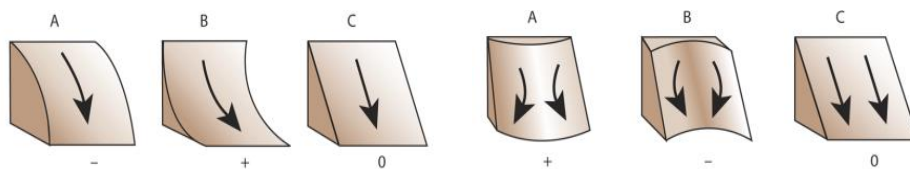
| <b>Intervalo (grados)</b> | <b>Tipo de terreno</b>  |
|---------------------------|-------------------------|
| 0-5                       | Plano                   |
| 5-12                      | Inclinado               |
| 12-25                     | Moderadamente escarpado |
| 25-60                     | Escarpado               |
| >60                       | Muy escarpado           |

*Nota:* Algunos valores fueron adaptados a la condición del terreno. Adaptada de: *Clases de pendiente, procesos esperados y condición del terreno.* Por Zuidam & Zuidam-Cancelado, (1986).

## ***Curvatura***

El tipo de curvatura potencia diversas características de la pendiente. Existen 3 opciones de curvatura de acuerdo con la perspectiva. Si analizamos la curvatura de perfil, esta es paralela a la pendiente y muestra la dirección de la pendiente máxima. Por otro lado, la curvatura de plano, es perpendicular a la dirección de la pendiente máxima; y repercute en la divergencia y convergencia del flujo superficial (ESRI, 2021), como se muestra en la Figura 12.

**Figura 12**  
*Curvatura del terreno.*



*Fuente:* Tomado de *Función de Curvatura*, por ArcGIS Desktop (2021).

Con el uso de la herramienta *reclassify*, se realizó una reclasificación de los valores del ráster, como se muestra en la Tabla 9. Los valores negativos, corresponden al terreno de tipo convexo y los valores positivos, son cóncavos.

**Tabla 8**  
**Clasificación de la curvatura del terreno.**

| Intervalo | Tipo de terreno |
|-----------|-----------------|
| -1        | Convexo         |
| 0         | Plano           |
| 1         | Cóncavo         |

Fuente: Tomado de *Función de Curvatura*, por ArcGIS Desktop (2021).

### *Aspecto*

Cada zona del terreno tiene un aspecto, a la cual se le establece un valor de código, el mismo que es la representación de la dirección ya sea cardinal u ordinal de su pendiente. Las áreas cercanas que poseen un código similar, se unifican en una sola entidad (ESRI, 2020). Esta variable determina la dirección cardinal hacia donde se dirige el flujo de la superficie, se mide en grados. Mediante la herramienta *reclassify* se realizó una reclasificación de los valores (Tabla 10).

**Tabla 9**  
*Rangos de clasificación de la variable aspecto.*

| Código | Dirección de la pendiente | Intervalo (grados) |
|--------|---------------------------|--------------------|
| -1     | Plano                     | Sin pendiente      |
| 1      | Norte                     | 0° - 22.5°         |
| 2      | Noreste                   | 22.5° - 67.5°      |
| 3      | Este                      | 67.5° - 112.5°     |
| 4      | Sureste                   | 112.5° - 157.5°    |
| 5      | Sur                       | 157.5° - 202.5°    |
| 6      | Suroeste                  | 202.5° - 247.5°    |
| 7      | Oeste                     | 247.5° - 292.5°    |
| 8      | Noreste                   | 292.5° - 337.5°    |
| 9      | Norte                     | 337.5° - 360°      |

Fuente: Tomado de *TIN Aspect*, por ESRI (2020)



### ***Cobertura y uso de suelo***

La cobertura del suelo, aún causa debate entre varios autores, acerca de su efecto detonante o condicionante a los diferentes tipos de deslizamientos (Imaizumi et al., 2008). Los autores Dai y Lee (2002), afirman que la cobertura vegetal influye en las propiedades mecánicas del suelo, mejora la cohesión, el potencial mátrico se ve fomentado por medio de la evapotranspiración y fortifica la matriz del suelo. Sin embargo, en estudios más actuales, se menciona que este puede considerarse como un factor condicionante importante mas no como detonante (Gomez y Kavzoglu, 2015).

La variable uso y cobertura del suelo de la subcuenca, contempló una fase de campo y un procesamiento de información en softwares SIG. En la fase de campo se georreferenciaron las coordenadas de 10 puntos de control por cada cobertura presente en el área de estudio: cultivos (Anexo 6a), área arbustiva (Anexo 6b), áreas sin vegetación (Anexo 6c), cuerpos de agua (Anexo 6d), bosque (Anexo 6e), áreas urbanas (Anexo 6f), páramo (Anexo 6g) y pastos (Anexo 6h), a lo largo de toda la cuenca. Con estos puntos y una imagen satelital Sentinel 2, se realizó una clasificación supervisada mediante firmas espectrales. El mapa resultante se validó mediante el índice Kappa, que demuestra la confiabilidad del resultado.

### ***Humedad del suelo***

La humedad del terreno se calculó con el Índice Topográfico de Humedad (TWI por sus siglas en inglés). El TWI se relaciona con la humedad en el suelo que refleja su tendencia a provocar escorrentías, es por ello, que los suelos con mayor humedad son más propensos a saturarse, por lo tanto, cuando la lluvia se precipita sobre ellos, tiene más facilidad de convertirse en escorrentía (Lobo y Kamp, 2012). La textura del suelo también es importante, por ejemplo, en un suelo arcilloso, se dan cambios de volumen, debido a las fluctuaciones de humedad. Estas expansiones y contracciones propician agrietamientos y cambios en la estructura del suelo, sobre todo en la pérdida de resistencia (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

Cuanto más alto es el valor del índice, mayor será la humedad que contenga la celda en función de la configuración topográfica. Esta última es obtenida a través

de un DEM, la precisión y robustez del TWI, depende de la escala y exactitud del DEM (Florinsky et al., 2002). Para generar el ráster del TWI, se usó el archivo de pendientes (**SR**); para luego, usar el DEM de 10m y mediante la herramienta *flow accumulation* (**ACU**), se determinaron las zonas donde se acumula el agua.

Luego, fue necesario determinar la pendiente de la tangente (**ST**), para ellos, se usó la herramienta *raster calculator*, con la siguiente fórmula:

$$ST = \text{Con}(SR) > (0, \text{Tan } SR, 001)$$

Como siguiente paso, se calculó la superficie de contribución de agua arriba (**UCA**), por medio de la siguiente fórmula:

$$UCA = (ACU + 1) * \text{tamaño pixel (10m)}$$

Finalmente, se agrupó todos los datos para calcular el TWI, en la siguiente fórmula:

$$TWI = \text{Ln} \left( \frac{UCA}{ST} \right) \quad (1)$$

Para reclasificar el ráster obtenido, se usó la herramienta *reclassify*. La metodología usada para esta reclasificación fue aplicada en un estudio por Al-Abadi et al., (2016), donde se clasifica en valores del 1 al 5; 1 es baja humedad y 5 muy alta humedad, como se muestra, en la Tabla 10.

**Tabla 10**  
*Clasificación del TWI.*

| Valores | Humedad  | Intervalo |
|---------|----------|-----------|
| 1       | Baja     | 0.1 – 3.3 |
| 2       | Moderada | 3.3 – 6.7 |
| 3       | Media    | 6.7 – 10  |
| 4       | Alta     | 10 – 13.4 |
| 5       | Muy alta | 13.4      |

### *Precipitación*

Para esta investigación, se utilizó la precipitación media anual. Para ello, se usó los datos de precipitación histórica de las estaciones cercanas, y con la herramienta *kriging*, se hizo una interpolación para obtener un ráster de toda la zona de estudio. Posteriormente, se reclasificaron los valores, tal como se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11**  
*Clasificación para la variable precipitación*

| Valores | Precipitación | Intervalo (mm/año) |
|---------|---------------|--------------------|
| 1       | Baja          | 565.06 - 688.66    |
| 2       | Moderada      | 688.66 - 812.27    |
| 3       | Media         | 812.27 - 935.87    |
| 4       | Alta          | 935.87 - 1059.47   |
| 5       | Muy alta      | 1059.47 - 1183.07  |

### *Distancia a fallas, ríos y vías*

La distancia a vías, ríos y fallas fue calculada con la herramienta *near*, para luego, mediante la herramienta *reclassify*, reclasificar los valores en 5 categorías convenientes para el estudio, como se indica en la Tabla 12 (AlThunwaynee, 2014).

**Tabla 12**  
*Intervalos para distancias a fallas, ríos y vías.*

|   | Fallas       | Ríos      | Vías       |
|---|--------------|-----------|------------|
| 1 | 0 a 336      | 0 a 100   | 0 a 250    |
| 2 | 331 a 1240   | 100 a 200 | 250 a 500  |
| 3 | 1241 a 3671  | 200 a 300 | 500 a 750  |
| 4 | 3671 a 10210 | 300 a 400 | 750 a 1000 |
| 5 | >10210       | >400      | >1000      |

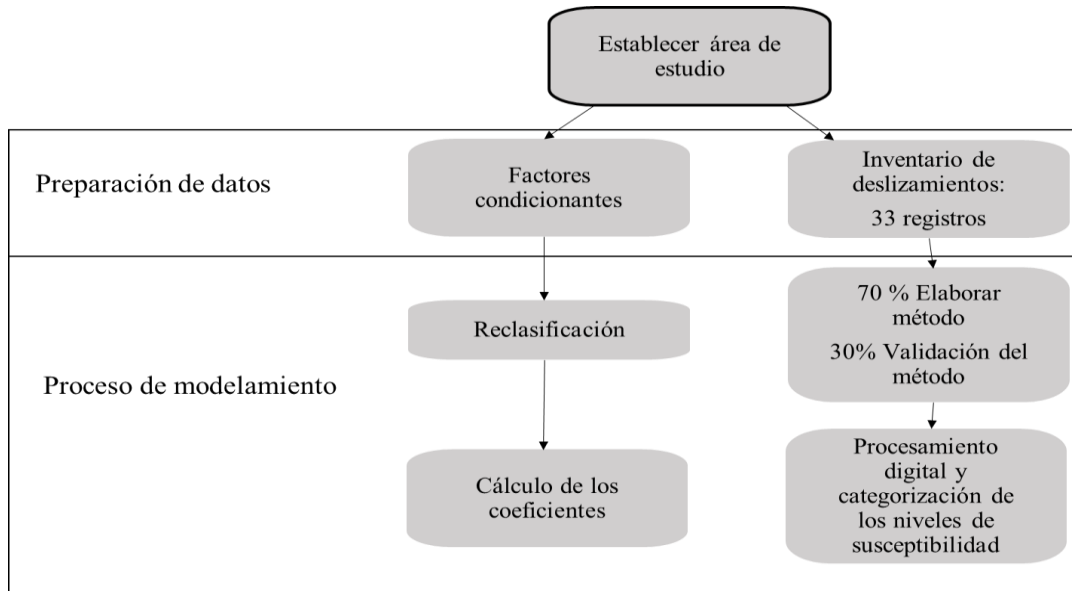
### 3.2.1.2 Método de radiofrecuencia

El método de radiofrecuencia está basado en una agrupación de tipo cuantificada entre los inventarios y los factores denominados condicionantes (AlThuwaynee et al., 2014). En esta investigación, indica la relación entre la superficie donde se suscitaron los deslizamientos y los factores que fueron considerados condicionantes y detonantes dentro del área de estudio. Para ello se utilizó el programa ArcGIS, y los autores AlThunwaynee et al (2014), recomiendan usar el 70% del inventario como áreas de entrenamiento y el 30% restante, como validación del método (p. 26).

Las clasificaciones de los factores anteriormente mencionados se modificaron en función del peso obtenido a partir de la frecuencia relativa y los deslizamientos, esta acción generó una reclasificación de todos los factores, conveniente para el área de estudio. Las ponderaciones se ejecutaron debido a la comparación pareada entre todos los factores que intervienen.

**Figura 13**

*Metodología para establecer niveles de susceptibilidad*



*Nota.* Tomado de *A novel ensemble bivariate statistical evidential belief function with knowledge-based analytical hierarchy process and multivariate statistical logistic regression for landslide susceptibility mapping* (p. 24), por AlThuwaynee et al, (2014).

La ecuación 2 representa la susceptibilidad a deslizamientos, la cual, generó los distintos rangos. Se usó el enfoque estadístico bivariado por su capacidad de precisión lógica (Althuwaynee et al., 2014). Se empleó la regla del intervalo para clasificar los distintos niveles de susceptibilidad en el modelamiento y finalmente se categorizó en cinco niveles de susceptibilidad, que ayudará a diseñar cartografía de susceptibilidad de la subcuenca del río Mataquí.

$$Susceptibilidad = \sum(rf\_variable * RF) \quad (2)$$

Donde:

rf\_variable: Ráster reclasificado para cada variable

RF: Factor de radiofrecuencia para cada variable.

### 3.2.1.3 Validación del modelamiento

No existe un método estandarizado para validar los modelos de susceptibilidad, debido a que depende de la disponibilidad de la calidad de datos para evaluar las pruebas estadísticas, es decir, tener registros y ocurrencias de deslizamientos futuros (Althuwaynee et al., 2014). Se validó el modelo cartográfico al compararse los cinco niveles de susceptibilidad resultantes, con los deslizamientos seleccionados aleatoriamente para la validación mediante la aplicación de la curva ROC.

La curva ROC toma en cuenta la sensibilidad (número de deslizamientos) y la especificidad (áreas en donde se presentaron estos fenómenos) (Amorim et al., 2009). Para ello se utilizó las siguientes formulas:

$$Sensibilidad = FVP = \frac{VP}{(VP + FN)} \quad (3)$$

$$Especificidad = FVN = 1 - FFP = \frac{VN}{N} = \frac{VN}{VN + FP} \quad (4)$$

Donde:

FVP= Fracción de verdaderos positivos

FVN= Fracción de verdaderos negativos

FFP= Fracción de falsos positivos

VP= Verdadero positivo

VN= Verdadero negativo

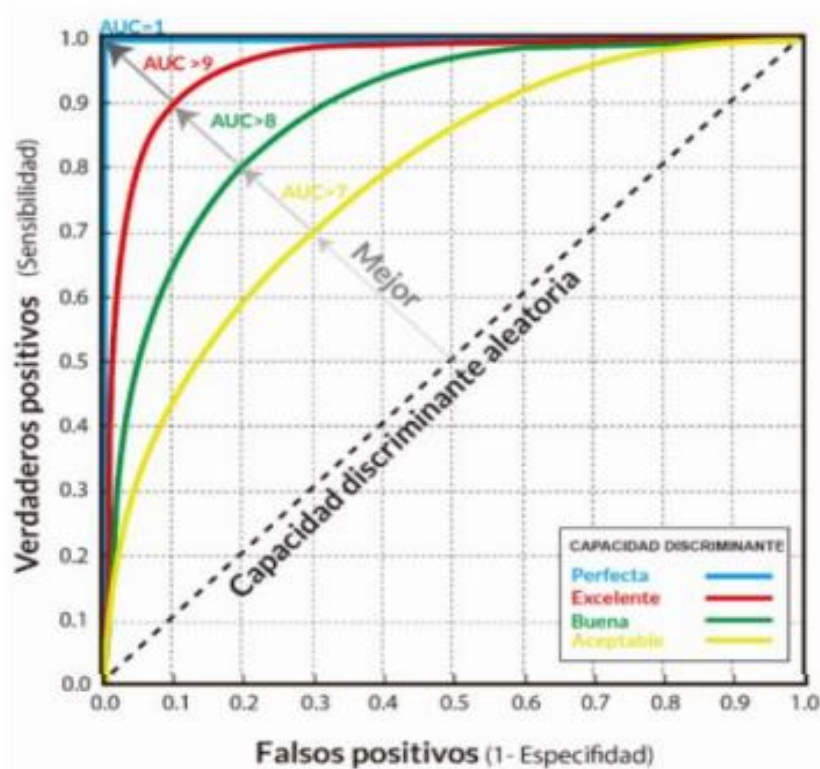
FP= Falso positivo

FN= Falso negativo

Se trazó la curva ROC, gracias a los parámetros mencionados anteriormente, en donde el eje de las Y es representado por 1- la sensibilidad y el eje de las X: 1- especificidad, el resultado que genera esta gráfica, es un área bajo la curva que indica si el modelo no tiene capacidad predictiva, con valores menores a 0,5 o 1 cuando el modelamiento tiene su máxima capacidad predictiva, representado en la Figura 14 (Gutiérrez et al., 2018).

### Figura 14

Curva Receiver Operating Characteristics



Fuente: Tomado de *Boletín de la Asociación Española de Geografía*, por Gutiérrez et al., (2018).

### 3.2.2. Establecimiento de los umbrales de precipitación

Para determinar los umbrales de precipitación, se necesitaron dos conjuntos de datos: datos de pluviosidad diaria y las fechas de ocurrencia de deslizamientos (inventario). Para ello, fue necesario la instalación de equipos pluviométricos en zonas que tienden a reportar deslizamientos con mayor frecuencia. Y para registrar el inventario de fechas de deslizamientos, se utilizó la metodología del observador directo y la recopilación de información en medios de comunicación.

#### 3.2.2.1 Datos de pluviosidad

Para la obtención de datos de pluviosidad, los pluviómetros fueron ubicados en cada una de las subdivisiones de la subcuenca: Pimampiro (Anexo 6m), Chugá (Anexo 6n) y Nueva América (Anexo 6k), como se observa en el Anexo 2. Se usó pluviómetros digitales Ecowitt WH5360B, tienen la capacidad de almacenamiento de hasta 3 años y una gran resistencia a las condiciones climáticas. La finalidad de estos equipos es medir la pluviosidad diaria de las zonas en donde históricamente se han registrado deslizamientos (AlThunwaynee et al., 2014).

Estos equipos tienen la capacidad de medir la pluviosidad diaria, semanal, mensual y anual; no solamente datos de lluvia, sino también temperatura y humedad atmosférica (ECOWITT, 2022). Cada dos meses, se realizaron monitoreos del estado de los equipos y mantenimiento de estos, para detectar cualquier anomalía en su funcionamiento, Anexos 6l y 6o. El tiempo de toma de datos de lluvia y las coordenadas de los pluviómetros se detallan en la Tabla 13.

**Tabla 13**

*Coordenadas y fechas de instalación de los equipos de medición*

| No. | Zona          | Coordenada (UTM)   | Fecha de instalación | Fecha de retiro |
|-----|---------------|--------------------|----------------------|-----------------|
| 1   | Pimampiro     | 10043900E 841108 N | 20/08/2021           | 09/04/2022      |
| 2   | Chugá         | 10041500E 846398 N | 04/07/2021           | 09/04/2022      |
| 3   | Nueva América | 10028200E 835702N  | 06/09/2021           | 09/04/2022      |

### **3.2.2.2. Inventario de fechas de ocurrencia de deslizamientos**

Se contó con tres fuentes de información para armar un inventario de fechas de ocurrencia de deslizamientos. La primera, en concordancia con la metodología utilizada por AlThunwaynee et al. (2014), que utiliza la información emitida por las entidades gubernamentales. En el caso de Ecuador, es el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE), que lleva un registro de los desastres naturales que ocurren en todas las provincias del Ecuador.

La segunda fuente debido a que el SNGRE no cubre la incidencia de estos eventos en su totalidad, es necesario un observador directo. Según Taylor y Bogdan (1986), de acuerdo con la finalidad y las necesidades del investigador, se puede hacer uso de un informante clave. Este informante es una persona que es capaz de ofrecer información vital, relevante y veraz sobre un elemento o fenómeno que es objeto de estudio.

En el caso de esta investigación, el informante clave fue un habitante de las comunidades dentro del área de estudio, con quién, se llegó a un acuerdo, para que notifique a los investigadores, la fecha de ocurrencia de un movimiento en masa, que se haya suscitado en su sector. Finalmente, las noticias de periódicos locales y digitales, que hayan documentado deslizamientos en el área de estudio (AlThuwaynee et al., 2014).

### **3.2.2.3. Cálculo de umbrales de precipitación**

Durante los días de registro de pluviosidad, se identificaron dos tipos de datos: los días en los que se registraron deslizamientos y en los que no se presentaron ningún movimiento en masa. El umbral de precipitación se determinó con los datos de pluviosidad de los días en los que hubo deslizamientos, para cada una de las estaciones pluviométricas. La pluviosidad diaria, sirvieron para determinar las tres variables de precipitación, indispensables en el cálculo de umbrales: lluvia acumulada (E) y la duración del evento de lluvia (D). El cociente entre E y D permite obtener la intensidad (I) del evento de lluvia.



La lluvia acumulada (E), es la suma de las precipitaciones diarias consecutivas de un evento de lluvia; se expresa en mm. La duración del evento de lluvia (D), es el número de días que dura una tormenta; expresada en días. En cuanto a la intensidad (I), es la relación entre lluvia acumulada y la duración, tiene como unidades mm/día y se expresa en la ecuación (1) deslizamiento (AlThuwaynee et al., 2018).

$$I = \frac{E}{D} \left( \frac{mm}{dia} \right) \quad (5)$$

Existen dos tipos de umbrales que son ampliamente usados en el mundo (Lee et al, 2014), los umbrales basados en la intensidad (I) y los umbrales basados en la lluvia acumulada y la duración (ED), ambos utilizan las variables de precipitación de los días en los que se presentaron deslizamientos. Para seleccionar el umbral que más se ajustó al área de estudio, dependió de los resultados del primer objetivo y la correlación entre las tres variables de precipitación.

#### 3.2.2.4. Modelo dinámico basado en la frecuencia

El modelo dinámico se construyó a través de una función de transferencia, la cual es una expresión matemática que establece las relaciones de “entrada – salida” de sistemas lineales que no varían en el tiempo. En otras palabras, define la relación de la transformada de Laplace de la salida (función respuesta), a la transformada de Laplace de la entrada (función excitadora), bajo la suposición de condiciones iniciales cero (Peña, 2015). En la presente investigación, la función excitadora es la precipitación; y la función de respuesta, son los movimientos en masa.

Sea el sistema lineal invariante en el tiempo definido por la siguiente ecuación:

$$a_y \cdot y^n + a_1 \cdot y^{(n+1)} + \dots + a_{(n-1)} \cdot y + a_n \cdot y = b_o \cdot x^m + b_1 \cdot x^{(m-1)} + \dots + b_{(m-1)} \cdot x + b_m \cdot x$$

Donde:

y= salida; x = entrada

Se reemplaza por la transformada de Laplace:

$$(a_0.S^n + a_1.S^{(n-1)} + \dots + a_{(n-1)}.S + a_n).Y_{(s)} = (b_0.S^m + b_1.S^{(m-1)} + \dots + b_{(m-1)}.S + b_m)X_{(s)}$$

La ecuación que se usará es la que se obtiene de la relación entre la salida ( $Y_{(s)}$ ) y la entrada ( $X_{(s)}$ ):

$$G_{(s)} = \frac{Y_{(s)}}{X_{(s)}} = \frac{b_0.S^m + b_1.S^{(m-1)} + \dots + b_{(m-1)}.S + b_m}{a_0.S^n + a_1.S^{(n-1)} + \dots + a_{(n-1)}.S + a_n} \quad (7)$$

La ecuación resultante (7) relaciona la salida y la entrada de un sistema lineal que no varía en el tiempo, en términos de los parámetros del sistema y constituye una propiedad que no depende de una función excitadora. Para establecer la función de la transferencia de cada estación, se usó los datos de pluviosidad diaria y el inventario de ocurrencia de deslizamientos.

### ***Estado Transitorio***

A través de los polos y ceros del sistema, se determinó el tiempo de respuesta promedio que tendrían las autoridades competentes para reaccionar, entre el momento en el que se rebasa el umbral de precipitación y el instante en el que se suscita un movimiento en masa. Este lapso, está respaldado con el fit del sistema, el cual, si es mayor al 70%, existe una alta fiabilidad (Peña, 2015).

### ***3.2.3 Diseño de una propuesta de un sistema de alerta temprana***

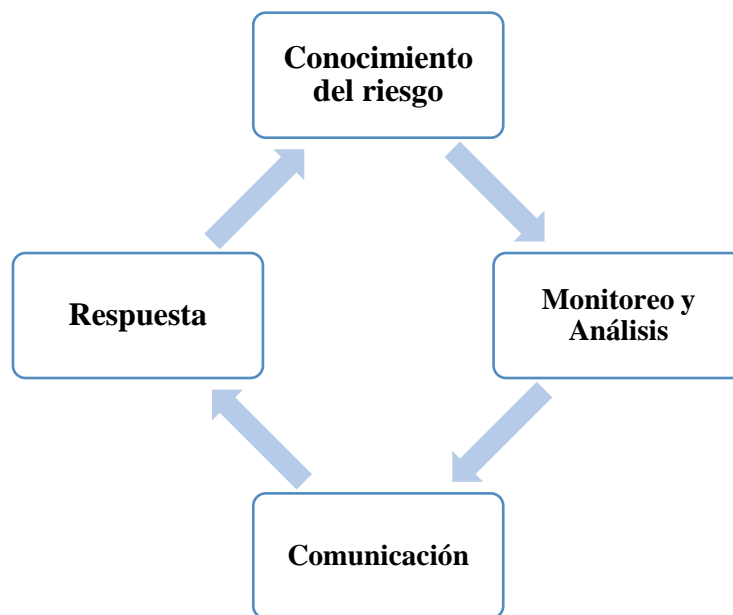
Para elaborar una propuesta de un mecanismo que ayude a anticipar procesos de deslizamientos en la cuenca del río Mataquí, se aplicó una metodología heurística, que son sumamente útiles al momento de buscar buenas soluciones a un determinado problema inteligentemente, con el uso de información disponible, aunque no se pueda comprobar que esas soluciones sean las más óptimas (Díaz y González, 1996). Esta metodología no es producto de un análisis formal, sino más bien, se basa en el conocimiento experto acerca de una problemática a solucionar, a un costo razonable y asequible (WordPress, 2021).

De acuerdo con la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD, 2013), un SAT completo y funcional, debe contener cuatro elementos

primordiales, que se detallan en la Figura 15. Cada elemento, contiene una serie de componentes que ayudan a estructurar un SAT adecuado a las necesidades y condiciones de las personas beneficiadas (OEA, 2010). A continuación, se detalla en qué consiste cada elemento, se tomó en cuenta las recomendaciones de la EIRD (2013).

### **Figura 15**

*Elementos y componentes del Sistema de Alerta Temprana (SAT).*



*Nota:* Tomado de *Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres* (2013). El diseño de este SAT está enfocado a aplicarse en zonas de alta y muy alta susceptibilidad del área de estudio.

#### **3.2.3.1 Conocimiento del riesgo.**

Es el primer paso en la construcción de un SAT y que todo gestor de riesgos debe considerar. Consiste en el registro de datos y una aplicación de valoraciones de riesgo que debe responder a preguntas como: ¿se conocen las amenazas y el grado de vulnerabilidad? ¿se conoce los patrones o tendencias? y ¿los datos y mapas de riesgo, se encuentran disponibles?

#### **3.2.3.2 Monitoreo**

El monitoreo contempla el seguimiento y evaluación de los eventos que están relacionados directamente con los movimientos en masa. Esta etapa trata de responder las preguntas: ¿se monitorea los parámetros correctos?, ¿los datos son

actualizados y en tiempo real? y ¿se pueden elaborar alertas apropiadas y fiables? El factor desencadenante más importante que da lugar a deslizamientos es la precipitación (Caine, 1980; López, 2015); por lo tanto, la lluvia es la principal variable para monitorear.

### 3.2.3.3 Comunicación

Es la transmisión de los datos y su análisis a las comunidades beneficiarias por parte del personal técnico o gestor de riesgos, a través de una alarma. Este elemento busca dar respuesta a las siguientes preguntas: ¿todas las personas afectadas tienen acceso a los avisos?, ¿las alertas son fáciles de entender? y ¿la información es clara y fiable? En este punto se puede hacer uso de la tecnología, tales como alarmas comunitarias, sitios webs, aplicaciones, etc.

Las alertas pueden adoptar varios niveles, y el Comité de Operaciones de Emergencia (COE, 2022), maneja un sistema de alarmas a base de colores, y cada una simboliza un tipo de peligro diferente. Cada nivel o tipo de alarma, cobra importancia para anticipar a la gente ante una amenaza. En la Figura 16, se muestra la simbología de las alarmas en el país.

**Figura 16**

*Niveles de alerta del COE Nacional antes desastres.*



#### **3.2.3.4. Capacidad de respuesta**

La capacidad de respuesta es fundamental, ya que marca la diferencia entre un SAT y una alarma o aviso convencional. Es la capacidad de una comunidad a responder a un desastre natural. En este punto se debe responder a preguntas como: ¿se encuentran actualizados y han sido aprobados los planes de respuesta?, ¿la comunidad local participa activamente de las estrategias que contempla el SAT? y ¿la población se encuentra lista para reaccionar ante las alarmas emitidas?

Los movimientos en masa es un grave problema económico, social y ambiental en la subcuenca del río Mataquí. La implementación de un Sistema de Alerta Temprana que ayude a anticiparse a la ocurrencia de este tipo de desastre natural es una solución acertada. Siguiendo los elementos principales de un SAT y la consecución de los dos primeros objetivos de la presente investigación, se tuvo las herramientas para proponer un SAT adecuado para la subcuenca del río Mataquí.

### 3.2. Materiales y métodos

Los materiales y el equipo necesario para efectuar la presente investigación se detallan en la Tabla 14.

**Tabla 14**  
*Materiales utilizados durante la investigación.*

| <b>Materiales</b>  | <b>Equipos</b>                         |
|--|--|
| Libreta de campo   | Computadora portátil                   |
| Software ArcGIS  | Aplicación GPS para Android            |
| Software Microsoft Office Excel  | Cámara digital                         |
| Modelo digital del terreno (SRTM 10m)                                      | Pluviómetros digitales Ecowitt WH5360B |
| Imágenes satelitales Sentinel 2 (10x10m)                                   | Vehículo 4x4                           |
| Cartografía base a escala 1:25 000   |  |
| Fotografías aéreas del Cantón Pimampiro del año 1999.                      |  |
| Registro histórico de fenómenos naturales del cantón Pimampiro, del SNGRE. |  |
| Datos de precipitación del INAMHI  |  |

## Capítulo IV

### Resultados y discusión

Los resultados obtenidos de los dos primeros objetivos, fueron de vital importancia para elaborar una propuesta de Sistema de Alerta Temprana. La información de los lugares con mayor tendencia a verse afectados por deslizamientos y la cantidad de lluvia necesaria para que origine un movimiento en masa, ayudaron a crear una propuesta de un sistema de alarmas que puede ser útil en las poblaciones más susceptibles. Además, se realizó una discusión de los resultados, donde se consideró investigaciones o estudios similares, con la finalidad de contrastar o discernir la información generada.

#### 4.1 Susceptibilidad a deslizamientos

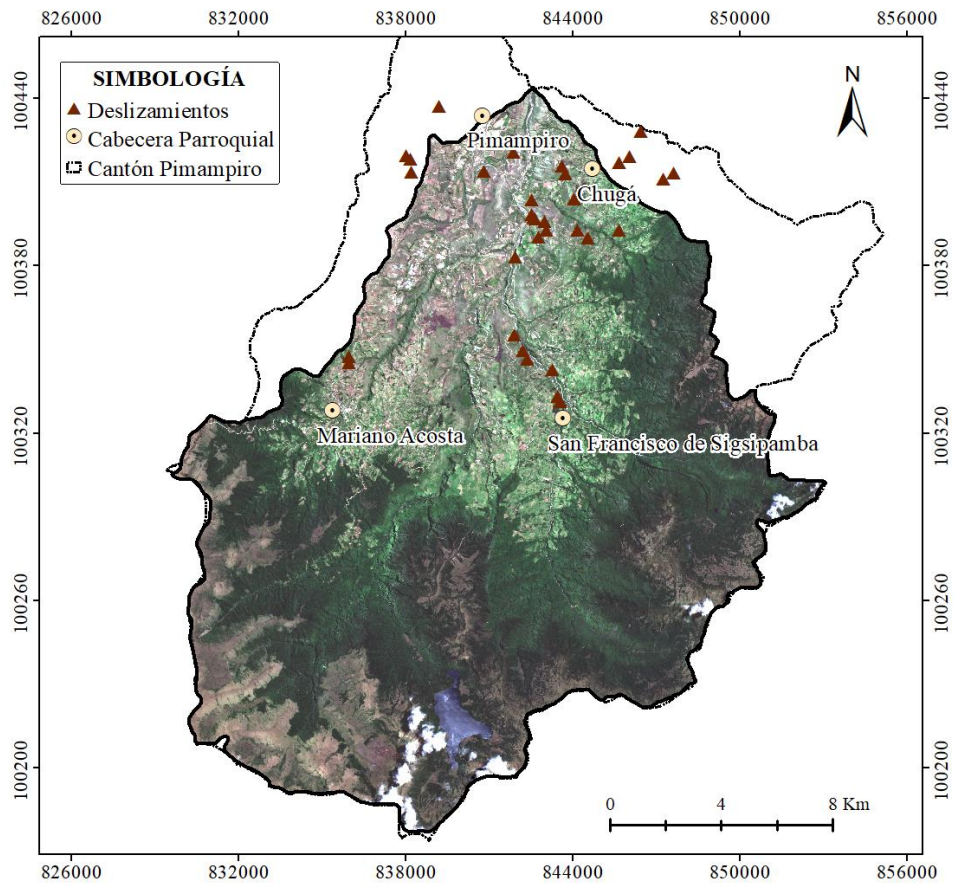
A través del método de radio frecuencia, se determinaron los niveles de susceptibilidad presentes en el área de estudio, por medio de cartografía, que identificó las zonas más susceptibles. La susceptibilidad se la reclasificó en 5 categorías, donde el nivel moderado abarca la mayor parte del área del cantón. Sin embargo, la susceptibilidad alta, abarcan zonas con presencia humana y se acentúan en vías, Anexo 4.

##### 4.1.1 Inventario de deslizamientos

El inventario se constituyó con 33 deslizamientos, 9 de los cuales no se incluyen dentro del área de estudio, sin embargo, se ubican en el cantón Pimampiro que es área de influencia para esta investigación (Figura 17). Se usó 25 datos de deslizamientos para áreas de entrenamiento y prueba (los puntos fueron escogidos aleatoriamente) y 8 para validar las áreas de susceptibilidad obtenidas (Anexo 3), como lo realizado por AlThuwaynee et al., (2014). El inventario fue validado mediante salidas de campo, por parte de los investigadores (Anexos 6j, s, t, u y v).

**Figura 17**

*Inventario de deslizamientos de la subcuenca del río Mataquí*



#### **4.1.2 Factores condicionantes y detonantes**

Los factores que intervienen dentro de la subcuenca del río Mataquí fueron escogidos con base en el método heurístico, es así como se encontraron diez variables convenientes para la investigación, las cuales son: precipitación media anual, distancia a: fallas geológicas, vías y ríos; pendiente, cobertura y uso de suelo, litología, aspecto, curvatura y humedad.

A diferencia de Mejía (2018), que incluye la variable permeabilidad pero omite distancia a fallas geológicas, vías y ríos, aspecto, curvatura y humedad, mismas que fueron procesadas por análisis multicriterio. Estas tres últimas variables se excluyeron en la investigación de Escalante et al., (2020), donde se utilizó la metodología de lógica Fuzzy. Ambos estudios fueron realizados en áreas dentro de la subcuenca del río Mataquí.



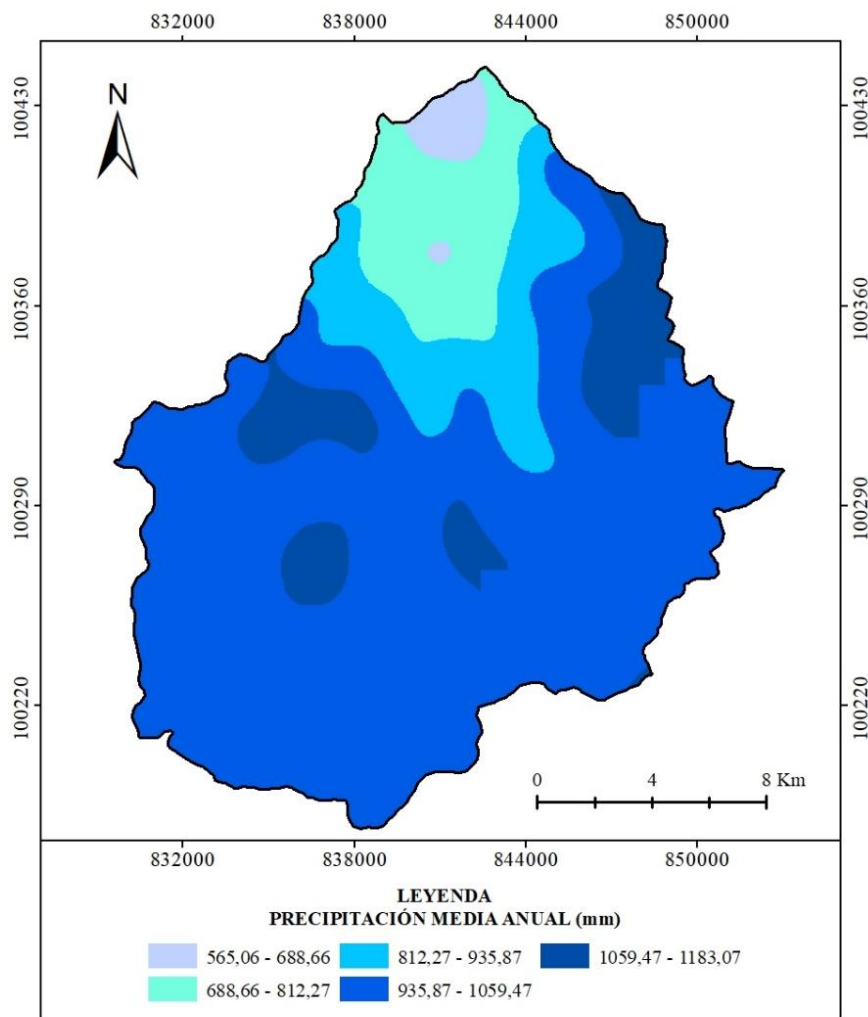
Las variables utilizadas en la metodología de radiofrecuencia tuvieron un procesamiento previo, antes de incluirse en el desarrollo para la clasificación de susceptibilidad a deslizamientos de la subcuenca del río Mataquí. Mismos que se detallan a continuación:

### Precipitación media anual

La precipitación media anual se indica en la Figura 18. Existen intervalos desde los 565.06 mm/año hasta 1 183.07 mm/año, distribuidos en cinco categorías, donde las cantidades de lluvia menores se presentan en la cuenca baja (Pimampiro y vía a San Francisco de Sigsipamba). Respecto a la cuenca alta, las precipitaciones elevadas son notables en los lugares: Mariano Acosta y Nueva América.

**Figura 18**

*Precipitación media anual de la subcuenca del río Mataquí*

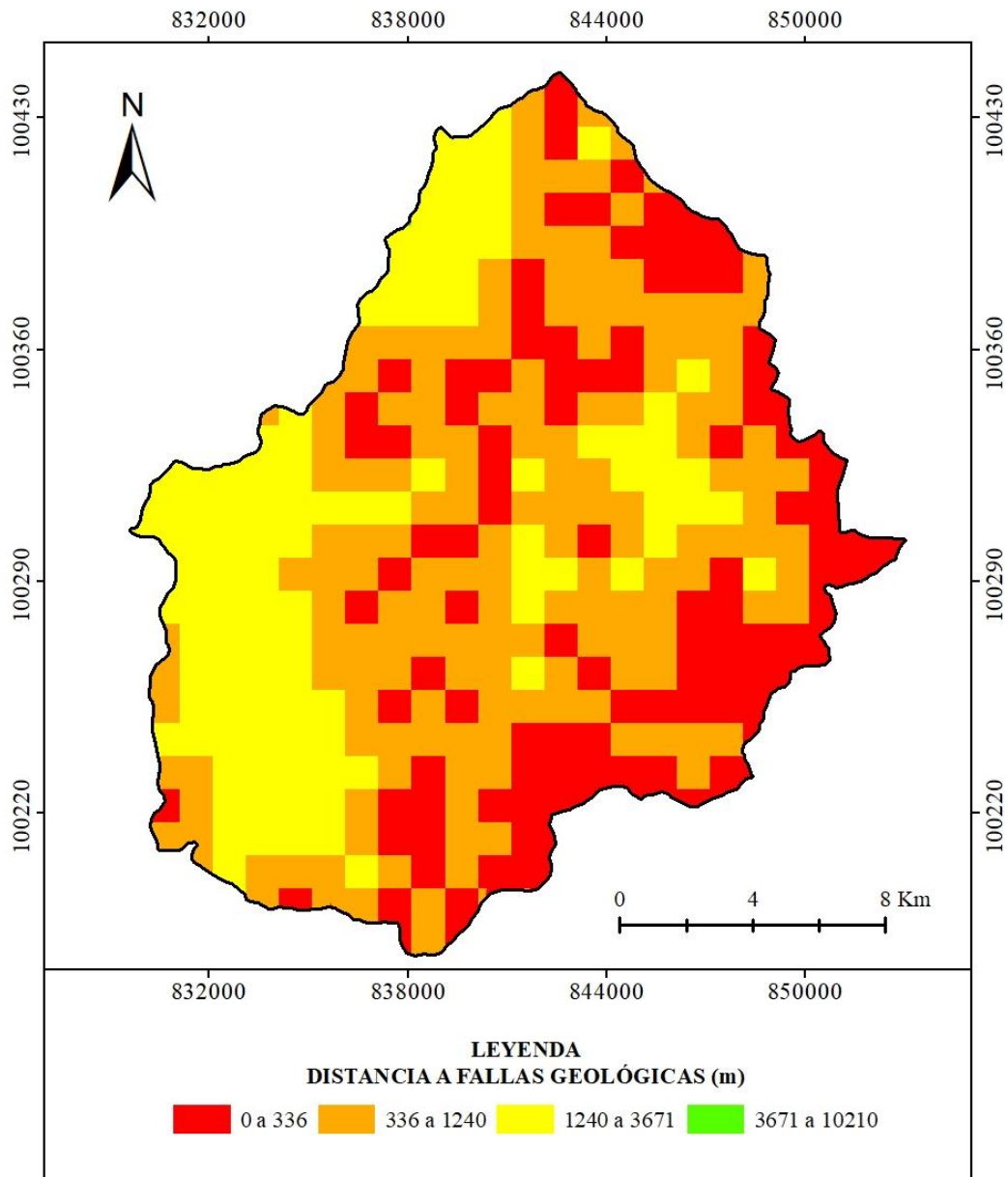


### Distancia a fallas geológicas

La subcuenca del río Mataquí comprende un conjunto de fallas geológicas, fracturas y fisuras. Se tomó en cuenta la distancia a estas estructuras, que comprende hasta los 10 210 metros, se realizó una clasificación en cinco niveles que convienen al área de estudio, como se identifica en la Figura 19. Las cuatro parroquias del cantón Pimampiro se encuentran sobre este sistema de fallas que pueden causar movimientos tectónicos y por ende deslizamientos de tierra.

**Figura 19**

*Distancia a fallas geológicas de la subcuenca del río Mataquí*

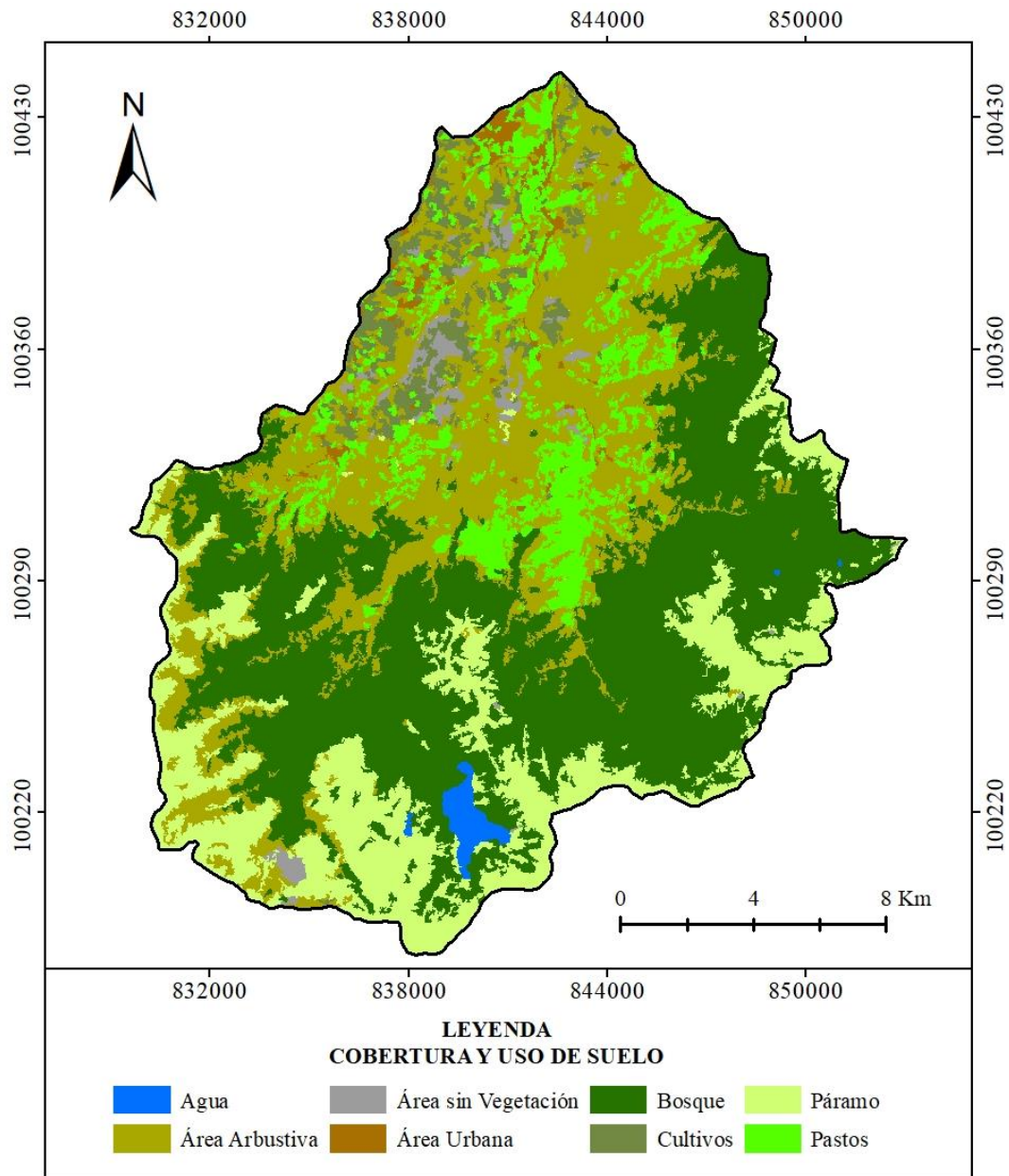


## Cobertura y uso de suelo

La clasificación de cobertura y uso de suelo se generó para el año 2022, donde se obtuvo ocho tipos de coberturas para la subcuenca del río Mataquí, como se indica en la Figura 20. La cuenca alta es cubierta por páramo, bosque y cuerpos de agua; respecto a la cuenca media y baja se tiene cultivos, pastos y áreas arbustivas; en menor cantidad existen zonas pobladas y áreas sin vegetación.

**Figura 20**

*Cobertura y uso de suelo de la subcuenca del río Mataquí*



- **Validación del mapa de uso y cobertura de suelo**

El índice Kappa con el que se validó el mapa de cobertura vegetal de la subcuenca del río Mataquí, tuvo un valor de 0.71, es decir, “considerable”; como se muestra en la Tabla 15.

**Tabla 15**  
**Resultado del cálculo del índice Kappa**

|                               |         | Base de datos |         |         |         |         |         |         |         | Clasificación | Precisión |
|-------------------------------|---------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|-----------|
|                               |         | Clase 1       | Clase 2 | Clase 3 | Clase 4 | Clase 5 | Clase 6 | Clase 7 | Clase 8 |               |           |
| Resultados Clasificados       | Clase 1 | 8             | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 8             | 100%      |
|                               | Clase 2 | 0             | 4       | 0       | 3       | 2       | 0       | 1       | 2       | 12            | 33.33%    |
|                               | Clase 3 | 0             | 1       | 10      | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 11            | 90.90%    |
|                               | Clase 4 | 0             | 0       | 0       | 6       | 0       | 1       | 2       | 0       | 9             | 66.66%    |
|                               | Clase 5 | 2             | 0       | 0       | 0       | 8       | 0       | 0       | 0       | 10            | 80%       |
|                               | Clase 6 | 0             | 5       | 0       | 1       | 0       | 8       | 0       | 0       | 14            | 57.14%    |
|                               | Clase 7 | 0             | 0       | 0       | 0       | 0       | 1       | 7       | 0       | 8             | 87.5%     |
|                               | Clase 8 |               | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 8       | 8             | 100%      |
|                               | Valores | 10            | 10      | 10      | 10      | 10      | 10      | 10      | 10      | 80            |           |
| Precisión                     | 80%     | 40%           | 100%    | 60%     | 80%     | 80%     | 70%     | 80%     |         |               |           |
| <i>Precisión general (OA)</i> |         | <b>73.75%</b> |         |         |         |         |         |         |         |               |           |
| <i>Kappa</i>                  |         | <b>0.7</b>    |         |         |         |         |         |         |         |               |           |

Nota: La índice kappa se mide de 0 a 1. Donde 0 es nula confiabilidad y 1 es la máxima. Valores mayores a 0.7 son aceptables.

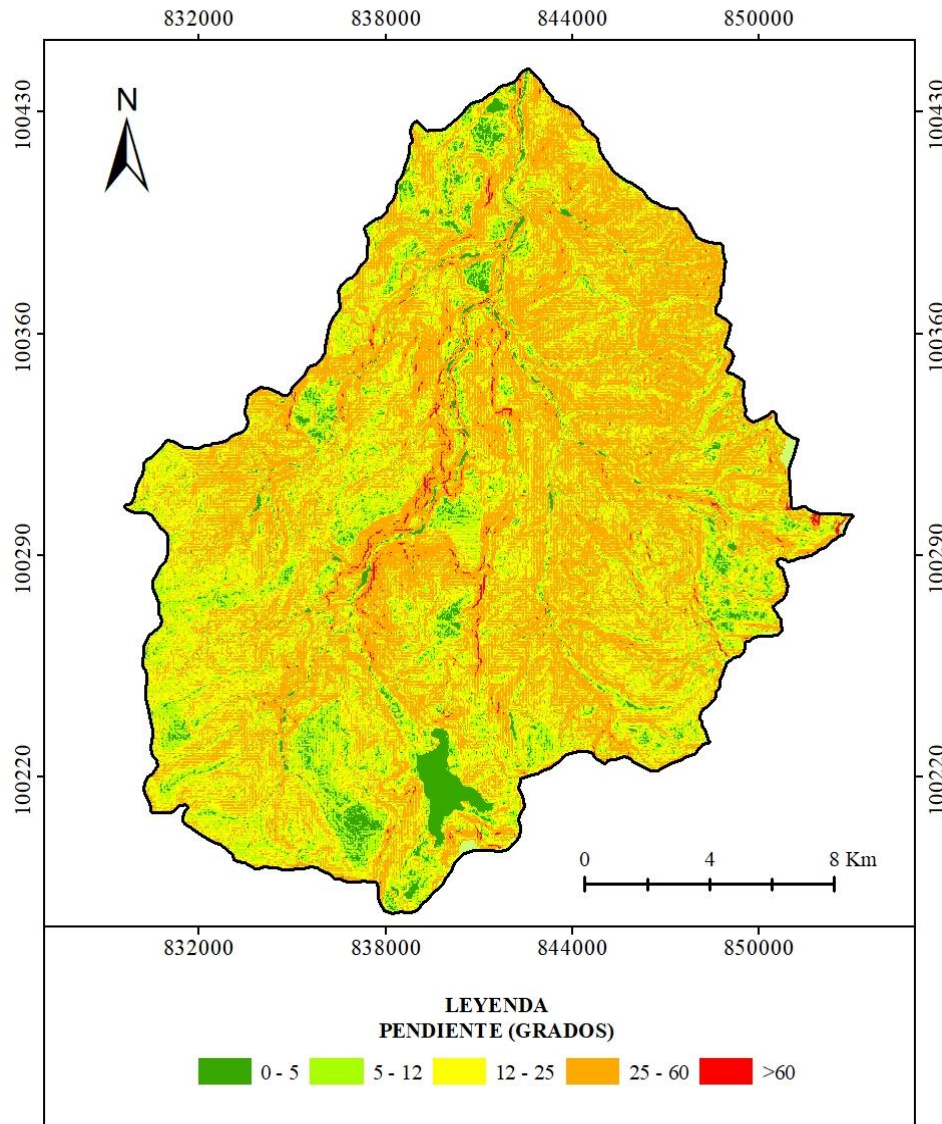
### Pendiente

La subcuenca del río Mataquí tuvo pendientes con valores de 0° a 5°, 5° a 12°, 12° a 25°, de 25° a 60° y mayor a 60° (Figura 21), corresponden a inclinaciones que van desde terrenos planos, pendientes ligeramente suaves y moderadas hasta pendientes abruptas y montañosas respectivamente. Existe predominancia en

pendientes desde los 12 ° hasta 60°, siendo más propensas a la hora de un deslizamiento.

**Figura 21**

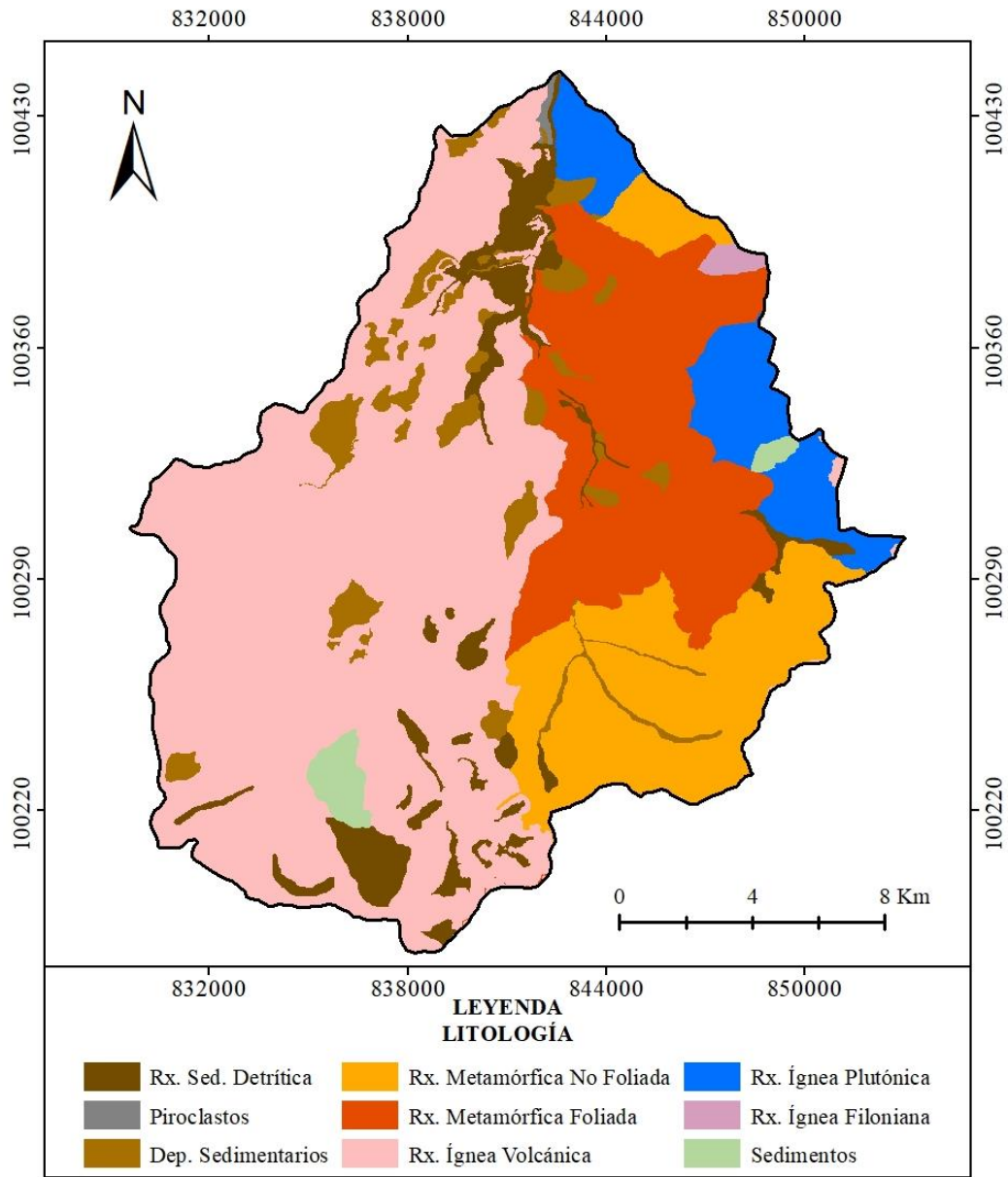
*Pendientes de la subcuenca del río Mataquí*



**Litología**

Existen diferentes formaciones geológicas que dieron lugar a la litología dentro de la subcuenca del río Mataquí, se realizó una clasificación generalizada tomando en cuenta al tipo de roca, donde se identificaron rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, así como también sedimentos, depósitos sedimentarios y piroclastos. La litología del área de estudio se muestra en la Figura 22.

**Figura 22**  
*Litología de la subcuenca del río Mataquí*

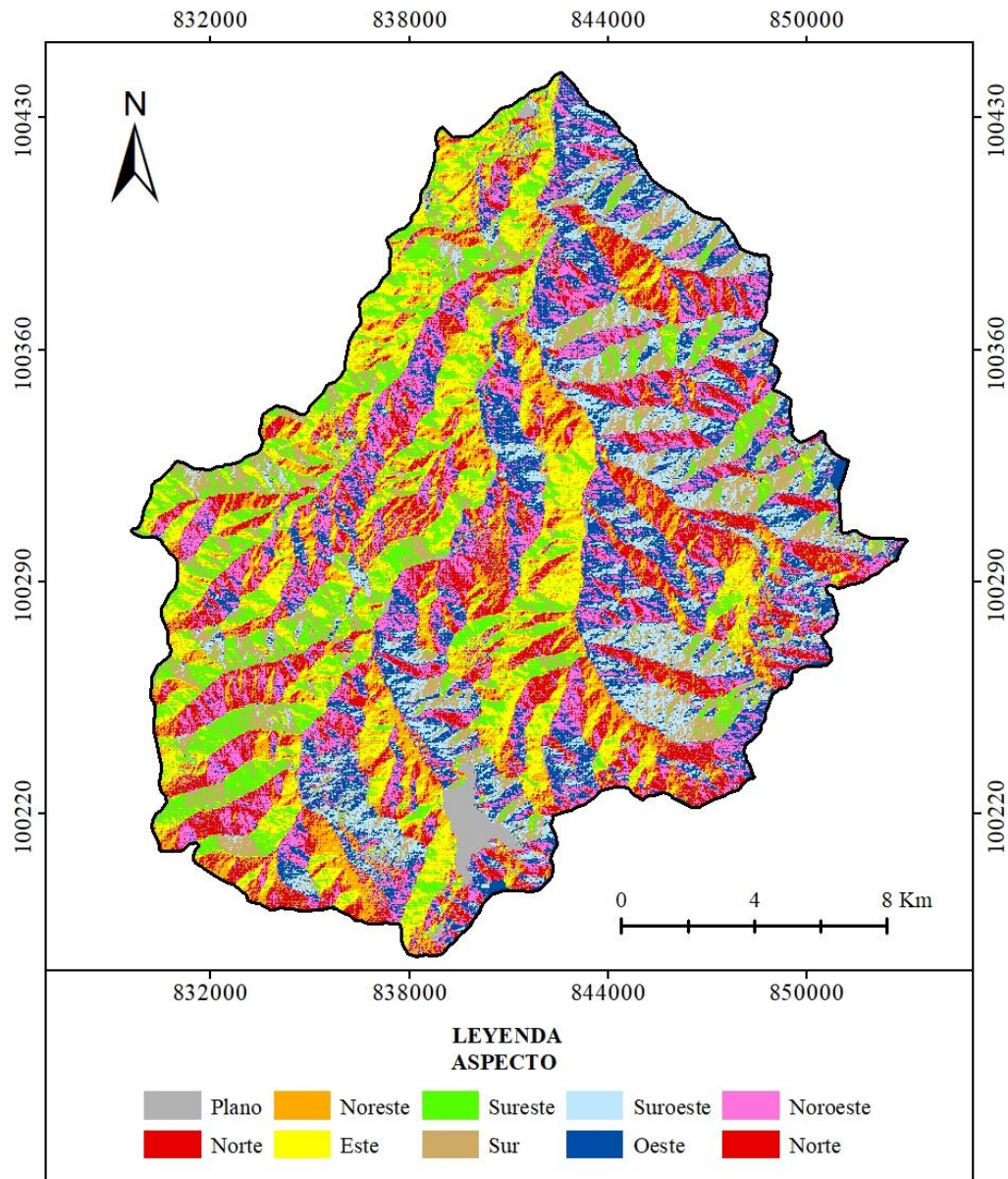


### **Orientación del terreno**

Respecto a la variable aspecto, la subcuenca del río Mataquí presentó dominancia en orientaciones Este, Sureste, Norte y Oeste respectivamente. Las demás orientaciones de terreno tuvieron baja presencia dentro del área de estudio, mismas que están representadas en la Figura 23.

**Figura 23**

*Orientación del terreno de la subcuenca del río Mataquí*

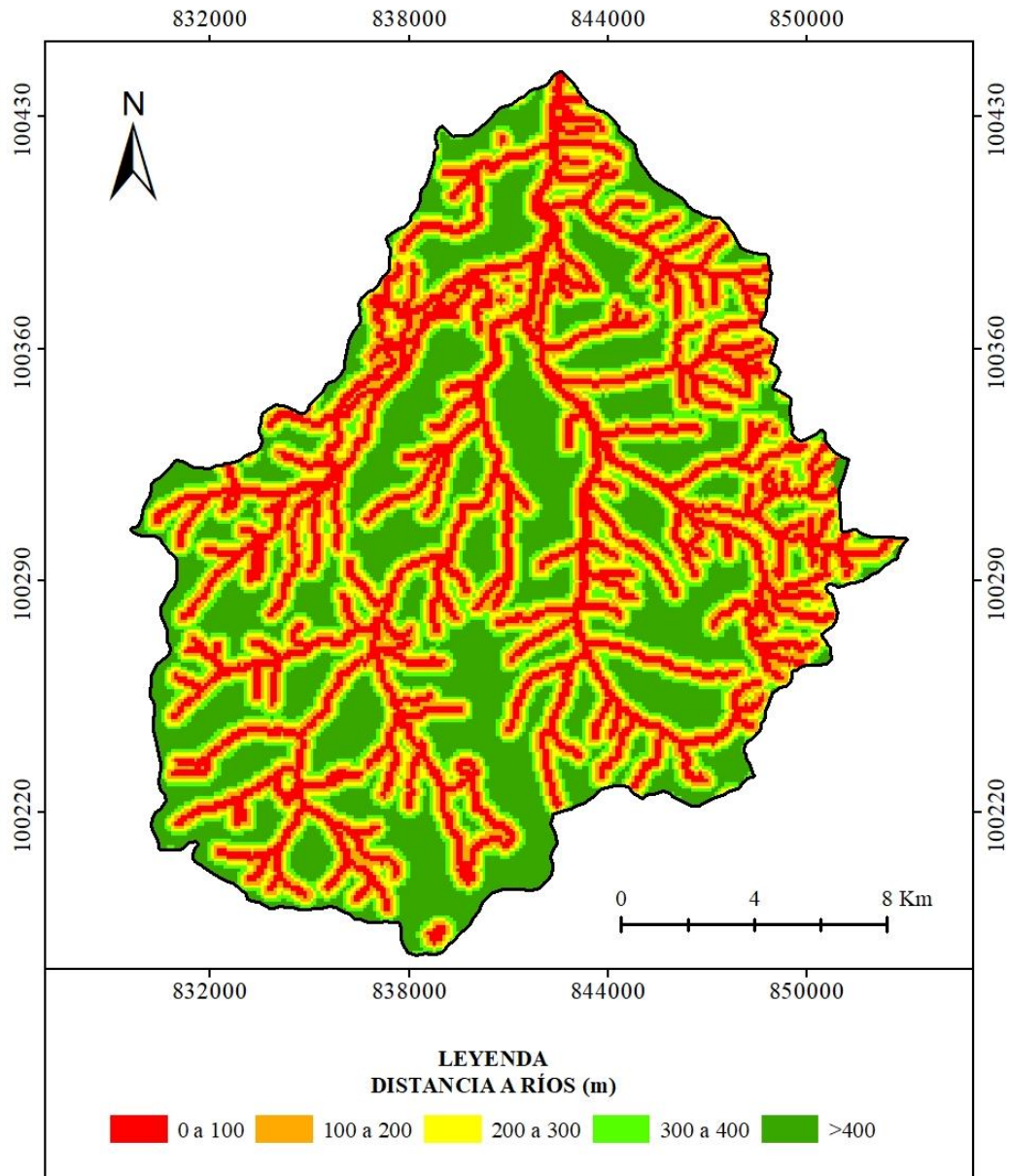


### **Distancia a ríos**

El área de estudio posee una red hídrica que inicia en el río Mataquí (principal), del cual se desprenden ríos y quebradas que se desplazan por toda el área de estudio. Se dividió en 5 niveles con una escala de 100 metros, inicia desde 0 hasta mayor a 400 metros. Estas distancias se encuentran distribuidas en toda la cuenca del río Mataquí, como se indica en la Figura 24.

**Figura 24**

*Distancia a ríos de la subcuenca del río Mataquí*



### **Distancia a vías**

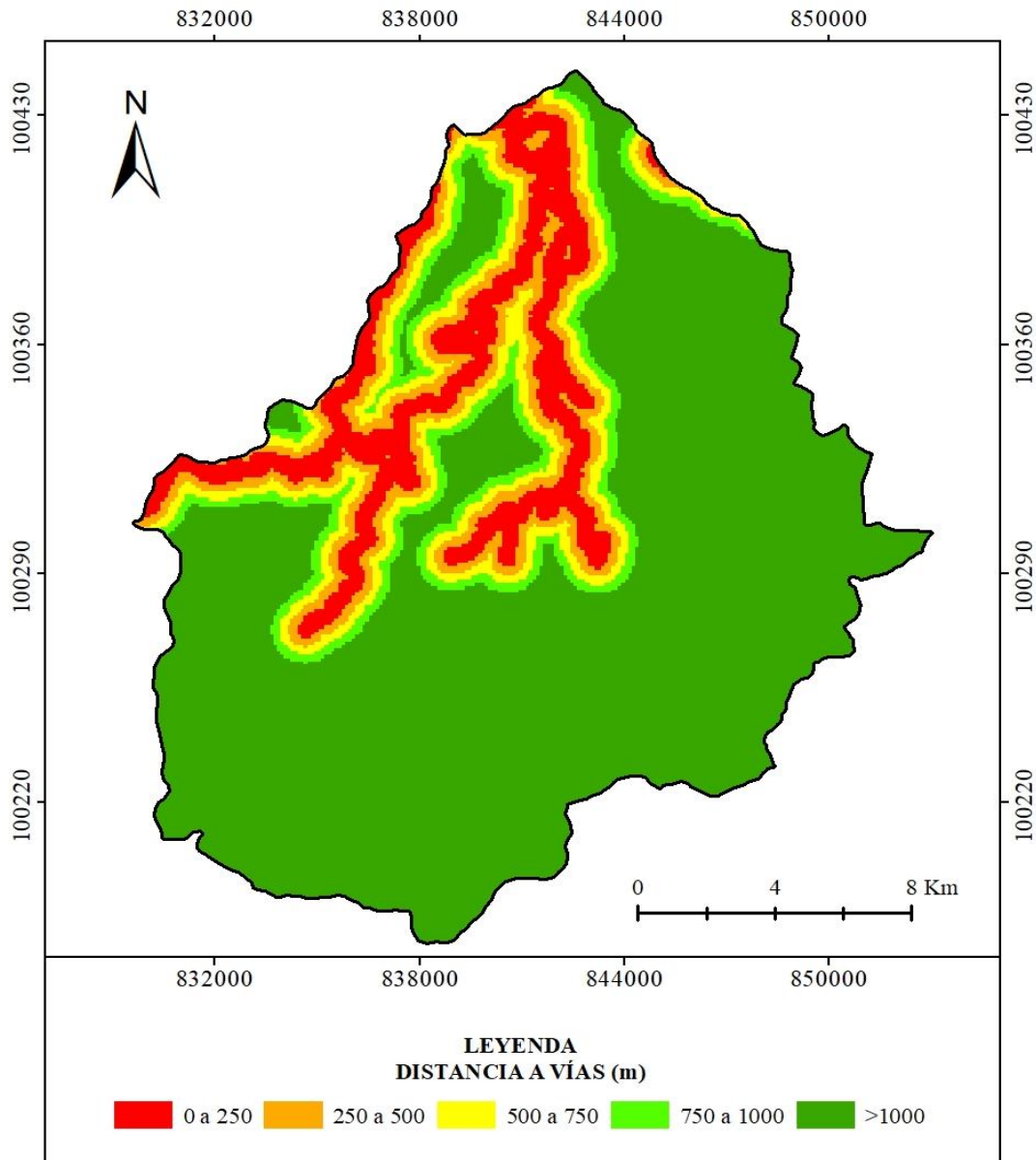
La presencia de vías dentro del área de estudio conecta a la parroquia Pimampiro con: Chugá, Mariano Acosta y San Francisco de Sigsipamba. Esta red vial posee en su mayoría caminos de segundo y tercer orden que no tienen estudios anteriores a su construcción, siendo uno de los principales problemas para que se susciten deslizamientos durante su trayecto. Es así como se estableció 5 categorías



que inician en distancias de 0 metros a los cauces de los ríos hasta mayores a 1 000 metros, en intervalos de 250 metros (Figura 25).

**Figura 25**

*Distancia a vías de la subcuenca del río Mataquí*

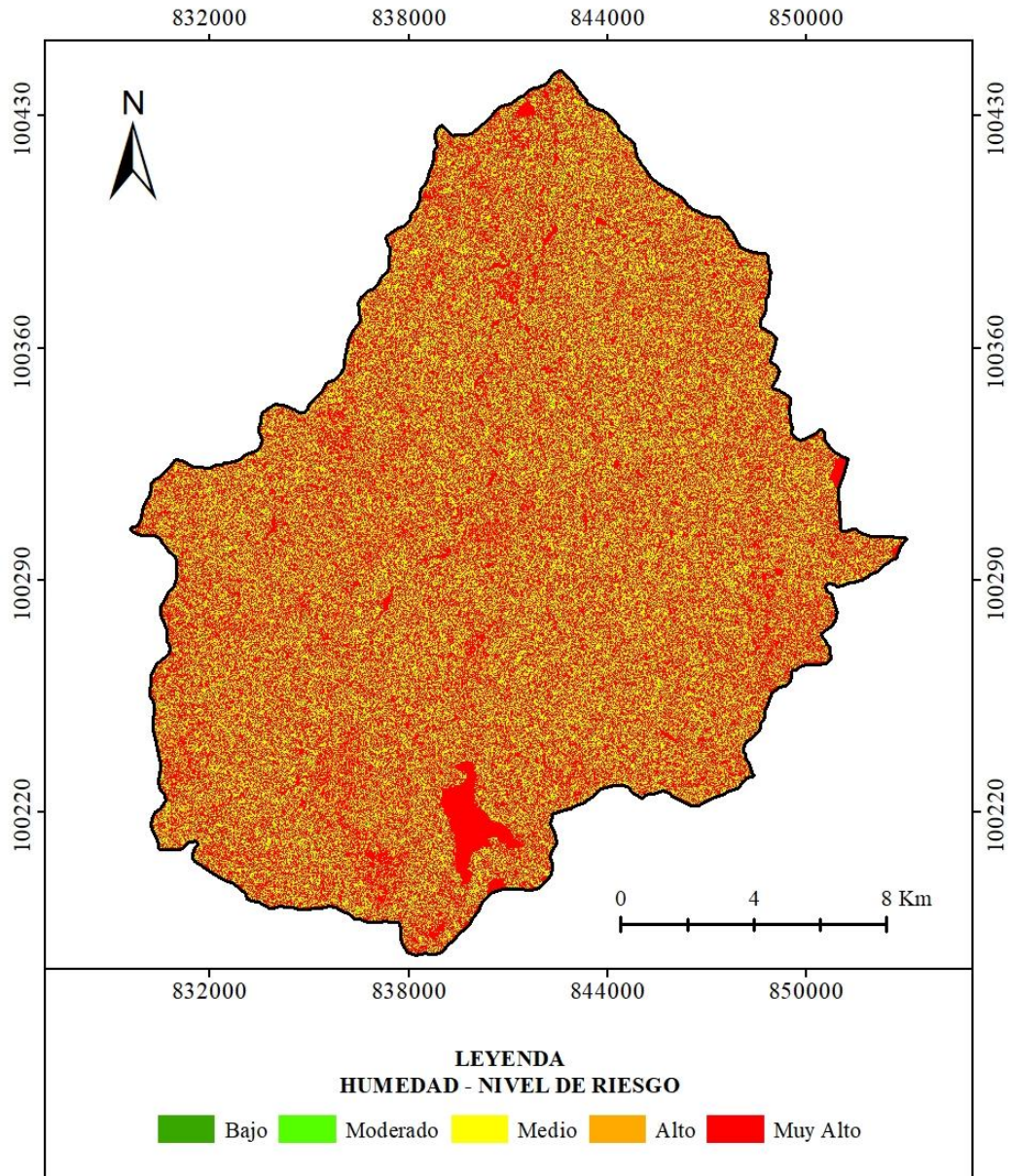


**Humedad**

La humedad relativa del suelo se clasificó en cinco categorías de acuerdo con el nivel de riesgo (bajo, moderado, medio, alto y muy alto) que representa un terreno según la cantidad de humedad que posea el suelo, representadas en la Figura 26. Los cinco niveles de riesgo estuvieron presentes dentro del área de estudio, sin

embargo, se resalta el riesgo muy alto y alto. Según esta variable, Mataquí es muy propenso a sufrir riesgos por fenómenos naturales.

**Figura 26**  
*Humedad de la subcuenca del río Mataquí*



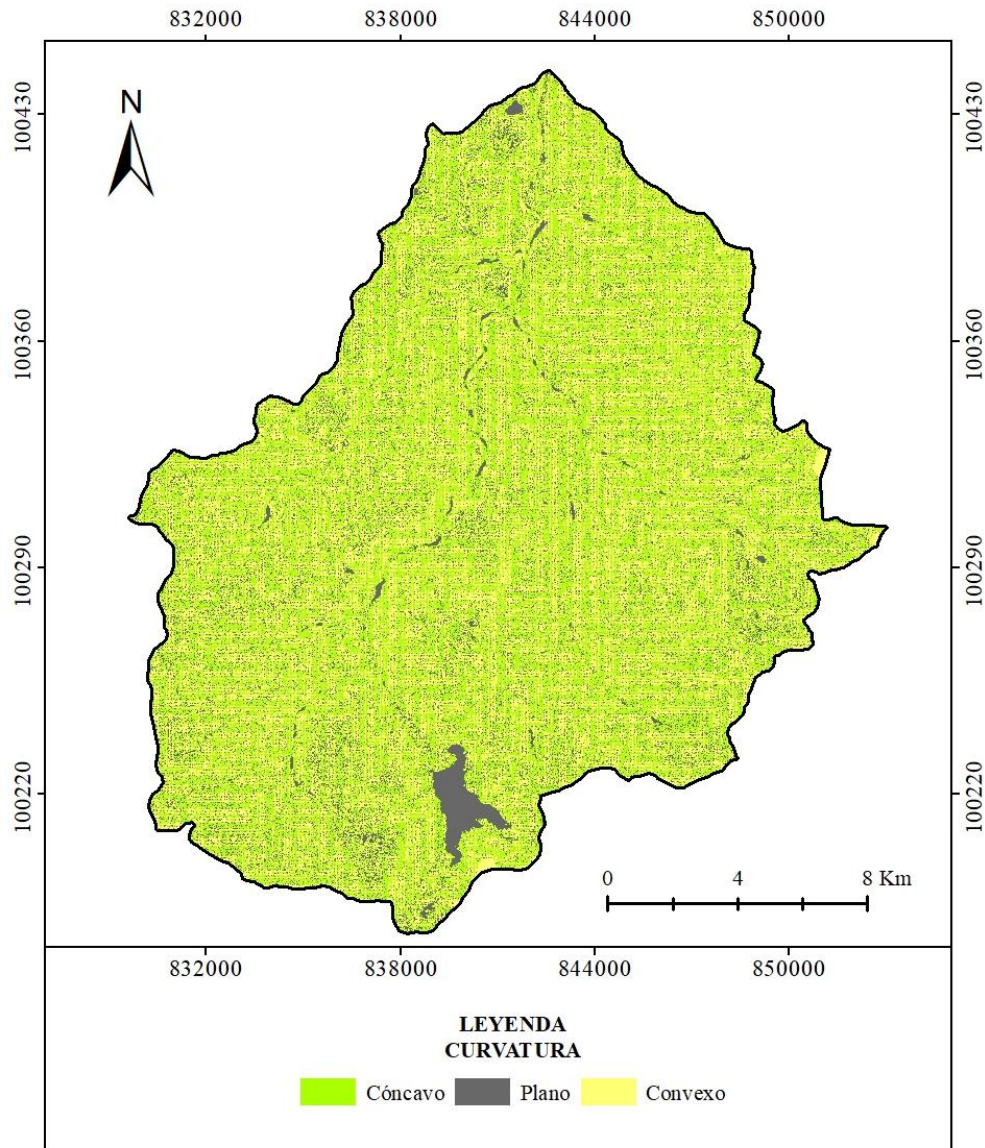
### Curvatura

Dentro de la subcuenca del río Mataquí, la variable curvatura se clasificó en cóncavo, plano y convexo. La curvatura de tipo cóncava tiene mayor relevancia en el área de estudio (Figura 27). Esta variable se relaciona directamente con el grado

de pendiente, siendo las curvaturas cóncavas, quienes tienen la capacidad para generar deslizamientos de mayor intensidad a diferencia de las convexas.

**Figura 27**

*Curvatura de la subcuenca del río Mataquí*



#### **4.1.3 Método de Radiofrecuencia**

##### **4.1.3.1 Factores causales**

Para los factores causales, se modificó la clasificación de cada variable, respecto a la cantidad de deslizamientos (datos de entrenamiento) suscitados en las diferentes categorías. Resultado de ello, se obtuvo una nueva categorización como

se presenta en la Figura 28. Se clasificaron 10 variables, de las cuales se dividió en dos grupos (detonantes y condicionantes).

Los factores detonantes son: la precipitación y el desplazamiento de fallas geológicas (distancia), capaces de producir sismos, en concordancia con Pozo, (2018) que abarca la cuenca del río Mira. Para ser utilizadas en el método de radiofrecuencia se necesitó procesar cada una de estas variables, fueron reclasificadas a partir de la frecuencia relativa, donde existen distintos niveles para cada una, como se muestra en la Tabla 16.

**Tabla 16**  
*Datos para la reclasificación, método de radiofrecuencia*

| Factor                                   | Factor classes  | No. Of points | % of points | Class area | % Class area | Ratio | RF       |    |
|--|-----------------|---------------|-------------|------------|--------------|-------|----------|----|
| <b>Distancia a Fallas Geológicas (m)</b> | 0-336           | 1100          | 42.31       | 1528727    | 26.46        | 1.59  | 0.51     | 51 |
|  | 336-1240        | 900           | 34.62       | 2423154    | 41.94        | 0.82  | 0.26     | 26 |
|  | 1240-3671       | 600           | 23.08       | 1806436    | 31.26        | 0.73  | 0.23     | 23 |
|  | 3671-10210      | 000           | 0           | 20000      | 0.346        | 0     | 0        | 0  |
|  |                 |               | <b>100</b>  |            | <b>100</b>   |       | <b>1</b> |    |
| <b>Precipitación Media Anual (mm)</b>    | 565.06-688.66   | 300           | 11.54       | 395433     | 5.84         | 1.97  | 0.23     | 23 |
|  | 688.66-812.27   | 1200          | 46.15       | 739167     | 10.91        | 4.23  | 0.50     | 50 |
|  | 812.27-935.87   | 600           | 23.08       | 816816     | 12.06        | 1.91  | 0.23     | 23 |
|  | 935.87-1059.47  | 500           | 19.23       | 3919543    | 57.85        | 0.33  | 0.04     | 4  |
|  | 1059.47-1183.07 | 000           | 00.00       | 903888     | 13.34        | 0     | 0        | 0  |
|  |                 |               | <b>100</b>  |            | <b>100</b>   |       | <b>1</b> |    |

*Nota:* Los valores se multiplicaron por 100 para mejorar la calidad en los modelamientos.

La nueva clasificación se generó a partir del inventario de deslizamientos, en donde las subcategorías de cada área que no presentaban estos eventos fueron eliminadas y las que presentaron la misma cantidad, se unieron en un solo rango. Es decir, el resultado del procedimiento a partir de la frecuencia relativa de los eventos en cada categoría y subcategoría.

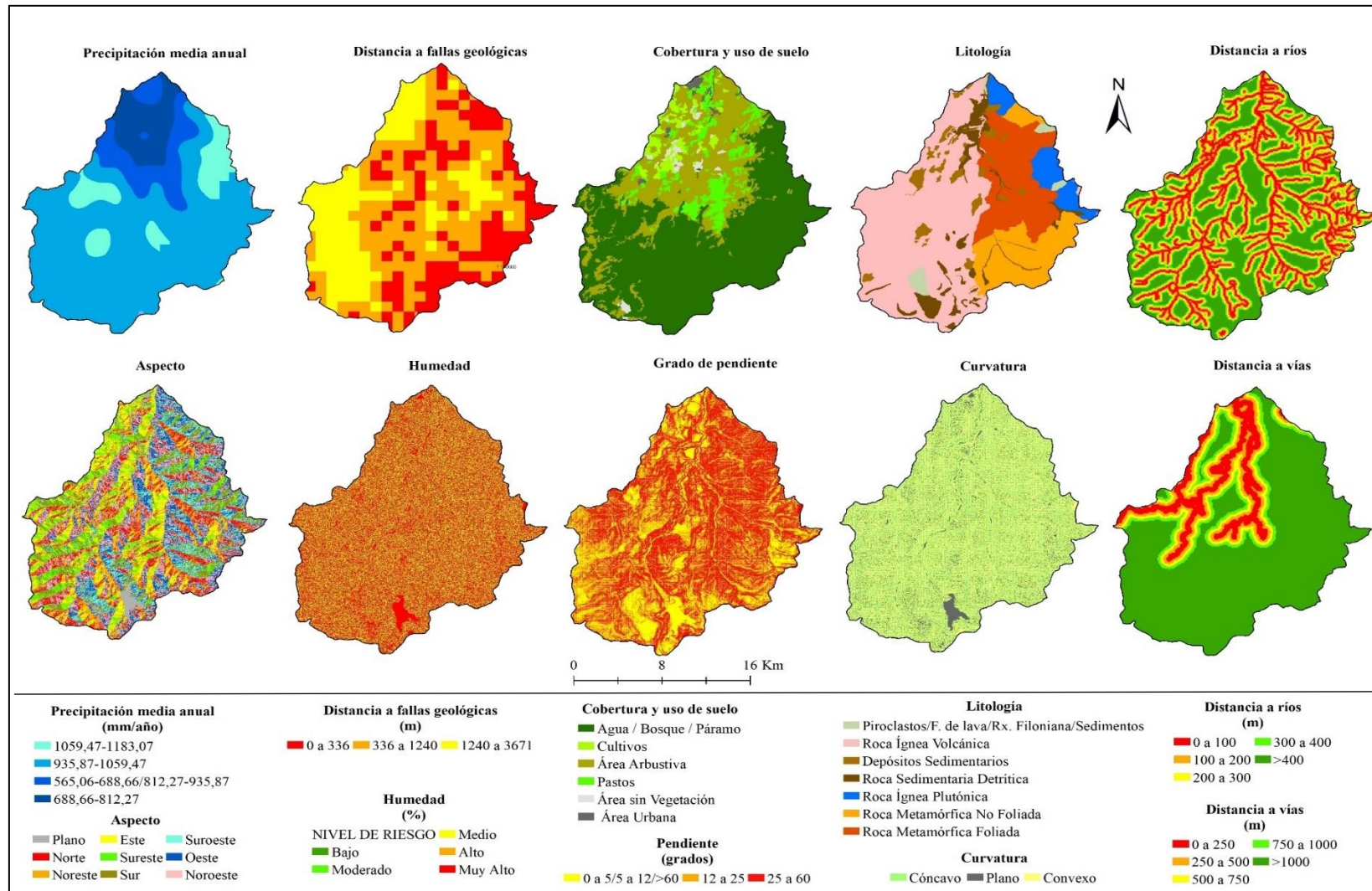
La nueva clasificación dividió en 3 y 4 niveles respectivamente, es así como la categoría con mayor lejanía a las fallas se eliminó, debido a que el área fue mínima dentro de la subcuenca y no se encontraron deslizamientos (Figura 28). Respecto a la precipitación media anual se unió en una misma categoría a 565.06 – 688.66 y 812.27 - 935.87 mm debido a que poseen el mismo número de deslizamientos y por ende el valor de RF, como se observa en la Figura 28.

La precipitación media anual, varía desde 565.06 a 1183.07 mm y los deslizamientos se registraron en todos los intervalos de lluvia. La lluvia acumulada generó mayor cantidad de movimientos en masa en los rangos desde los 688.66, 812.27 y 935.87 mm/año. En el caso de la distancia a fallas geológicas, se tiene un intervalo de 0 a 10 210 metros como se observa en la Figura 28.

Al existir movimientos tectónicos produce desajustes internos de la tierra, desestabilidad de taludes, y deslizamientos. Aunque estas variables actúen como factores detonantes, la presencia de ciertas actividades antrópicas: construcciones poco estables, mal manejo de los sistemas de riego y su infraestructura (reservorios de agua sin capas impermeables, acequias, canales), deforestación y modificaciones topográficas (Anexo 6q), intensifican el riesgo a deslizamiento.

Se estableció ocho factores condicionantes para que sucedan deslizamientos, mismos que intervienen de manera diferente en cada uno de los casos. Los que tienen mayor relevancia fueron la pendiente, litología, cobertura vegetal, curvatura y distancia a vías. Las variables: humedad, distancia a ríos y aspecto, participaron en menor proporción dentro de los niveles de susceptibilidad, sin embargo, no pierden importancia. En concordancia a AlThuwaynee et al. (2014), que además de las variables antes mencionadas, utiliza 15 factores, en los cuales incluye: rugosidad de la superficie, SPI que mide el poder de la erosión de la corriente, tipo, edad y diámetro de la madera, espesor y drenaje del suelo. Las cuales fueron analizadas por análisis de regresión lineal y comparación por pares según sea el caso (p. 26).

**Figura 28**  
*Reclasificación de los factores causales mediante el método de radiofrecuencia*



#### 4.1.3.2 Categorización de susceptibilidad

El método de radiofrecuencia genera nuevas clasificaciones basadas en el peso obtenido a partir de la frecuencia relativa y el inventario de deslizamientos. La comparación pareada entre todos los factores generó las ponderaciones de la tasa de predicciones (Tabla 17).

**Tabla 17**

*Ponderación de factores influyentes en la susceptibilidad a deslizamientos (RF).*

| Factores                  | Tasa de predicción de RF | RF*100 |
|---------------------------|--------------------------|--------|
| Pendiente                 | 3.29                     | 329    |
| Litología                 | 1.81                     | 181    |
| Cobertura Vegetal         | 2.50                     | 250    |
| Curvatura                 | 2.22                     | 222    |
| Aspecto                   | 1.00                     | 100    |
| Distancia a Ríos          | 1.28                     | 128    |
| Distancia a Fallas        | 2.58                     | 258    |
| Distancia a Vías          | 2.59                     | 259    |
| Humedad                   | 1.59                     | 159    |
| Precipitación Media Anual | 2.55                     | 255    |

*Nota:* Los valores se multiplicaron por 100 para mejorar la calidad en los modelamientos

La ecuación 8, basada en la metodología de la ecuación 2, se realizó en base a la Tabla 17, que generó como resultado: el modelo final de la susceptibilidad a deslizamientos. Este modelamiento se categorizó en cinco niveles de susceptibilidad sobre 100 puntos: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta, para la subcuenca del río Mataquí, como se observa en la Tabla 18 y Figura 29.

$$\begin{aligned}
 \text{Susceptibilidad} = & (\text{fr\_pend} * 329) + (\text{"fr\_geo"} * 181) + (\text{"fr\_cob"} * 50) + \\
 & (\text{"fr\_curvat"} * 222) + (\text{"fr\_aspect"} * 100) + (\text{"fr\_rios"} * 128) + \\
 & (\text{"fr\_fallas"} * 258) + (\text{"fr\_vias"} * 259) + (\text{"fr\_hum"} * 159) + (\text{"fr\_prec"} * 255)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

**Tabla 18***Niveles de susceptibilidad a deslizamientos de la subcuenca del río Mataquí.*

| <b>Susceptibilidad</b> | <b>Área</b>      |                       |
|------------------------|------------------|-----------------------|
|                        | <b>Hectáreas</b> | <b>Porcentaje (%)</b> |
| Muy Baja               | 3925.98          | 11.0                  |
| Baja                   | 15703.95         | 44.0                  |
| Moderado               | 13919.41         | 39.0                  |
| Alta                   | 1962.99          | 5.5                   |
| Muy Alta               | 178.45           | 0.5                   |
|                        | <b>35690.80</b>  | <b>100</b>            |

En concordancia a AlThuwaynee et al. (2014) que usan las mismas categorías pero difiere con los estudios realizados por: Pozo (2018), donde categoriza en niveles (alto, medio, bajo, nulo y no aplicable); Mejía (2018) en su estudio obtuvo: muy baja, baja, moderada y alta. Y por último, Escalante et al., (2020) que únicamente usaron las categorías media, alta y muy alta.

#### **4.1.3.3 Cartografía de susceptibilidad**

La susceptibilidad a deslizamientos fue dividida en 5 categorías (Figura 29 y Anexo 4), cada una representa el nivel de predisposición del terreno a presentar un movimiento en masa. A continuación, se hace un análisis de cada categoría:

- ***Susceptibilidad muy alta a deslizamientos***

La susceptibilidad categorizada como muy alta corresponde a áreas que cubren el 0.5 % del total de la subcuenca. Comprende la vía a la parroquia de San Francisco de Sigsipamba, la Ruta del Vértigo y los poblados que se encuentran en este trayecto, como se muestra en la Figura 29. Las áreas con mayor susceptibilidad fueron el Sector La Mesa y el Infiernillo, donde se encontró 5 deslizamientos en pequeñas distancias del trayecto.



Estas áreas presentaron una precipitación con un rango de 688.66 a 935.87 mm/año, la distancia a fallas geológicas fue de 0 a 336m, con una litología de tipo: depósitos sedimentarios con presencia de gravas, arenas y arcillas, estas últimas presentan características que les permiten expandirse y contraerse con presencia de agua; roca metamórfica foliada y parte de rocas ígneas intrusivas altamente meteorizadas (Anexo 6r). Una cobertura vegetal de tipo: área urbana y cultivos. Se identificó pendientes entre 25° y 60°, humedad entre medio y muy alto, distancia a ríos y vías de 0-250m y de 0-200m respectivamente, tipo de curvatura cóncavo y convexo. Aspecto de elevación en Suroeste y Oeste.

- ***Susceptibilidad Alta a Deslizamientos***

Alrededor del 5.50 % cubre la susceptibilidad alta a deslizamientos de tierra, en el área de estudio. Se identificó 8 deslizamientos ubicados en la vía principal que conduce a la parroquia de San Francisco de Sigsipamba y los pueblos aledaños a la misma (Pueblo Nuevo de Yuquín, Yuquín Alto y Bajo, El Cedral, San José, Bellavista, San Antonio, La Merced, San Vicente, San Isidro, La Floresta). Así como también la vía principal y secundaria que conecta a Los Árboles, El Inca, Buenos Aires, Guanupamba y Mariano Acosta, como se representa la Figura 29.

Las características fueron: precipitación en el rango de 565.06 a 1059.47 mm/año, distancia a fallas geológicas desde 0 a 1240 metros. La litología comprende depósitos sedimentarios, roca sedimentaria detrítica y roca metamórfica foliada, una cobertura vegetal: pastos y cultivos, área arbustiva, sin vegetación, y urbana. Pendientes de 12° a 60°, humedad: moderado, alto y muy alto, distancia de ríos y vías hasta 1000m, tipo de curvatura: cóncavo y convexo. Por último, el aspecto de elevación, todos los niveles excepto plano.

- ***Susceptibilidad Moderada a Deslizamientos***

La susceptibilidad a deslizamientos de categoría moderada comprende el 39% de la subcuenca y se encuentran en todos los sectores dentro del área de estudio (Los Árboles, El Inca, Buenos Aires, El Alisal, Guanopamba, La Florida, Mariano Acosta, Nueva América, San Isidro, San Vicente, La Floresta, La Merced, San José, El Cedral, Pueblo Nuevo de Yuquín, Yuquín Alto y Bajo, Cebadal, Pan de Azúcar, el Carmen, Chugá), con un total de 11 deslizamientos registrados, de los cuales dos de ellos se presentan en rocas ígneas plutónicas representadas por granodioritas altamente meteorizadas (Anexo 6r). Los subniveles de todas las variables que fueron utilizadas en la presente investigación intervienen para esta categoría de susceptibilidad, excepto los cuerpos de agua.

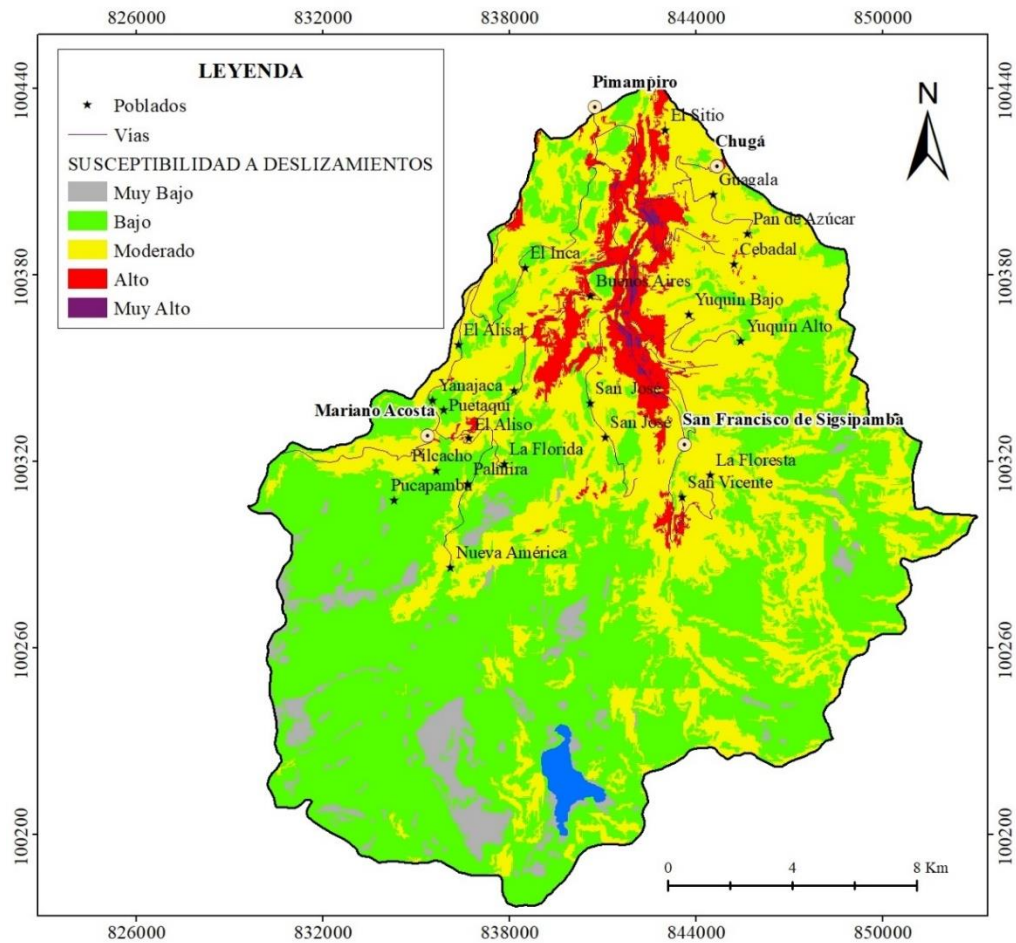
- ***Susceptibilidad Baja y Muy Baja a Deslizamientos***

El 44 y 11% respectivamente ocupan estas categorías, ubicadas en su mayoría en la cuenca alta de la subcuenca del río Mataquí que pertenece a la parroquia Mariano Acosta, no se registraron deslizamientos, la precipitación comprende el rango más elevado (1059.47 a 1183.07 mm/año), la distancia a fallas geológicas, ríos y vías, se encuentra en todos los rangos, la litología presente es de tipo rocas ígneas, metamórficas (páramos y bosques).

Los bosques primarios se encuentran en cierto porcentaje en rocas metamórficas foliadas, sin embargo, las especies forestales gracias a sus raíces ayudan a mantener este tipo de rocas estables. Depósitos sedimentarios y sedimentos presentes en los cuerpos de agua. Pendientes de 0 a 60°, curvatura cóncava y convexa, aspecto de elevación y humedad en todos los niveles.

**Figura 29**

*Niveles de susceptibilidad de la subcuenca del río Mataquí.*



Las categorías, muy alta y alta identificadas, se ubican en la vía principal a la parroquia San Francisco de Sigsipamba y los principales lugares afectados por deslizamientos son La Mesa y El Infiernillo. Autores como Mejía (2018) y Pozo (2018) también encontraron que la susceptibilidad alta en la subcuenca es en todo el tramo de la vía. Esto a diferencia de Escalante y Sandoval (2019), quienes encontraron que la superficie con mayor susceptibilidad comprende las áreas que están cubiertas por bosque y páramo, y por ese motivo la susceptibilidad alta cubre 60% de la superficie de la subcuenca hidrográfica. Esto último difiere con la teoría, porque bosque y páramo son coberturas con baja susceptibilidad a deslizamientos, AlThunwaynee, (2012), Mejía (2018) y Pozo, (2018).

Sin embargo, el deterioro de las coberturas y el cambio de uso de suelo ocasionan que la susceptibilidad a deslizamientos aumente (Rabby et al. 2022). El

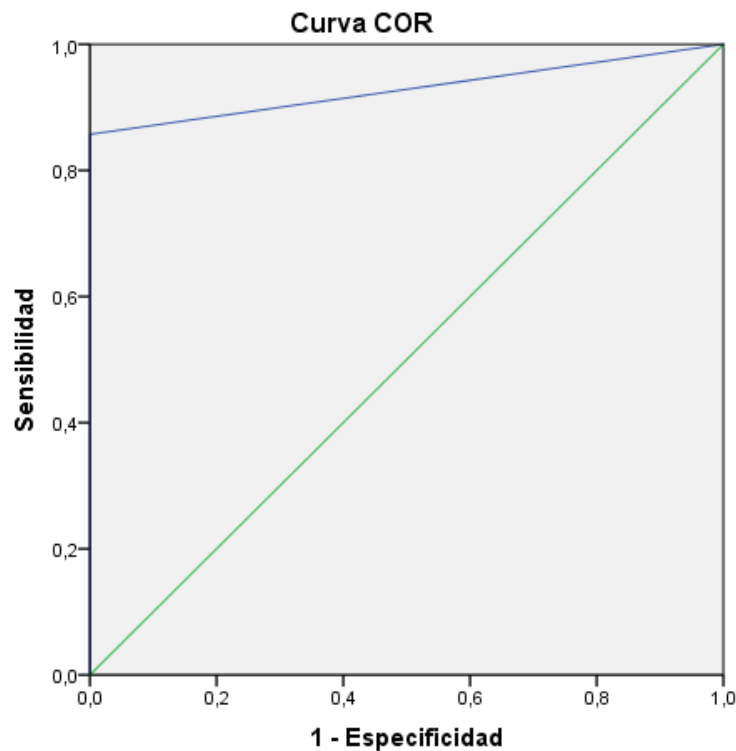
aumento de peligro a un deslizamiento superficial y a un flujo de lodos puede ser producido por el cambio de uso de suelo, Persichillo et al. (2017), He et al (2018). De este modo, se concluye que existe un proceso de remoción en masa en la subcuenca que puede ser resultado del deterioro del suelo producto de la erosión existente en toda la cuenca hidrográfica del río Mira, que según Arias-Muñoz et. al. (2022) es entre las más altas del mundo.

#### **4.1.4 Validación de niveles de susceptibilidad**

En la Figura 30 se muestra la capacidad alta de predicción al usar el área bajo la curva, con un coeficiente mayor a 1 (0.93), lo que conlleva a aceptar y validar la cartografía de susceptibilidad a deslizamientos de la subcuenca del río Mataquí con incidencia de la lluvia acumulada (Anexo 4), al contrario del modelo realizado en base a la intensidad de la lluvia (Anexo 5) que no genera niveles de susceptibilidad aceptables.

**Figura 30**

*Curva ROC de validación del modelo de susceptibilidad a deslizamientos.*



*Nota:* Se usó 7 verdaderos positivos (VP), que fueron aquellos deslizamientos evidenciados en el modelamiento, con una efectividad mayor al 60 % para todos los puntos, y 1 falso positivo (VN), pero la evidencia en la cartografía de susceptibilidad marcó un 59 %.

La cartografía de susceptibilidad a deslizamientos fue validada el 18 de junio del 2022. En los primeros días del mes de julio se presentaron tormentas de lluvia que provocaron deslizamientos en las áreas que se determinó susceptibilidad alta y muy alta dentro de esta investigación, lo cual, corrobora estos resultados. Estas zonas son históricamente susceptibles a deslizamientos, por lo que las autoridades realizan trabajos preventivos para estos sectores (Anexo 6p).

## 4.2. Establecimiento de umbrales de precipitación

### 4.2.1. Datos de pluviosidad

La estación Pimampiro, registra el promedio diario más bajo de lluvia (1.46 mm). La estación de la cuenca media (Chugá), presenta el valor más alto de lluvia diaria máxima (44.7 mm). Y por último, la estación Nueva América tiene el promedio más alto de lluvia (3.91 mm), esta área es donde existe mayor cantidad de precipitaciones. En la Tabla 19 se muestra un resumen de los datos recolectados.

**Tabla 19**

*Resumen de los datos obtenidos en las estaciones pluviométricas*

| Estación      | No. de días monitoreados | Lluvia diaria máxima | Lluvia diaria promedio |
|---------------|--------------------------|----------------------|------------------------|
| Pimampiro     | 232                      | 21.7 mm              | 1.5 mm                 |
| Chugá         | 278                      | 44.7 mm              | 3.5 mm                 |
| Nueva América | 214                      | 43.7 mm              | 3.9 mm                 |

De acuerdo con la Tabla 19, la estación Pimampiro posee la cantidad más baja de lluvia diaria máxima, en comparación que las demás estaciones. Esto se debe principalmente al tipo de ecosistema presente en esta zona, el bosque seco premontano (Alcaldía de Pimampiro, 2014), que se caracteriza por precipitaciones relativamente bajas y altas temperaturas, entre 250 a 1000 mm al año y 18 a 24 °C, respectivamente (Holdridge, 1967).

Por otro lado, la estación Chugá, ubicada en la parroquia Chugá, forma parte de la zona de vida de Bosque Húmedo Montano Bajo, con precipitaciones de 1000 a 1500 mm/ año, es por ello, que la estación registra días con alta pluviosidad (Alcaldía de Pimampiro, 2014). Según La Alcaldía de Pimampiro (2014), la estación Nueva América, ubicada en las zonas más altas de la cuenca, se encuentra dentro del Bosque Nativo “Nueva América”. Esta zona presenta precipitaciones de 1000 mm al año (p. 59), dominado por bosques de montaña, páramos y humedales.

El área de influencia del umbral de precipitación para cada estación pluviométrica fue determinada a través de los Triángulos de Thiessen. En la investigación de AlThunwaynee et al. (2014), determina las zonas de influencia mediante círculos alrededor de las 14 estaciones pluviométricas que usó, sin embargo, no menciona el radio de esas zonas ni el área de cada círculo. Por tanto, la metodología de los polígonos es la manera más precisa de determinar las áreas de influencia del umbral para cada estación.

#### **4.2.2 Inventario de ocurrencia de deslizamientos**

A lo largo de la cuenca se registraron un total de 11 deslizamientos, durante 278 días de monitoreo. En la Tabla 20, se observan las fechas de los deslizamientos, siendo la cuenca media la que presentó mayor cantidad de deslizamientos.

**Tabla 20**  
*Inventario de ocurrencia de deslizamientos.*

| <b>Localidad</b> | <b>Sector</b>                 | <b>Informante</b>     | <b>Fecha de ocurrencia</b> |
|------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Cuenca baja      | Santa Clara                   | Medio de comunicación | 23/10/2021                 |
| Cuenca baja      | Santa Clara                   | Observador directo    | 1/11/2021                  |
| Cuenca media     | San Onofre                    | Observador directo    | 16/7/2021                  |
| Cuenca media     | San Onofre                    | Observador directo    | 19/7/2021                  |
| Cuenca media     | San Francisco de los Palmares | Observador directo    | 22/7/2021                  |
| Cuenca media     | Guagalá                       | Observador directo    | 29/7/2021                  |
| Cuenca media     | La Mesa                       | Observador directo    | 23/10/2021                 |

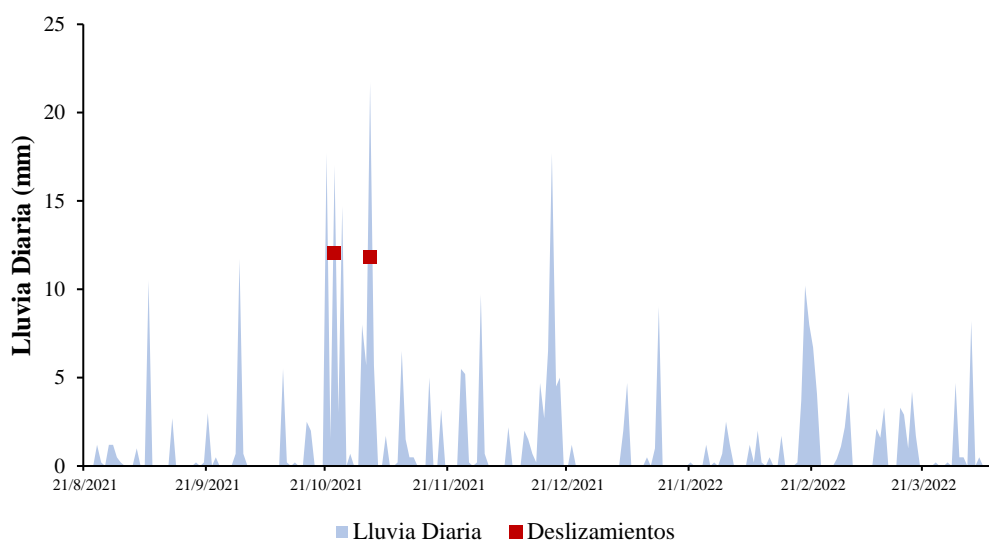
|              |            |                    |            |
|--------------|------------|--------------------|------------|
| Cuenca media | Guagalá    | Observador directo | 12/11/2021 |
| Cuenca media | Guagalá    | Observador directo | 18/12/2021 |
| Cuenca media | San Onofre | Observador directo | 11/3/2022  |

#### 4.2.3. Umbrales de precipitación de la Estación Pimampiro

La precipitación registrada en Pimampiro se llevó a cabo en un periodo de 232 días, con un total de lluvia registrada de 338.9 mm. En este lapso se registraron dos deslizamientos con su respectiva fecha de ocurrencia, como se muestra en la Figura 31. El mes con mayor cantidad de lluvia registrada (78.7mm) y que a la vez se suscitaron dos deslizamientos, fue octubre.

**Figura 31**

*Registro de Precipitación y Deslizamientos de la Estación Pimampiro.*



Los datos muestran que en Pimampiro no todos los deslizamientos tienen como factor detonante la lluvia, como se visualiza en la Tabla 20. Los registros de pluviosidad de la estación Pimampiro indicaron que los días 18 y 23 de noviembre, no existió presencia de lluvia, por lo tanto, estos movimientos en masa aparentemente tienen su origen en la acción de otros factores, probablemente antrópicos. Al no existir una cantidad de datos representativa de registro de fechas

de ocurrencia de deslizamientos durante el tiempo de monitoreo, no se logró calcular un umbral de precipitación representativo.

**Tabla 21**

*Calculo de variables de precipitación para los días en los que se registraron deslizamientos, en el área de influencia de la Estación Pimampiro.*

| Fecha de ocurrencia de deslizamiento | Sector      | Precipitación diaria (mm) | Lluvia acumulada (E)(mm) | Duración (D) (días) | Intensidad (mm/días) |
|--------------------------------------|-------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|
| 23/10/2021                           | Santa Clara | 17.0                      | 36.2                     | 3                   | 12.07                |
| 1/11/2021                            |             | 21.7                      | 35.4                     | 3                   | 11.80                |
| 18/11/2021                           | Aloburo     | 0.0                       | 0.0                      | 0                   | 0.00*                |
| 23/11/2021                           |             | 0.0                       | 0.0                      | 0                   | 00.00*               |

*Nota:* \*Los movimientos en masa que iniciaron con fisuras el 18 de noviembre del 2021 en la vía Pimampiro-Mariano Acosta (Aloburo) y finalizaron con un deslizamiento de tipo traslacional el 23 de noviembre del mismo año, no fueron considerados en este estudio. Los días en los que tuvieron lugar estos deslizamientos, se registró una pluviosidad de 0 mm, tanto para ese día como para los días antecedentes. Es decir, la precipitación no fue el factor detonante.

Los deslizamientos registrados el 23 de septiembre y el 1 de noviembre de 2021, se localizaron en el sector de Santa Clara. Estos fenómenos se suscitaron cuando alcanzaron una lluvia acumulada de 36.2 y 35.4 respectivamente, y una duración de 3 días. Es decir, la precipitación participó como factor detonante para estos deslizamientos.

En el caso de los deslizamientos en el sector Aloburo, no hubo presencia de lluvia para el 23 de noviembre, sin embargo, sucedió uno de los deslizamientos de tierra con mayor intensidad y daño. Lo que conlleva a determinar que tuvo influencia la lluvia acumulada de días anteriores junto con variables geológicas y topográficas que se vieron afectadas por actividades antrópicas sin control, como el mal manejo del sistema de riego. Esto concuerda con un estudio en el departamento de Antioquia, Colombia, el cual menciona que la lluvia de un solo día no es el desencadenante de deslizamientos por si sola, sino las cantidades altas de lluvia acumulada a mediano plazo (hasta de 15 días) originan movimientos en masa.



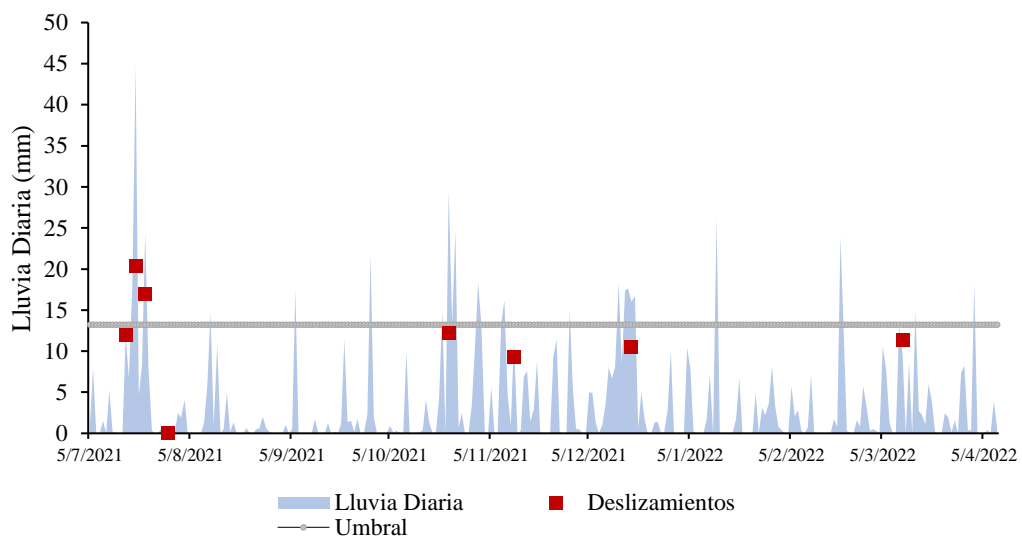
Además los factores topográficos son determinantes en varias zonas del departamento que incluso pueden ser detonantes (Moreno et al., 2016).

#### 4.2.4 Umbrales de precipitación de la Estación Chugá

El registro de la pluviosidad diaria en la Estación Chugá, se llevó a cabo en un período de 278 días, con un total de lluvia registrada de 980 mm. En este lapso, se contabilizaron ocho deslizamientos con su respectiva fecha de ocurrencia y lluvia diaria (inventario de ocurrencia de deslizamientos), como se muestra en la Figura 32. El mes con mayor cantidad de pluviosidad registrada (143.8mm) y con mayor número de deslizamientos (3), fue julio.

**Figura 32**

*Registro de precipitación y deslizamientos de la Estación Chugá*

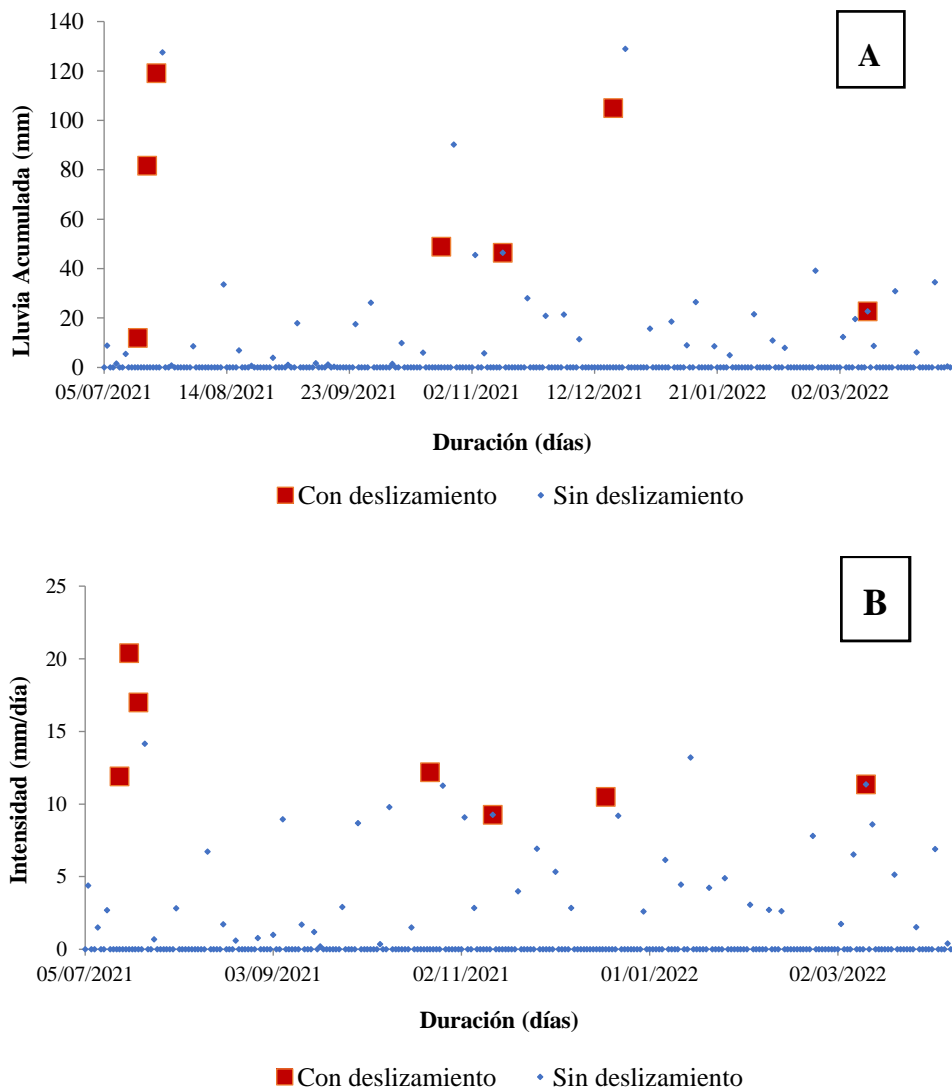


Los valores más altos de lluvia acumulada se presentaron en el mes de julio y diciembre con 127.4 mm y 128.9 mm, respectivamente, como se muestra en la Figura 33A, que a su vez, coincide con el mes que históricamente presenta mayor cantidad de precipitación (CIPRADEC, 2014). En cuanto a la intensidad, el valor más alto se presentó en un día con deslizamiento que fue de 20.4 mm/día, como se observa en la Figura 33B. Al igual que la lluvia acumulada, es el mes de julio donde se registran los valores más altos.

En el primer objetivo de la presente investigación que corresponde a la elaboración de cartografía de susceptibilidad, en la variable de pluviosidad se usó en primera instancia, la intensidad de lluvia que ayudaría a crear el modelo de susceptibilidad. Sin embargo, el resultado no fue el esperado. Por lo tanto, se usó en su lugar la lluvia acumulada, la cual permitió validar la cartografía. Es decir, un umbral basado en la lluvia acumulada y la duración es el que mejor se adapta al área de estudio.

**Figura 33**

*Registro de lluvia acumulada (E) e Intensidad (I).*

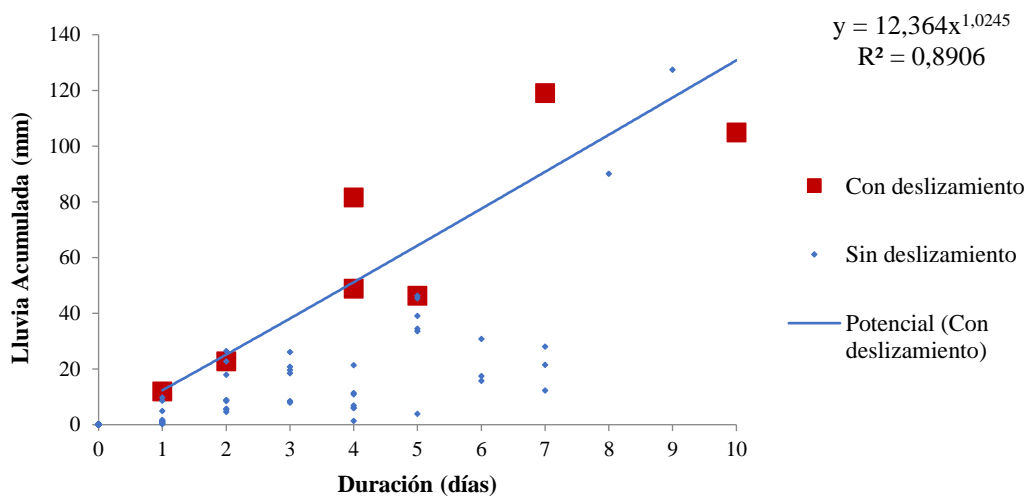


Para corroborar que el umbral ED era la mejor opción para el área de estudio, se hizo un análisis de correlación entre las tres variables de precipitación de la estación de los días en los que se registraron deslizamientos, como se muestran en la Tabla 22. Los resultados de la correlación se muestran en la Figura 34.

En la Figura 34, se observa que existe una correlación alta (0.8906) entre la cantidad de lluvia con la duración. En la Estación Chugá, existe una relación directamente proporcional entre el tiempo de duración de la tormenta y la cantidad de lluvia. Esta relación, también se observó en el estudio de AlThunwaynee et al. (2018), mencionan que la relación E-D son significativas y guardan estrecha relación (p. 1550). La fórmula de la regresión E-D en la Estación Chugá, determina la cantidad de lluvia que se precipita sobre la estación, y se representa continuación:

$$E = 12,364 * D^{1,0245} \quad (9)$$

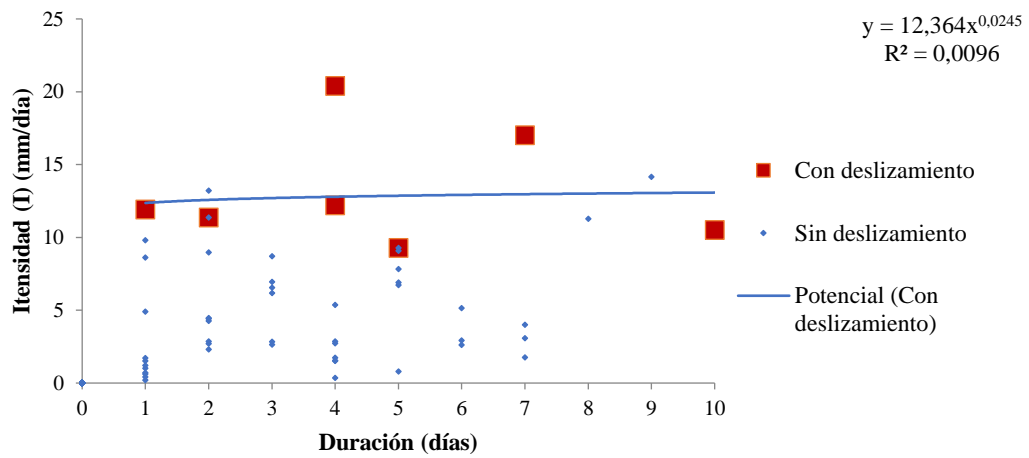
**Figura 34**  
*Relación entre lluvia acumulada y duración*



La relación existente entre la Intensidad y la Duración (I-D) se puede apreciar en la Figura 35. El coeficiente de correlación fue de 0.0096 para la estación Chugá, indica que la intensidad del evento de lluvia no depende de la duración de esta. Varios autores utilizan esta relación, para determinar umbrales de precipitación mínimos y máximos, como es el caso de Caine (1980) y

**Figura 35**

*Relación entre intensidad y duración.*

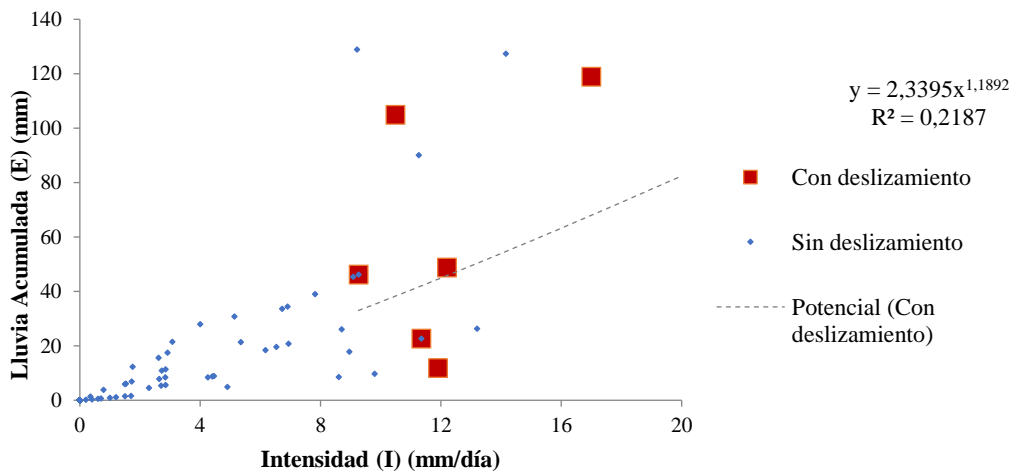


AlThunwaynee et al. (2014 y 2018), que corresponden al tipo de Umbrales por Curvas ID (p. 1550).

Finalmente, la correlación entre las variables intensidad y cantidad de lluvia, Figura 36, presenta un valor de 0.155. Es decir, la intensidad no presenta una correlación alta con las otras variables, por lo tanto, el umbral de precipitación basado en la intensidad, calculado en la Tabla 21, no sería el factor desencadenante de deslizamientos. Por su parte, la lluvia acumulada, presenta una muy buena relación con el factor duración, por lo tanto, se procedió a calcular un umbral de precipitación, basado en la cantidad de lluvia acumulada (E).

**Figura 36**

*Relación entre intensidad y lluvia acumulada.*



Con los datos de la Tabla 22, se calculó umbrales de precipitación ED, se puede distinguir dos umbrales de acuerdo con la duración. Cuando existe un evento de lluvia con duración menor o igual a 5 días y si se rebasa los 81.16 mm de lluvia acumulada puede existir un deslizamiento. De la misma manera, cuando exista un evento de lluvia con una duración mayor o igual a 6 días y una lluvia acumulada superior a 104.9 mm es muy probable que tenga lugar un deslizamiento. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula que menciona la existencia de un umbral de precipitación. Este resultado difiere con AlThunwaynee et al. (2014), que usa un umbral basado en la intensidad en un solo día, ya que la I sí se relaciona con E y D (p. 1548).

**Tabla 22**

*Cálculo de variables de precipitación para los días en los que se registraron deslizamientos, en el área de influencia de la Estación Chugá.*

| Fecha de ocurrencia de deslizamiento | Precipitación diaria (mm) | Lluvia acumulada (E) (mm) | Duración (D) (días) | Intensidad (mm/días) |
|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|
| 16/7/2021                            | 11.9                      | 11.9                      | 1                   | 11.9                 |
| 19/7/2021                            | 44.7                      | 81.16                     | 4                   | 20.4                 |
| 22/7/2021                            | 23.4                      | 119.00                    | 7                   | 17                   |
| 23/10/2021                           | 29.5                      | 48.8                      | 4                   | 12.2                 |
| 12/11/2021                           | 11.1                      | 46.3                      | 5                   | 9.26                 |
| 18/12/2021                           | 16                        | 104.9                     | 10                  | 10.49                |
| 11/3/2022                            | 9.6                       | 22.7                      | 2                   | 11.35                |

### **Modelo basado en la frecuencia de la Estación Chugá.**

A través de la función de transferencia, que determina cómo reacciona la entrada y la salida de un sistema, en este caso, cómo se comporta la precipitación (entrada) en función de los deslizamientos (salida). La Estación Chugá, tiene una dinámica que relaciona la precipitación y los movimientos en masa, que responde a la fórmula 10.

$$F_{(s)} = \frac{1.412s^2 + 1.052s + 0.4121}{s^3 + 0.5066s^2 + 0.2096s + 0.106} \quad (10)$$

Donde:

s= variable de frecuencia (pluviosidad)

- **Estado transitorio**

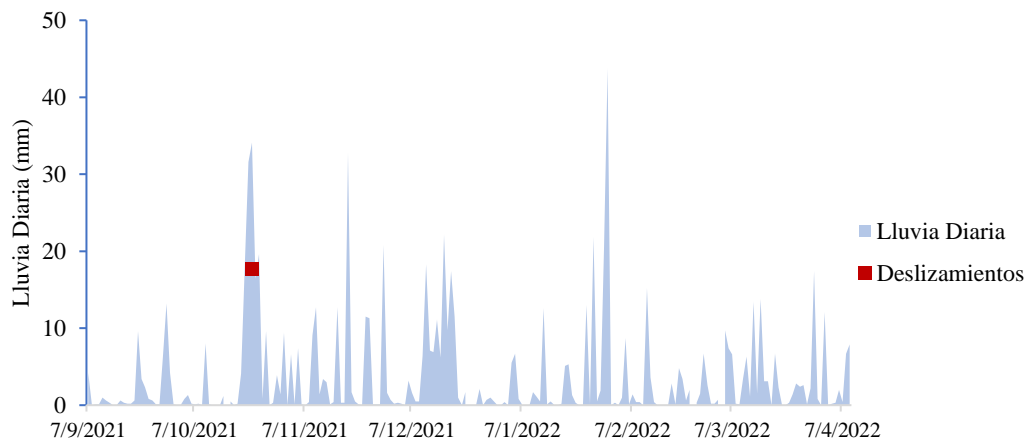
El estado transitorio del área de influencia de la Estación Chugá, que hace referencia al tiempo que transcurre entre el momento que se supera el umbral de precipitación y el instante en el que ocurre un deslizamiento, fue de 5 días (tiempo promedio de respuesta), se respalda con un *fit* del 88.3 %. Los organismos de socorro tienen 5 días lapso, para poder reaccionar y prevenir futuros daños. Este componente, es muy importante para el diseño de un SAT.

#### **4.2.5 Umbrales de precipitación en la Estación Nueva América**

La estación Nueva América fue monitoreada durante 214 días, con una precipitación total acumulada de 820.3 mm. Durante este tiempo se registró un solo deslizamiento en el sector de Guagalango, con una intensidad de 17.72 mm/día y lluvia acumulada de 88.6 en 5 días. Debido a la falta de datos, no fue posible calcular el umbral de precipitación para esta zona.

**Figura 37**

*Registro de Precipitación y Deslizamientos de la Estación Nueva América*



A pesar de las altas precipitaciones en el área de influencia de Nueva América, la población local señala que este tipo de desastre natural no es muy recurrente en el sector. De igual manera, los registros de desastres naturales del SNGRE, corroboran la información. En la Figura 37, se observa el registro de la pluviosidad diaria durante el período de monitoreo.

### 4.3. Diseño de una propuesta de un sistema de alerta temprana (SAT)

Para realizar una propuesta de diseño de un SAT en la subcuenca del río Mataquí, que permita a las autoridades competentes y a la población local anticiparse ante este tipo de desastre natural, se usó un flujograma estructurado a partir de los cuatro elementos fundamentales de cualquier SAT, recomendados dentro de La Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (2013), con el aval de la ONU y la OEA, como se muestra en la Figura 39.

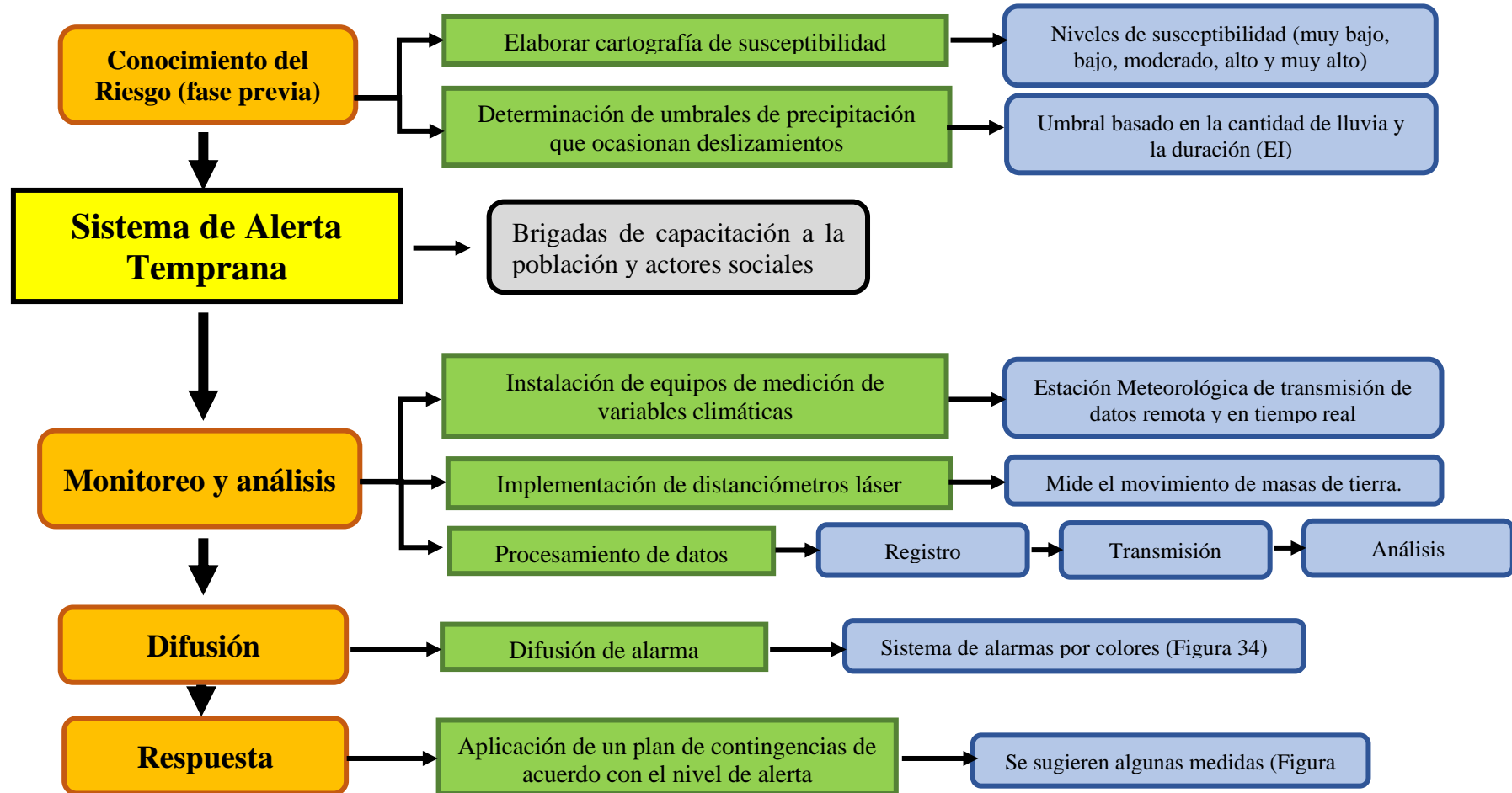
De acuerdo con el conocimiento del riesgo y el monitoreo de los parámetros detonantes de los deslizamientos, se diseñó un sistema de alarmas basado en las condiciones en las que se encuentra el proceso de deslizamiento. Así mismo, dependiendo de la alarma emitida, se procede a aplicar un mecanismo de respuesta a cargo de las autoridades competentes. El significado de cada alarma y su respectiva respuesta se encuentra en la Figura 38 y la Tabla 23. Se sugiere la creación de una Comisión de Monitoreo y Pronóstico que estará a cargo del SAT.

Para la difusión de la alarma, se puede emplear mensajes de texto, aplicaciones móviles o páginas de internet. Sin embargo, en la subcuenca del río Mataquí debido a que no todas las personas tienen acceso a internet, las alarmas comunitarias ubicadas en cada comunidad serían la mejor opción para comunicar el nivel de peligrosidad que se encuentra la población, cuando llueve.

**Figura 38**  
*Sistemas de colores de alarmas y su respectivo significado.*

| <b>Sistema de Alarmas</b>   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| <b>Blanca</b><br>No existe peligro de deslizamiento. Condiciones normales | <b>Amarilla</b><br>Existen fuertes lluvias, pero el umbral de precipitación no es sobrepasado | <b>Naranja</b><br>El umbral de precipitación fue sobrepasado y el sensor registra actividad | <b>Roja</b><br>El umbral es sobrepasado, los sensores detectan movimiento. existe registros visuales de deslizamientos. |

**Figura 39**  
*Propuesta de un Sistema de Alerta Temprana.*





**Tabla 23**

*Sistema de colores para cada tipo de alerta, con sus respectivos indicadores y medidas de respuesta.*

| <b>Tipo de Alerta</b> | <b>Nivel de peligrosidad</b> | <b>Indicadores</b>   | <b>Medidas de respuesta</b>   |
|-----------------------|------------------------------|--|---|
| Blanca                | Nula- Muy baja               | - Presencia de lluvias inferiores al promedio de precipitación diaria de la zona. El promedio diario de la Estación Chugá es de 3.5 mm.  | - Monitoreo de la lluvia con lecturas diarias.  |
| Amarilla              | Media                        | - Presencia de lluvias superiores al promedio de precipitación diaria de la zona.  | - Recomendar cautela a la población, sobre todo en las vías y en la noche (horarios desde las 00H00 hasta las 5H00)<br>- Monitoreo constante con lecturas cada hora.  |
| Naranja               | Alta                         | - El umbral de precipitación que desencadena deslizamientos ha sido sobrepasado.<br>- El sistema Andom registra actividad anormal en los parámetros monitoreados.<br>- Registro documentado de deslizamientos que no afectan directamente a la integridad de personas e infraestructura. | - Alertar a la población ante una posible evacuación.<br>- Preparar los lugares de evacuación y la logística, para la llegada de personas evacuadas.<br>- Prohibición vehicular a partir de las 22H00 hasta las 05H00 (exceptuando personal indispensable y emergencias).<br>- Reunión del comité local de emergencias. |
| Roja                  | Muy alta                     | - El umbral de precipitación que desencadena deslizamientos ha sido sobrepasado.<br>- El sistema Andom registra actividad anormal en los parámetros monitoreados.<br>- Registro documentado de deslizamientos que afecten a poblaciones y destrucción total de infraestructura.          | - Evacuación de las poblaciones aledañas al evento de deslizamiento.<br>- Alerta a la población del lugar del siniestro.<br>- Prohibición vehicular y peatonal total en el sector, hasta que las labores de reparación y socorro, hayan finalizado.<br>- Reunión del comité de emergencias cantonal (COE).              |

## Capítulo V

### Conclusiones y recomendaciones

#### 5.1 Conclusiones

Las áreas con susceptibilidad a deslizamientos altas y muy altas se localizan en la sección baja de la subcuenca, no representan más del 6% de la superficie, sin embargo, afectan la vía principal de la parroquia San Francisco de Sigsipamba que conectan con la ciudad de Pimampiro. Esto convierte al peligro de deslizamientos en una afección latente y constante a la movilidad. Por otro lado, la mayor parte de la superficie de la subcuenca (55%) presenta susceptibilidad baja y muy baja.

Las condiciones que generan susceptibilidad alta y muy alta son: una precipitación anual superior a 1183 mm, la cercanía de vías, ríos y fallas geológicas junto a la presencia de sedimentos, rocas intrusivas y extrusivas con alta meteorización, pendientes escarpadas, y cultivos, arbustos y zonas sin vegetación. Mientras que, las zonas con susceptibilidad baja y muy baja presentan rocas metamórficas foliadas capaces de desprender material rocoso, pero comparten una cobertura de tipo bosque. En el caso del páramo hay pendientes planas e inclinadas, también existen áreas donde son muy escarpadas, hay rocas estables (volcánicas y metamórficas no foliadas).

La aplicación de métodos probabilísticos, como el de radiofrecuencia, en entornos SIG permitió obtener cartografía de susceptibilidad con una exactitud mayor al 90% considerando que el valor de validación obtenido en la curva ROC es 0.93.

Los umbrales de precipitación fueron calculados con base en la influencia de cada estación pluviométrica. Sin embargo, al no presentarse deslizamientos en la sección baja y alta de la cuenca, localidades donde se localizan las estaciones pluviométricas de Nueva América (cuenca alta) y Pimampiro (cuenca baja), la precipitación en estos sectores no presentó influencia alguna en generación de deslizamientos. Por lo tanto, los umbrales de precipitación detonantes de

deslizamientos provienen desde la acumulación de lluvia recibida en la parte media de la cuenca.

Se concluye que el umbral de precipitación en el área de estudio es debido a la lluvia acumulada y la duración del evento (ED) y más no a la intensidad de lluvia. De ahí que, se distinguen dos umbrales de precipitación (ED), uno cuando presenta una lluvia acumulada de 81.16 mm en un evento de precipitación con duración menor o igual a 5 días, y otro cuando presenta una lluvia acumulada de 104.9 mm en un evento de 6 o más días. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, la cual, confirma que existe un umbral de precipitación que da lugar a movimientos en masa.

La implementación del Sistema de Alerta Temprana para la reducción del riesgo de deslizamiento en la zona implica la ejecución de 4 ejes importantes: conocimiento del riesgo, monitoreo del riesgo, comunicación y respuesta, dentro de un Plan de Gestión de Riesgos. La aplicación del sistema permitirá que la población beneficiada pueda anticiparse a los posibles peligros que acarrea un deslizamiento, minimizará las víctimas mortales y otorgará el tiempo necesario para una adecuada evacuación. Este sistema se complementa con la incorporación de equipos tecnológicos y el conocimiento de la población local.

## 5.2 Recomendaciones

Se recomienda implementar un sistema Andon dentro del cantón Pimampiro. Este sistema permite a los beneficiados monitorear un fenómeno en tiempo real de los factores desencadenantes como la precipitación y otras variables condicionantes importantes como: las fallas geológicas, la humedad y el movimiento de masas de tierra en pendientes pronunciadas.

El tiempo de monitoreo es muy importante para entender la dinámica del área de estudio y obtener resultados óptimos. Por lo que se recomienda recolectar información en campo al menos un año, tanto para el inventario de fechas de ocurrencias de deslizamiento como para la pluviosidad de la zona de estudio. Esto ayudará a establecer un umbral de precipitación más exacto y confiable.

Los resultados obtenidos en esta investigación servirán en el futuro para el diseño e instalación de sistemas de alerta temprana en las zonas con alto y muy alto riesgo. Estos SAT deben de ir acompañados de capacitación en gestión de riesgos, tanto para autoridades como para la población local.

Los SAT son sólo una parte de todo el entramado de la preparación. Este sistema de preparación es, a su vez, una parte de lo que se llama la gestión de riesgos, que contiene todo el ciclo de la respuesta humanitaria (preparación, respuesta, reconstrucción y rehabilitación), además de otras acciones como mitigación y prevención. Por lo tanto, se recomienda urgentemente crear planes integrales de gestión de riesgos en todas las parroquias del cantón Pimampiro.

## Referencias bibliográficas

- Al-Abadi, A. M., Al-Temmeme, A. A., y Al-Ghanimy, M. A. (2016). A GIS-based combining of frequency ratio and index of entropy approaches for mapping groundwater availability zones at Badra–Al Al-Gharbi–Teeb areas, Iraq. *Sustainable Water Resources Management*, 2(3), 265-283. <https://doi.org/10.1007/s40899-016-0056-5>
- Alcaldía de Manizales. (2014). *Gestión de Riesgos Manizales*. Gestión del Riesgo Memoria Histórica 2001 - 2013.
- Alcaldía de Pimampiro. (2014). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2014-2017*. CIPRADEC. <https://n9.cl/fsjm6>
- Aleotti, P. (2014). A Warning System for Rainfall-induced Shallow Failures. *Engineering Geology*, 73, 247-265. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.007>
- AlThuwaynee, O., Asikoglu, O., y Eris, E. (2018). Threshold Contour Production of Rainfall Intensity That Induces Landslides in Susceptible Regions of Northern Turkey. *Landslides*, 15. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0968-2>
- AlThuwaynee, O., Pradhan, B., y Ahmad, N. (2015). *Estimation of rainfall threshold and its use in landslide hazard mapping of Kuala Lumpur metropolitan and surrounding areas*.
- AlThuwaynee, O., Pradhan, B., Park, H.-J., y Lee, J. (2014). A Novel Ensemble Bivariate Statistical Evidential Belief Function with Knowledge-based Analytical Hierarchy Process and Multivariate Statistical Logistic

Regression for Landslide Susceptibility Mapping. *CATENA*, 114, 21-36.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.011>

Amorim, S., Corominas, J., Lantada, N., Baeza, C., Portilla, M., y Angulo, C. (2009). Análisis comparativo de técnicas estadísticas y de aprendizaje para evaluar la susceptibilidad del terreno a los deslizamientos superficiales en el pirineo catalán. *VII Simposio Nacional Sobre Taludes y Laderas Inestables*. <https://n9.cl/bgm43>

Arias-Muñoz, P., Saz, M. A., y Escolano Utrilla, S. (2022). Estimación de la erosión del suelo mediante el modelo RUSLE. Caso de estudio: cuenca media alta del río Mira en los Andes de Ecuador.

Aristizábal, E., y Yokota, S. (2006). Geomorfología Aplicada a la Ocurrencia de Deslizamientos en el Valle de Aburra. *Dyna*, 73(149), 5-16.

Asamblea Nacional de la República del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Registro Oficial N°449.

Avellaneda, F., y Villafuerte, D. (2008). *Propuesta de Uso del Agua en las Microcuencas Hidrográficas del Cantón Pimampiro en Base a su Vocación* [Escuela Politécnica del Ejército].  
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/816>

Ávila, A., Carvajal, Y., y Justino, F. (2015). Representative Rainfall Thresholds for Flash Floods in the Cali River Watershed, Colombia. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 6, 4095-2119.  
<https://doi.org/10.5194/nhessd-3-4095-2015>

Berti, M., Martina, M. L. V., Franceschini, S., Pignone, S., Simoni, A., y Pizziolo, M. (2012). Probabilistic rainfall thresholds for landslide occurrence using a

- Bayesian approach: Probabilistic Rainfall Threshold. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F4), n/a-n/a.  
<https://doi.org/10.1029/2012JF002367>
- Borga M, Vezzani C, y Dalla G. (2015). Regional Rainfall Depth–duration–frequency Equations for an Alpine Region. *Nat Hazards*, 36, 221-235.
- Bowen, N., y Schairer, J. (1956). *The Evolution of the Igneous Rocks*. Dover.
- Caine, N. (1980). The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler*, 62, 23-27.  
<https://doi.org/10.2307/520449>
- Candela, Andy y Aronica, George. (2016). Rainfall Thresholds Derivation for Warning pluvial flooding risk in Urbanised Areas. *E3S Web of Conferences*, 7, 18016.
- Cannon, S., Gartner, J., Wilson, R., Bowers, J., y Laber, J. (2008). Storm Rainfall Conditions for Floods and Debris Flows from Recently Burned Areas in Southwestern Colorado and Southern California. *Geomorphology*, 3, 250-269.
- Chaverri, I. (2016). *Zonificación de la Susceptibilidad a Deslizamiento, por Medio de la Metodología Mora-Vahrson, en la Microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica* [Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://n9.cl/22zyu>
- Cherres, J. (2013). *Deslizamientos en el Ecuador* (Vol. 3). Grant.
- CIPRADEC. (2014). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón San Pedro de Pimampiro*. Gobierno Autónomo Descentralizado de San Pedro de Pimampiro.

- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., y Vescovi, P. (2002). A Procedure for Landslide Susceptibility Zonation by the Conditional Analysis Method. *Geomorphology*, 48, 349-364. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00079-X)
- COE. (2022). *Estados de Alerta por eventos peligrosos – Comité de Operaciones de Emergencia*. <https://n9.cl/58g7u>
- Cordero, D., y Espinoza, R. (2012). *Sistemas de Alerta Temprana para Monitoreos de Deslizamientos*. 25. <https://n9.cl/p0s1n>
- Dai, F. C., y Lee, C. F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42, 213-228. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00087-3)
- Díaz, M., y Encarnación, G. (2018). *Zonificación de áreas Propensas a Incendios de Cobertura Vegetal en el Cantón Pimampiro, Provincia de Imbabura* [Universidad Técnica del Norte]. <https://n9.cl/dynjp>
- Díaz Velarde, A., y González Fernández, J. L. (1996). *Optimización Heurística y redes neuronales*. Paraninfo.
- Duque, J., González, S., Andrade, X., y Garzón, O. (2015). *Levantamiento de Cartografía Temática Escala 1:25000—Geomorfología*. <https://n9.cl/qk6rn>
- Duque, J., González, S., Galeas, M., y Guallichicomin, T. (2015). *Levantamiento de Cartografía Temática Escala 1:25000, Lote 1—Cobertura y Uso de la Tierra, Sistemas Productivos, Zonas Homogéneas de Cultivo*. 77.
- ECOWITT. (2022). *ECOWITT Home*. [ecowitt.com](https://www.ecowitt.com). <https://www.ecowitt.com/shop/goodsDetail/13>



- Escalante, A., Sandoval, S., Rosales, O., Arias, P. (2020). Aplicación del modelo Fuzzy para la determinación de la Susceptibilidad a Deslizamientos: Caso de la Subcuenca del río Mataquí ubicada en la provincia Imbabura-Ecuador. *Riesgos Naturales en la Cuenca del Río Mira, 1*, 23-40.
- ESRI. (2020). *Aspecto de TIN (3D Analyst)*. <https://n9.cl/hh1fj>
- ESRI. (2021). *Función de curvatura—ArcMap*. <https://n9.cl/zymbu>
- Florinsky, I., Eilers, R. G., Manning, G. R., y Fuller, L. G. (2002). Prediction of soil properties by digital terrain modeling. *Environmental Modelling & Software, 17*, 295-311. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00067-6)
- Frattini, P., Crosta, G., y Sosio, R. (2009). Approaches for Defining Thresholds and Return Periods for Rainfall-triggered Shallow Landslides. *Hydrological Processes, 23*, 1444-1460. <https://doi.org/10.1002/hyp.7269>
- GAD Pimampiro. (2019). *Gobierno de Pimampiro*. División Política del Cantón Pimampiro.
- GAD Provincial de Imbabura. (2021). *GAD Provincial de Imbabura*. <https://n9.cl/xztj0>
- Garzón, J., Valencia, E., y Muñoz, J. (2012). *Evaluación de la Vulnerabilidad y Consecuencias por Deslizamiento en la Conexión Vial Aburrá* [Trabajo de Grado]. Universidad de Medellín.
- Geological Survey (U.S.) (Ed.). (1982). *Goals and Tasks of the Landslide Part of a Ground-failure Hazards Reduction Program*. United States Department of the Interior, Geological Survey.

- Gomez, H., y Kavzoglu, T. (2015). Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology*, 78, 11-27.
- Guamán, G. (2012). *Aplicación de SIG para el Manejo de Riesgos Naturales en el Área Urbana de la Ciudad de Loja*. Universidad San Francisco.
- Gutiérrez, O., Cámara, R., Senciales, J., y García, L. (2018). Modelos predictivos en Biogeografía: Aplicación para la modelización de nichos ecológicos en Geografía Física | Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles. *Boletín de la Asociación Española de Geografía*, 78, 88-126.  
<https://doi.org/10.21138/bage.2395>
- Guzzetti, F., Perunacci, S., y Rossi, M. (2007). Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides in Central and Southern Europe. *Meteorog Atmos Phys*, 98, 239-267.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., y Ardizzone, F. (2005). *Probabilistic Landslide Hazard Assessment at the Basin Scale*. 72, 272-299.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>
- He, S., Wang, D., Li, Y., & Zhao, P. (2018). Land use changes and their driving forces in a debris flow active area of Gansu Province, China. *Sustainability*, 10(8), 2759.
- Holdridge, L. (1982). *Ecologia basada en zonas de vida*. IICA.
- Holdridge, L. R. (1967). Life zone ecology. *Life Zone Ecology.*, (rev. ed.).  
<https://n9.cl/ifeqy>
- Imaizumi, F., Sidle, R., y Kamei, R. (2008). Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan.

*Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 827-840.  
<https://doi.org/10.1002/esp.1574>

Instituto de Investigación para la Protección Hidrogeológica. (2021a). *Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides*. Rainfallthresholds.ripi.  
<http://rainfallthresholds.irpi.cnr.it>

Instituto de Investigación para la Protección Hidrogeológica. (2021b). *Threshold Type*. Rainfallthresholds.ripi.  
[http://rainfallthresholds.irpi.cnr.it/threshold\\_info.htm](http://rainfallthresholds.irpi.cnr.it/threshold_info.htm)

IPCC. (2007). *Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis*. IPCC.  
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/ar4-wg2-sum-vol-sp.pdf>

Jácome, G., Mejía, J., Guerra, N., Romero, A., Piedmag, V., Padilla, C., Tanaí, I., y Pupiales, N. (2020). Los volcanes de Imbabura y su tiempo geológico. Imbabura-Ecuador. FICAYA Emprende.

Jakob, M., W., H. (2003). A Hydroclimatic Threshold for Landslide Initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia. *Geomorphology*, 54, 137-156.

Jamaludin, S. y Hussein, A. (2006). *Landslide Hazard and Risk Assessment. The Malysaian Experience*.

Lee, M., N., K., Huang, Y., y Li, W. (2014). Rainfall-induced Landslides in Hulu Kelang Area, Malaysia. *Nat Hazards*, 70, 353-375.

Lobo, J. R., y Kamp, U. (2012). Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, estado Trujillo-Venezuela. *Revista geográfica venezolana*, 53(1), 109-126.

- López, P. (2015). Análisis de umbrales de precipitación de procesos de remoción en masa, en laderas urbanizadas de la costa de Chile centro-sur. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 93-112. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50212>
- Luca, D. L. D., y Versace, P. (2016a). A General Formulation to Describe Empirical Rainfall Thresholds for Landslides. *Procedia Earth and Planetary Science*, 16, 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.10.011>
- Luca, D. L. D., & Versace, P. (2016b). A General Formulation to Describe Empirical Rainfall Thresholds for Landslides. *Procedia Earth and Planetary Science*, 16, 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.10.011>
- Medina, Y. (2017). *Zonificación de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra en la Cuenca del Río Patía-Departamento del Cauca* [Universidad de Manizales]. <https://n9.cl/n1003>
- Mejía, P. (2018). *Valoración del impacto causado por riesgos a deslizamientos, empleando el método de costo de reposición en el tramo de la vía Pimampiro – San Francisco de Sigsipamba, para la elaboración de un plan de manejo* [Thesis, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra]. <https://n9.cl/owcn1>
- Moreno, H., Vélez, M., Montoya, J., y Rhenals, R. (2016). La Lluvia y los Deslizamientos de Tierra en Antioquia: Análisis de su Ocurrencia en las Escalas Interanual, Intranual y Diaria. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 5, 59-69.

- Naciones Unidas. (2013). *Manual para la evaluación de desastres*.  
<https://n9.cl/4yq89>
- Núñez, H. (2008). *Procesos de Movimientos en Masa Sector Yuquín, Cantón Pimamprio, Provincia de Imbabura*. [Instituto de Altos Estudios Nacionales]. <https://n9.cl/5kc1r>
- Ocharan, J. (2007). *Sistemas de Alerta Temprana. Fotografía Actual y Retos Futuros*. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de NN.UU.  
<https://core.ac.uk/download/pdf/41783097.pdf>
- OEA. (2010). *Manual para el diseño, instalación, operación y mantenimiento de Sistemas Comunitarios de Alerta Temprana ante inundaciones*. Organización de Estados Americanos.  
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000227593>
- Oliva González, A., y Gallardo, R. (2018). Evaluación del riesgo por deslizamiento de una ladera en la ciudad de Tijuana, México. *Tecnura*, 22, 34-50.  
<https://doi.org/10.14483/22487638.12063>
- Peña. (2015). *Sistemas de Control*. fdocuments.mx. <https://n9.cl/wa5a0>
- Pereira, S., Zêzere, J. L., Quaresma, I. D., y Bateira, C. (2014). Landslide incidence in the North of Portugal: Analysis of a historical landslide database based on press releases and technical reports. *Geomorphology*, 214, 514-525.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.032>
- Persichillo, M. G., Bordoni, M., & Meisina, C. (2017). The role of land use changes in the distribution of shallow landslides. *Science of the total environment*, 574, 924-937.

- Pourrut, P. (Ed.). (1995). *El agua en el Ecuador: Clima, precipitaciones, escorrentía*. Colegio de Geógrafos del Ecuador : Corporación Editora Nacional.
- Pozo, M. (2018). *Zonificación de Amenazas por Deslizamientos en la Cuenca del Río Mira, Ecuador* [Universidad de Salzburg]. [https://issuu.com/unigis\\_latina/docs/tesis\\_reyes1](https://issuu.com/unigis_latina/docs/tesis_reyes1)
- Rabby, Y. W., Li, Y., Abedin, J., y Sabrina, S. (2022). Impact of land use/land cover change on landslide susceptibility in Rangamati municipality of Rangamati District, Bangladesh. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(2), 89.
- Ruales, A., Chang, F., Vélez, J., Zambrano, J., y Mejía, F. (2020). Umbrales de Precipitación Basados en Intensidad para Crecidas Torrenciales en la Quebrada Manizales, Colombia. *Revista EIA*, 17, 1-16.
- Salciarini, D., Godt, J., Savage, W., Baum, R., y Conversini, P. (2008). Modeling Landslide Recurrence in Seattle, Washington, USA. *Eng Geo*, 102, 227-237.
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2021). *Plan de Creación de Oportunidades 2021- 2025*. PDF. <https://n9.cl/8imkc>
- Segarra, F., y Montalván, D. (2022). *Zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos por medio de sistemas de información geográfico, en la parroquia Bulán, canton Paute*. 87.
- Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía Metodológica para la zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1: 25.000*. Servicio Geológico Colombiano. <https://n9.cl/634j0>

- Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencia. (2019). *Lineamientos para Incluir la Gestión del Riesgo de Desastres en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT)*.
- SNGRE. (2020a). *Deslaves*. Servicio Nacionales de Genstión de Riesgos y Emergencias. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/deslaves/>
- SNGRE. (2020b). *Informe de Situación—Época Lluviosa* (N.º 156). Sistema Nacional de Gestión de Riesgos. <https://n9.cl/xamjs>
- SNGRE. (2021). *Informe de Situación—Época Lluviosa* (N.º 041). Sistema Nacional de Gestión de Riesgos. <https://n9.cl/atx7t>
- Suárez, D. (2008). Árbol de Decisiones para la Predicción y Alera de Deslizamientos Activados por Lluvias. *XII Congreso Colombiano de Geotecnia*, 6.
- Suárez, J. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. *Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos*, 4(2), 548-599.
- Tarolli, P., Borga, M., Chang, K.-T., y Chiang, S. (2011). *Modeling shallow landsliding susceptibility by incorporating heavy rainfall statistical properties*. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2011.02.033>
- Taylor y Bogdan. (1986). *Introducción a los Mètodos Cualitativos de Investigación* (3ra ed.). Ediciones Paidos. <https://n9.cl/4f8sk>
- UNDRR. (2017). *Pérdidas ecnómicas, pobreza y DESASTRES 1987-2017*. <https://n9.cl/ixgkr>
- UNDRR - Oficina Regional de Las Américas y El Caribe. (2013). *Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres*. <https://n9.cl/agg3h>

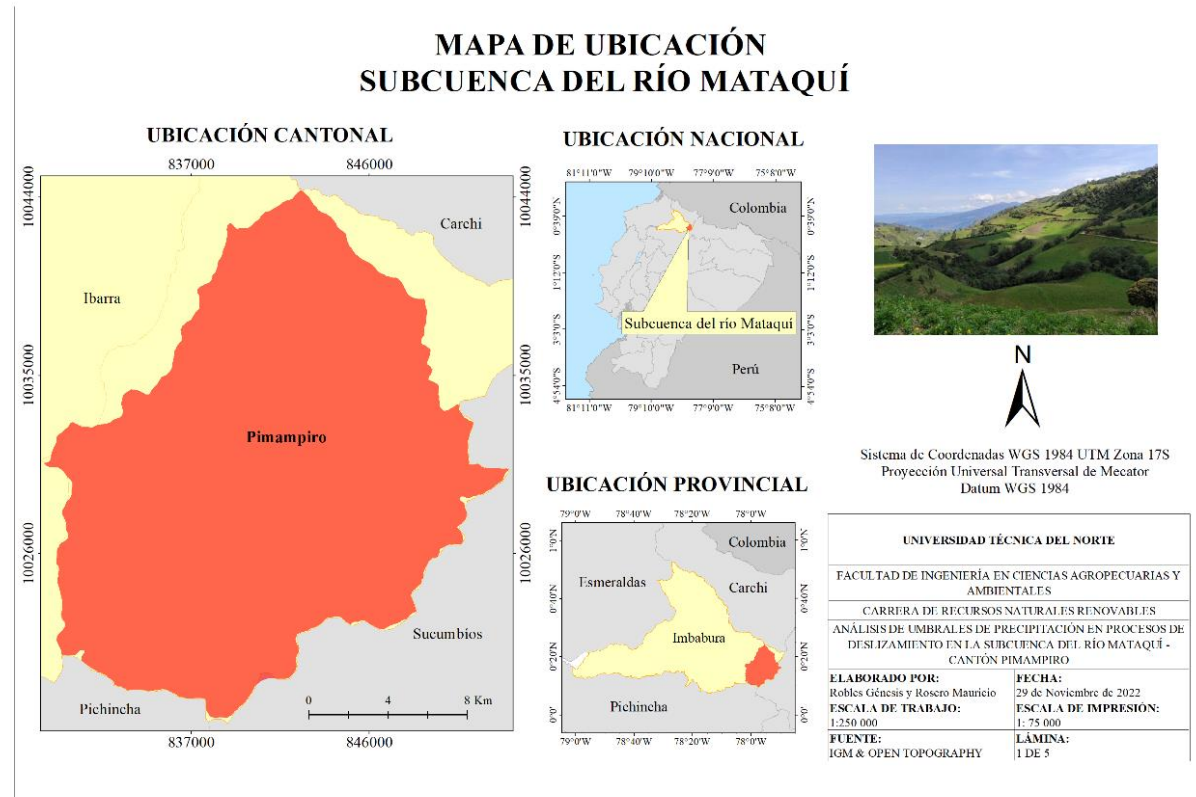
- United Nations. (2010). *United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR) Secretariat Evaluation*. Dalberg. <https://n9.cl/6ia9r>
- United Nations. (2021). *Early Warning Systems*. Climate Actions. <https://n9.cl/pc9qb>
- Vargas, R. (2002). *Evaluación de la Susceptibilidad los Deslizamientos, Municipio de La Celia, Departamento de Risaralda* (p. 25) [Contrato de prestación de servicios N° 021 de 2001]. <https://n9.cl/t6hzu>
- Varnes, D. (1984). *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice* (Vol. 3). Unesco. <http://unesdoc.unesco.org/images/0006/000630/063038EB.pdf>
- Wilson. (1997). *Normalizing Rainfall/debris-flow Thresholds along the U.S. Pacific coast for long-term Variations in Precipitation Climate*. 3(2). <https://n9.cl/lq6re>
- WordPress. (2021). *Método Heurístico*. WordPress.com. <https://analisisheurísticos.wordpress.com/metodo-heuristico/>
- Zuidam, R. A. van, & Zuidam-Cancelado, F. I. van. (1986). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Smits Publishers.



## Anexos

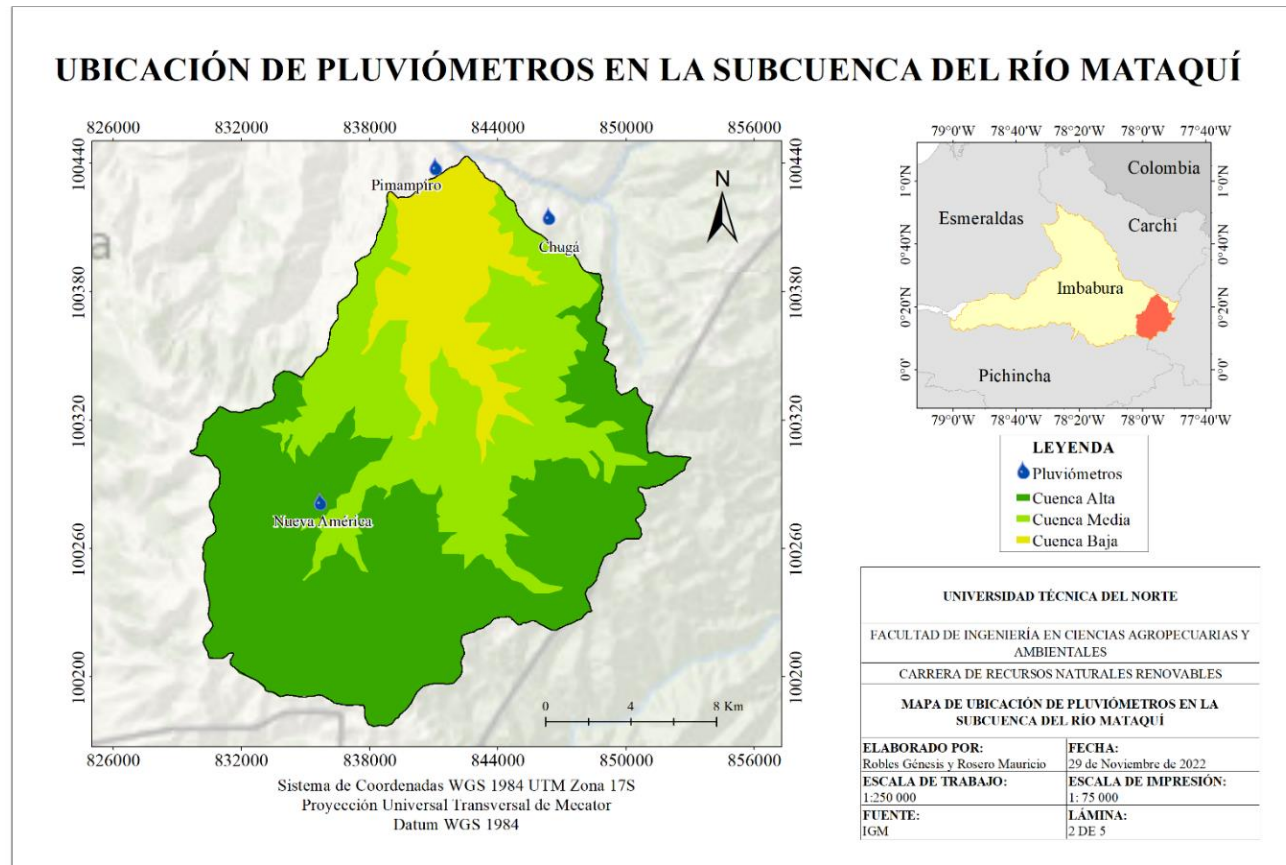
### Anexo I

#### Mapa de ubicación de la subcuenca del río Mataquí



## Anexo 2

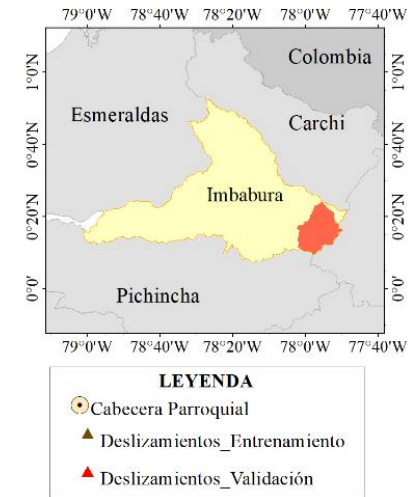
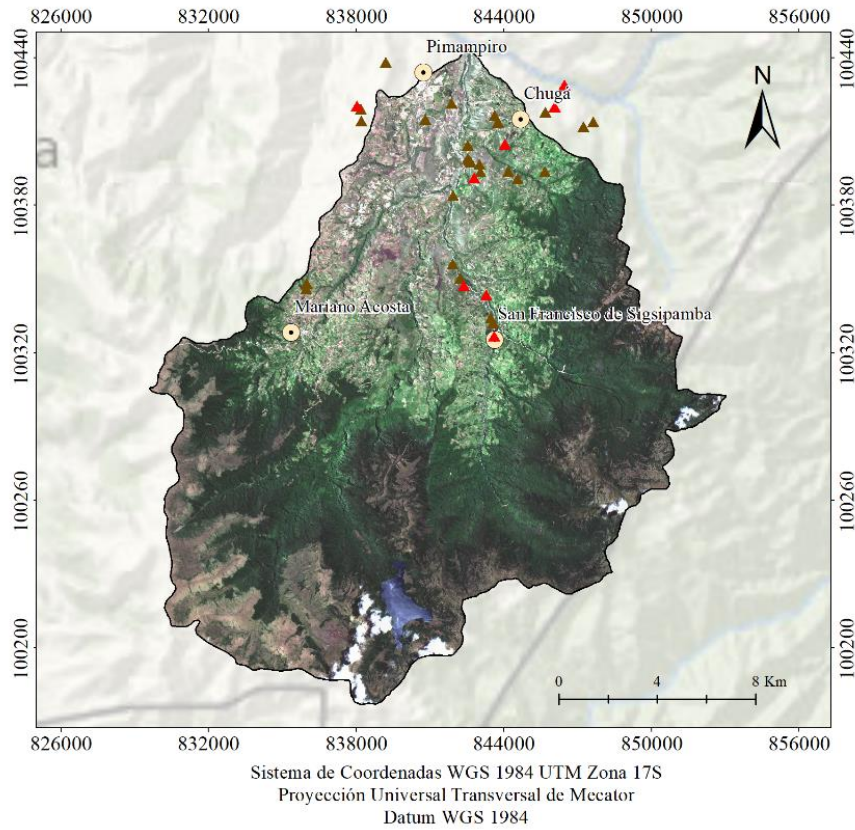
Ubicación de pluviómetros en la cuenca alta, media y baja de la subcuenca del río Mataquí.



**Anexo 3**

25 datos de deslizamiento para entrenamiento y 8 para validar

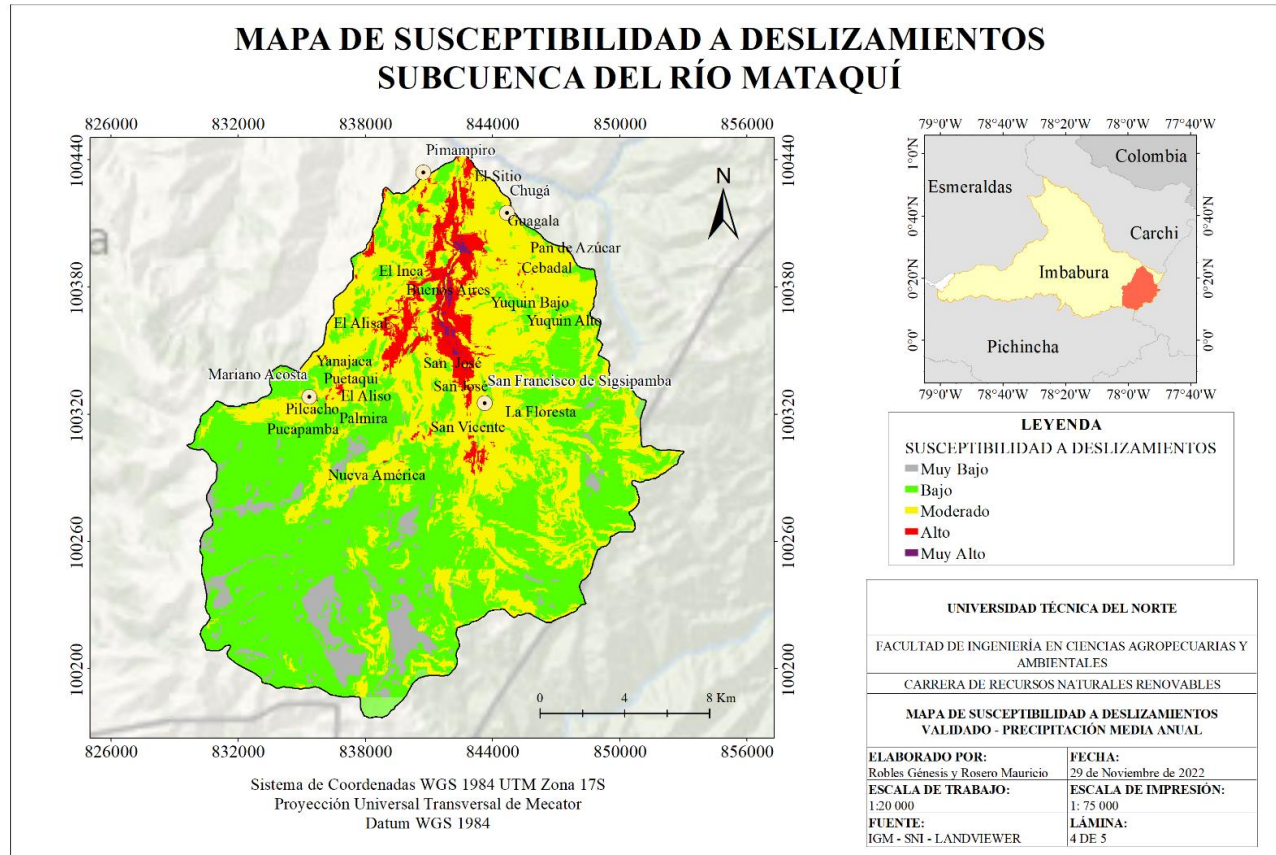
**DESLIZAMIENTOS DENTRO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO MATAQUÍ**



|  |  |
|--|--|
| <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE</b>   |  |
| FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES                                     |  |
| CARRERA DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES   |  |
| <b>MAPA DE DESLIZAMIENTOS DE ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN DENTRO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO MATAQUÍ</b> |  |
| <b>ELABORADO POR:</b><br>Robles Génesis y Rosero Mauricio  | <b>FECHA:</b><br>29 de Noviembre de 2022 |
| <b>ESCALA DE TRABAJO:</b><br>1:20 000  | <b>ESCALA DE IMPRESIÓN:</b><br>1: 75 000 |
| <b>FUENTE:</b><br>IGM - SNI - LANDVIEWER   | <b>LAMINA:</b><br>3 DE 5                 |

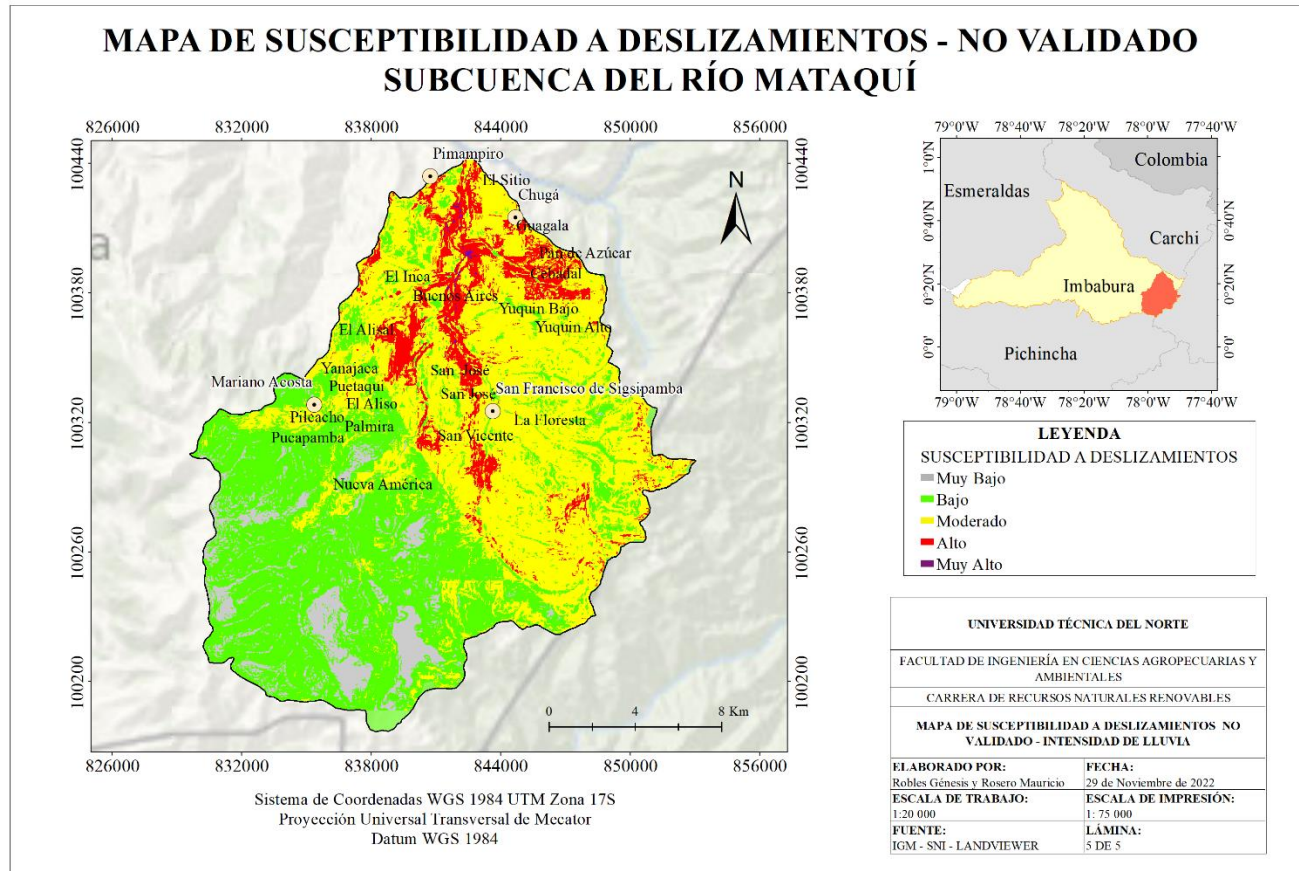
**Anexo 4**

*Mapa de susceptibilidad a deslizamientos con precipitación media anual*



**Anexo 5**

*Mapa de susceptibilidad a deslizamientos con intensidad de lluvia (umbrales)*



**Anexo 6.** Registro fotográfico de salidas de campo

**Anexo 6a.** Georreferenciación de cultivos



**Anexo 6b.** Georreferenciación de área arbustiva



**Anexo 6c.** Georreferenciación de áreas sin vegetación



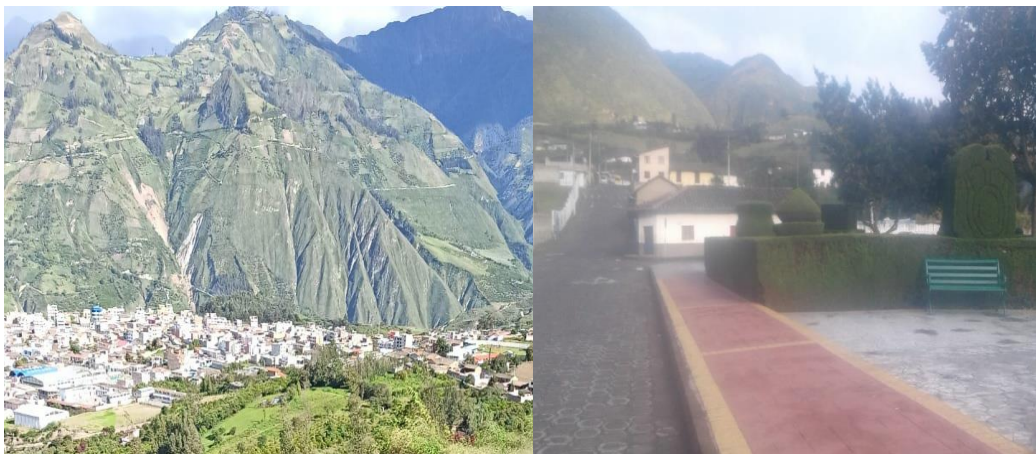
**Anexo 6d. Georreferenciación de cuerpos de agua**



**Anexo 6e. Georreferenciación de bosque**



**Anexo 6f. Georreferenciación de áreas urbanas**



**Anexo 6g.** Georreferenciación de páramo



**Anexo 6h.** Georreferenciación de pastos



**Anexo 6i.** Georreferenciación de deslizamientos durante el tiempo de investigación





**Anexo 6j . Georreferenciación de cicatrices de deslizamientos**



**Anexo 6k. Instalación de pluviómetro en Nueva América**



**Anexo 6l.** Mantenimiento y toma de datos de pluviómetro en Nueva América



**Anexo 6m.** Instalación de pluviómetro en Pimampiro



**Anexo 6n.** Instalación de pluviómetro en Chugá



**Anexo 6o.** Mantenimiento y toma de datos de pluviómetro en Chugá



**Anexo 6p.** Deslizamientos y trabajos de mantenimiento vial emergente del 1 al 5 de julio del 2022



*Nota.* Mantenimiento de vías, por deslizamientos en la vía San Francisco de Sigsipamba, por Municipio de Pimampiro (2022).

**Anexo 6q.** Actividades antrópicas que intensifican el riesgo a deslizamientos



**Anexo 6r. Granodioritas altamente meteorizadas**



**Anexo 6s. Deslizamiento – sector La Mesa**



Escala: 1:194

**Anexo 6t. Deslizamientos – vía a Chugá**



Escala: 1:160

**Anexo 6u. Deslizamientos – Ruta del Vértigo**



Escala: 1:183

Anexo 6v. Deslizamientos – vía a San Francisco de Sigsipamba



Escala: 1:106