

**ANALISIS DE LAS PRINCIPALES VARIABLES QUE INFLUYEN EN LOS
MOVIMIENTOS DE REMOCION EN MASA EN LA SUBCUENCA DEL RIO
MOLINO**



CORPORACION UNIVERSITARIA
AUTONOMA
DEL CAUCA

**LEIDY ALEJANDRA TONGUINO BURBANO
SANDRA KARINA RUBIANO ORDOÑEZ**

**CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYAN, CAUCA
2019**

**ANÁLISIS DE LAS PRINCIPALES VARIABLES QUE INFLUYEN EN LOS
MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA SUBCUENCA DEL RIO
MOLINO**



CORPORACION UNIVERSITARIA
AUTONOMA
DEL CAUCA

**LEIDY ALEJANDRA TONGUINO BURBANO
SANDRA KARINA RUBIANO ORDOÑEZ**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYAN, NOVIEMBRE DE 2019**

**ANÁLISIS DE LAS PRINCIPALES VARIABLES QUE INFLUYEN EN LOS
MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA SUBCUENCA DEL RIO
MOLINO**



CORPORACION UNIVERSITARIA
AUTONOMA
DEL CAUCA

**LEIDY ALEJANDRA TONGUINO BURBANO
SANDRA KARINA RUBIANO ORDOÑEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERA AMBIENTAL Y SANITARIO**

**Director
Ingeniera Ambiental
Ángela M. Montaña**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYAN, NOVIEMBRE DE 2019**

NOTA DE ACEPTACION

El trabajo de grado titulado “ANÁLISIS DE LAS PRINCIPALES VARIABLES QUE INFLUYEN EN LOS MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA SUBCUENCA DEL RIO MOLINO”, realizado por las estudiantes LEIDY ALEJANDRA TONGUINO BURBANO Y SANDRA KARINA RUBIANO ORDOÑEZ, cumple con los requisitos para optar por el título de Ingeniera Ambiental y Sanitario.

ING. ÁNGELA M. MONTAÑO
Director Trabajo de grado

Presidente del jurado

Jurado 1

Jurado 2

Popayán, 26 de Noviembre de 2019

DEDICATORIA

La presente tesis se la dedico principalmente a Dios mi creador, por ser mi guía y él que siempre me levanta de mis continuos tropiezos.

A mi amado Padre *Emiliano Francisco* Q.E.P.D, el forjador de mi camino quién nunca se cansó de trabajar para darle lo mejor a su única hija para verla convertida en toda una Ingeniera, hoy mi papi no puede tocar ni mirar este trabajo que tanto costó culminar y yo no puedo ver su sonrisa al decirle que lo logré. Desde el 24 de abril del año 2018 mi papi es un angelito que a diario llevo presente, nunca olvidaré lo que me enseñó, pues considero que esa es la herencia que él me dejó y vale más que todo el oro del mundo junto. Papi nunca te olvidaré y nunca olvidaré todo lo que hiciste por mí hasta tu último suspiro, eternas gracias ¡ESTO ES TUYO, TE AMO!

Leidy Alejandra Tonguino Burbano

La presente tesis la dedico a DIOS quien fue mi guía y estuvo presente en mí caminar, bendiciéndome y dándome fuerzas para continuar con mis metas trazadas sin desfallecer.

A mis padres quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a esta estancia, para cumplir mi sueño de ser una profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer ante las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A mi hermana por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento, gracias. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento, hicieron de mí una mejor persona y de una u manera me acompañan en todos mis sueños y metas propuestas.

Sandra Karina Rubiano Ordoñez

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Diosito nuestro padre celestial, creador de mis padres y todas las personas que amo con mi más sincero amor. A mi Madre *Ana Milena*, que siempre ha estado conmigo apoyándome en todo a pesar de todas las dificultades que hemos tenido, ella es mi única familia, por la que anhelo trabajar insaciablemente para darle todo lo que se merece. Gracias infinitas mami por tus consejos y paciencia ¡TE AMO! A mi compañero sentimental *Jeison Ríos* por ser mi cómplice en todo, A mis amigos de la Uni *Jacque, Pipe* y sobre todo a *Karina* mi compañera de tesis, ellos son como los hermanos que nunca tuve, gracias por su confianza, lealtad y paciencia, qué felicidad saber que aun cuento con su valiosa amistad. A nuestra directora *Ángela* por su dedicación, por ser parte de este sueño que a partir de hoy se convierte en realidad gracias a usted profe.

Leidy Alejandra Tonquino Burbano

Primeramente, doy gracias a DIOS por ser mi guía y acompañarme en el transcurso de mi vida, brindándome sabiduría, conocimiento y paciencia para culminar con éxito mi etapa profesional; a mi familia por brindarme su apoyo incondicional en mi proceso de formación, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me han inculcado, les agradezco infinitamente porque sin ellos no fuese posible cumplir este logro. Agradezco a la Universidad UNIAUTONOMA por haberme abierto sus puertas y permitirme formar como profesional y conocer grandes personas que se convirtieron en un apoyo en todo momento en las diferentes facetas que vivimos, a ustedes Daniel, Jacqueline y Leidy que es mi compañera de tesis, les agradezco por su lealtad, paciencia y cariño. Gracias a nuestra asesora de tesis *Ángela* por su acompañamiento, apoyo, esfuerzo, dedicación y paciencia, el cual fue fundamental para la elaboración de nuestra tesis; hoy estoy haciendo mi sueño realidad, lograr mi título como profesional de Ingeniera Ambiental y Sanitaria.

Sandra Karina Rubiano Ordoñez

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	13
INTRODUCCION.....	15
CAPÍTULO I: PROBLEMA.....	17
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	20
1.3 OBJETIVOS.....	24
1.3.1 Objetivo general.....	24
1.3.2 Objetivos específicos.....	24
CAPÍTULO II: MARCO TEORICO.....	25
2.1 ANTECEDENTES.....	25
2.2 BASES LEGALES.....	26
2.3 REFERENTES CONCEPTUALES.....	29
2.3.1 Sistemas de Alertas Tempranas (SAT).....	29
2.3.2 Conceptualización sobre gestión del riesgo.....	32
2.3.3 Conceptualización sobre Sistema de Información Geográfica (SIG)..	42
2.3.4 Subcuenca del Río Molino.....	44
CAPÍTULO III: METODOLOGIA.....	49
3.1 PRIORIZACIÓN DE ÁREAS PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS EN MASA.....	49
3.1.1 Caracterización de las zonas de amenazas.....	51
3.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN LOS MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA.....	55
3.2.1 Método para determinar pendiente.....	56

3.2.2	Método para determinar tipo de suelo	59
3.2.3	Método para determinar cobertura vegetal	61
3.2.4	Determinar temperatura y precipitación (ArcGIS)	63
3.3	PRINCIPALES VARIABLES A CONSIDERAR PARA INCLUIR EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA (SAT) DE LA SUBCUENCA DEL RÍO MOLINO	63
3.3.1	Fase I: Definición e importancia de variables con mayor incidencia a los deslizamientos de tierra	64
3.3.2	Fase II: Presentación de variables meteorológicas que evalúan los SAT (Popayán, Medellín y Manizales)	64
3.3.3	Fase III: Evaluación del Sistema de Alerta Temprana de Popayán ...	65
CAPÍTULO IV: DISCUSION Y PRESENTACION DE RESULTADOS		66
4.1	PRIORIZACIÓN DE ÁREAS PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS EN MASA	66
4.1.1	Características de las áreas de amenaza	68
4.2	IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN LOS MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA	89
4.2.1	Clasificación de pendiente (Cortes & Malagón)	91
4.2.2	Clasificación de tipo de suelo (Caldas-lang)	98
4.2.3	Clasificación y base de datos multitemporal de cobertura vegetal y uso de suelo.....	105
4.2.4	Temperatura anual Popayán - Cauca	116
4.3	PRINCIPALES VARIABLES A CONSIDERAR PARA INCLUIR EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA (SAT) DE LA SUBCUENCA DEL RÍO MOLINO	121

4.3.1	Fase I: Variables con alto porcentaje a ocurrencia de movimientos en masa	121
4.3.2	Fase II: Variables meteorológicas que manejan los SAT (Popayán, Medellín y Manizales).....	122
4.3.3	Fase III: Variables a considerar para incluir en el Sistema de Alerta Temprana de la subcuenca del Río Molino	126
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		129
5.1	CONCLUSIONES	129
5.2	RECOMENDACIONES.....	130
BIBLIOGRAFIA.....		132

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Normatividad.....	26
Tabla 2 Clasificaciones climáticas Colombia	41
Tabla 3 Clasificación de la pendiente por categorías según su grado de inclinación	42
Tabla 4 Clasificación zonas priorizadas.....	50
Tabla 5 Elementos expuestos ante el evento amenazante.....	52
Tabla 6 Clasificación de la red vial.....	53
Tabla 7 Zonas o escenario de exposición.....	54
Tabla 8 Clasificación tipos de pendiente.....	57
Tabla 9 Clasificación susceptibilidad	58
Tabla 10 Clasificaciones climáticas Colombia	60
Tabla 11 Clasificación cobertura vegetal y uso del suelo	62
Tabla 12 Leyenda ubicación barrios priorizados.....	86
Tabla 13 Clasificación de zonas priorizadas	86
Tabla 14 Leyenda corrección de mapeo zonas priorizadas.....	89
Tabla 15 Identificación de variables.....	91
Tabla 16 Base de datos clasificación de pendiente	94
Tabla 17 Base de datos pendiente	97
Tabla 18 Base de datos clasificación tipo de suelo.....	100
Tabla 19 Base de datos clasificación tipo de suelo (caldas-lang).....	104
Tabla 20 Base de datos clasificación cobertura vegetal y uso de suelo 1990	107
Tabla 21 Base de datos clasificación cobertura vegetal y uso de suelo 2019	109
Tabla 22 Base de datos clasificación cobertura vegetal y uso de suelo 1990	114
Tabla 23 Base de datos clasificación cobertura vegetal y uso de suelo 2019	115
Tabla 24 Variables identificadas según las zonas priorizadas.....	120
Tabla 25 Variables estudiadas VS variables SAT.....	126

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Clasificación de amenaza sísmica por ciudades	21
Ilustración 2 Fotointerpretación amenaza, riesgo y vulnerabilidad.....	33
Ilustración 3 Factores que propician los Movimientos en Masa	34
Ilustración 4 Influencia del clima y la erosión en las pendientes	35
Ilustración 5 Tipos de suelo	39
Ilustración 6 Mapa urbano y rural de Popayán.....	46
Ilustración 7 Localización de la subcuenca río Molino en el Departamento del Cauca	48
Ilustración 8 Mapa de amenaza por movimientos en masa Popayán Cauca.....	66
Ilustración 9 Zoom mapa zonas de amenaza priorizadas	67
Ilustración 10 Leyenda del mapa de amenaza por movimientos en masa Popayán Cauca	68
Ilustración 11 Mapa de Popayán Cauca	69
Ilustración 12 Zoom mapa de Popayán Cauca	69
Ilustración 13 Leyenda mapa de Popayán Cauca.....	70
Ilustración 14 Zona priorizada - Real independencia	73
Ilustración 15 Ubicación barrio la Isla	79
Ilustración 16 Zona priorizada - Arcos de Yanaconas.....	80
Ilustración 17 Distancia entre el río y la vivienda	81
Ilustración 18 Ubicación y distancia entre el río y las viviendas.....	84
Ilustración 19 Ubicación barrios priorizados	85
Ilustración 20 Corrección de mapeo zonas priorizadas	89
Ilustración 21 Clasificación de pendientes	92
Ilustración 22 Zoom mapa clasificación pendientes	93
Ilustración 23 leyenda de clasificación de pendientes	93
Ilustración 24 Clasificación tipo de suelo	99
Ilustración 25 Zoom clasificación tipo de suelo	99
Ilustración 26 Leyenda clasificación tipo de suelo	100

Ilustración 27 Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 1990	106
Ilustración 28 Zoom mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 1990	106
Ilustración 29 Leyenda mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 1990	107
Ilustración 30 Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2019	108
Ilustración 31 Zoom mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2019	108
Ilustración 32 Leyenda mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2019	109
Ilustración 33 Mapa temperatura 2018	116
Ilustración 34 Zoom mapa temperatura 2018	117
Ilustración 35 Leyenda mapa temperatura 2018.....	117
Ilustración 36 Mapa de precipitación anual barrios priorizados	118
Ilustración 37 Zoom mapa de precipitación anual barrios priorizados	119
Ilustración 38 Leyenda mapa de precipitación anual barrios priorizados	119
Ilustración 39 Sistema SAT 2018 Popayan.....	123

LISTADO DE GRÁFICOS

Grafico 1 Clasificación pendiente Cortes y Malagón (1984)	97
Grafico 2 Clasificación tipo de suelo	103
Grafico 3 Cobertura vegetal y uso de suelo 1990	113
Grafico 4 Cobertura vegetal y uso de suelo 2019	114

RESUMEN

Con el objetivo de determinar las principales variables que influyen en los movimientos de remoción en masa en la subcuenca del río Molino del municipio de Popayán, se realizó búsqueda de información primaria y secundaria en sitios web, base de datos y libros, además se realizaron visitas a las instituciones relacionadas con el tema como: el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la alcaldía Municipal en la Oficina principal de Gestión del Riesgo de Desastres, para poder hacer el análisis de la zona el cual nos ayudó a delimitar las áreas de mayor riesgo a deslizamientos y a establecer los principales factores detonantes de los movimientos en masa.

Para obtener información más precisa de lo que ocurre en la zona, se realizaron entrevistas informales cualitativas a la comunidad aledaña de la subcuenca, que permitió determinar el comportamiento hidrológico de la misma, además de visitas a campo para verificar la información cartográfica y textual obtenida.

Con ayuda de la información primaria y secundaria recopilada se logró determinar variables como la pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal y precipitación, debido a que estas son principales detonantes porque tienen una fuerte incidencia a la hora de deslizamientos.

Una vez interpretados los resultados se observó que en las zonas donde se realizó el estudio de remoción en masa es necesaria la implementación de un sistema de alerta temprana, que permita prevenir las consecuencias y mitigar las causas que ocasionan un desastre que puede ser natural o antrópico, de esta forma poder hacerle frente a esta problemática.

Palabras clave: remoción en masa, variables, sistema de alerta temprana.

Abstract

In order to determine the main variables that influence mass removal movements in the Molino River sub-basin of the municipality of Popayán, we searched for primary information and secondary information on websites, databases, books and also performed Visits to the institutions related to the topic such as: the Colombian Geological Service (SGC) and the municipal mayor's office in the Main Office of Disaster Risk Management to be able to do the analysis of the area which helped us to delimit the areas of greatest risk to landslides and to establish the main triggers of mass movements.

In order to obtain more precise information on what is happening in the area, qualitative informal interviews were conducted with the surrounding sub-basin community, which allowed it to determine its hydrological behavior, as well as field visits to verify the cartographic and textual information obtained.

With the help of the primary and secondary information collected, it was possible to determine variables such as the slope, type of soil, vegetation cover and precipitation, because these are main triggers because they have a strong incidence at the time of landslides.

Once the results were interpreted, it was observed that in the areas where the mass removal study was carried out, the implementation of an early warning system is necessary, which allows to prevent the consequences and mitigate the causes that cause a disaster that can be natural or anthropic, to be able to face this problem.

Keywords: mass removal, variables, early warning system.

INTRODUCCION

Los movimientos de remoción en masa han ocasionado grandes catástrofes en Colombia, lo que ha generado el interés por estudiar las causas de estos eventos, ya que gran parte del país se encuentra sobre el sistema montañoso de la Cordillera los Andes. Esto hace que las ciudades que se han desarrollado cerca o dentro de esta cadena de montañas sean más susceptibles a que se generen movimientos en masa dentro de sus territorios, por lo cual, se hace necesario analizar esas zonas para elaborar planes de prevención y mitigación sobre el riesgo por eventos de deslizamientos.

Los factores internos y externos que ayudan a la generación de estos desplazamientos de tierra están relacionados a la geomorfología, geología y suelo. Debido a que la mayor parte de movimientos en masa ocupan áreas de gran extensión dificultando el estudio de campo, es necesario analizar estas variables mediante vistas aéreas para su mejor comprensión.

El avance de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ha facilitado el procesamiento y análisis de información del terreno sobre el cual se desarrollan estos eventos, a través del análisis de datos en los SIG se permiten generar modelos del terreno y los eventos de remoción en masa con información geológica, geomorfológica y uso del suelo sobre las áreas a analizar.

Debido a que la remoción en masa es uno de los peligros más ocurrentes que existen en Colombia, se requirió la ayuda de los SIG para realizar evaluaciones de mitigación, dar información actual de cierta zona y así mismo determinar soluciones posibles.

Mediante la aplicación de los SIG, en este caso el software ArcGIS, se elaboró gran parte de los resultados de este informe en el que se estudió para la ciudad de Popayán departamento del Cauca, la subcuenca del Río Molino, exactamente la parte media de la montaña, en donde los caudales medios y mínimos son

regulados por la composición de los suelos, zona en donde mayor es la susceptibilidad a generar movimientos de remoción en masa. Importante por su capacidad hidrológica que alcanza una demanda en el sector agrícola de 4310.4 L/ha, considerando que su extensión es de 5547.28 has.

La subcuenca del Río Molino, no cuenta con ninguna estación hidrométrica que permita cuantificar la escorrentía superficial, para efectuar un balance hídrico y determinar mediante un estudio de sedimentos el grado de erosión que se está presentando.

CAPÍTULO I: PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un tema de gran interés que, en materia de riesgo ambiental son los procesos por remoción en masa; se ha evidenciado como en los últimos años los asentamientos en Colombia se han localizado en gran proporción en zonas inseguras o con riesgo de amenazas naturales [1]. El riesgo que estos representan para diversas poblaciones aumenta debido a la expansión urbana en áreas montañosas de estabilidad frágil y zonas de extracción minera, al igual que factores naturales y antrópicos asociados al desencadenamiento del movimiento de materiales laderas abajo, que suelen ser consecuencia de factores drásticos como las precipitaciones acumuladas y prolongadas, topografía, los eventos sísmicos, volcánicos y geológicos [2].

En los procesos de remoción de masa se deben considerar factores como los diferentes tipos de materiales involucrados (suelo o roca), estos inician con el desprendimiento y se produce en el momento en que el esfuerzo cortante supera al valor de rozamiento interno del material, también debido al grado de saturación que alcanza el suelo y al mecanismo de ruptura en que se encuentra la roca [3]. Estos factores junto con las características geológicas, geotécnicas y geomorfológicas del entorno, condicionan la potencial generación de procesos de remociones en masa, al igual que las velocidades de desplazamiento y el volumen del material desplazado [4].

Los fenómenos de remoción en masa constituyen una de las causas más frecuentes de desastres naturales alrededor del mundo. Parte de este fenómeno se ha producido por diversas razones entre las cuales están el crecimiento poblacional, el desplazamiento forzado, la desigualdad socioeconómica y la localización de un número importante de centros poblados en zonas montañosas o de ladera; zonas donde el relieve, la geomorfología y los procesos tectónicos son recurrentes e influyentes en la caracterización y debate sobre la amenaza a los diferentes tipos de movimientos en masa a los que se estaría expuesto [5], [6].

Existe una serie de factores determinantes para el desarrollo de los eventos que deben ser identificados y estudiados, por ende, es importante identificar los factores que de forma directa se encargan de originarlo. Entre los principales factores desencadenantes de estos fenómenos se encuentran los sismos, responsables principalmente de deslizamientos y caídas, las lluvias intensas, que generan en su mayoría flujos y deslizamientos, pues ambos factores son capaces de originar todos los tipos de remociones en masa [7].

Por otra parte, muchos de los movimientos en masa están involucrados en las cadenas de procesos que incluyen terremotos, erupciones volcánicas, inundaciones y fenómenos naturales como lo son las avenidas torrenciales, que debido al aumento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos climáticos extremos ha desencadenado la ocurrencia de diferentes eventos como inundaciones de ríos [8].

Colombia al encontrarse en la zona intertropical sufre cambios de humedad relativa, lo que genera que los materiales que componen la ladera o suelos se degraden y sean vulnerables a los cambios climáticos, ocasionando así los deslizamientos de tierra [9].

Tener diversidad de climas hace que crezca el desarrollo de la economía implementando nuevas técnicas para la producción agropecuaria, de las cuales traen consigo un gran problema al suelo debido a su sobreutilización, ocasionando desequilibrio y deslizamientos, como lo es el caso del departamento del Cauca con un 24,6% de sobreutilización del suelo, lo que lo hace más susceptible a movimientos de remoción en masa [10].

Debido a esto, se hace correlación con la subcuenca del Río Molino de Popayán, ya que en los antecedentes históricos de la ciudad se logra identificar que las condiciones naturales y antrópicas que generan riesgo por inundación de dicho río en la zona urbana de Popayán son las lluvias torrenciales, las cuales generan inestabilidad ante el relieve de la ciudad, ocasionando movimientos de tierra en

gran parte de la subcuenca y de igual forma se identifican las condiciones antrópicas que causan este tipo de riesgo como lo es la contaminación y la invasión de las zonas de protección de la fuente hídrica [11].

La Oficina Asesora de Gestión del Riesgo Departamental (OAGRD), expuso estadísticas de los desastres del efecto invernadero en el departamento del Cauca, entre estos se encontró que el Río Molino ha registrado al menos ocho grandes inundaciones de las cuales en los últimos seis años durante la temporada invernal, ha tenido dos emergencias, causas que han generado veintitrés (23) crecientes de caudal y ciento setenta y cinco (175) deslizamientos de tierra debidos a la erosión existente en la parte alta de la cuenca, también, el desbordamiento del río hacia las zonas aledañas como Mercaderes, Piendamó, Silvia y Timbiquí; dejando determinadas consecuencias de impactos ambientales, sociales y económicos en el municipio [12].

Se considera que fenómenos como este tienen una gran influencia, pero no se conocen las variables determinantes en este proceso, por tal motivo es importante determinar la incidencia o las variables que influyen en los fenómenos de remoción en masa en esta área de influencia para que las autoridades municipales tengan más herramientas para mitigar el riesgo asociado a deslizamientos de tierra.

1.2 JUSTIFICACIÓN

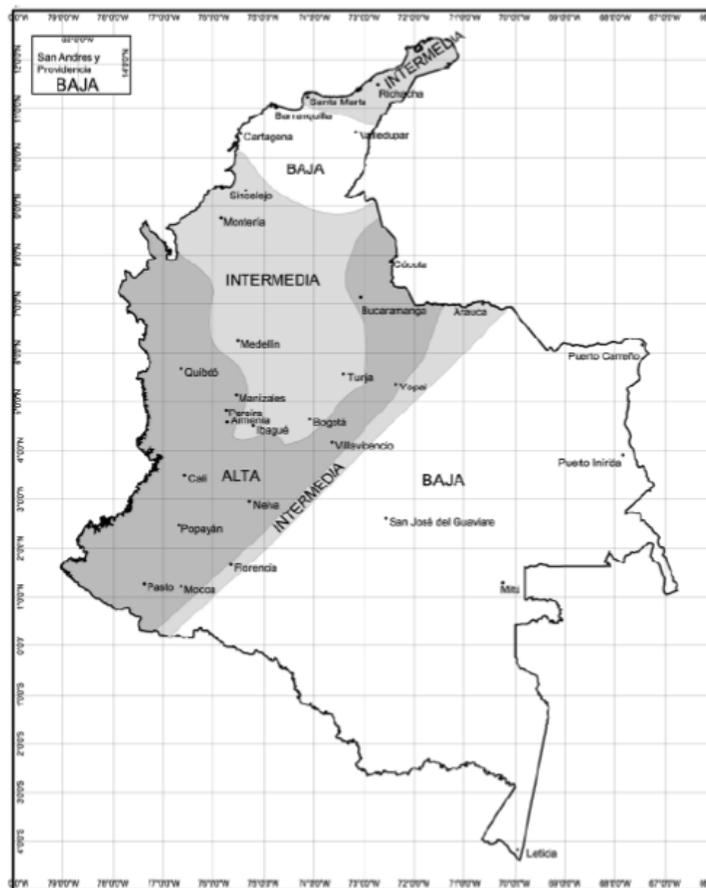
Debido a que los deslizamientos son ocasionados por fenómenos antrópicos y naturales, se consideran importantes para realizar estudios en las zonas donde se pueda presentar este riesgo, para así poder determinar las principales variables que influyan en los movimientos pendiente abajo de una ladera y de esta forma evitar pérdidas económicas, sociales y ambientales mediante un SAT (Sistema de Alerta Temprana), que permita controlar y monitorear las diferentes variables detonantes del desequilibrio de la ladera cuando esta se sobre carga en su parte superior [13].

Colombia está conformado por treinta y dos (32) departamentos y mil ciento un (1101) municipios de los cuales ochenta y uno (81) se encuentran en amenaza de deslizamientos, debido a que posee tres cordilleras que son habitadas en su gran mayoría, además todo el transporte atraviesa montañas causando así que siempre se encuentre bajo amenaza natural, debido a lo anteriormente mencionado nuestro país se considera un país vulnerable a deslizamientos [14].

El país presenta una gran variedad de suelos debido a la gran diversificación de factores como: geomorfología, suelos, geología y cobertura de la tierra; todos estos factores influyen para que los suelos tengan características diferentes en cada uno de los departamentos que lo conforman [15].

También, Colombia cuenta con un mapa que enseña la clasificación de amenaza sísmica por ciudades como se observa en la *“Ilustración 1 Clasificación de amenaza sísmica por ciudades”*, la cual permitió conocer los criterios de zonificación de amenaza en la que se encuentran los municipios de Colombia, donde el Cauca hace parte de los municipios que presentan amenaza sísmica alta [16].

Ilustración 1 Clasificación de amenaza sísmica por ciudades



Fuente Formulación del plan de gestión del riesgo de desastres del Municipio de Popayán

El Cauca al estar en amenaza sísmica alta, al ser un departamento con una geología compleja, estar atravesado por fallas geológicas y presentar muchas precipitaciones, es muy propenso a que ocurran deslizamientos que afectan a la comunidad ocasionando pérdidas humanas y económicas [17].

El estudio hidrológico relacionado con la subcuenca del Río Molino, permitió determinar que cuando se presentan precipitaciones de alta intensidad es más alto el riesgo de que se presenten crecientes súbitas y movimientos en masa, también es importante que la comunidad aledaña tenga el correcto conocimiento del comportamiento hidrológico de la subcuenca para poder establecer las áreas

vulnerables a los eventos hidrometeorológicos de la zona y de esta forma cuentan con las medidas preventivas en caso de detonación de un desastre natural [18].

Según las condiciones de riesgo de la Ciudad de Popayán, es prioritario desarrollar acciones en la gestión del riesgo de desastres para la subcuenca del Río Molino, ya que en el POT del año 2002 de Popayán se presenta que el escenario de amenazas está fuertemente influenciado por fenómenos como las inundaciones constantes del Río Molino y ríos vecinos [19].

Debido a la expansión que ha tenido la ciudad de Popayán la población ha tenido que buscar nuevos lugares para vivir, como es el caso en la subcuenca del Río Molino que tiene la mayor parte de asentamientos humanos a sus riberas, los cuales realizan construcciones de viviendas sin contar con un estudio geotécnico previo que permita conocer las características del terreno antes de iniciar una construcción, de esta manera evitar ser afectados por desastres naturales como los deslizamientos y las inundaciones que pueden ocasionar numerosas pérdidas humanas, ambientales y económicas.

Para este estudio es importante analizar las diferentes variables que influyen en los movimientos de remoción en masa en la subcuenca del Río Molino, de los cuales según antecedentes, la pendiente es uno de los factores más comunes para que ocurra un deslizamiento, junto con el tipo de suelo que depende de la capacidad de absorción también se debe tener en cuenta la cobertura vegetal, ya que esta tiene relación con la humedad del suelo, sin dejar de lado la precipitación que es la que modifica las condiciones de la estabilidad de la ladera [20].

La importancia de este estudio radica en primer lugar en crear un diagnóstico de las zonas priorizadas, el cual es un insumo para que las entidades relacionadas con el tema puedan mejorar la calidad de la información y de los sistemas de alerta a la población por movimientos de remoción en masa, en segundo lugar se quiere contribuir con el análisis de las principales variables detonantes de los movimientos de remoción en masa de la subcuenca del Río Molino y de esta

manera poder determinar la principales variables que se deben tener en cuenta para incluir en el Sistema de Alerta Temprana (SAT) de la subcuenca del Río Molino de la ciudad de Popayán, las cuales permiten al SAT tener una amplia capacidad a la hora de evaluar y monitorear la ocurrencia de los desastres [21].

Por lo tanto, mediante este insumo se pueda incluir y fortalecer el SAT municipal, teniendo en cuenta lo importante que es esta herramienta para la gestión del riesgo de desastres al realizar el monitoreo constante de la zona vulnerable, permite alertar a la comunidad que está en riesgo y de esta forma lograr prevenir las consecuencias y mitigar las causas que ocasionan un desastre natural [22].

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Determinar las principales variables que intervienen en los movimientos de remoción en masa en la subcuenca del Río Molino del municipio de Popayán.

1.3.2 Objetivos específicos

- Priorizar las áreas para el análisis de las variables que influyen en los movimientos de remoción en masa en la subcuenca del Río Molino.
- Identificar las variables que influyen en los movimientos de remoción en masa en la subcuenca del Río Molino.
- Determinar las principales variables a considerar para incluir en el sistema de alerta temprana (SAT) de la subcuenca del Río Molino.

CAPÍTULO II: MARCO TEORICO

2.1 ANTECEDENTES

Colombia es un país que cuenta con épocas de sequía y lluvia en las cuales los suelos actúan diferente generando grandes problemas entre los que se encuentran los movimientos de remoción en masa, los cuales son influenciados por las precipitaciones, pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal, entre otros, que son algunos de los detonantes para que ocurran los deslizamientos [23]. El departamento del Cauca es considerado como uno de los departamentos que tiene geología compleja y cuenta con seis tipos de paisajes existentes, siendo el de mayor extensión el paisaje de montaña que representa el 64.62%, seguido por el de lomerío con un 20%, planicie un 6.26%, altiplanicie un 5.33%, valle un 2.53% y piedemonte un 0,68%; cada uno de ellos caracterizado por la presencia de múltiples tipos de relieves [24].

Según un estudio realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el país ya cuenta con el dieciséis por ciento (16%) de suelos enfermos debido a la sobre utilización agropecuaria que se ha presentado; de los mil ciento un (1101) municipios con los que cuenta Colombia, trece (13) de ellos tienen al menos un cincuenta por ciento (50%) de sobre utilización agropecuaria, como es el caso del departamento del Cauca, con un veinticuatro coma seis por ciento (24,6%) de sobreutilización del suelo, lo cual lo hace más susceptible a movimientos de remoción en masa [10].

Según estudios realizados sobre el suelo en el municipio de Popayán, departamento del Cauca, se han registrado en el sector Suroriental un total de 396 deslizamientos, sector Nororiental 238 deslizamientos, sector Suroccidental 108 deslizamientos y en el sector Noroccidental 81 deslizamientos, además se encontró que los suelos más predominantes son los suelos finos, los cuales se clasifican como: limo-arcillosos o arcillo - limosos de alta plasticidad [17], [25].

Más de 100 comerciantes resultaron afectados por el desastre natural ocurrido en la madrugada de aquel 25 de Diciembre de 2013, por cuenta del fuerte aguacero que se prolongó durante varias horas aquella madrugada.

Sobre las once de la noche el río Molino se desbordó, produciendo estragos en algunas viviendas de Pueblillo y La Independencia. Los daños más severos fueron registrados en los puestos de la plaza de mercado del barrio Bolívar; comerciantes que venden al por mayor, minoristas y hasta informales tuvieron pérdidas económicas considerables, algunos afirmaron que se quedaron en la calle pues el lodo arrastró todos sus productos. Propietarios de negocios que tenían grandes bodegas quedaron con unos cuantos bultos, las rejas de algunos locales fueron destruidas. Los afectados debieron esperar a que dejara de llover para poder ingresar a sus puestos a revisar lo que se había salvado, a otras personas la tragedia les tomó por sorpresa al llegar en la mañana del 25 de diciembre y encontrarse con el escabroso barrizal que rodeó todo el barrio Bolívar [26].

En Colombia existen diferentes Sistemas de alertas tempranas, se conoce el Sistema de alerta temprana de Medellín y el Valle de Aburra, Sistema de alerta temprana participativa (SAT) en Caldas, Diseño de un sistema de alerta temprana por inundación y deslizamiento en el flanco Nororiental de la Sierra Nevada de Santa Marta – Departamento de la Guajira y el Sistema de alerta temprana de Bogotá; su función es dar aviso sobre los niveles hídricos y advertir a la comunidad de zonas con alto riesgo de avenida torrencial ante la eventual ocurrencia de un fenómeno natural.

2.2 BASES LEGALES

Tabla 1 Normatividad

LEY	EXPIDE LA NORMA	CONCEPTO
Resolución CRC O883 de 2006	Corporación Autónoma Regional del Cauca	Por la cual se aprueba el plan de ordenación y manejo de la subcuenca hidrográfica del Molino

		-Pubús- en el municipio de Popayán [27, p. 08].
Resolución 509 del 2013	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por la cual se definen los lineamientos para la conformación de los Consejos de Cuenca y su participación en las fases del Plan de Ordenación de la Cuenca [28].
Ley 99 de 1993	El Congreso de Colombia	Se establecen lineamientos para fortalecer el Sistema Nacional Ambiental y fijar las pautas generales para el ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas [29, p. 99].
Ley 1450 de 2011	El Congreso de Colombia	Corresponde a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de las Cuencas Hidrográficas conforme a los criterios establecidos por el Gobierno Nacional en cabeza del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [30].
Ley 1523 de 2012	El Congreso de Colombia	Mediante la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres [31].

Ley 388 de 1997	El Congreso de Colombia	Establece un mandato para que todos los municipios del país formulen sus respectivos Planes de Ordenamiento Territorial y reglamenta los usos del suelo [32, p. 388].
NSR-10	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible	Es el reglamento Colombiano encargado de regular las condiciones con las que deben contar las construcciones con el fin de que la respuesta estructural a un sismo sea favorable [33].
Decreto 2811 del 18 de Diciembre de 1974	El presidente de la Republica de Colombia	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente [34].
Decreto 1729 de 2002	El Presidente de la República de Colombia	Por el cual se reglamenta la Parte XIII del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas y se dictan otras disposiciones [35].
Decreto 3600 de 2007	El Presidente de la Republica de Colombia	Determinantes de Ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo [36].
Decreto 1640 de 2012	El Presidente de la Republica de Colombia	Se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos [37].

Decreto 1807 de 2014	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa en suelos urbanos, de expansión y centros poblados rurales, para la revisión o expedición de planes de ordenamiento territorial [38].
----------------------	---	---

Fuente Propia

2.3 REFERENTES CONCEPTUALES

2.3.1 Sistemas de Alertas Tempranas (SAT)

El Sistema de Alerta Temprana (SAT), es una herramienta que permite dar información oportuna y eficaz para la reducción de riesgos y la preparación ante desastres, la cual da respaldo técnico a la comunidad para actuar oportunamente ante una eventualidad con el fin de proteger a las personas [39].

- Sistema de alerta temprana de Medellín y el Valle de Aburra – SIATA.

Es un proyecto de ciencia y tecnología del área metropolitana del Valle de Aburra y la alcaldía de Medellín, que cuenta con el apoyo y los aportes de EPM e ISAGEN.

Este sistema es una estrategia regional para la gestión del riesgo que permite fortalecer la toma de decisiones y la intervención oportuna de los organismos de respuesta ante la información brindada oportunamente frente a la posibilidad de ocurrencia de un evento extremo como: precipitación máxima, inundaciones, movimientos en masa y calidad del aire, para las que se desarrollan cuatro tareas:

- Monitoreo, se realiza midiendo diferentes variables meteorológicas, hidrológicas y calidad del aire, ofreciendo información en tiempo real en la plataforma.

- Modelación, se desarrolla y se pone en marcha modelos de pronóstico hidrológico y meteorológico ajustados a las condiciones del Valle de Aburrá.
- Alerta y gestión, se entrega oportunamente la información generada a los organismos gestores de riesgo en el territorio y a la ciudadanía.
- Se promueve la apropiación social del conocimiento y la divulgación científica [40].

- Sistema de alerta temprana participativa (SATP) en Caldas.

Es un sistema de alerta temprana participativa con dos subsistemas: tecnológico y participativo.

El subsistema tecnológico es compuesto por micro estaciones, sistemas informáticos con series cronológicas de clima, equipos de comunicación y asistencia técnica; el subsistema participativo está integrado por gremios, entidades públicas y privadas, ONG y la comunidad [41].

- Diseño de un sistema de alerta temprana por inundación y deslizamiento en el flanco Nororiental de la Sierra Nevada de Santa Marta – Departamento de la Guajira.

La Corporación Autónoma Regional de la Guajira, desarrolla el proyecto del diseño, instalación y operación de un sistema de alerta temprana por inundación y deslizamientos, el cual plantea la instalación de una red de estaciones automáticas hidrometeorológicas que monitorea el comportamiento de las precipitaciones y los niveles del agua de drenaje en tiempo real, con el fin de prevenir o mitigar problemas que puedan ocasionar las inundaciones y deslizamientos en el sector estudiado.

El diseño del sistema de alerta temprana por inundación o deslizamiento contara con:

- Sensor de velocidad de viento

- Sensor de dirección de viento
- Sensor de temperaturas del aire
- Sensor de evaporación
- Tanque de evaporación tipo A
- Sensor de humedad de aire
- Sensor de temperatura del suelo
- Sensor de presión atmosférica
- Sensor de precipitación
- Sensor de radiación global y reflejada [42].

- Sistema de alerta temprana de Bogotá.

El sistema de alerta temprana de Bogotá permite realizar seguimiento a diversas variables en torno a la reducción y manejo de condiciones en la ciudad, este sistema cuenta con cuarenta (40) estaciones de monitoreo hidrometeorológicas que registran información en superficie, también cuenta con sensores que registran las magnitudes físicas del ambiente [43].

- Sistema de detección de avenidas torrenciales para una subcuenca hidrográfica del municipio de Popayán.

Estudiantes de la facultad de Ingenierías, programa de Electrónica de la Corporación Universitaria de Popayán, plantearon los elementos necesarios para la construcción de un sistema de alerta temprana (SAT) sobre el Río Molino, el cual presenta un alto índice de riesgo por cruzar de oriente a occidente el municipio de Popayán.

Para su desarrollo utilizaron un servidor de placa reducida para alojar y procesar la información del cauce y así finalmente mostrar las variables hidráulicas caracterizadas en niveles de alerta sobre una aplicación móvil desarrollada en App

Inventor, las variables fueron: temperatura, humedad relativa y caudal (estimado a partir de la altura del espejo de agua). La estación de monitoreo fue la encargada de censar las variables físicas en los puntos de medición establecidos, cuenta con un sensor de distancia para determinar el nivel del río, un sensor de temperatura y un sensor de humedad relativa, de igual forma integra un transmisor para enviar los datos por la red sigfox [44].

2.3.2 Conceptualización sobre gestión del riesgo

La gestión del riesgo no solo permite prevenir desastres sino practicar el desarrollo sostenible para que la gente pueda vivir bien, con salud y sin dañar el ambiente [45].

Riesgo, medida de la probabilidad y dureza de un efecto adverso a la vida, salud, propiedad o el ambiente. Corresponde a todos los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a eventos físicos peligrosos de origen natural, socio natural o antrópico no intencional, en un periodo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos [46].

El riesgo es la probabilidad de que una amenaza se convierta en un desastre y la vulnerabilidad o las amenazas por separado no representan un peligro, pero si se juntan se convierten en un riesgo, o sea, en la probabilidad de que ocurra un desastre, sin embargo los riesgos pueden reducirse o manejarse si se es cuidadosos en la relación con el ambiente y si estamos conscientes de nuestras debilidades y vulnerabilidades frente a las amenazas existentes [47].

La amenaza es la probabilidad latente de que un evento de origen natural o antrópico causen afectaciones o pérdidas de vidas humanas, daños o pérdidas en los bienes, infraestructura y recursos ambientales. Puede manifestarse en un lugar específico con una intensidad y duración determinada [46].

La vulnerabilidad es el grado de exposición al cual están sometidos los bienes y los seres humanos ante la detonación de un fenómeno natural o antrópico. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y

sus medios de subsistencia que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos [46].

Para que un fenómeno natural, socio-natural o causado por el hombre constituya un riesgo para la población, es necesario la existencia de una amenaza sumado a las condiciones de vulnerabilidad de una población frente a esa amenaza, como se puede apreciar en la siguiente ilustración “*Ilustración 2 Fotointerpretación amenaza, riesgo y vulnerabilidad*” [48].

Ilustración 2 Fotointerpretación amenaza, riesgo y vulnerabilidad



Fuente Alcaldía de Medellín

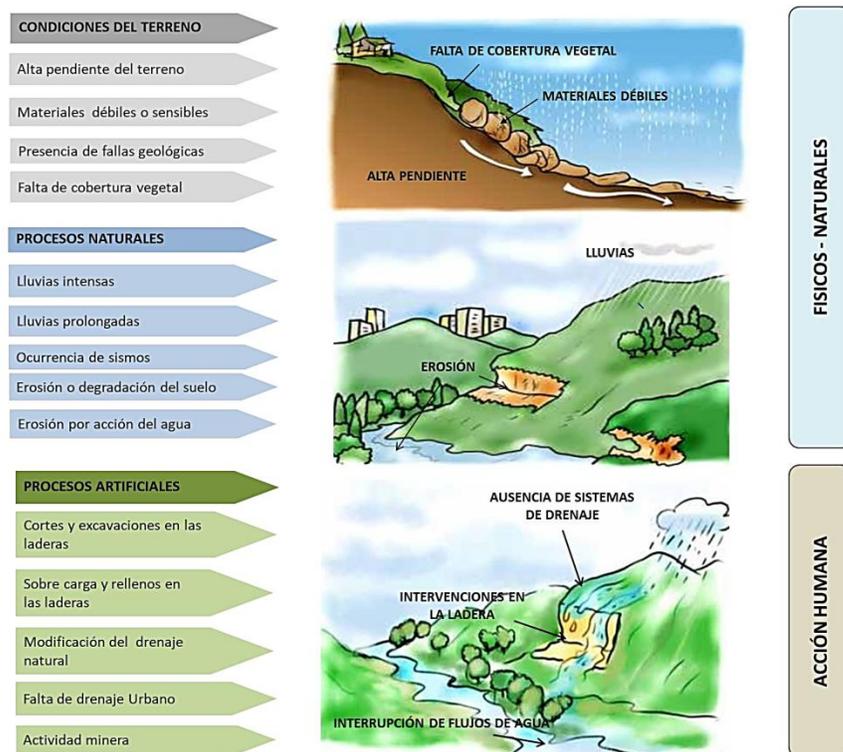
Los elementos expuestos son todas las personas, medios de subsistencia, servicios ambientales, recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura, que por su localización se encuentran en peligro ante la manifestación de una amenaza [49].

El movimiento en masa es el desprendimiento del suelo o terreno que ocurre cuando este se encuentra saturado de agua o algunos factores geomorfológicos, geológicos y movimientos sísmicos se alteran por actividades antrópicas o naturales ocasionando que el terreno se desplace a una cota inferior causando pérdidas económicas, sociales y ambientales [49]. También son caracterizados por desarrollar una o más superficies de rupturas, una zona de desplazamiento y

una zona de acumulación, donde incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca o de tierras por efectos de la gravedad.

Existen diferentes factores que propician los movimientos en masa, pueden ser causas naturales o producto de la acción humana como se muestra en la siguiente ilustración “ *Ilustración 3 Factores que propician los Movimientos en Masa*” [50]:

Ilustración 3 Factores que propician los Movimientos en Masa



Fuente Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático

Con respecto a las separaciones laterales, consisten en un movimiento de extensión acompañado por fracturamiento cortante o tensional que se desplazan en sentido lateral o casi horizontal en donde subyacen masas rocosas y materiales de composición arcillosa [51].

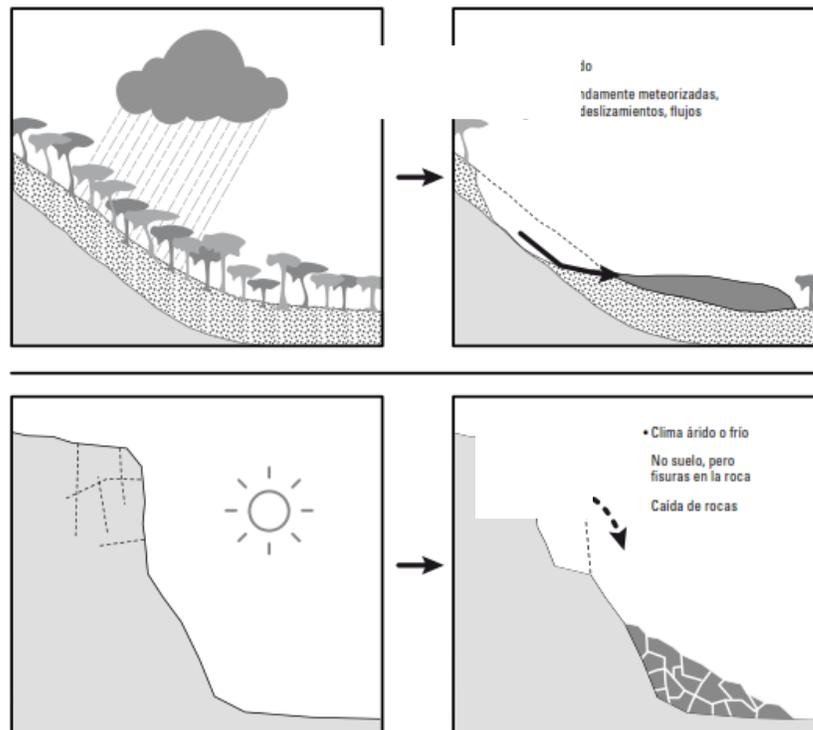
La estabilidad de taludes es el principal problema a la hora de proyectar cualquier tipo de desmonte, es asegurar la estabilidad de sus taludes, ya que las características resistentes de ese suelo de nada servirán si se producen continuos

deslizamientos que pongan en peligro la funcionalidad de la carretera a la que sirven de soporte [52]. Parece claro que la estabilidad de un talud depende tanto de su geometría, pendiente y altura como de las características intrínsecas del propio suelo que lo forma, como el ángulo de rozamiento interno y cohesión [53].

Las características interiores del terreno son un aspecto fundamental para determinar la susceptibilidad a la generación de movimientos en masa, en la que se encuentra la geomorfología, que permite definir y caracterizar la superficie a través de unidades geomorfológicas [51].

En la ilustración “*Ilustración 4 Influencia del clima y la erosión en las pendientes*” se logra observar la influencia del clima, la erosión en las pendientes y tipos dominantes de movimientos en masa.

Ilustración 4 Influencia del clima y la erosión en las pendientes



Fuente Influencia del clima y la erosión en las pendientes

La Morfometría de cuencas resulta de gran utilidad permitiendo determinar la semejanza de los flujos de diferentes tamaños, reside en los objetivos fundamentales de estos estudios orientados a inferir posibles picos de avenidas torrenciales en caso de tormentas. La morfometría particular de cada cuenca hidrográfica es proporcional con la posibilidad de cosecha hídrica ante eventos climáticos con la generación de una respuesta a los mismos [54].

Los procesos morfodinámicos presentan diferencias en su actividad dependiendo de la eficacia del agente morfológico, de esta manera la intensidad de los procesos morfodinámicos dependen de la cantidad de energía potencial liberada en un evento morfodinámico, así la magnitud estará limitada por umbrales de funcionamiento.

Existen límites de la influencia de los procesos morfodinámicos que no son de caracteres espaciales sino temporales. Un ejemplo de ello es el umbral de funcionamiento de la erosión de los ríos durante las crecidas hasta el estiaje [55].

Las áreas de montaña se distribuyen en el mundo de manera azonal, se da una relación entre altitud y latitud entre los elementos del clima, temperaturas y precipitaciones. Las montañas muestran un escalonamiento altitudinal en pisos, tanto de vegetación como morfoclimáticos que no se encuentran a la misma altura en todas ellas debido a distintos factores, además de la altitud, las pendientes favorecen la aparición de importantes formas debidas a los fenómenos de ladera en los que el grado de la pendiente y la acción de la gravedad se suman en una misma zona montañosa, las características del clima y por tanto de la vegetación, estos varían con la exposición a los rayos solares [56].

Detonante es un hecho o acción que puede desencadenar un evento natural o movimiento en masa que tiene como consecuencia un hecho desfavorable [57].

La precipitación es un factor detonante de los movimientos en masa, debido a que esta afecta la estabilidad de las laderas ocasionando un desprendimiento del suelo y ocurre cuando el suelo está completamente saturado de agua.

Los sismos son un factor detonante de los movimientos en masa ya que cuando estos se accionan generan una fuerza inercial dentro de la ladera ocasionando el aumento en la fuerza cortante de terreno, lo cual provoca deslizamientos, flujos de suelo, avalanchas, entre otras [58].

Tanto los procesos de remoción en masa como los de erosión y desborde de los arroyos y ríos, constituyen fenómenos naturales en la evolución del relieve, que pueden generar grandes pérdidas materiales e incluso humanas. Es por ello que la identificación de los sectores donde tienen lugar, como así también la comprensión de los factores que los controlan, son de fundamental importancia para una correcta planificación territorial [59].

Un flujo dinámico que genera pérdidas socioeconómicas y ambientales es la avenida torrencial, debido al arrastre de sólidos y agua en una cuenca que es ocasionado por represamientos, precipitaciones o por deslizamientos [60].

Los flujos son movimientos relativos de material litológico de textura fina y gruesa que se desplazan a lo largo de una superficie de falla bien definida, la cual sigue una discontinuidad formada por una estructura geológica o una estructura geotécnica [51].

Una falla geológica es una fractura en la corteza terrestre a lo largo de la cual se mueven los bloques rocosos que son separados por ella, en una falla activa las piezas de la corteza de la Tierra a lo largo de la falla se mueven con el transcurrir del tiempo y el movimiento de estas rocas puede causar terremotos [61].

También se entiende como falla geológica, o amenaza, al proceso geológico potencialmente catastrófico, o bien, a la probabilidad de que suceda un evento de este tipo durante un periodo de tiempo en un sitio dado [62]. En nuestro país, la situación geográfica determina que los fenómenos de remoción en masa constituyen uno de los peligros geológicos más importantes en ambientes de tipo montañoso, donde las características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas

del paisaje lo convierten en la principal fuente de numerosos desastres naturales de este tipo.

El suelo es escenario de complejos procesos químicos y físicos, así como de un ecosistema subterráneo de pequeños animales y abundantes microorganismos cuya presencia impacta directamente en la fertilidad del mismo. Está conformado por una mezcla de rocas, residuos, agua y minerales, incluye materia orgánica (6%) e inorgánica (50%), así como agua (24%) y capas de aire (26%) [63].

Debido a que el tipo de suelo es la formación de diferentes procesos que ocurren en el suelo como procesos de sedimentación, disposición eólica, la meteorización y residuos orgánicos; estos procesos se pueden clasificar dependiendo a su estructura (suelos arenosos, arcillosos, calizos, humíferos, pedregosos y mixtos) y a sus características físicas (litosoles, camisoles, luvisoles, acrisoles, gleysoles, fluvisoles, rendzina y vertisoles) [64].

En la *“Ilustración 5 Tipos de suelo”* que se presenta a continuación, se puede observar que existen diferentes clases de suelos en el planeta tierra que se clasifican según diferentes factores, algunos sirven para cultivar alimentos, mientras que en otros casi no hay seres vivos que los habiten por ende no hay plantas.

Ilustración 5 Tipos de suelo



Fuente ECOLOGIAHOY, 2019

Pendiente es el grado de inclinación o desnivel del terreno (suelo), a mayor inclinación mayor valor de pendiente. Esta se mide calculando la tangente de la superficie y la tangente se calcula dividiendo el cambio vertical en altitud entre la distancia horizontal. Por lo general, existe un cambio de pendiente más o menos brusco entre la vertiente y el talud que se forma en su base; la pendiente límite de ese talud suele ser de aproximadamente 35° [65].

La pendiente está muy relacionada con la aparición de movimientos en masa dado que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad y es una de las principales condiciones para que ocurra un movimiento en masa. La variable se relaciona directamente con las tensiones de cortes tangenciales y normales en la formación superficial y en suelos, e influye también en la distribución de agua en la ladera. Su valor se expresa en grados de 0° a 90° o en porcentaje, es una variable cuantitativa continua que se deriva del DEM [66].

La física de suelos estudia el conjunto de factores y procesos físicos que ocurren dentro del suelo y en su superficie, importantes para el crecimiento de las plantas y el manejo de suelo, para determinar las propiedades físicas del suelo se emplean técnicas que permiten modificar adecuadamente las condiciones del suelo para resolver problemas de producción de cultivos (Malagón & Cortés, 1984).

Cobertura vegetal es la capa de vegetación natural presente en la superficie terrestre en la cual se encuentran una amplia gama de biomas con diferentes características fisonómicas y ambientales, también se incluyen las coberturas vegetales inducidas que son el resultado de la acción humana como serían las áreas de cultivos [67].

La cubierta viva aporta una gran capacidad protectora sobre el suelo, al actuar como una capa que evita que las gotas de lluvia impacten directamente contra la superficie desnuda del mismo, al frenar el impacto se evita la erosión física que éste provoca, por lo tanto se previene la pérdida de suelo [68].

Precipitación es el producto de la condensación del vapor de agua atmosférico que se deposita en la superficie de la tierra, la cual se puede producir de diversas maneras como: llovizna, lluvia, agua nieve y granizo. Ocurre cuando la atmósfera se satura con el vapor de agua y el agua se condensa y se precipita. El aire se satura a través de dos procesos: por enfriamiento y añadiendo humedad [69].

Clasificación de Caldas – Lang, el geólogo suizo Paul Schaufelberguer en 1962, combinó la clasificación de Caldas con la de Lang, obteniendo 25 tipos de clima, en los cuales se considera el factor térmico y el factor de humedad. La clasificación de Caldas – Lang es una de las más utilizadas en el país debido a su sencillez y sentido práctico, además de que describe adecuadamente las características de humedad y de temperatura dominantes en una determinada localidad. En la *“Tabla 2 Clasificaciones climáticas Colombia”*, se puede apreciar

cada tipo de clima se nombra con dos palabras: la primera describe su característica térmica y la segunda describe su estado de humedad promedio [70].

Tabla 2 Clasificaciones climáticas Colombia

TIPOS DE CLIMA SEGÚN CALDAS – LANG	
CÁLIDO SUPERHÚMEDO	MUY FRÍO BAJO SUPERHÚMEDO
CÁLIDO HÚMEDO	MUY FRÍO BAJO HÚMEDO
CÁLIDO SEMIHÚMEDO	MUY FRÍO BAJO SEMIHÚMEDO
CÁLIDO SEMIÁRIDO	MUY FRÍO BAJO SEMIÁRIDO
CÁLIDO ÁRIDO	MUY FRÍO BAJO ÁRIDO
TEMPLADO SUPERHÚMEDO	EXTREMADAMENTE FRÍO SUPERHÚMEDO
TEMPLADO HÚMEDO	EXTREMADAMENTE FRÍO HÚMEDO
TEMPLADO SEMIHÚMEDO	EXTREMADAMENTE FRÍO SEMIHÚMEDO
TEMPLADO SEMIÁRIDO	EXTREMADAMENTE FRÍO SEMIÁRIDO
TEMPLADO ÁRIDO	EXTREMADAMENTE FRÍO ÁRIDO
FRÍO SUPERHÚMEDO	NIVAL SUPERHÚMEDO
FRÍO HÚMEDO	NIVAL HÚMEDO
FRÍO SEMIHÚMEDO	NIVAL SEMIHÚMEDO
FRÍO SEMIÁRIDO	NIVAL SEMIÁRIDO
FRÍO ÁRIDO	NIVAL ÁRIDO

Fuente IDEAM

El principal propósito de la caracterización de suelos es posibilitar la realización de predicciones más precisas, numerosas y útiles sobre usos específicos de los suelos, que las que podrían realizarse de no contar con estudios de esta naturaleza (Malagón & Cortés, 1984).

Los diferentes niveles categóricos establecidos para el indicador de pendiente, fueron adoptados como parte del proceso para determinar distritos de conservación de suelos, fueron los planteados por Cortes & Malagón (1984),

ratificada por la metodología para levantamientos edafológicos utilizada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2010). Se privilegió esta clasificación sobre la planteada por USDA (2014) o FAO (2009), como se puede apreciar en “Tabla 3 Clasificación de la pendiente por categorías según su grado de inclinación”, debido a que es la que se utiliza en el territorio Colombiano hace más de 50 años en los procesos de levantamientos geomorfológicos y de reconocimiento de suelos, siendo ya estandarizada para dichos fines [71].

Tabla 3 Clasificación de la pendiente por categorías según su grado de inclinación

INTERVALO	PORCENTAJE	TERMINO	SIMBOLO
1	0-3	PLANA	a
2	3-7	LIGERAMENTE INCLINADA	b
3	7-12	MODERADAMENTE INCLINADA	c
4	12-25	FUERTEMENTE INCLINADA	d
5	25-50	LIGERAMENTE ESCARPADA	e
6	50-75	MODERADAMENTE ESCARPADA	f
7	>75	FUERTEMENTE ESCARPADA	g

Fuente Cortés y Malagón 1984; IGAC, 2010

2.3.3 Conceptualización sobre Sistema de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica se han vuelto indispensables en el aspecto argumentativo de información espacial para la solución de problemas, ya que es una herramienta primordial que permite elaborar múltiples desarrollos e investigaciones que contribuyan a la sociedad [72].

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten integrar software, hardware y datos geográficos que son empleados para realizar análisis

exhaustivos del territorio, ya que está diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar la información requerida [73].

ArcGIS es un sistema que permite recopilar, analizar, compartir y distribuir información geográfica mediante la creación de mapas que integran y sintetizan completas capas de información geográfica y descriptiva de diversas fuentes [74].

Así pues, ArcGIS ha evolucionado desde una única herramienta para el análisis y el procesamiento de datos espaciales a todo un conjunto de aplicaciones relacionadas entre sí destinadas al manejo y el tratamiento de la información geográfica, siendo su característica más reseñable el ser un SIG diseñado para trabajar a nivel multiusuario [75].

Un shapefile es un formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas. Las entidades geográficas de un shapefile se pueden representar por medio de puntos, líneas o polígonos (áreas). El espacio de trabajo que contiene shapefiles también puede incluir tablas del dBASE, que pueden almacenar atributos adicionales que se pueden vincular a las entidades de un shapefile [76].

Modelos digitales de elevación (DEM), las superficies son fenómenos geográficos con valores en todos los puntos de su extensión, estas se suelen modelar con datasets ráster. Un ráster es una matriz de celdas también denominadas píxeles, organizadas en filas y columnas que cubren alguna región del mundo o incluso el mundo entero. Las herramientas de análisis se pueden ejecutar en los DEM para producir nuevas superficies como pendientes y orientaciones, además se pueden usar para estudiar propiedades de la superficie como la visibilidad y el flujo de agua [77].

La constelación de 8 satélites LANDSAT (LAND: tierra y SAT: satélite), que inicialmente se llamaron ERTS (EarthResourcesTechnologySatellites), fue la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. Su mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la

Aeronáutica y del Espacio (NASA), mientras que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite y el sensor se incluye un canal pancromático y/o uno térmico; así mismo las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120m [78].

La herramienta Calculadora ráster permite crear y ejecutar expresiones de álgebra de mapas en una herramienta. La lista de capas y variables de entrada identifica la entrada que se puede utilizar en la expresión de álgebra de mapas, si está utilizando la herramienta de forma independiente la lista contendrá las capas en la tabla de contenido [79].

La base de datos de CorineLandCover Colombia (CLC) permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (Landsat), para la construcción de mapas de cobertura a diferentes escalas.

Hasta el momento el país cuenta con dos mapas nacionales completos de coberturas para los periodos 2.000 – 2.002 y 2.005 – 2.009 utilizando la metodología CorineLandCover Colombia a escala 1:100.000 [72].

Para la definición de las coberturas del suelo presentes en el territorio colombiano se especificaron cinco (5) grandes grupos de clasificación que abarcan más tipos de cobertura existentes. Estos cinco grupos de clasificación son: territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas, cuerpos de agua [80].

2.3.4 Subcuenca del Río Molino

Popayán es un municipio Colombiano, capital del departamento del Cauca. Geográficamente se encuentra ubicado en el valle de Pubenza, entre la Cordillera

Occidental y Central al occidente del país. Por encontrarse ubicada en una zona de riesgo sísmico alto, Popayán ha sido azotada por varios terremotos a lo largo de su historia [81].

Las coordenadas geográficas de Popayán son: Latitud: 2.433, Longitud: -76.617, 2° 25' 59" Norte, 76° 37' 1" Oeste.

La extensión territorial de Popayán es de 2.725 hectáreas y su precipitación media anual de 1.941 mm. Por estar a una altura de 1.737 msnm y muy cerca al Ecuador tiene una temperatura media de 18-19 °C durante todo el año. La ciudad por su ubicación disfruta de los pisos térmicos y debido a esto su clima es templado.

La actividad económica se centra en el sector agrícola y pecuario predominando los cultivos de caña, café, hortalizas y frutas. El sector pecuario, se ve favorecido por la avicultura, la porcicultura, la piscicultura y la ganadería.

En cuanto a su hidrografía, la ciudad es atravesada por el río Cauca por más de 10 km alcanzando a tener 40 m de ancho en promedio. También entran en la ciudad los ríos Molino, Piedras, Vinagre, Negro, Ejido, Blanco, Hondo, Saté, Palacé Clarete y Pisoje, además de cerca de 50 quebradas [82].

A continuación, en la *"Ilustración 6 Mapa urbano y rural de Popayán"*, se encuentra el mapa de la ciudad de Popayán donde se puede observar la delimitación entre la parte urbana y rural de la ciudad.

Ilustración 6 Mapa urbano y rural de Popayán



Fuente Sectores económicos de Popayán 2009

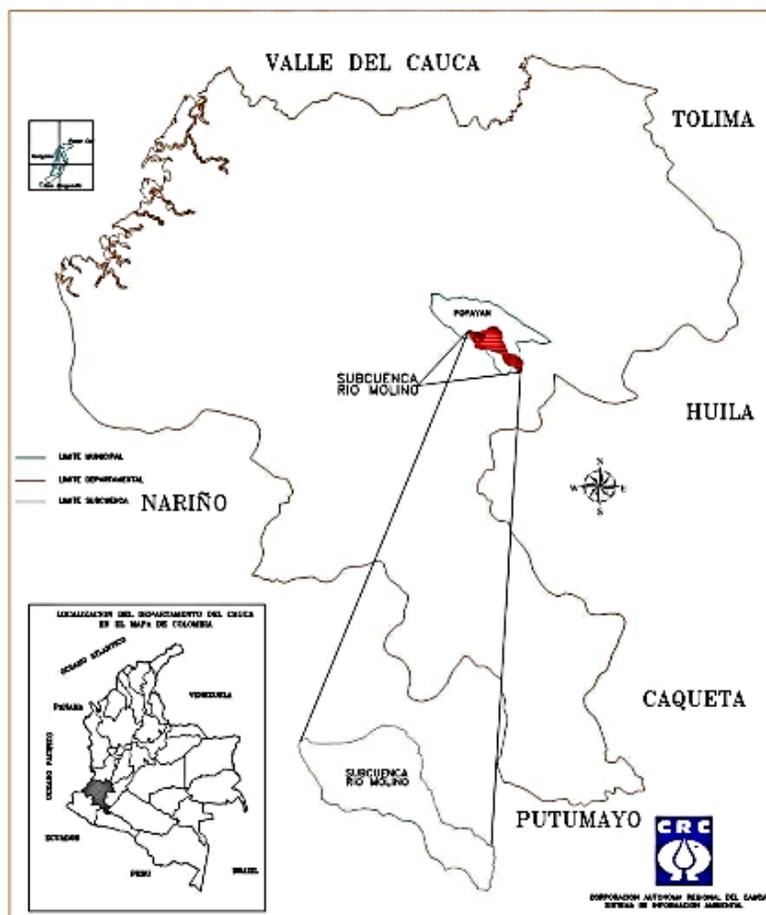
La sub-cuenca río Molino se encuentra localizada al sur occidente de Colombia, en el centro del departamento del Cauca, hacia el oriente del municipio de Popayán, tiene un área de 67,87 Km² y una altura de 1680 a 2880 msnm. El nacimiento del río Molino es en la vereda de Santa Elena a 1063100 Este, 752900 Norte y tiene un recorrido de 24,5 kilómetros; parte de él atraviesa la ciudad de Popayán hasta la desembocadura en el río Ejido [83]. Por otro lado, cuenta con 8 corregimientos, 10 veredas, 4 comunas urbanas y se estiman 53.329 habitantes distribuidos en la zona urbana y rural. Existen diferentes grupos poblacionales asentados: campesinos e indígenas en la zona rural representada por el Resguardo de Poblazón y comunidades urbanas.

Esta situación le da al río Molino la característica de subcuenca urbana, que se determinan por el incremento de la impermeabilización y la reducción de la

infiltración debido al revestimiento del suelo como consecuencia de las construcciones y la remoción de la cobertura vegetal, esto incrementa el volumen y la velocidad de escorrentía produciendo caudales pico mayores en comparación con la subcuenca no intervenida [18].

El río Molino se ha consolidado no solo como fuente abastecedora del acueducto sino también como espacios paisajísticos articuladores de dinámicas socio-ambientales rurales y urbanas [84], la subcuenca se encuentra ordenada y en constante planificación bajo procesos institucionales y comunitarios que la posicionan como modelo integral de desarrollo regional, fundamentado en la sostenibilidad ambiental y equidad social, se puede contemplar en la *“Ilustración 7 Localización de la subcuenca río Molino en el Departamento del Cauca”*, la localización de la subcuenca.

Ilustración 7 Localización de la subcuenca río Molino en el Departamento del Cauca



Fuente Plan de Ordenación y Manejo Subcuenca río Molino, 2006

CAPÍTULO III: METODOLOGIA

3.1 PRIORIZACIÓN DE ÁREAS PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS EN MASA

Para definir los sitios críticos de amenaza por remoción en masa se tomó como base la identificación de escenarios de riesgo del municipio y la información oficial que tiene la oficina de Gestión del Riesgo en la Alcaldía de Popayán en cuanto a la localización de áreas de riesgo dentro de la subcuenca.

Se analizaron los diferentes estudios relacionados con gestión del riesgo que se han desarrollado en el municipio, como lo son *“COMPONENTE GEOLÓGICO Y ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR INUNDACIÓN Y DESLIZAMIENTOS, SUBCUENCA RÍO MOLINO, MUNICIPIO DE POPAYÁN, DEPARTAMENTO DEL CAUCA”*, *“PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA SUBCUENCA RÍO MOLINO”*, *“EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PARTE MEDIA Y ALTA DE LA SUBCUENCA RIO MOLINO MUNICIPIO DE POPAYÁN”*, *“IDENTIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES NATURALES Y ANTRÓPICAS, QUE GENERAN RIESGO POR INUNDACIÓN DEL RÍO MOLINO EN EL MUNICIPIO DE POPAYÁN - COLOMBIA”*, y se recopiló información cartográfica de la zona mediante un estudio realizado por la oficina de Gestión del riesgo municipal *“ZONIFICACIÓN GEOMECANICA Y DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL MUNICIPIO POPAYAN - CAUCA”*, en el cual se encontró el mapa de *AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA* [85], en este mapa se observó el nivel de amenaza por deslizamientos que se presenta en la parte alta, media y baja de la subcuenca y en base a esto se priorizaron los barrios que se encuentran susceptibles a deslizamientos.

Para la caracterización de cada uno de los barrios priorizados se utilizaron tablas (elementos expuestos, clasificación de la red vial, zonas o escenarios de exposición), encontradas en la *“GUIA METODOLOGICA PARA ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA”*, que

mejor se ajustan para la obtención de información de cada una de las zonas identificadas.

Se realizó un análisis detallado de cada área priorizada que permitió determinar la ubicación precisa de las zonas a estudiar, para esto fue necesario medir la distancia que existe entre el río Molino a la vivienda y así determinar si estas cumplen con lo estipulado según el Decreto 2811 de 1974 donde prohíbe la construcción de viviendas a menos de 30 metros de la franja de protección, para así determinar la susceptibilidad del riesgo en la que se encuentra cada zona.

Según lo anteriormente mencionado se elaboró la “*Tabla 4 Clasificación zonas priorizadas*”, con la cual se realizó la clasificación de los barrios priorizados y sus características, además se realizó una entrevista informal que permitió desarrollar la descripción de los barrios.

Tabla 4 Clasificación zonas priorizadas

BARRIO	COMUNA	DISTANCIA DEL RÍO A VIVIENDAS	ÁREA Y COORDENADAS		DESCRIPCIÓN
			Río Molino	Viviendas	

Fuente Propia

FORMATO ENTREVISTA INFORMAL



CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA

ENTREVISTA INFORMAL

1. ¿Cuándo se fundó el barrio?
2. ¿Cuántas viviendas y habitantes tiene el sector?
3. ¿En el sector se han presentado deslizamientos?
4. ¿Hace cuánto ocurrió el último movimiento en masa?
5. ¿Las autoridades municipales les han prestado algún tipo de ayuda cuando han ocurrido estos eventos?

Fuente: Propia

3.1.1 Caracterización de las zonas de amenazas

La vulnerabilidad se ha de evaluar en forma cuantitativa, para lo cual se analizaron los escenarios de vulnerabilidad ante los tipos de movimientos en masa. Dichos escenarios incluyen tanto la exposición de los elementos expuestos (bienes físicos y personas) como su grado de fragilidad ante el evento amenazante. Al relacionar la intensidad de las masas que se pueden desplazar en cuanto a su volumen o su

deformación, se pueden establecer unos niveles de daño para cada edificación con la fragilidad de los elementos expuestos y en cuanto a la vulnerabilidad de las personas se define en función de los posibles niveles de afectación en materia de pérdidas probables de vida o lesiones corporales asociadas con los niveles de daño en las edificaciones, previamente evaluados [46]. A continuación, se encuentran las tablas para caracterizar las zonas de amenazas:

Los elementos expuestos incluyen tanto elementos físicos (bienes e infraestructura) como servicios ambientales, recursos económicos y sociales y bienes culturales, que por su localización pueden resultar afectados por la materialización de una amenaza, esta evaluación física es con fines de estimaciones cuantitativas de riesgo, para lo cual los elementos expuestos se reducen a dos grupos: bienes físicos y personas como se indica en la “*Tabla 5 Elementos expuestos ante el evento amenazante*” [46].

Tabla 5 Elementos expuestos ante el evento amenazante

CLASIFICACION		IDENTIFICACION	USO-COMPONENTE
Bienes físicos	Edificaciones	Indispensables - grupo IV (norma NSR-10)	Salud (pública –privada)
		Atención a la comunidad- grupo III (normaNSR-10)	Seguridad
			Emergencia
			Educación
		Ocupación especial – grupo II (norma NSR-10)	Institucionales
			Gubernamentales
			Centros comerciales

			Industria
		Ocupación normal- grupo I (norma NSR-10)	Residencial y comercio
	Líneas vitales	Red vial	Vías
			Puentes vehiculares
			Puentes peatonales
		Servicios públicos	Líneas de acueductos, alcantarillado y gas(tuberías)
			Redes eléctricas y comunicaciones
	Personas	Población	

Fuente GUIA METODOLOGIA para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa

De acuerdo con Argyroudis et al. (2005), se emplea la clasificación urbana de vías “Tabla 6 Clasificación de la red vial”. En el inventario de la red vial se deben incluir estructuras como puentes vehiculares o peatonales.

Tabla 6 Clasificación de la red vial

CLASIFICACION	TIPO	ANCHO (m)
Autopista	V-0	100
Arterial principal	V-1	60
Arterial secundario	V-2	40
	V-3	25

Vial intermedia	V-4	22
	V-5	18
	V-6	16
Vial local	V-7	13
	V-8	10
	V-9	8

Fuente Adaptada de Argyroudis et al. (2005), de acuerdo con las categorías definidas por la Oficina de Planeación de Bogotá.

Para evaluar la exposición se han definido cuatro zonas o escenarios, las cuales se describen a continuación “*Tabla 7 Zonas o escenarios de exposición*”.

Tabla 7 Zonas o escenario de exposición

ZONA	DESCRIPCION	DAÑOS ESPERADOS	CRITERIOS DE INTENSIDAD O MAGNITUD
1	Elementos ubicados sobre la zona estable en la parte superior del talud, sin posibilidad de afectación por retrogresión	No se esperan daños a causa de los movimientos en masa.	
2	Elementos ubicados sobre una ladera potencialmente inestable o potencialmente afectados por efectos de	Colapso o daños instantáneos debido a pérdida de soporte en la zona de retrogresión. Asentamientos diferenciales, inclinaciones y agrietamientos	Velocidad del movimiento. Actividad del deslizamiento. Cantidad de desplazamiento. Desplazamientos

	retrogresión	asociados con movimientos lentos; colapso de la estructura asociado con movimientos rápidos.	verticales.
3	Elementos ubicados en la trayectoria del movimiento en masa o en la zona de depósito del material deslizado	Daños localizados por impactos, colapso total, obstrucción, enterramiento, entre otros.	Velocidad del movimiento. Distancia de viaje. Presiones laterales. Impactos (volúmenes y energía cinética) Alturas de acumulación de material.
4	Elementos fuera del alcance del movimiento en masa y su área de depósito.	No se esperan daños debido a los movimientos en masa.	

Fuente GUIA METODOLOGICA para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.

3.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN LOS MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA

Para identificar las variables que influyen en los movimientos de remoción en masa se recopiló información secundaria en sitios web, base de datos, libros y además se realizaron visitas a las instituciones relacionadas con la gestión del riesgo de desastres en el Municipio como: el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Alcaldía Municipal en la Oficina principal de Gestión del Riesgo de

Desastres, las cuales brindaron la información pertinente al tema para así poder identificar las principales variables.

Los documentos que se analizaron ayudaron a la definición de cada variable y el grado de importancia que tienen frente a la detonación de movimientos en masa, los documentos que se tomaron como base para la identificación de estas variables fueron: “*METODOLOGÍA PARA LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD GENERAL DEL TERRENO A LOS MOVIMIENTOS EN MASA*” [13] del Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales (IDEAM), el cual indicó las variables empleadas para la generación del mapa de susceptibilidad general del terreno a los deslizamientos y otros documentos que proporcionó la Alcaldía Municipal.

3.2.1 Método para determinar pendiente

Fue necesaria la elaboración del mapa de pendientes mediante el software ArcGIS, el cual representó la distribución espacial de los cortes de inclinación del terreno y su principal característica fue su precisión para representar los cambios graduales que se presentan en forma aleatoria sobre la superficie de la tierra.

Este tipo de base cartográfica resultó de gran importancia; mediante el mapeo detallado se logró realizar el estudio geomorfológico (pendiente), capacidad de uso, mapeo de suelos y riesgos naturales.

Se contó con las curvas de nivel a cada 25 metros y para la elaboración del mapa de pendientes se hizo necesario realizar con las curvas de nivel un modelo de elevación digital del terreno que sirvió en un principio para analizar cómo se constituye el área en cuanto a zonas de pendientes.

Para clasificar los tipos de pendientes y formas del terreno sobre la fotografía aérea y establecer patrones de pendiente del municipio de Popayán, se procedió a descargar un DEM (Modelo de elevación digital) suministrado por la USGS para analizar con mayor precisión las áreas con mayor pendiente, con el fin de transformar y convertir sus curvas de pendientes en polígonos con escala en ° con

la herramienta SLOPE y así determinar qué tipo de pendiente se encuentra en el municipio de Popayán y los cinco barrios que se priorizaron [86]. Debido a que estas son imágenes de satélite empleadas para el planeamiento general y estudios estratégicos, se convirtió el mapa de pendientes a una escala grande número 1:100.000, ya que esta escala es utilizada para usos urbanos, planos de localización (topografía).

Los diferentes niveles categóricos establecidos para el indicador de pendiente, fueron adoptados como parte del proceso para determinar distritos de conservación de suelos, planteados por Cortes & Malagón (1984), ratificada por la metodología para levantamientos edafológicos utilizada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2010).

La metodología consiste en una tabla diseñada para identificar diversos rangos de pendientes en porcentajes, se desplaza sobre el mapa de tal manera que indique la zona priorizada determinando el rango en la tabla, de esta forma asignándose al espacio analizado un identificador (intervalo, porcentaje, término, símbolo y color) según la categoría de pendiente que posee.

La pendiente fue reclasificada en categorías según el estudio de suelos del departamento del Cauca (IGAC, 2009), con los valores que define y cuantifica a la pendiente como lo indica la siguiente *“Tabla 8 Clasificación tipos de pendiente”*.

Tabla 8 Clasificación tipos de pendiente

INTERVALO	PORCENTAJE	TERMINO	SIMBOLO	COLOR
1	0-3	PLANA	a	
2	3-7	LIGERAMENTE INCLINADA	b	
3	7-12	MODERADAMENTE INCLINADA	c	
4	12-25	FUERTEMENTE INCLINADA	d	

5	25-50	LIGERAMENTE ESCARPADA	e	
6	50-75	MODERADAMENTE ESCARPADA	f	
7	>75	FUERTEMENTE ESCARPADA	g	

Fuente IGAC

Cada agrupación presenta una descripción relacionada con su calificación o interpretación para ser aplicada en la determinación y uso espacial de la unidad de tierra a la cual pertenece la subcuenca río Molino, luego para cada zona priorizada.

Esta tabla sirvió para analizar con mayor precisión hacia qué lado se ubicaban las áreas con mayor pendiente, para cual se ubicaban las de menor pendiente y así sucesivamente para todas las áreas priorizadas.

Los valores de la pendiente se van a trabajar en porcentajes en relación a los deslizamientos, cuanto menor sea el porcentaje de la pendiente es más plano el terreno, cuanto mayor sea el porcentaje de la pendiente, más pronunciado el terreno aumentando la susceptibilidad a los movimientos en masa.

Los valores de clasificación en función de la susceptibilidad de la pendiente van a ser así como se indica en la siguiente tabla “*Tabla 9 Clasificación susceptibilidad*”; aprobado por el documento metodológico de zonificación de susceptibilidad y amenazas por movimientos en masa, desarrollado por INGEOMINAS.

Tabla 9 Clasificación susceptibilidad

DESCRIPCION	PORCENTAJE %	GRADOS °	SUSCEPTIBILIDAD
Plano	0 – 3	0 – 2	Muy baja
Ligeramente inclinado	3 – 7	2 – 4	

Moderadamente inclinado	7 – 12	4 – 7	Baja
Fuertemente inclinado	12 – 25	7 – 14	Media
Ligeramente escarpado	25 – 50	14 – 27	Alta
Moderadamente escarpado	50 – 75	27 – 37	
Fuerte escarpado	>75	>37	Muy alta

Fuente INGEOMINAS

3.2.2 Método para determinar tipo de suelo

Se realizó el mapa de Caldas - lang, elaborado con el software ArcGIS para determinar el tipo de suelo mediante la METODOLOGIA CALDAS-LANG.

La clasificación Caldas - Lang brinda información respectiva a los valores generados entre la relación Precipitación/Temperatura, con el fin de determinar la calidad y uso del suelo, para ello utilizamos el Shapefile de Popayán y los valores obtenidos del IDEAM. Para procesarlo se utilizó el comando RASTER CALCULATOR y los valores establecidos por Caldas - lang para determinar el tipo de suelo.

Procedimientos: Para los procesos que se han empleado para obtener la metodología propuesta por Caldas – Lang en cuanto a la zonificación climática de la cuenca al igual que la obtención del mapa temático, se han utilizado para ambos casos las herramientas del ArcToolbox (SpatialAnalyst Tools – Interpolation – IDW – Map Algebra – RasterCalculator). Archivos de Shapefile (precipitación, temperatura, índice P/T mensual y límite de la cuenca), superficie ráster de ArcGIS.

Una vez obtenidos los mapas temáticos de la precipitación y temperatura mensuales y anuales, se generaron los mapas del índice P/T, para ello se dispone de un conjunto de herramientas de cálculo con matrices de datos que reciben el nombre genérico de álgebra de mapas, se aplican a cada celda del ráster de entrada. Para realizar esta operación se hizo uso de la herramienta RasterCalculator, del programa ARCGIS 10.1; el cual además permite realizar cálculos matemáticos entre mapas temáticos o varios mapas resultantes.

Esta metodología consiste en una tabla diseñada para identificar diversos tipos de clima según Caldas - Lang, se desplaza sobre el mapa de tal manera que indique la zona priorizada asignándose un color determinando para cada tipo de clima que se nombra con dos palabras: la primera describe su característica térmica y la segunda describe su estado de humedad promedio, como se muestra en la siguiente tabla “Tabla 10 Clasificaciones climáticas Colombia”.

Tabla 10 Clasificaciones climáticas Colombia

TIPOS DE CLIMA SEGÚN CALDAS – LANG	COLOR
CÁLIDO Y SUPERHÚMEDO	
FRIO Y HÚMEDO	
FRIO Y SUPERHUMEDO	
TEMPLADO Y HUMEDO	
TEMPLADO Y SUPERHUMEDO	

Fuente IDEAM

Mediante fotointerpretación preliminar se hizo la zonificación de las diferentes formas del terreno y la cobertura del mismo, teniendo presente procesos y factores que han actuado en la modelación del suelo, entre ellos: el relieve, el clima, material parental, sedimentación, erosión y tectonismo. Esta información se valida con trabajo de campo, recorriendo toda la zona, comprobando y corrigiendo, identificado suelos y su distribución geográfica y estudiando las condiciones de uso y manejo de los suelos.

Debido a que Caldas - lang es para zonas de vida y que el suelo tiene una historia de origen, en la cual el clima juega un papel muy importante a pesar de que no es el único factor formador, se tomó en cuenta el clima para las características de fertilidad del suelo de cada zona de vida, ya que cada una de estas tienen sus propiedades particulares para fertilidad dadas por el clima, logrando clasificar los tipos de suelo por medio de material parental. Los suelos por textura tienen otra clasificación que depende de las partículas de arena, arcilla y limo.

Se empleó como apoyo el estudio realizado por el Servicio Geológico Colombiano [13] y la información cartográfica que brindó la oficina de Gestión del riesgo de la Alcaldía municipal titulado, *“ZONIFICACIÓN GEOMECANICA Y DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL MUNICIPIO DE POPAYAN - CAUCA”* realizado en noviembre del año 2015, en el cual se encontraron algunas condiciones geológicas del suelo con el fin de determinar el comportamiento y tipo del mismo ante la detonación de un movimiento en masa.

3.2.3 Método para determinar cobertura vegetal

Se realizó el mapa de cobertura vegetal y uso del suelo elaborado con el software ArcGIS y se utilizó la metodología de Corine Land Cover para su clasificación.

Esta metodología tiene como propósito la realización del inventario homogéneo de la cubierta biofísica (cobertura) de la superficie de la tierra a partir de la interpretación visual de imágenes de satélite asistida por computador y la generación de una base de datos geográfica (Ministerio de Ambiente de La Republica de Colombia, 2010).

El esquema metodológico Corine Land Cover contempla las siguientes etapas: adquisición y preparación de la información, análisis e interpretación de las coberturas y generación de la capa temática escala 1:100.000.

Adquisición y preparación de la información: Para generar la información de coberturas de la tierra se utilizó el shapefile de Popayán, se emplearon imágenes

satelitales (Landsat 8 y 5) publicadas por la NASA en su página web USGS (las cuales se pueden descargar), se procesaron de tal forma que se pudieron usar las bandas de cada satélite para determinar la clase y uso de suelo con la metodología Corine Land Cover, para ello se requirió a un recorte CLIP de la imagen respecto al shapefile, luego, se realizó la combinación de bandas con el fin de determinar qué tipo y uso de suelo se encontraba en la zona, una vez determinado lo anteriormente mencionado se procedió a digitalizar el mapa mediante polígonos para cada tipo con la herramienta EDITOR.

Análisis e interpretación de coberturas: la interpretación de las imágenes de satélite se realizó inicialmente a través de la visualización en computador, empleando el software ArcGis que cuenta con una configuración para delinear las diferentes unidades de mapeo.

Generación de la capa temática escala 1:100.000: con la información generada se obtuvo coberturas o shapefiles, las cuales contienen los atributos y códigos definidos en la nomenclatura Corine; las coberturas se ensamblan en una base de datos geográfica (geodatabase), la cual permite estandarizar y articular los objetos bajo un esquema único, garantizando la portabilidad, interoperabilidad y la generación de reportes de información.

Se realizó el análisis por medio de la comparación multi temporal entre los años de 1990 y 2019, en donde en cada uno de los mapas se muestra el espacio ocupado de cobertura vegetal y el uso del suelo, utilizando una clasificación que permitió determinar lo que se encontró en cada zona priorizada, clasificación que se indica en la siguiente tabla *“Tabla 11 Clasificación cobertura vegetal y uso del suelo”*.

Tabla 11 Clasificación cobertura vegetal y uso del suelo

CLASIFICACION	COLOR
Bosques	
Cuerpo de agua	
Cultivo transitorio	

Cultivos	
Pastos limpios	
Pastos y espacios naturales	
Tejido urbano	

Fuente Corine Land Cover

3.2.4 Determinar temperatura y precipitación (ArcGIS)

Para llevar a cabo la ejecución de la cartografía del municipio de Popayán se descargaron los formatos (Shapefile) de los municipios de Colombia y los datos (precipitación y temperatura) de las estaciones meteorológicas que brinda el IDEAM en su página web. Se creó un Geodatabase para el almacenamiento.

Posteriormente se ingresó los shapefile y los datos en coordenadas WGS84 al ArcGIS, los valores del IDEAM se convirtieron a puntos, luego se seleccionó el atributo shapefile "POPAYAN" que fue el área de estudio y las estaciones que se encuentran dentro del municipio y finalmente se procedió a guardarlos en la geodatabase para empezar a procesarlos.

Para procesar los datos del IDEAM se realizó una interpolación mediante el comando SPLINE para generar el raster, al cual se le aplicó una orden de superficie con el comando CONTOUR y así generar las líneas y valores de cada estación.

3.3 PRINCIPALES VARIABLES A CONSIDERAR PARA INCLUIR EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA (SAT) DE LA SUBCUENCA DEL RÍO MOLINO

Con la información primaria recopilada durante la investigación y analizado las variables constantes y meteorológicas que tienen mayor incidencia a la hora de los movimientos de remoción en masa, se establecieron tres fases para la determinación de las principales variables a incluir en el sistema de alerta temprana de la subcuenca río Molino.

3.3.1 Fase I: Definición e importancia de variables con mayor incidencia a los deslizamientos de tierra

Con base a la información obtenida anteriormente se generaron criterios que permitieron establecer según la pertinencia, confiabilidad y las condiciones de la subcuenca las áreas priorizadas susceptibles a deslizamientos, para esta generación de zonificación susceptible del terreno fue necesario disponer y utilizar la información de Geomorfología, Geología, Suelos y Cobertura de la tierra. Contando con la información anterior de los temas para las áreas de interés, se estructuraron las variables que se deben considerar por sus dinámicas de amenaza y que permitieron incluirse como un criterio para la selección de puntos en los que se vayan a instalar los sensores de monitoreo del Sistema de Alerta Temprana de la subcuenca río Molino de Popayán.

Ponderación de las variables: la determinación de los pesos ponderados de las variables se realizó a través de la calificación por panel de expertos, en la cual cada experto en una matriz compara por pares las variables de cada tema (Ejemplo método PHP), obteniendo de esta manera la ponderación de cada variable, según IDEAM 2009 [13].

3.3.2 Fase II: Presentación de variables meteorológicas que evalúan los SAT (Popayán, Medellín y Manizales)

Una vez determinada la importancia de cada una de las variables mencionadas en la fase anterior, en esta fase se disgregaron cuáles son los parámetros que actualmente maneja el SAT del río Molino de Popayán, al igual que el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburra - SIATA (Medellín) y el Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas - SIMAC (Manizales), de esta forma, se hizo una comparación acerca de las variables que establecen y manejan los demás SAT; las estaciones hidrometeorológicas junto a otras estaciones de alarma sonora que permiten transmitir información oportuna e instrucciones en caso de emergencia.

La comparación se realizó mediante un cuadro en donde se indicaron las variables estudiadas durante la investigación VS las variables de los demás Sistemas de Alertas Tempranas – SAT, como lo son los de (Popayán, Medellín y Manizales) como se muestra a continuación.

VARIABLES ELEGIDAS	VARIABLES SAT POPAYAN	VARIABLES SIATA MEDELLIN	VARIABLES SIMAC MANIZALES

Fuente: Propia

3.3.3 Fase III: Evaluación del Sistema de Alerta Temprana de Popayán

Con base a los resultados de las fases anteriores incluyendo el cuadro comparativo entre los SAT (variables elegidas de la investigación, variables SAT Popayán, variables SAT Medellín, variables SAT Manizales), se determinaron las principales variables que se consideraron que hacían falta para incluir al SAT de Popayán con su respectiva justificación.

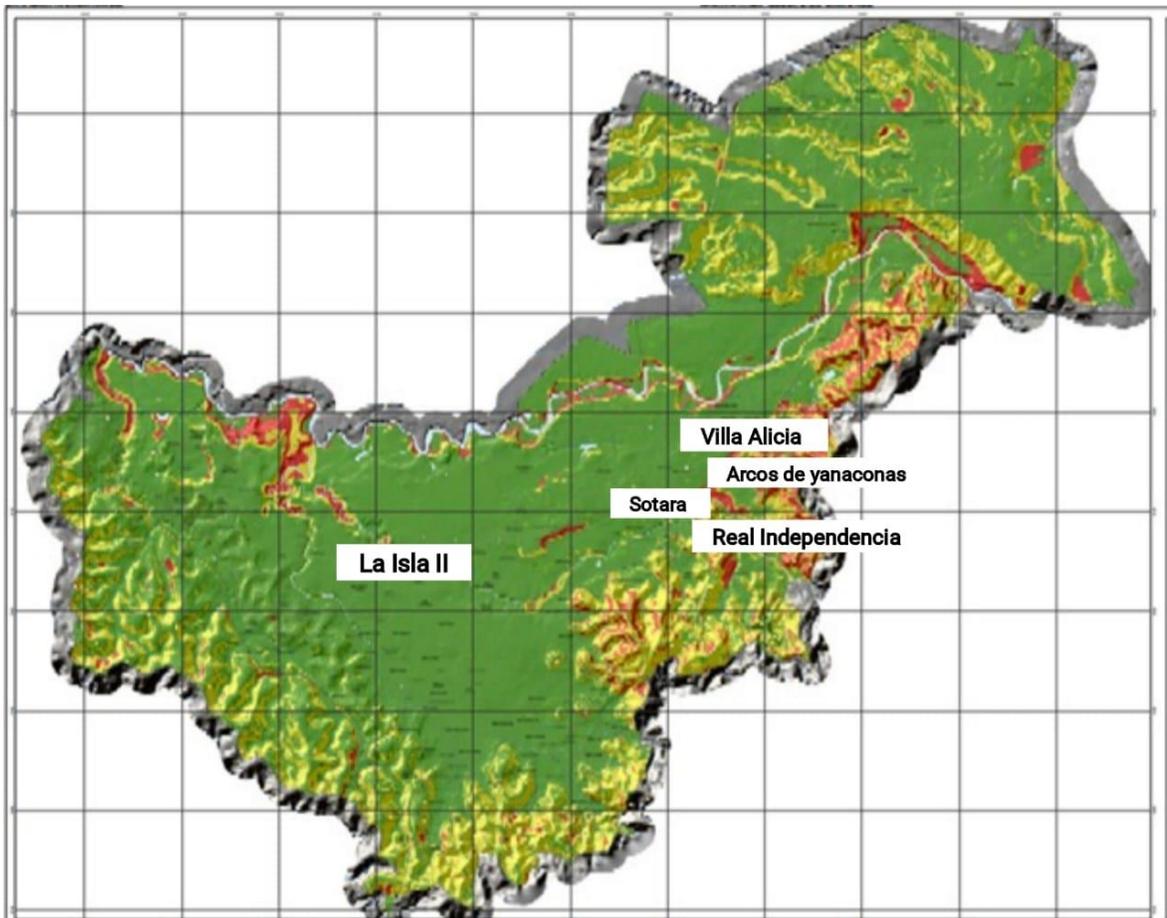
En esta última fase, para poder evaluar el SAT fue necesario haber visto que tipos de parámetros manejan otros sistemas y de esta forma se propuso las variables elegidas durante la investigación que son: las variables constantes y las variables meteorológicas e hidrometeorológicas que se consideró hacen falta al actual sistema de alerta temprana de Popayán, justificando por qué son importantes y deben incluirse como un criterio para la selección de puntos en los que se vayan a instalar los sensores de monitoreo del Sistema de Alerta Temprana de la subcuenca río Molino de Popayán.

CAPÍTULO IV: DISCUSION Y PRESENTACION DE RESULTADOS

4.1 PRIORIZACIÓN DE ÁREAS PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS EN MASA

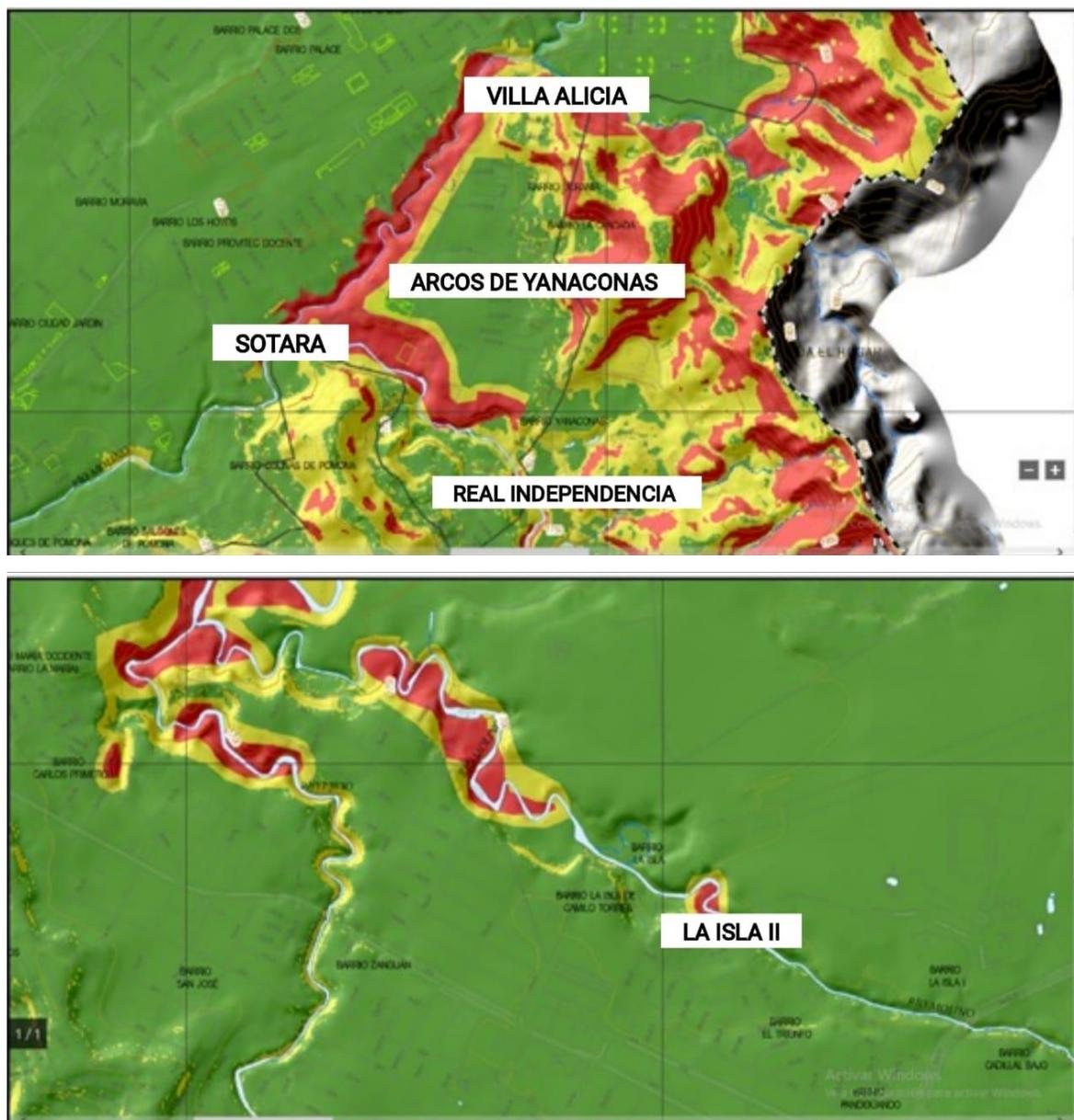
Aplicando la metodología explicada anteriormente se seleccionaron cinco barrios de la zona urbana de la ciudad de Popayán (Sotara, Real Independencia, la Isla II, Arcos de Yanaconas y Villa Alicia), son zonas que se encuentran en la parte media de la subcuenca del río Molino, las cuales están identificadas por el Municipio de Popayán desde su oficina de gestión del riesgo con un alto riesgo de amenaza por movimientos de remoción en masa, estos barrios se pueden observar en el siguiente mapa “Ilustración 8 Mapa de amenaza por movimientos en masa Popayán Cauca”.

Ilustración 8 Mapa de amenaza por movimientos en masa Popayán Cauca



Fuente Oficina Gestión del Riesgo Alcaldía de Popayán

Ilustración 9 Zoom mapa zonas de amenaza priorizadas



Fuente Oficina Gestión del Riesgo Alcaldía de Popayán

Ilustración 10 Leyenda del mapa de amenaza por movimientos en masa Popayán Cauca

CATEGORÍA DE LA AMENAZA	DESCRIPCIÓN	RECOMENDACIONES
ALTA	<p>Estas áreas tienen una probabilidad alta (> 0.05 /año) de ocurrencia de movimientos en masa con magnitudes del orden de miles de metros cúbicos, detonados por acumulación de agua en el subsuelo y ascensos del nivel freático asociados con periodos lluviosos, así como, la ocurrencia de sismos con magnitudes iguales o superiores a 0.17g*. Igualmente, corresponden a áreas con presencia de movimientos en masa superficiales antiguos o con actividad reciente, en su mayoría producto de intervención antrópica inadecuada (sobrecarga del terreno al borde de cortes o laderas, cortes en laderas, minería, rellenos, manejo de aguas superficiales, cambios en la cobertura y uso del suelo).</p> <p>Se espera la ocurrencia de movimientos en masa superficiales tipo deslizamiento traslacional en laderas, y caídas de suelo en algunos márgenes de los principales drenajes de la zona de estudio: Ríos Cauca, Molino, Ejido y Quebrada Pubus.</p> <p>La zona de amenaza alta cubre el 6% de la zona urbana, periurbana y de expansión del municipio de Popayán, y se presenta principalmente en las laderas de las comunas 3 y 4 al oriente del municipio, comuna 9 al occidente del municipio, y en las márgenes de los Ríos Cauca, Molino y Ejido y la Quebrada Pubus.</p> <p>Se asocia con suelos derivados de ignimbritas e ignimbritas altamente meteorizadas, así como, con suelos transportados de origen fluvial y volcánico - fluvial con valores bajos de resistencia al corte; aflorando en pendientes del terreno altas del orden de 20 - 45°. La resistencia al corte de los materiales en esta zona es variable y puede disminuir drásticamente ante la exposición a eventos climáticos extremos.</p>	<p>Se deben realizar estudios para estabilizar las áreas con movimientos en masa activos, así como, para el manejo de los procesos denudativos tipo erosión, generalmente asociado a los cortes viales y de socavación lateral que tiendan a reactivar los deslizamientos antiguos o a generar nuevos movimientos.</p> <p>En las zonas de amenaza alta se requiere de estudios detallados de amenaza, vulnerabilidad y riesgo que consideren la probabilidad de falla de las laderas incluyendo la variabilidad de la resistencia al corte de los materiales en su condición normal y crítica, especialmente considerando que son zonas con importante intervención antrópica (obras civiles y actividad minera). Estos estudios deben definir las posibles medidas de mitigación en las zonas de amenaza media y baja que puedan resultar afectadas.</p>
MEDIA	<p>Estas áreas tienen una probabilidad media (0.001 a 0.05/año) de ocurrencia de movimientos en masa con magnitudes del orden de miles de metros cúbicos, detonados por acumulación de agua en el subsuelo y ascensos del nivel freático asociados con periodos lluviosos, así como, la ocurrencia de sismos con magnitudes iguales o superiores a 0.17g*. Corresponden a áreas propensas a la ocurrencia de movimientos en masa producto de intervención antrópica inadecuada (sobrecarga del terreno al borde de cortes o laderas, cortes en laderas, minería, rellenos, manejo de aguas superficiales, cambios en la cobertura y uso del suelo).</p> <p>En caso de detonarse, es posible la ocurrencia de movimientos en masa superficiales tipo deslizamiento traslacional.</p> <p>La zona de amenaza media cubre el 24% de la zona urbana, periurbana y de expansión del municipio de Popayán, y se presenta principalmente en las laderas que limitan el casco urbano y periurbano de municipio. Al norte del municipio (Comuna 2) la amenaza media predomina en las márgenes de las quebradas Chamizal, Pastelito, Quitacalzón y Saté, entre otros drenajes.</p> <p>Se asocia con suelos derivados de ignimbritas e ignimbritas meteorizadas y en menor proporción con suelos transportados de origen fluvial y volcánico - fluvial; aflorando en pendientes del terreno del orden de 10 - 30°.</p>	<p>En estas zonas para todos los posibles tipos de intervención, se requiere de estudios detallados de amenaza, vulnerabilidad y riesgo que incluyan la probabilidad de falla de las laderas considerando la variabilidad de la resistencia al corte de los materiales en su condición normal y crítica y se definen las posibles medidas de mitigación.</p> <p>Las intervenciones antrópicas inadecuadas contribuyen a aumentar la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa, por lo cual deben ser reglamentadas.</p> <p>Debe prestarse especial atención a las áreas próximas a la zona de amenaza alta, con el fin de evitar la posible afectación por movimientos en masa activos o antiguos.</p> <p>La exposición del suelo producto de cortes o procesos erosivos, es un factor contribuyente a la pérdida de resistencia en los materiales y consecuente falla de taludes, esta condición debe prevenirse.</p>
BAJA	<p>Estas áreas tienen una probabilidad baja (< 0.001 /año) de ocurrencia de movimientos en masa. Corresponden a áreas de baja pendiente y laderas conformadas por materiales con alta resistencia al corte.</p> <p>La zona de amenaza baja cubre el 70 % de la zona urbana, periurbana y de expansión del municipio de Popayán.</p>	<p>La intervención antrópica inadecuada al igual que los procesos erosivos, contribuyen a aumentar la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa.</p> <p>Debe evaluarse la posible afectación por ocurrencia de movimientos en masa en laderas adyacentes. Las áreas planas son vulnerables a la acumulación de material proveniente de las laderas.</p> <p>Los rellenos de origen antrópico sin tratamientos físicos y mecánicos adecuados pueden generar zonas de inestabilidad.</p>

*g = Aceleración de la gravedad

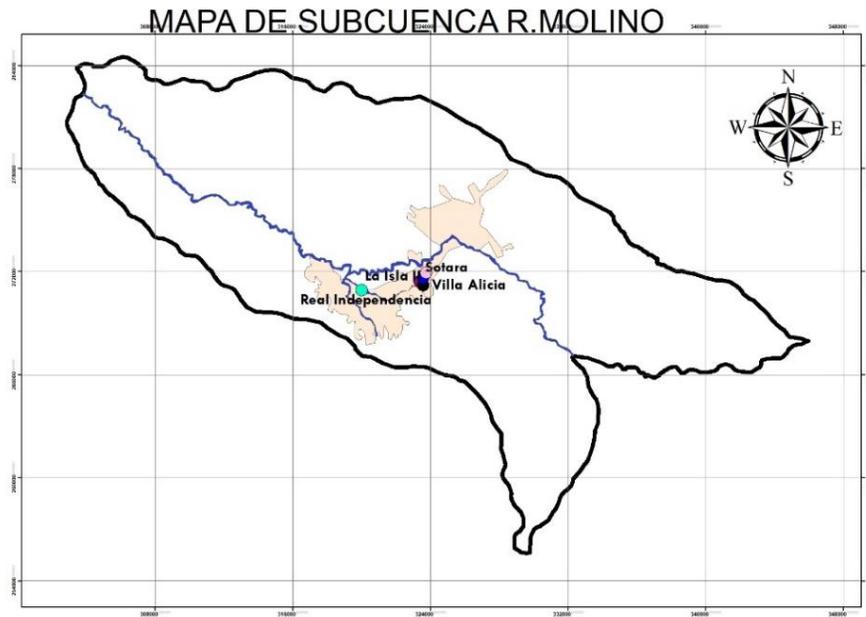
Fuente Oficina Gestión del Riesgo Alcaldía de Popayán

4.1.1 Características de las áreas de amenaza

A continuación, se presenta el mapa de Popayán “Ilustración 10 Mapa de Popayán Cauca”, su tejido urbano y la subcuenca del río Molino donde muestra la ubicación exacta de los cinco barrios priorizados que se encuentran cercanos al

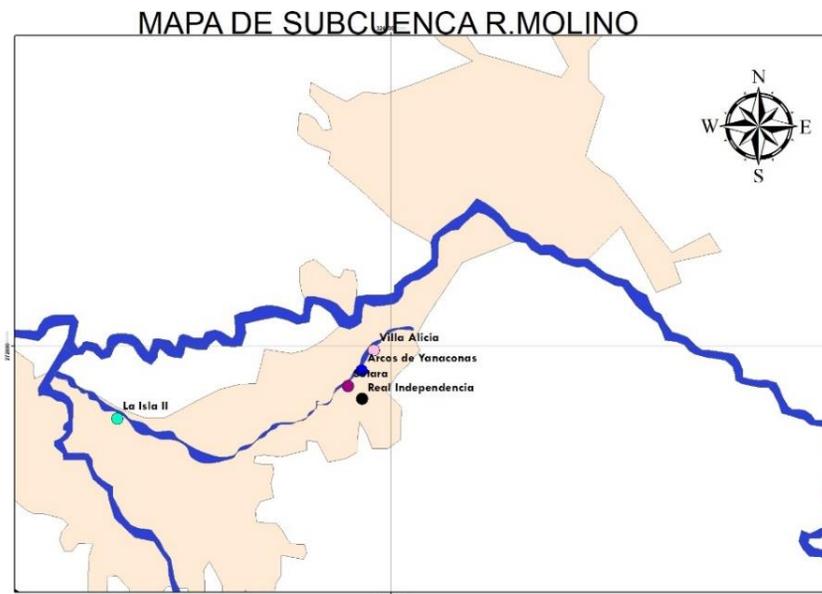
río Molino, además de un zoom del mismo mapa elaborado mediante el software ArcGIS “Ilustración 11 Zoom mapa de Popayán Cauca”.

Ilustración 11 Mapa de Popayán Cauca



Fuente Propia

Ilustración 12 Zoom mapa de Popayán Cauca



Fuente Propia

Ilustración 13 Leyenda mapa de Popayán Cauca



Fuente Propia

A continuación, se presentan las características obtenidas mediante la verificación en campo de cada zona priorizada.

- **Sotara**

El barrio Sotara tiene 42 años de fundación y hace parte de la comuna 3 de la ciudad de Popayán, se encuentra en estrato 3 y cuenta con 55 viviendas y 220 habitantes aproximadamente, es un barrio tranquilo que a pesar de ser pequeño es muy comprometido con el medio ambiente, entre todos sus habitantes están pendientes para con frecuencia realizar la limpieza a las orillas del río Molino que atraviesa muy cerca de sus viviendas y estar al tanto de que algo fuera de lo común suceda.

En la avalancha ocurrida en el año 2013 la cual afecto en su mayoría al barrio Bolívar el presidente de la junta de acción comunal del barrio Sotara don Luis Sotelo contó que por fortuna en el sector no se presentaron daños a viviendas ni habitantes, pero que dicho evento ocasiono el daño de un puente peatonal y pérdidas materiales, pues hasta sus hogares llegó la corriente del lodo. Esta zona al estar rodeada por la subcuenca río Molino cuenta con alarmas a lo largo del cauce, las cuales están en constante monitoreo para alertar a la comunidad y autoridades competentes ante algún suceso amenazante.

En la visita de verificación de información al sector se encontró que a la ribera de la subcuenca río Molino del barrio Sotara, más exactamente en la carrera 25A

Norte 50 y carrera 4 se encuentran dos viviendas ubicadas a menos de 10 metros de la ribera de la subcuenca, estas viviendas junto con sus habitantes se encuentran en riesgo por amenaza de deslizamiento debido a que no cumplen con lo descrito en el Decreto 2811 de 1974 acerca de no construir a menos de 30 metros del río, observando el cauce de la subcuenca se notó que este cuenta con predominante cobertura vegetal, tienen bastante caña brava y algunas plantas de café. A continuación, algunas fotografías de la zona “Fotografía 1 Zona priorizada – Sotara”.

Fotografía 1 Zona priorizada - Sotara



Fuente Propia

Continuando con la metodología anteriormente expuesta según “*Tabla 5 Elementos expuestos ante el evento amenazante*”, según la clasificación de bienes físicos la cual incluye edificaciones y líneas vitales, se logró identificar que el sector no tiene elementos expuestos como: edificaciones indispensables (salud pública), edificaciones de atención a la comunidad (seguridad, emergencia y educación), edificaciones de ocupación especial (institucionales y centros comerciales) y edificaciones de ocupación (comercial), pero en las edificaciones de ocupación (residencial) si existen dos viviendas expuestas ante deslizamientos, debido a que se encuentran a menos de 10 metros de la orilla de la subcuenca poniendo en peligro la vida de las personas que las habitan; en cuanto a líneas vitales tienen la mayoría de las vías en buen estado y cuenta con todos los servicios públicos (líneas de acueducto, alcantarillado, gas, redes eléctricas y

comunicaciones) las cuales no se encuentran en peligro ante un movimiento en masa, finalmente, según la clasificación de la red vial expuesta en la tabla “*Tabla 6 Clasificación de la red vial*”, se logró determinar que el barrio cuenta con una vía de arterial secundario de tipo (V-2 de 40 metros de ancho mínimo), vía local de tipo (v-9) de 8 metros de ancho y ninguna de estas se encuentra en amenaza ante deslizamiento sobre la subcuenca río Molino, a continuación algunas fotografías “*Fotografía 2 Vías y plantación en Sotara*”.

Fotografía 2 Vías y plantación en Sotara



Fuente Propia

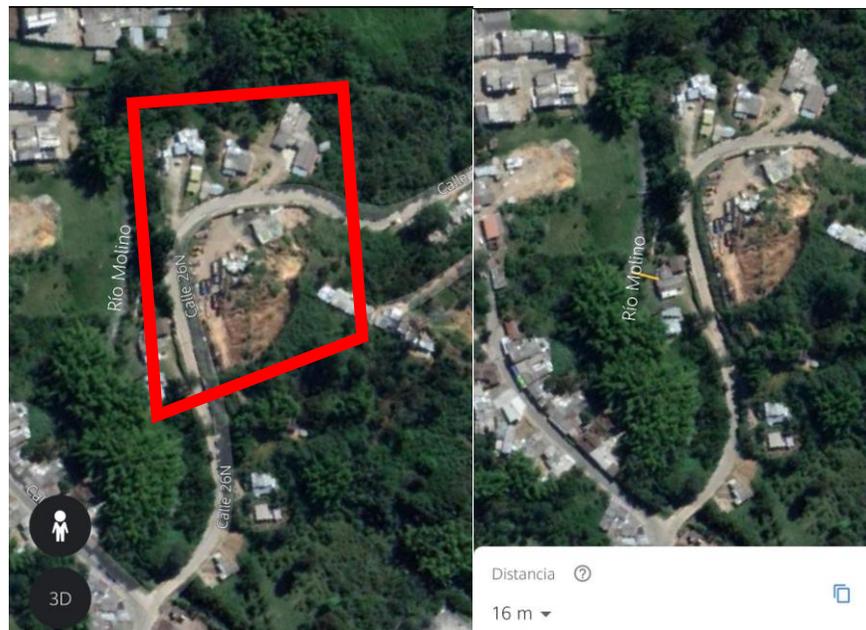
En cuanto a la “*Tabla 7 Zonas o escenario de exposición*” se pudo observar que parte del barrio se encuentra en la zona 2 donde hay presencia de viviendas ubicadas sobre la ladera potencialmente inestable y se esperan daños instantáneos debido a pérdida de soporte en la zona, finalmente se encuentra que en la zona 4 hay elementos fuera del alcance del movimiento en masa y en su área de depósito no se esperan daños.

- **Real Independencia**

Este barrio se constituyó legalmente el 10 de marzo de 1999, está ubicado al Norte de la ciudad de Popayán más exactamente en la calle 26N, cuenta con aproximadamente 75 viviendas y 300 habitantes de estrato dos. Según don Luis

Laso, presidente de la junta del barrio, la subcuenca del río Molino en dos ocasiones inundó cuatro casas que se encuentran a la ribera, por fortuna no hubo personas lesionadas sólo daños materiales, tampoco en el sector han ocurrido deslizamientos, pero parte del barrio se encuentra en zona de riesgo por movimientos en masa que es monitoreado y vigilado por Riesgos y desastres. Las viviendas se encuentran construidas a menos de 30 metros como se muestra en la ‘Ilustración 12 Zona priorizada – Real independencia’, por ende, no cumplen con el Decreto 2811 de 1974 el artículo 83 “...una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho”.

Ilustración 14 Zona priorizada - Real independencia



Fuente Google Earth

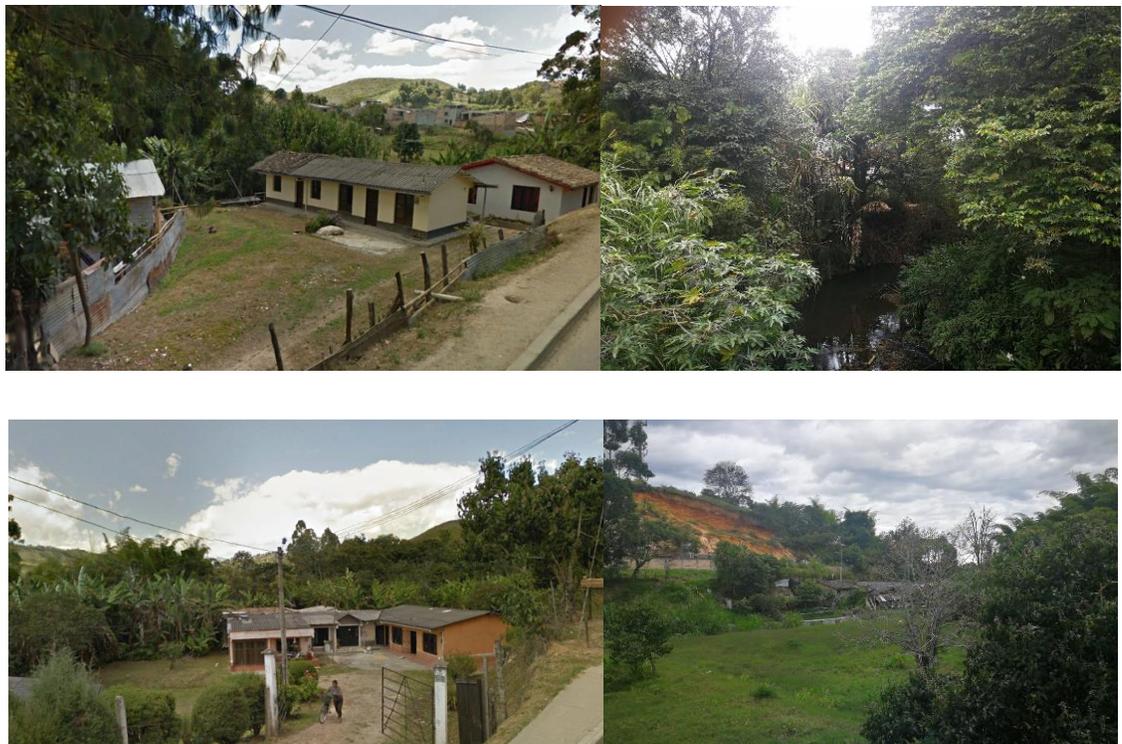
Siguiendo con la metodología expuesta en la “Tabla 5 Elementos expuestos ante el evento amenazante”, en la visita realizada a la zona se pudo observar que en bienes físicos en cuanto a edificaciones en el sector solo se tienen expuestas viviendas, las cuales ya han sido afectadas por eventos de inundaciones, pues se encuentran construidas a 16 metros de la ribera de la subcuenca. Continuando

con los elementos de líneas vitales, el sector cuenta con red vial (vías) y servicios públicos (líneas de acueducto, alcantarillado y gas - redes eléctricas y comunicaciones) los cuales no han sido afectados por eventos anteriores; en cuanto a la *“Tabla 6 Clasificación de la red vial”* la zona no tiene puentes peatonales ni vehiculares, pero cuenta con una vía de arterial principal (V-1) de 60 metros de ancho y vía local (V-9) de 8 metros de ancho.

Teniendo en cuenta la *“Tabla 7 zonas o escenarios de exposición”* el barrio tiene una zona que según la tabla anteriormente mencionada se encuentra en la zona 2, donde hay presencia de viviendas ubicadas sobre la ladera potencialmente inestable y se esperan daños instantáneos debido a pérdida de soporte en la zona.

A continuación, fotografías de la zona priorizada *“Fotografía 3 Verificación a campo”*.

Fotografía 3 Verificación a campo



Fuente Propia

- **La Isla II**

En el momento de la verificación de campo al barrio priorizado la Isla II como se observó en *“Ilustración 8 Mapa zonas de amenaza priorizadas”*, se encontró que este barrio ya fue reubicado al sector el “Triunfo” debido a que se encontraba en alto riesgo de amenaza por deslizamiento. A consecuencia de la situación tan grave en la que se encontraba el barrio la Isla II este pasa de tener 2 etapas a ser actualmente solo la Isla.

En la comuna 8, hace 42 años se fundó el barrio la Isla que actualmente tiene 150 viviendas y 600 habitantes aproximadamente, gran parte de las viviendas que están a orillas del río Molino presentan daños en su estructura debido a la erosión que presenta la ribera del río, pues este se desmorona continuamente y las familias residentes en ese lugar han perdido una proporción de sus terrenos. Las viviendas no cuentan con escritura pública del terreno, ya que este es producto de una “invasión” que actualmente es estrato 1, donde cada familia debe pagar los servicios públicos a pesar de no tener los mejores beneficios, pues los habitantes del barrio afirman que a causa de las obras mal terminadas de acueducto y alcantarillado han sufrido graves consecuencias, además que las tuberías no son resistentes y esta es la razón por la que el agua se desborda y termina inundando sus casas, causando enfermedades por los malos olores, zancudos y mosquitos que a la final los afectados terminan siendo mayormente los niños, como se puede apreciar en la siguiente fotografía *“Fotografía 4 Zona priorizada – La Isla”*.

Fotografía 4 Zona priorizada - La Isla



Fuente Propia

También, los habitantes de este sector cuando llueve muy fuerte temen que en cualquier momento el río los puede arrastrar a todos, ya que cada que esto pasa el terreno de estas casas está cediendo en mayores cantidades; además por la cercanía al río algunas casas están a punto de caerse pero las personas no se van de sus hogares porque no tienen los recursos económicos necesarios para organizarse en otro lugar tan fácilmente.

En el año 2013 ocurrió una avalancha que dejó muchas pérdidas económicas y socioambientales, como lo es el caso del habitante Ramiro Santiago que habitó junto con sus familiares (siete personas), en una de las residencias que presentaba mayor deterioro y en esta ocasión desafortunadamente a sus hermanos les causó serias lesiones físicas quedando afectados en sus extremidades inferiores y heridas en otras partes de su cuerpo al caer al precipicio que tiene aproximadamente 10 metros. Se pueden apreciar fotografías de la zona a continuación *“Fotografía 5 Evidencia visita zona priorizada”*.

Fotografía 5 Evidencia visita a zona priorizada



Fuente Propia

Continuando con la metodología anteriormente expuesta según la tabla “*Tabla 5 Elementos expuestos ante el evento amenazante*”, de acuerdo a la clasificación de bienes físicos la cual incluye edificaciones y líneas vitales, se logró identificar que en el sector no existe amenaza a bienes físicos como: edificaciones indispensables (salud pública - privada), edificaciones de atención a la comunidad (seguridad, emergencia y educación), edificaciones de ocupación especial (institucionales, gubernamentales, centros comerciales e industrias) y edificaciones de ocupación (comercial), por otro lado existen bienes físicos en edificaciones de ocupación (residencial) que pueden ser afectados por la materialización de movimientos en masa debido a que el sector solo cuenta con viviendas residenciales ubicadas a la ribera de la subcuenca y cuenta con todos los sistemas indispensables para la vida humana y el funcionamiento de la población y todos los servicios públicos (líneas de acueducto, alcantarillado, gas, redes eléctricas y comunicaciones), estas no alcanzan a ser afectadas ante la detonación de deslizamientos, finalmente, según la clasificación de la red vial expuesta en la tabla “*Tabla 6 Clasificación de la red vial*” se pudo determinar que

el barrio cuenta con una vía local de tipo (v-9) de 8 metros de ancho la cual no ha tenido ninguna afectación por los deslizamientos.

En cuanto a la “*Tabla 7 Zonas o escenario de exposición*” se pudo observar que en el sector se encuentra en la zona 2 donde hay presencia de viviendas ubicadas sobre la ladera potencialmente inestable y se esperan daños instantáneos debido a pérdida de soporte en la zona, como se puede evidenciar en la siguiente fotografía “*Fotografía 6 Viviendas aledañas al río Molino – La Isla*”.

Fotografía 6 Viviendas aledañas al río Molino - La Isla



Fuente Propia

También se pudo observar que en el barrio la Isla no cuentan con un control adecuado de parte de la Alcaldía municipal para dar cumplimiento a lo estipulado en el Decreto 2811 de 1974 el artículo 83 “...una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos hasta de treinta metros de ancho”, lo cual los hace más vulnerable a la hora de ocurrencia de un fenómeno natural como se observa en la “*Fotografía 6 viviendas aledañas al río Molino – La Isla*”, se logró evidenciar que a la orilla donde se encuentran las viviendas es una zona susceptible a deslizamientos debido a que esta tiene poca cobertura vegetal, tiene una pendiente muy pronunciada de 90° (según lo observado), la textura del suelo predominante en la zona es arena lo cual la hace más susceptible a movimientos de remoción en masa ya que ese tipo de suelo es permeable a la hora de las precipitaciones. Las viviendas del barrio no respetan los 30 metros de

franja de protección como se puede contemplar en la siguiente ilustración “Ilustración 13 Ubicación del barrio la Isla”.

Ilustración 15 Ubicación barrio la Isla



Fuente Propia

- **Arcos de yanaconas**

Es un barrio pequeño fundado hace 17 años, ubicado al Nororiente de la ciudad, cuenta con 17 viviendas y aproximadamente 68 habitantes de estrato 3. En la visita de verificación en campo se observó que el barrio no se encuentra en peligro de deslizamientos sobre la subcuenca río Molino como se encontró en la información cartográfica, pues esta zona se encuentra retirada de donde pasa la subcuenca, así se puede observar en la siguiente ilustración “Ilustración 14 Zona priorizada – Arcos de Yanaconas”.

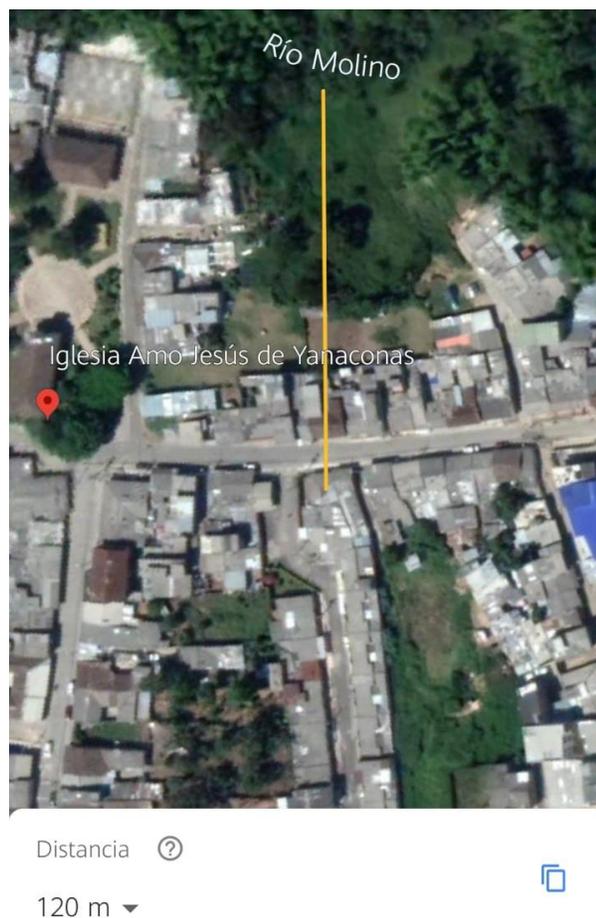
Ilustración 16 Zona priorizada - Arcos de Yanaconas



Fuente Propia

En la visita de verificación a la zona priorizada se consiguió notar que la subcuenca río Molino pasa por la parte del frente de las viviendas a aproximadamente 120 metros, ante esto se puede decir que el barrio cumple con el Decreto 2811 de 1974 el artículo 83 "...una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho", en lo visto en el lugar la subcuenca tiene a sus orillas abundante cobertura vegetal, así como se logra ver en la *"Ilustración 15 Distancia entre el río y la vivienda"*.

Ilustración 17 Distancia entre el río y la vivienda



Fuente Google Earth

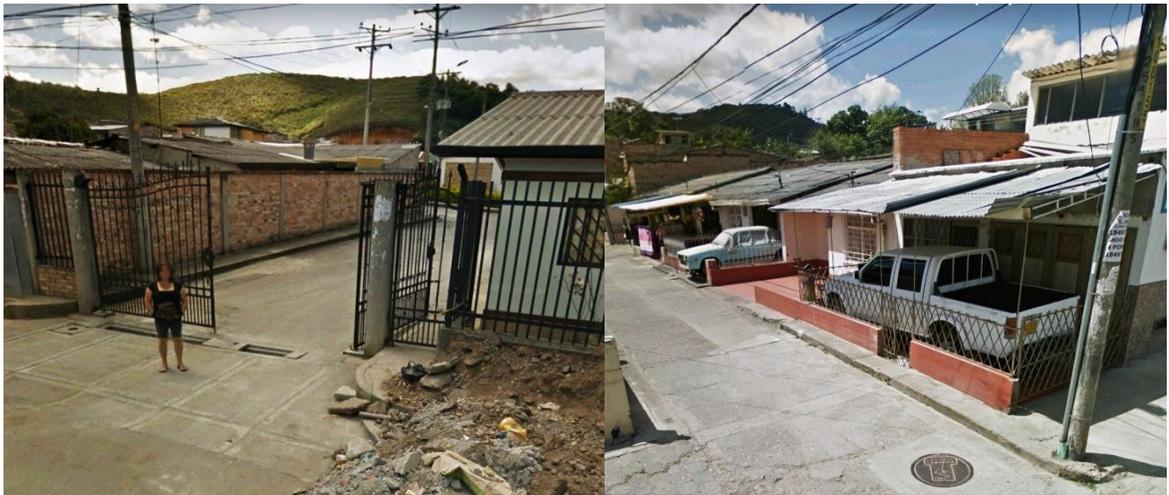
En esta zona los actuales límites están demarcados en su mayoría por pequeños puentes, ríos y quebradas, su forma de vida en comunidad, la iglesia y el parque que la rodea; los caminos que atraviesan el territorio funcionan como vertientes que comunican con veredas como “El Hogar” o que incluso conducen a viejos caminos hacia resguardos indígenas como “Poblazón”.

Teniendo en cuenta que el barrio Arcos de Yanaconas es un barrio pequeño y que se encuentra a 120 metros de la subcuenca río Molino, no presenta riesgo ante elementos expuestos según la tabla “*Tabla 5 Elementos expuestos ante el evento amenazante*”, como: edificaciones indispensables (salud pública - privada), edificaciones de atención a la comunidad (seguridad, emergencia y educación),

edificaciones de ocupación especial (institucionales, gubernamentales, centros comerciales e industrias) y edificaciones de ocupación (comercial y residencial); en cuanto a líneas vitales el barrio cuenta con conjunto de sistemas y servicios que son fundamentales para el funcionamiento de la zona y todos los servicios públicos (líneas de acueducto, alcantarillado, gas, redes eléctricas y comunicaciones).

Según la “*Tabla 6 Clasificación de la red vial*” el sector priorizado tiene una vial local (privada comunal) de tipo (v-8 de 10 metros de ancho) la cual no se ve afectado por deslizamiento sobre la subcuenca del río molino. En cuanto a la “*Tabla 7 Zonas o escenario de exposición*” se pudo observar que el sector se encuentra en la zona 4 en la cual hay elementos fuera del alcance del movimiento en masa, por lo que no se esperan daños debido a movimientos en masa que se presenten sobre la subcuenca río molino. A continuación, se puede ver la zona priorizada “*Fotografía 7 Zona priorizada – Arcos de yanaconas*”.

Fotografía 7 Zona priorizada- Arcos de yanaconas



Fuente Propia

- **Villa Alicia**

La zona priorizada Villa Alicia con 15 años de fundación se encuentra ubicada al norte de la ciudad de Popayán por el sector de Yambitara, más exactamente en la carrera 4 #36a Norte - 32 transversal 4B, un sector tranquilo que cuenta con un complejo de 61 viviendas de estrato 3, 244 habitantes aproximadamente que cuentan servicio de porteria, lo que hace que la urbanización sea mas segura.

Se puede apreciar fotografías de la zona priorizada *“Fotografía 8 Zona priorizada – Villa Alicia”*.

Fotografía 8 Zona priorizada - Villa Alicia



Fuente Propia

La urbanización Villa Alicia no cumple con lo descrito en el Decreto 2811 de 1974 el artículo 83 donde describe que “...una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho”, en la verificación en campo se observó que frente al lugar priorizado, la subcuenca tiene a sus orillas abundante cobertura vegetal y las viviendas la más cercana está a 28 metros del río Molino, tal como se aprecia en el siguiente mapa *“Ilustración 16 Ubicación y distancia entre el río y las viviendas”*.

Ilustración 18 Ubicación y distancia entre el río y las viviendas



Fuente Google Earth

En el sector no se han presentado deslizamientos que incluyan muertes o pérdidas de viviendas, el fenómeno natural de aquella madrugada del 25 de diciembre del año 2013 pasó por el lugar de la subcuenca afectando a más de 100 personas en el casco urbano por la parte baja de la ribera y solo dos puentes peatonales colapsaron en este sector.

Teniendo en cuenta que el barrio Villa Alicia se encuentra a 28 metros de la subcuenca río Molino este no presenta riesgo ante elementos expuestos como se indica en la '*Tabla 5 Elementos expuestos ante un evento amenazante*' para edificaciones indispensables (salud pública - privada), edificaciones de atención a la comunidad (seguridad, emergencia y educación), edificaciones de ocupación especial (institucionales, gubernamentales, centros comerciales e industrias) y edificaciones de ocupación (comercial), solo presenta riesgo en cuanto a

edificaciones de ocupación (residencial), además no tiene líneas vitales expuestas a deslizamientos.

Según la “*Tabla 6 Clasificación de la red vial*”, el sector priorizado tiene una vial local (privada comunal) de tipo (v-8 de 10 metros de ancho) la cual no se ve afectado por deslizamiento sobre la subcuenca del río Molino.

En cuanto a la “*Tabla 7 Zonas o escenario de exposición*” se pudo observar que el sector se encuentra en la zona 4 en la cual hay elementos fuera del alcance del movimiento en masa por lo que no se esperan daños debido a deslizamientos de tierra que se presenten sobre la subcuenca río Molino, teniendo en cuenta que la ribera de la subcuenca tiene una franja de protección con abundante cobertura vegetal.

A continuación, se puede observar una captura de pantalla de las cinco zonas priorizadas como se observa en la ilustración “*Ilustración 19 Ubicados barrios priorizados*”, cada punto simboliza el barrio en donde se encuentran las viviendas cerca por donde pasa la subcuenca río Molino. Los resultados de esta información (distancias) se confirmaron mediante el software de ArcGIS.

Ilustración 19 Ubicación barrios priorizados



Fuente GoogleEarth

Tabla 12 Leyenda ubicación barrios priorizados

LEYENDA	
	Río Molino
	Vivienda cercana

Fuente Google Earth

La tabla ‘Tabla 13 clasificación de zonas priorizadas’, que se muestra a continuación clasifica los barrios que fueron identificados por medio de la información cartográfica que brindó la oficina de gestión del riesgo municipal acerca de las zonas que se encuentran en amenaza por deslizamientos.

Tabla 13 Clasificación de zonas priorizadas

BARRIO	COMUNA	DISTANCIA DEL RÍO A VIVIENDAS	ÁREA Y COORDENADAS		DESCRIPCIÓN
			Río Molino	Viviendas	
Sotara	3	9.38 Metros	Latitud: 2°27'13.12" N Longitud: 76°35'22.0 2"O	Latitud: 2°27'13.20 "N Longitud: 76°35'22.3 6"O	El barrio Sotara tiene 42 años de fundación, está ubicado al oriente de la ciudad de Popayán, cuenta con 55 viviendas y 220 habitantes.
Real Independencia	7	16.0 Metros	Latitud: 2°27'14.31" N Longitud:	Latitud:2°27'13.78"N Longitud: 76°35'15.2	El barrio Real Independencia tiene 20 años de fundación,

			76°35'14.8 1"O	2"O	está ubicado al norte de Popayán y cuenta con 75 viviendas y aproximadamente 300 habitantes.
La Isla	8	6 Metros	Latitud: 2°27'1.74" N Longitud: 76°37'8.74" O	Latitud: 2°27'1.50" N Longitud: 76°37'8.80 "O	El barrio la Isla tiene 42 años de fundación, cuenta con 150 viviendas y 600 habitantes aproximadamente de estrato 1.
Arcos de Yanaconas	3	120 Metros	Latitud: 2°27'20.00" N Longitud: 76°35'14.3 1"O	Latitud: 2°27'19.26 "N Longitud: 76°35'10.6 1"O	El barrio Arcos de yanaconas tiene 17 años de fundación, está ubicado al nororiente de la ciudad de Popayán, cuenta con 17 viviendas y aproximadamente 68 habitantes de estrato 3.

Villa Alicia	3	28 Metros	Latitud: 2°27'34.44" NLongitud: 76°35'4.92" O	Latitud: 2°27'33.82 "N Longitud: 76°35'4.23 "O	La Urbanización Villa Alicia con 15 años de fundación se encuentra ubicada al norte de la ciudad de Popayán, cuenta con 61 viviendas de estrato 3 y 244 habitantes aproximadamente.
--------------	---	-----------	---	---	---

Fuente Propia

Debido a que cuando se realizó la verificación en campo se encontró con que una de las zonas priorizadas (Arcos de yanaconas) no se encuentra tan cercana a donde pasa la subcuenca río Molino como se observa en la cartografía suministrada por la Alcaldía, por ende, se decidió realizar otro mapeo mediante Google Earth para realizar la ubicación exacta del barrio y así calcular en metros la distancia que existe realmente con el río, como se muestra en la ilustración *"Ilustración 20 Corrección de mapeo zonas priorizadas"* a continuación:

Ilustración 20 Corrección de mapeo zonas priorizadas



Fuente Google Earth

Tabla 14 Leyenda corrección de mapeo zonas priorizadas

LEYENDA	
	Río Molino
	Vivienda cercana

Fuente Propia

4.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN LOS MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA

En la identificación de las variables que influyen en los movimientos de remoción en masa según los documentos estudiados, se logró determinar que cada variable se desprende de otra de mayor rango de importancia como lo es el caso de la Geomorfología, la cual tiene las siguientes ramas (morfometría, morfogénesis y morfodinámica). Según estudios realizados por el IDEAM se demuestra en porcentaje el grado de importancia de cada variable, donde se eligió la

morfometría ya que esta tiene un alto porcentaje de importancia (40%), con esta describimos cuantitativamente las características del terreno como longitud, ángulo de inclinación y altura de la ladera y al mismo tiempo determina la distribución de la pendiente; de entre varias variables que la morfometría desprende se eligió la pendiente debido al grado de importancia que esta tiene (40%), la cual proporciona el grado de inclinación de la ladera y de esta forma determinar la velocidad del deslizamiento.

Otra variable es el suelo debido a su alto porcentaje (76.75%) y a que es la capa superficial de la corteza terrestre la cual permite la entrada y regulación inicial de la precipitación pluvial en el ecosistema modificando el estado de la materia, afectando sus propiedades y esfuerzos, pero sin alterar su naturaleza; también porque es un factor de gran importancia en la detonación de movimientos en masa ya que con este se determina el suelo que presenta la ladera y las condiciones que la soportan.

Los suelos incluyen características físicas como textura (30.25%) que se encuentra relacionada con la velocidad de infiltración, retención y almacenamiento de humedad, permeabilidad, fertilidad y nutrición mineral; el tipo de arcilla (17.25%) que es importante en los movimientos en masa ya que radica en el grado de estabilidad que esta presenta cuando entra en contacto con el agua, ya sea que se contraiga, se expanda o forme grietas, por último, la erosión actual (29.25%) se identifica por el desprendimiento, transporte y deposición del material superficial por acción del agua, el viento, el hielo o el hombre, la cual permitió establecer la estabilidad del suelo y la susceptibilidad a los movimientos en masa.

Así como también la cobertura de la tierra con un (100%) permite conocer que tan protegido se encuentra el suelo del impacto del agua, para evaluar la cobertura de la tierra dentro de la generación de mapas de susceptibilidad a deslizamientos es importante conocer la importancia de esta temática, visto no solamente como la “vegetación” que se encuentra en determinado sitio, sino todo lo que implica la

cobertura como: la humedad del suelo, la relación de la humedad con la precipitación y el tipo de paisaje en el que se desarrolla.

Finalmente se eligió la precipitación debido a que es una de los mayores factores determinantes en la ocurrencia de los deslizamientos de tierra, ya que cuando alcanza un valor límite de humedad del suelo o las condiciones hidrológicas hace que sea altamente factible a la ocurrencia de un deslizamiento.

Una vez obtenidos los resultados anteriormente acerca de la priorización de las áreas con riesgo de amenaza por deslizamientos se dio paso a la identificación de las principales variables que influyen en los movimientos de remoción en masa, para esto se organizó la siguiente tabla “*Tabla 15 identificación de variables*” que indica las variables seleccionadas y los factores que influyen en cada una de ellas.

Tabla 15 Identificación de variables

VARIABLES					
		Pendiente	Tipo de suelo	Cobertura vegetal	Precipitación
FACTORES QUE INFLUYEN	Grados de inclinación	Tipos de clima	Cubierta Biofísica (uso de suelo)	Estaciones meteorológicas	
	Descripción de relieve				
	Susceptibilidad según el tipo de relieve				

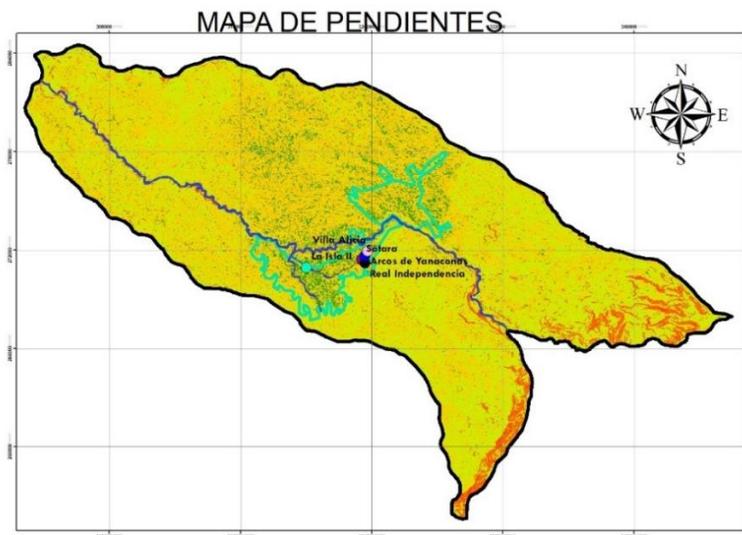
Fuente Propia

4.2.1 Clasificación de pendiente (Cortes & Malagón)

Los diferentes niveles categóricos establecidos para el indicador de pendiente para determinar áreas de conservación de suelos, fueron los planteados por Cortes & Malagón (1984). Esta clasificación es la que se utiliza en el territorio

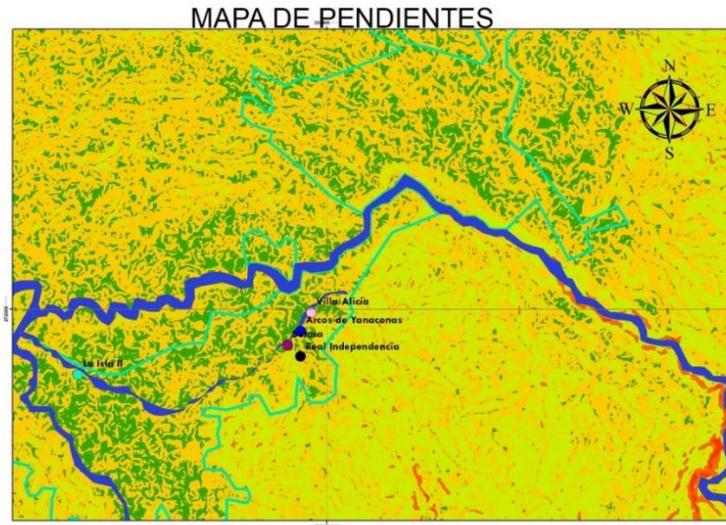
Colombiano hace más de 50 años en los procesos de levantamientos geomorfológicos y de reconocimiento de suelos, siendo ya estandarizada para dichos fines. En la siguiente ilustración “*Ilustración 21 Clasificación de pendientes*”, se consiguió observar el mapa y el zoom “*Ilustración 22 Zoom mapa clasificación pendientes*” del mismo, que contiene la clasificación de pendientes de la ciudad de Popayán y de las zonas priorizadas en la investigación acerca de la subcuenca río Molino.

Ilustración 21 Clasificación de pendientes



Fuente Propia

Ilustración 22 Zoom mapa clasificación pendientes



Fuente Propia

Ilustración 23 leyenda de clasificación de pendientes



Fuente Propia

La siguiente tabla “Tabla 16 Base de datos clasificación de pendiente” es la base de datos que indica la clasificación o término de cada rango de pendiente según su porcentaje y la cantidad de áreas a la que cada una de estas pertenece.

Tabla 16 Base de datos clasificación de pendiente

PORCENTAJE	CLASIFICACION	AREA (ha)
0-3	Plana	3771
3-7	Ligeramente inclinada	5071
7-12	Moderadamente Inclinada	19448
12-25	Fuertemente Inclinada	16993
25-50	Ligeramente Escarpada	1449
50-75	Moderadamente Escarpada	466
>75	Fuertemente Escarpada	173
TOTAL		47371

Fuente Propia

ANALISIS DE CLASIFICACION DE PENDIENTE

Como se logró observar en los resultados de la “*Ilustración 21 Clasificación de pendientes*”, la ciudad de Popayán cuenta con 47371 (ha) de las cuales 19448 (ha) corresponden a un relieve moderadamente inclinado, además se presenta un relieve fuertemente inclinado con 16993 (ha), continuando con la clasificación de pendiente y con menor área está el relieve ligeramente inclinado con 5071 (ha), relieve plano con 3771 (ha), relieve ligeramente escarpado con 1449 (ha), relieve moderadamente escarpado 466 (ha) y el relieve fuertemente escarpado con 173 (ha).

Continuando con la clasificación de pendiente según lo observado en el mapa “*Ilustración 22 Zoom mapas clasificación de pendientes*”, las zonas priorizadas como lo son: Isla y Real Independencia corresponden a una pendiente de 27 a 37 grados, lo cual indico que el relieve de la zona es moderadamente escarpado con sectores afectados por erosión hídrica moderada que presentan suelos moderadamente profundos y excesivamente drenados, texturas finas, fertilidad moderada; estos barrios presentan susceptibilidad alta de amenaza por movimientos en masa. También el barrio Villa Alicia presenta susceptibilidad alta

pero debido al rango de la pendiente que va de 14 a 27 grados la clasificación del relieve cambia a ligeramente escarpado, por ende la baja fertilidad natural y la baja profundidad efectiva de los suelos, igual también la disminución de precipitaciones durante aproximadamente un semestre.

Según la ubicación en el zoom del mapa, el barrio Sotara posee una pendiente de 7 a 14 grados siendo fuertemente inclinada con erosión hídrica laminar ligera, suelos superficiales moderadamente bien drenados, con texturas gruesas y fertilidad en general moderada. Su uso está restringido fundamentalmente a bosque o vida silvestre y es apto para cultivos de semi bosque o agroforestales en el que se incluyan cultivos de cítricos, plátano y aguacate entre otros. Esta zona presenta susceptibilidad media de amenaza a deslizamientos.

Finalmente el barrio Arcos de yanacunas no presenta ningún tipo de riesgo por movimientos en masa para las viviendas debido a que la subcuenca río Molino pasa a 120 metros de distancia de la entrada principal del barrio, sin embargo la pendiente de esta zona priorizada debido al rango de clasificación va de 2 a 4 grados de inclinación, se clasifica como ligeramente inclinada con erosión moderada y laderas afectadas especialmente por erosión hídrica en sectores ausentes, por ende la susceptibilidad de amenaza en esta zona es muy baja.

De esta manera se puede apreciar que las formas del relieve en la subcuenca del río Molino en cuanto a las categorías de pendiente son diferentes, solo dos zonas priorizadas presentan el mismo rango de 27 a 37 grados, ya que las demás presentan de 2 a 4, de 7 a 14 y de 14 a 27 grados; debido a que cuando mayor es el grado de pendiente es más pronunciado el terreno aumentando la susceptibilidad a movimientos en masa se consideró que gran parte de las zonas priorizadas se encuentran en alto riesgo ante la detonación de un deslizamiento, de esta forma se logra analizar mediante la observación del "mapa de pendientes" que la subcuenca cuenta con un terreno suave que va de ligero a moderadamente escarpado con pendientes cortas que varían desde suaves a fuertes y el recubrimiento de cenizas volcánicas sobre rocas sedimentadas.

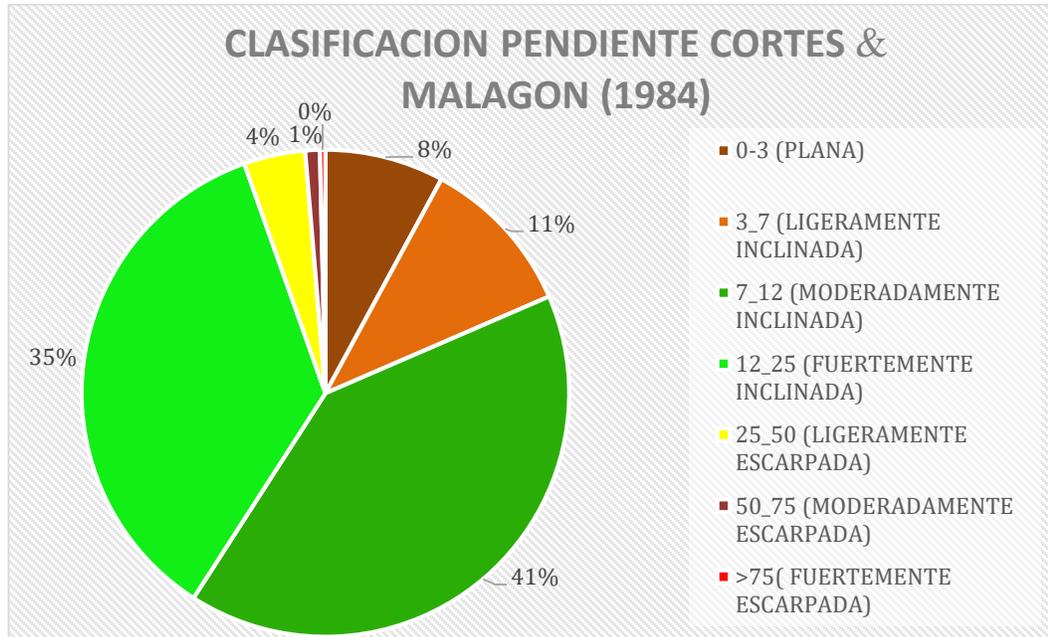
La parte media de la subcuenca que fue el área de estudio, es la parte en la cual hay un equilibrio entre el material sólido que llega traído por la corriente y el material que sale, en esta parte visiblemente la erosión es moderada debido a que es regulada por la composición de los suelos, pues estos parámetros influyen sobre la velocidad del flujo y juega un papel importante en la forma del hidrograma.

A pesar de que el tipo de pendiente impone límites en el uso del suelo y en la agricultura a través de sus efectos en la erosión y en las técnicas de cultivo, los suelos en la subcuenca río Molino son profundos, bien drenados con texturas medianas a finas, ricos en materia orgánica y fertilidad media, pero si aumenta la pendiente de una ladera aumenta también el componente de la gravedad y por ende la probabilidad de deslizarse.

Este mapa de pendiente resultó de gran importancia, pues ayudó a clasificar y evaluar las áreas que debido a la inclinación de la pendiente resultaba más susceptible a procesos de movimientos en masa y de esta forma analizar con mayor precisión las áreas con mayor pendiente. También la importancia de este parámetro para evaluar la susceptibilidad debido a que la pendiente puede condicionar el uso del suelo y la estabilidad de una ladera, ya que de ella dependen los componentes de las fuerzas que pueden favorecer o no al movimiento de las mismas.

TABLA Y GRAFICO ESTADISTICO DE PENDIENTE

Grafico 1 Clasificación pendiente Cortes y Malagón (1984)



Fuente Propia

Tabla 17 Base de datos pendiente

PORCENTAJE	CLASIFICACION	AREA (ha)	PORCENTAJE (%)
0-3	Plana	3771	7.9
3-7	Ligeramente inclinada	5071	10.6
7-12	Moderadamente Inclinada	19448	40.6
12-25	Fuertemente Inclinada	16993	35.5
25-50	Ligeramente Escarpada	1449	4.07
50-75	Moderadamente Escarpada	466	0.97
>75	Fuertemente Escarpada	173	0.36
TOTAL		47371	100

Fuente Propia

ANALISIS ESTADISTICO DE PENDIENTE

Teniendo en cuenta el mapa de pendiente según la clasificación de Cortes y Malagón (1984), la ciudad de Popayán posee mayores áreas de pendiente moderadamente inclinada con un porcentaje de 40.6% y relieve de pendiente fuertemente inclinada con 35.5%, con un porcentaje intermedio de 10.6% y 7.9% el relieve se considera ligeramente inclinado y plano, también se logra observar que hay porcentajes menores como lo son 4.07% ligeramente escarpado, 0.97% moderadamente escarpado y 0.36% fuertemente escarpado.

4.2.2 Clasificación de tipo de suelo (Caldas-lang)

En Colombia se encuentran representados la mayor parte de los climas que presenta la clasificación de CALDAS – LANG en donde los climas húmedos y superhúmedos se concentran en la cordillera occidental en el departamento del Cauca. Como se puede observar en el siguiente mapa *“Ilustración 24 Clasificación tipo de suelo (caldas-lang) ”*, y el zoom *“Ilustración 25 Zoom clasificación tipo de suelo (caldas-lang) ”*. El mapa y el zoom indicaron las diferentes clasificaciones de clima que es de donde se desprenden los diferentes tipos de suelos.

Ilustración 24 Clasificación tipo de suelo



Fuente Propia

Ilustración 25 Zoom clasificación tipo de suelo



Fuente Propia

Ilustración 26 Leyenda clasificación tipo de suelo



Fuente Propia

La siguiente tabla “*Tabla 18 Base de datos clasificación tipo de suelo (caldas-lang)*” es la base de datos que indica el término del clima para cada uno de los puntos que se necesiten y la cantidad de áreas a la que cada una de estos pertenece.

Tabla 18 Base de datos clasificación tipo de suelo

CLASIFICACION	AREA (ha)
Cálido y superhumedo	1660
Frio y húmedo	644
Frio y superhumedo	27.062
Templado y superhumedo	18.583
Templado y húmedo	25
TOTAL AREA	47973

Fuente Propia

ANALISIS DE CLASIFICACION TIPO DE SUELO (CALDAS-LANG)

Como se logró observar en los resultados de la “*Ilustración 24 Clasificación tipo de suelo*”, la ciudad de Popayán cuenta con 47973 (ha) de las cuales 1660 (ha) corresponden a un tipo de clima cálido y superhumedo, siguiendo con frio y húmedo 644 (ha), por otro lado se presenta un mayor número de hectáreas para el clima frio y superhumedo 27.062 (ha) y templado y superhumedo 18.583 (ha),

continuando con la clasificación de los climas y con menor área está el clima templado y húmedo con 25 (ha).

En la *“Ilustración 25 Zoom clasificación tipo de suelo (caldas-lang)”* se logró observar que en el mapa la ciudad de Popayán presenta cinco tipos de climas de los cuales el clima frío y superhúmedo tiene la mayor área de hectáreas (27062).

El suelo es el resultado de los factores formadores como el clima, rocas, el tiempo y los procesos geológicos. De acuerdo con la génesis y evolución de los suelos el municipio de Popayán tiene suelos de origen volcánico de esta manera se denominan suelos andisoles, estos son suelos relativamente jóvenes y poco evolucionados. Las características de la parte media de la subcuenca río Molino en la vereda Santa Helena ubicada en el municipio de Popayán, presenta en su gran mayoría una topografía con pendientes variables de 6 y 40 grados (a veces verticales o convexas), algunas zonas de esta área presentan pendientes moderadas, su relieve es quebrado (ligeramente escarpado) en su gran mayoría, predomina la textura franco arcillosa y franco arenoso y su estructura es de bloques subangulares de clase fina a gruesa. Al poseer estos suelos la fertilidad es media.

Estas zonas al tener suelos derivados de cenizas volcánicas contienen abundante materia orgánica y altos contenidos de Hierro y Aluminio, lo que indicó estos aspectos fue la vegetación que crece en el lugar y lo que se logró evidenciar fue helecho y lengua de vaca.

Son suelos en su mayoría ácidos con pHs inferiores a 5 o 6, baja asimilación de Nitrógeno, bajo contenido de Fósforo (P) y alto contenido de Potasio (K). Por lo que se pudo analizar que las tierras de la subcuenca del río Molino están sembradas por pasto kikuyo que es usado para ganadería extensiva, esta actividad la combinan con sembrados pequeños de pan coger como mora, arveja, algunas hortalizas y papa, a causa de su clima ecuatorial de montaña con pisos térmicos, como: frío y superhúmedo.

Debido a la presencia de materia orgánica, los primeros horizontes son de color oscuro y los otros horizontes presentan colores pardos amarillentos, pardos rojizos y rojos. La densidad aparente es baja y el drenaje subdentrítico a sub-rectangular o sub-paralelo con características geotécnicas buenas y profundidades entre 70 a 30 metros. Su clasificación taxonómica por la mayor o menor profundidad de la ceniza volcánica es Dystrandept y Dystropept respectivamente.

En cuanto la clasificación taxonómica se clasifica en *typcDystrandept* debido a su piso bioclimático oscilando entre 1800 a 2200 msnm. Estos suelos son desarrollados a partir de cenizas volcánicas y de diabasas, andesitas, brechas y tobas volcánicas que fueron recubiertas parcialmente por las cenizas volcánicas.

Teniendo en cuenta lo anteriormente analizado se logró observar que en todas las zonas priorizadas (Sotara, Real Independencia, la Isla, Arcos de Yanacónas y Villa Alicia) el clima predominante según el mapa es "frio y superhmedo". Cuando se realizó la verificación en campo se consiguió observar que en el barrio Sotara la ribera de la subcuenca tiene abundante cobertura vegetal, lo que indicó que el suelo es fértil para algunas siembras como lo es el aguacate, café y caña brava. El barrio Real independencia tiene sembrados de yuca, caña panelera y maíz, su suelo es presenciado altamente con materia orgánica lo que lo hace moderadamente fértil, esto ocurre debido a que los suelos de estas zonas son de textura ligera, profundos, bien drenados con un pH neutro (5,5) y son suelos franco arcillosos porque existe un buen drenaje (manchan la mano y se pueden moldear).

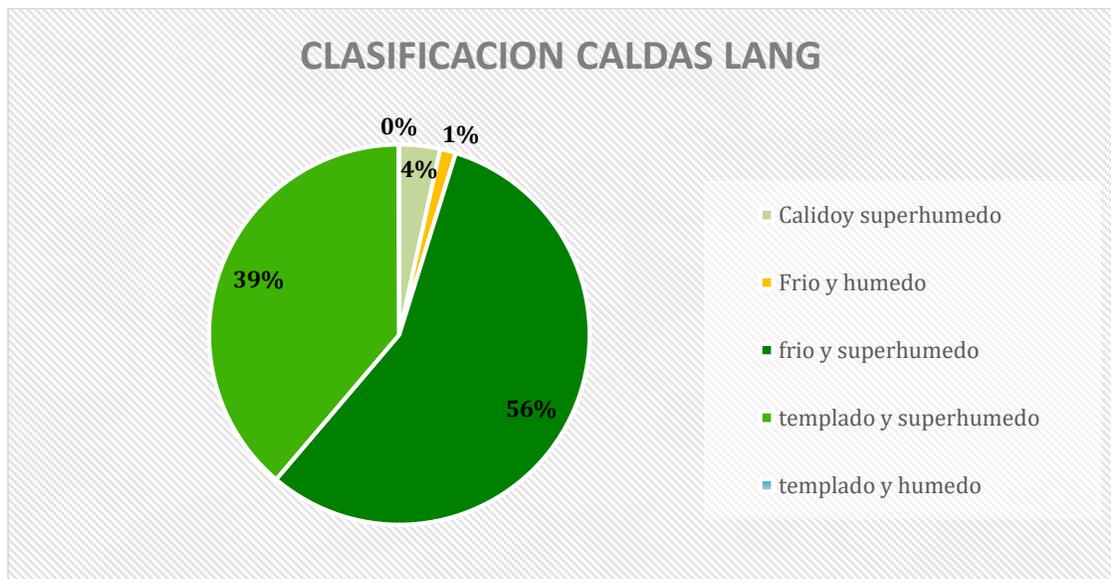
Para el barrio la Isla se observó que en estas tierras el suelo es franco arenoso (ásperos, manchan la mano y no forman figura) pues el exceso de humedad propicia un medio adecuado para el desarrollo de enfermedades fisiológicas de la raíz, como la asfixia radical, por ende, solo existe presencia de pasto maleza y caña brava a los alrededores de la subcuenca por donde pasa el río Molino, lo que hace que este sea más susceptible a deslizamientos.

Para el barrio Arcos de yanaconas debido a que cumple con lo descrito en el Decreto 2811 de 1974 el artículo 83 acerca de que ‘una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho’, se determinó que el suelo en la ribera del río Molino es fértil ya que cuenta con la presencia de árboles nativos y árboles frutales, según lo observado se puede denominar como suelo medio (franco arenoso). Finalmente, para el barrio Villa Alicia en la visita no se observó bastante vegetación pues el suelo presente es arcilloso de permeabilidad muy lenta debido al poco drenaje que provoca exceso de humedad, por esta razón son terrenos con fertilidad baja y más susceptibles a deslizamientos.

La apreciación sobre este terreno en general de la subcuenca río Molino llevó a pensar en más alternativas de producción agrícola (siembra de papa y hortalizas) ya que presenta un clima viable, esto con el fin de mejorar la calidad de vida de los campesinos y mercaderes de la región.

TABLA Y GRAFICO ESTADISTICO CLASIFICACION TIPO DE SUELO (CALDAS-LANG)

Grafico 2 Clasificación tipo de suelo



Fuente Propia

Tabla 19 Base de datos clasificación tipo de suelo (caldas-lang)

CLASIFICACION	AREA (ha)	PORCENTAJE (%)
Calido y superhumedo	1660	4
Frio y humedo	644	1
Frio y superhumedo	27062	56
Templado y superhumedo	18583	39
Templado y humedo	25	0
TOTAL	47974	100

Fuente Propia

ANALISIS ESTADISTICO CLASIFICACION TIPO DE SUELO (CALDAS-LANG)

Después de haber llevado a cabo la realización del mapa con clasificación fisiológica del terreno del municipio de Popayán se pudo observar que se encuentra en un terreno mayormente (más del 80% del terreno) “frio y superhumedo (56%) y templado y superhumedo (39%)”, siendo esto para la clasificación de Caldas-lang como dos pisos térmicos donde las precipitaciones anuales superan los 600 mm de lluvia anual, para el resto de las clasificaciones como cálido y superhumedo (4%), frio y húmedo (1%) y templado y húmedo (0%), se obtuvo muy bajo porcentaje como se muestra en la tabla 2 “base de datos clasificación tipo de suelo (caldas-lang)”.

Las plantas de esta región tienen una característica especial teniendo como lecho un prado de gramíneas con asociaciones de arbustos de hojas resistentes y enanas. La topografía de esta formación es de montañosa a escarpada y su vegetación se conserva inalterada. En ciertas áreas se observa pastoreo a pesar de que por su alta humedad y baja temperatura es impropia para labores agropecuarias limitando la producción económica de la región.

De igual manera la subcuenca del río Molino se ha adaptado eficientemente a la hora de realizar sus cultivos aprovechando este tipo de clima y sembrando mayormente Mora.

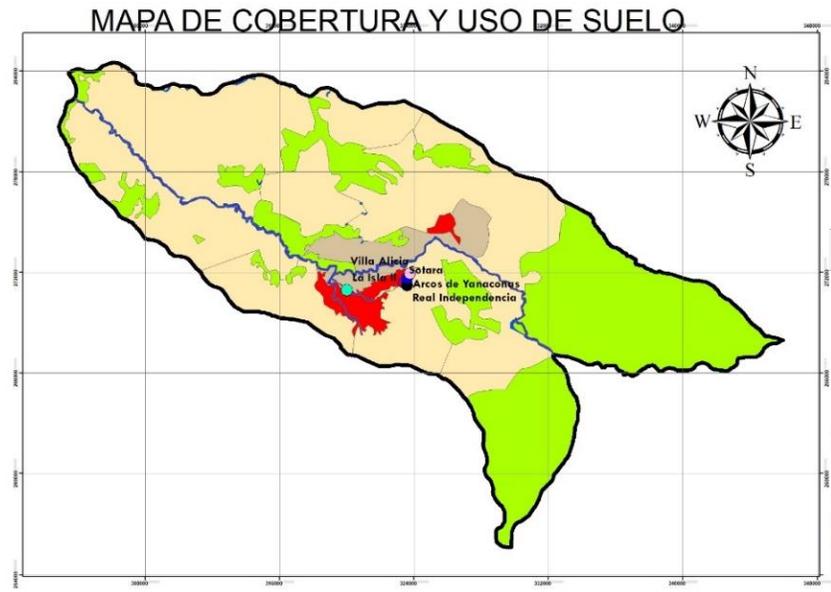
Este mapa sirvió de igual manera para determinar y darle seguimiento a la calidad de vida que se presenta, y como se muestra en las gráficas que más del 80% es superhúmedo se pudo apreciar que el exceso de humedad ambiental aumenta la posibilidad de contraer enfermedades respiratorias como el asma, sinusitis, e infecciones pulmonares como la bronquitis.

4.2.3 Clasificación y base de datos multitemporal de cobertura vegetal y uso de suelo

La leyenda nacional para la zonificación de las coberturas de la tierra a escala 1:100.000 adaptada al territorio Colombiano proporciona las características que el país requiere para el conocimiento de sus recursos naturales, para la evaluación de las formas de ocupación y apropiación del espacio geográfico a partir de la adaptación realizada de la metodología Corine Land Cover.

En las ilustraciones *“Ilustración 27 Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 1990”* e *“Ilustración 30 Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2019”* presentadas a continuación se observan los mapas y los zoom *“Ilustración 28 Zoom Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 1990”* e *“Ilustración 31 Zoom mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2019”* de cada uno de ellos a diferentes años con el fin de realizar análisis multitemporal, en estos se señala la proporción de la cobertura de la tierra en Popayán y la subcuenca río Molino.

Ilustración 27 Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 1990



Fuente Propia

Ilustración 28 Zoom mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 1990



Fuente Propia

Ilustración 29 Leyenda mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 1990



Fuente Propia

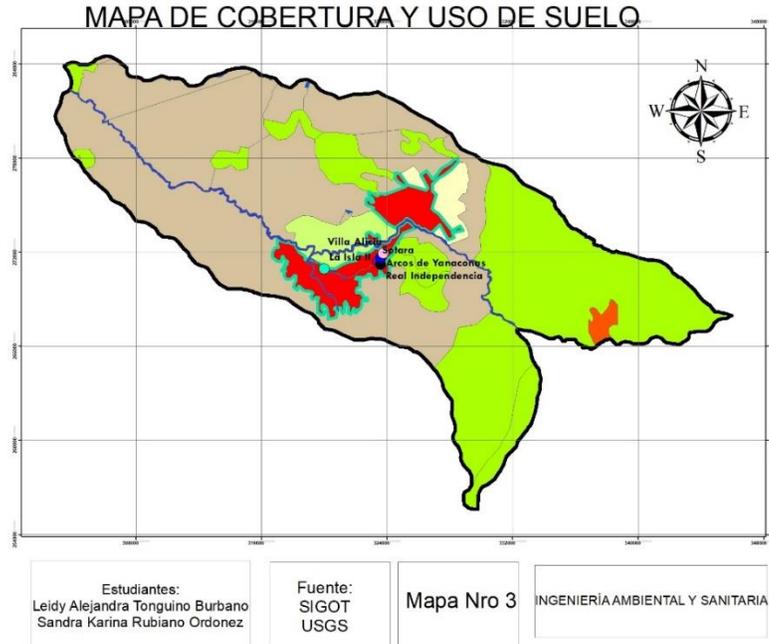
La siguiente tabla "Tabla 20 Base de datos clasificación cobertura vegetal y uso de suelo 1990" es la base de datos que indica la caracterización del uso del suelo y las coberturas naturales y antrópicas, además de la cantidad de áreas a la que cada una corresponde.

Tabla 20 Base de datos clasificación cobertura vegetal y uso de suelo 1990

CLASIFICACION	AREA (ha)
Bosque	17.406
Cuerpo de Agua	521
Pastos Limpios	2.073
Pastos y Espacios Naturales	26.827
Tejido Urbano	1.062
TOTAL ÁREA	47.889

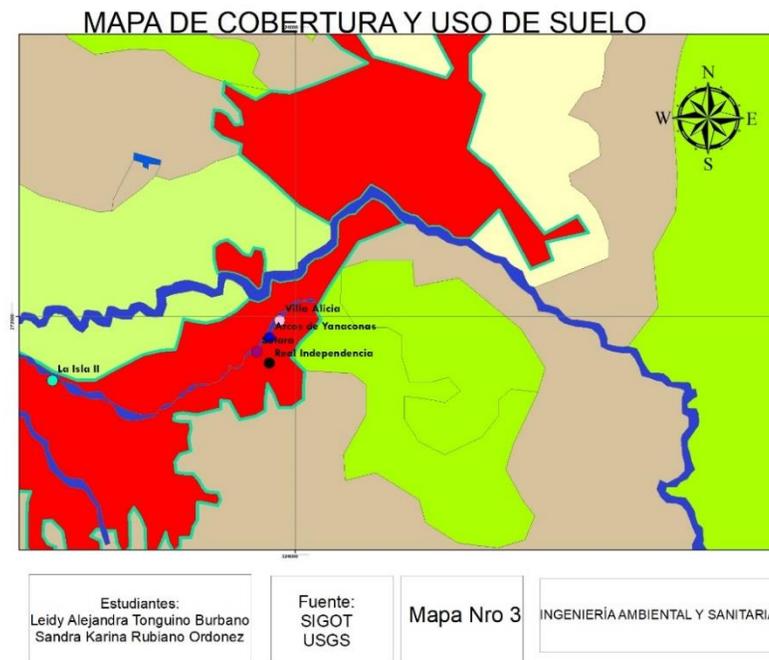
Fuente Propia

Ilustración 30 Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2019



Fuente Propia

Ilustración 31 Zoom mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2019



Fuente Propia

Ilustración 32 Leyenda mapa de cobertura vegetal y uso de suelo 2019



Fuente Propia

Tabla 21 Base de datos clasificación cobertura vegetal y uso de suelo 2019

CLASIFICACION	AREA (ha)
Bosque	17.474
Cuerpo de Agua	736
Cultivo transitorio	328
Cultivos	926
Pastos Limpios	1.405
Pastos y espacios naturales	24.172
Tejido urbano	2.952
TOTAL ÁREA	47.993

Fuente Propia

ANALISIS MULTITEMPORAL DE COBERTURA VEGETAL

Con la metodología CORINE LAND COVER se realizó la descripción de la cobertura de la tierra, la cual generó información sobre dinámicas de coberturas y cambios en el uso del suelo como se consiguió ver en el mapa “*Ilustración 27 Mapa de Cobertura Vegetal 1990*” y la “*Ilustración 30 Mapa de Cobertura Vegetal 2019*”. En la ciudad de Popayán en el año de 1990 el área de Bosque era de 17.406 *ha* mientras que en el año 2019 el área de bosque es de 17.474 *ha*, lo que

indicó un crecimiento actual del área de bosque en la ciudad, esto es debido a la gran importancia que le ha dado la sociedad a estos, ya que los bosque cumplen funciones importantes como: la regulación del clima, protección del suelo por absorción, desviación de las radiaciones, precipitaciones y vientos, conservación de la humedad y del dióxido de carbono al reducir la velocidad del viento, captación y almacenamiento de agua, absorción y transformación de energía radiante y termal, entre otras.

El cuerpo de agua tuvo un área de 521 *ha* en el año 1990 y en el año 2019 el área es de 736 *ha*, esto demostró que ha aumentado debido a muchos factores como el aumento de caudal (creciente) que se produce como consecuencia de factores meteorológicos como grandes y/o fuertes precipitaciones que aumentan repentinamente produciendo desbordamientos e inundaciones que afectan las zonas aledañas que se encuentran pobladas; otro factor es la erosión de la cuenca ya que son varias las causas que ayudan a la pérdida del suelo en cuencas, las de mayor efecto son: la deforestación debido a que esta reduce los tiempos de concentración del agua lluvia y aumenta el volumen de escurrimiento superficial, otra causa son las técnicas inadecuadas de cultivo que causan alteraciones en la compactación disminuyendo su porosidad y perdiendo las propiedades del suelo.

Del mismo modo, existen otras causas que pueden alterar la condición del equilibrio, por ejemplo: los cambios en el río debido a cortes de meandros que pueden ser causados por situaciones naturales o antrópicas, también los movimientos telúricos que cambian la configuración del terreno y el trazo del río.

El tejido urbano en el año 1990 ocupaba un área de 1.062 *ha* y en el año 2019 el área es de 2.952 *ha*, lo que indicó que la población ha aumentado significativamente debido a los procesos de reinserción, desplazamiento y conflicto armado que se vivió en la zona donde las familias de la parte rural migraban a la zona urbana con el fin de proteger a sus integrantes de la violencia y buscar nuevas oportunidades de vida, pero pese a este crecimiento urbano que se ha

dado las familias han tenido que buscar lugares donde asentarse y lo han hecho de manera ilegal, desconociendo las condiciones de los terrenos en los cuales viven como lo es el caso de las comunidades que se han asentado en las orillas de los ríos los cuales se encuentran más susceptibles a fenómenos naturales como inundaciones y deslizamientos; en consecuencia la subcuenca río Molino cuenta con 8 corregimientos, 10 veredas y 4 comunas urbanas, en donde existen diferentes grupos poblacionales asentados como campesinos e indígenas en la zona rural y comunidades urbanas, quienes dependiendo de su sentido de pertenencia y necesidades degradan en mayor o menor medida los recursos de los que dependen.

Pese a este crecimiento urbano que se ha dado en la actualidad el área de pastos limpios ha disminuido notablemente, pasa de tener un área de 2.073 *ha* en el año 1990 a tener un área de 1.405 *ha* en el año 2019, lo que denota que esta disminución se debe al crecimiento poblacional de la ciudad y a la actividad ganadera y agrícola utilizando técnicas tradicionales sin tener en cuenta la vocación de los suelos, así como hacen con la deforestación para obtener leña para combustible y viviendas sin saneamiento básico.

Además se puede notar que en el año 2019 existen cultivos con un área de 926 *ha* y cultivos transitorios con un área de 328 *ha*, este aumento se presentó debido a la ganadería extensiva, además esta actividad la combinan con sembrados pequeños de pan coger como mora, arveja, algunas hortalizas y papa, por ende la actividad económica dominante es la ganadería, además cabe resaltar que en la actualidad el gobierno implementó el Programa Nacional Integral para la Sustitución de Cultivos Ilícitos – PNIS desarrollado en Colombia para resolver el fenómeno de las drogas ilícitas de la mano con las comunidades brindando apoyo a las actividades agrícolas, ya que esta busca la sustitución de cultivos ilícitos de manera voluntaria para que las familias que se dedican a esta labor cuenten con otra alternativa para generar un cambio en las condiciones sociales y económicas de las comunidades.

Debido al crecimiento demográfico que ha tenido Popayán, se logró estimar que la ciudad desde el año 1990 hasta el año 2019 ha tenido un aumento de 104 *ha*, parte de este crecimiento se ha distribuido cerca a las riberas de la subcuenca río Molino, en la zona urbana (parte media) y en la zona rural.

Con la metodología aplicada en esta investigación se encontró entre los años 1990 y 2019 un aumento de área en el tejido urbano en todas las zonas priorizadas de 1890 *ha*, las zonas fueron: Arcos de Yanacónas, Real Independencia, Sotara, la Isla II y Villa Alicia, al igual aumentó el área del cuerpo de agua de la subcuenca río Molino con 215 *ha*, pero se observó una disminución del área total en pastos y espacios naturales de 2655 *ha* y en los pastos limpios la disminución fue de 668 *ha*, y finalmente se observó la aparición del área de cultivos con 926 *ha*, y cultivos transitorios con 328 *ha*.

Observando el mapa *“Ilustración 28 Zoom clasificación cobertura vegetal y uso de suelo 1990 e “ilustración 31 Zoom clasificación cobertura vegetal y uso de suelo 2019”*, se alcanzó a notar que para el año 1990 los sectores que ocupan actualmente los barrios de Sotara, Real Independencia, Arcos de Yanacónas y Villa Alicia se encontraban con cobertura vegetal de pastos y espacios naturales, según el mapa del zoom del año 2019 los sectores hoy en día tienen una gran proporción de tejido urbano, lo que nos indica que la zona ha sido deforestada debido al aumento de población o a la masiva migración de personas en busca de nuevas oportunidades, frente a dicha problemática no existe otra opción que deforestar zonas para asentamiento humano y así satisfacer la necesidades del hombre. En la visita de verificación a los sectores se observó la presencia de viviendas a menos de treinta metros de la ribera del río, hoy en día los barrios hacen parte de la comuna 3 de la ciudad de Popayán y cuentan con todos los servicios vitales que son fundamentales para el funcionamiento de la sociedad.

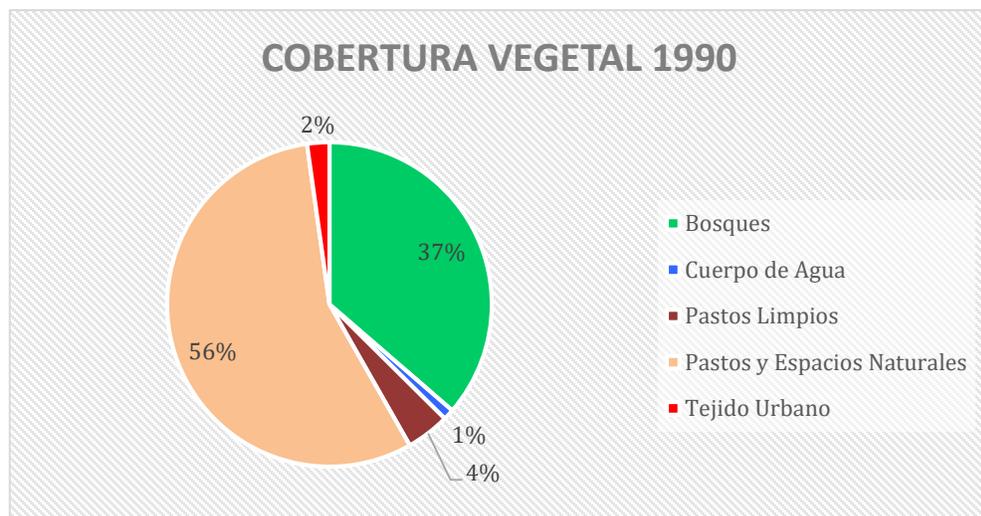
Por último el barrio la Isla en el año 1990 presentaba un área de pastos limpios y en el año 2019 el sector cuenta con un amplio tejido urbano el cual ha sido producto de invasiones que se han asentado de manera indebida en el sector sin

conocer los riesgos que les presenta estar ubicados en esta riesgosa zona incumpliendo además con lo estipulado en el Decreto 2811 de 1974 el artículo 83 “una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho”, tal y como se observó en la visita de verificación en el sector ya se han presentado deslizamientos, por ende ya se han reubicado algunas viviendas. La oficina de gestión del riesgo está liderando un proyecto para la realización de un muro de contención para proteger las residencias que se encuentran a la ribera de la subcuenca río Molino y así evitar pérdidas humanas, económicas y socio - ambientales.

Todas las zonas priorizadas cuentan con abundante cobertura vegetal a la ribera de la subcuenca río Molino, existen árboles nativos y frutales, además de cercas vivas que son plantadas por sus habitantes para ayudar a proteger el terreno de erosión hídrica.

TABLA Y GRAFICO ESTADISTICO CLASIFICACION MULTITEMPORAL COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO

Grafico 3 Cobertura vegetal y uso de suelo 1990



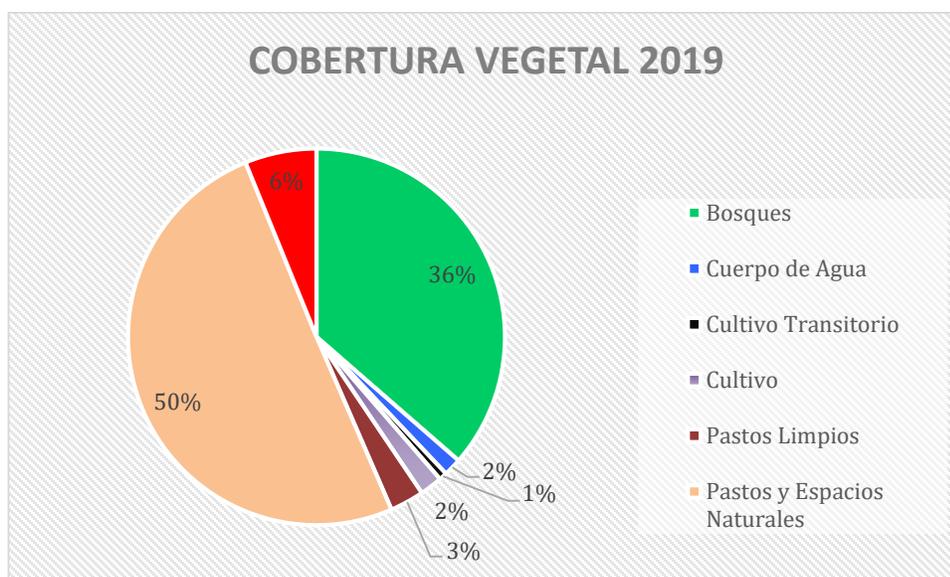
Fuente Propia

Tabla 22 Base de datos clasificación cobertura vegetal y uso de suelo 1990

CLASIFICACION	AREA (ha)	PORCENTAJE (%)
Bosques	17406	37
Cuerpo de Agua	521	1
Pastos Limpios	2073	4
Pastos y Espacios Naturales	26827	56
Tejido Urbano	1062	2
TOTAL	47889	100

Fuente Propia

Grafico 4 Cobertura vegetal y uso de suelo 2019



Fuente Propia

Tabla 23 Base de datos clasificación cobertura vegetal y uso de suelo 2019

CLASIFICACION	AREA ha	PORCENTAJE %
Bosques	17474	36
Cuerpo de Agua	736	2
Cultivo Transitorio	328	1
Cultivo	926	2
Pastos Limpios	1405	3
Pastos y Espacios Naturales	24172	50
Tejido Urbano	2952	6
TOTAL	47993	100

Fuente Propia

ANALISIS ESTADISTICO MULTITEMPORAL DE COBERTURA VEGETAL

Se realizó la comparación de la clasificación de cobertura vegetal presente en el año 1990 y 2019, por la cual se logró determinar mayor porcentaje (37%) en bosques y (56%) en pastos y espacios naturales para el año 1990, en cuanto a las demás áreas se pudo notar que existió menor porcentaje en pastos limpios (4%), tejido urbano (2%) y cuerpo de agua (1%).

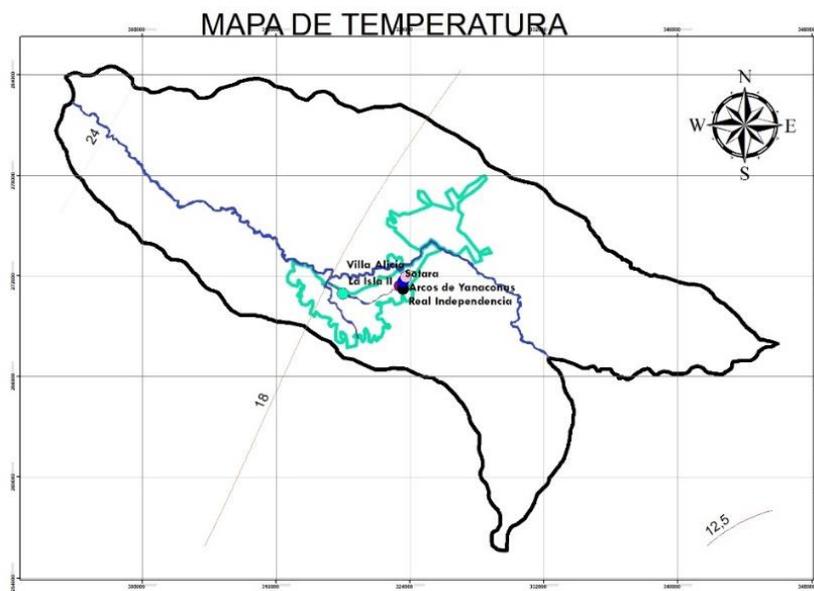
Por otro lado, para el año 2019 disminuyeron los porcentajes de algunas áreas, el área de bosques se redujo a (36%), los pastos y espacios naturales (50%) y los pastos limpios (3%), para las demás áreas el porcentaje aumentó, como es el caso del tejido urbano (6%) y cuerpo de agua (2%).

Finalmente comparando los dos círculos estadísticos y los mapas de los diferentes años (1990 y 2019), se notó que en el año 2019 aparecieron dos áreas con un bajo porcentaje, estas son: cultivos transitorios (1%) y cultivos (2%).

4.2.4 Temperatura anual Popayán - Cauca

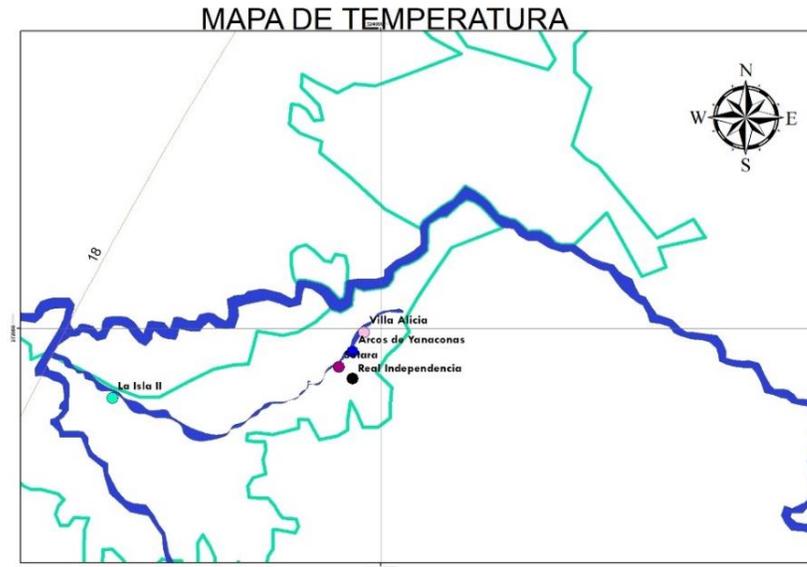
La ilustración “Ilustración 33 Mapa temperatura 2018” presentada a continuación denota el mapa y el zoom que indica la temperatura anual de la ciudad de Popayán para el año 2018, donde delimita el tejido urbano y la subcuenca río Molino e indica las zonas priorizadas con el fin de observar el registro de temperatura de cada barrio.

Ilustración 33 Mapa temperatura 2018



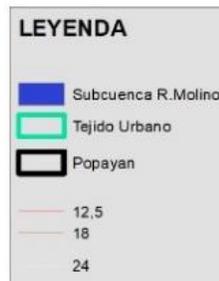
Fuente Propia

Ilustración 34 Zoom mapa temperatura 2018



Fuente Propia

Ilustración 35 Leyenda mapa temperatura 2018



Fuente Propia

ANALISIS TEMPERATURA ANUAL POPAYAN - CAUCA

La ciudad de Popayán está ubicada en el departamento del Cauca, geográficamente se encuentra ubicada en el Valle de Pubenza, entre la Cordillera Occidental y Central al occidente del país, su ubicación hace que se presenten diferentes pisos térmicos y debido a esto su clima es templado; además presenta dos temporadas que son la temporada templada que va desde el mes de Julio hasta Septiembre y la temporada fresca que va desde Octubre al mes de

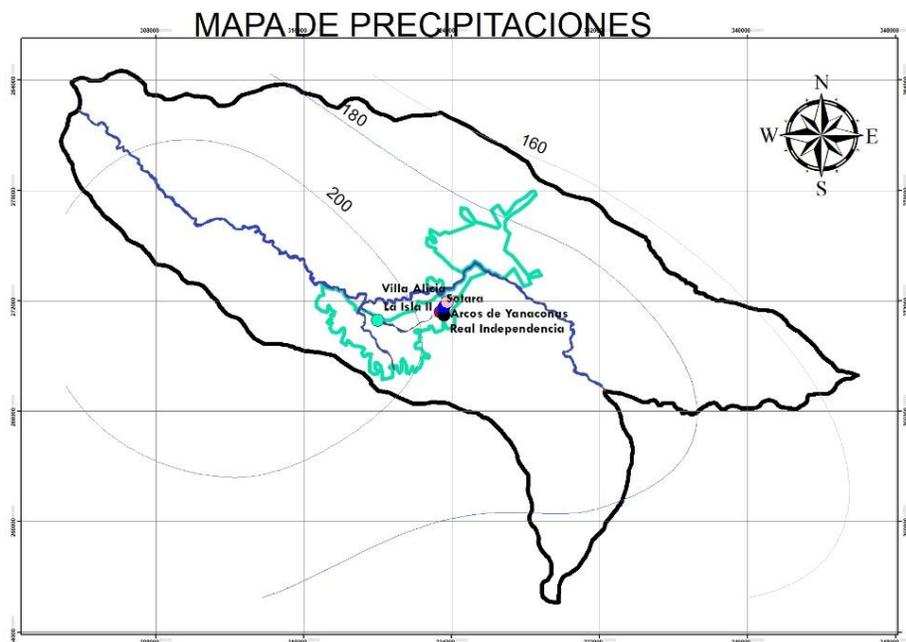
Diciembre y como nos muestra la “Ilustración 33 mapa temperatura 2018” Popayán presenta una temperatura anual de 24° a 12,5° anuales.

Como se logró apreciar en el mapa “Ilustración 34 zoom mapa temperatura 2018”, los barrios que se priorizaron en la subcuenca del río Molino presentan una temperatura que oscila entre 18° a 12,5° anuales, estos barrios fueron: la Isla, Villa Alicia, Arcos de yanacunas, Sotara y Real independencia.

Precipitación Popayán – Cauca

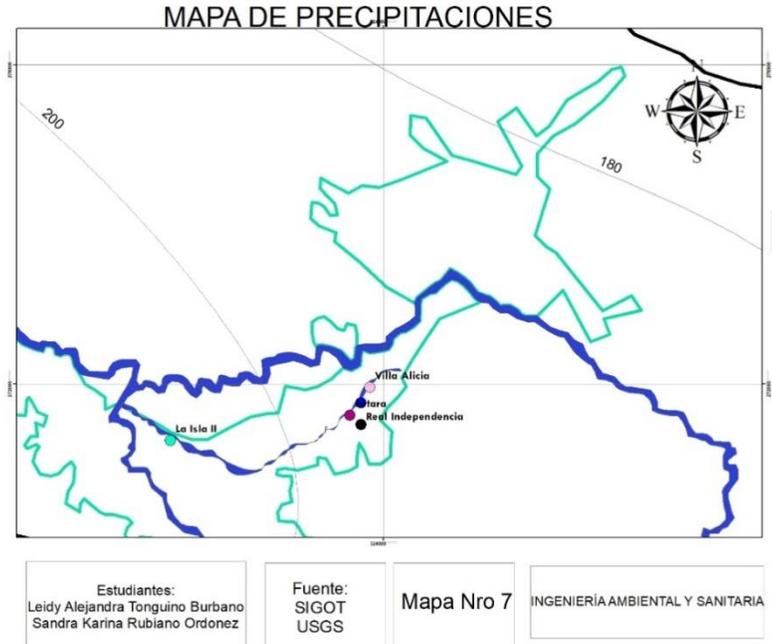
El mapa que se observa a continuación en la siguiente ilustración “Ilustración 36 Mapa de precipitación anual barrios priorizados” con su respectivo zoom “Ilustración 37 Zoom mapa de precipitación anual barrios priorizados” corresponde a la precipitación anual con la que cuenta Popayán para los barrios priorizados, en este se puede determinar la cantidad de lluvia en mm de agua caídos.

Ilustración 36 Mapa de precipitación anual barrios priorizados



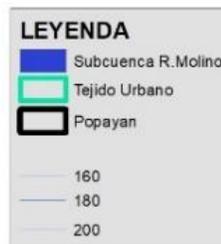
Fuente Propia

Ilustración 37 Zoom mapa de precipitación anual barrios priorizados



Fuente Propia

Ilustración 38 Leyenda mapa de precipitación anual barrios priorizados



Fuente Propia

ANALISIS DE PRECIPITACION POPAYAN - CAUCA

La ciudad de Popayán presenta una gran variabilidad en la distribución de las lluvias y cuenta un régimen de lluvia biomodal con una temporada seca muy marcada hacia los meses de Junio, Julio y Agosto y una temporada lluviosa principal en los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre. Adicionalmente, se registran dos temporadas secundarias: en los meses de Enero y Febrero las lluvias disminuyen y en el periodo de Marzo a Mayo, se incrementan.

Según la “*Ilustración 36 Mapa de precipitación anual*” en Popayán se presenta una precipitación anual que oscila entre 160 mm/año a 400 mm/año y teniendo en cuenta lo que se consiguió observar los barrios Arcos de yanacunas, Real independencia, Sotara y Villa Alicia presentan una precipitación de 180 - 200 mm/año y el barrio Isla II presenta una precipitación de 200 – 400 mm/año; la localización de los barrios y la precipitación que reciben los hacen más vulnerables a los movimientos de remoción en masa debido a que están cerca de la subcuenca río molino y sus laderas son inestables, además cabe resaltar que dichos barrios no cumplen con lo estipulado en el Decreto 2811 de 1974 el artículo 83 “una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho”.

Finalizando, en la siguiente tabla “*Tabla 24 Variables identificadas según las zonas priorizadas*”, se observan las variables analizadas durante la investigación las cuales son de gran importancia para cada zona priorizada.

Tabla 24 Variables identificadas según las zonas priorizadas

BARRIOS VARIABLES	SOTAR A	REAL INDEPEN DENCIA	LA ISLA	ARCOS DE YANACONAS	VILLA ALICIA
PENDIENTE(°)	7-14	27-37	27-37	2-4	14-27
TIPO DE SUELO	Frío y superhmedo				
COBERTURA VEGETAL	Tejido urbano				
PRECIPITACION (mm/año)	180-200	180-200	200-400	180-200	180-200

Fuente Propia

4.3 PRINCIPALES VARIABLES A CONSIDERAR PARA INCLUIR EN EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA (SAT) DE LA SUBCUENCA DEL RÍO MOLINO

Aplicando la metodología explicada anteriormente se presentan a continuación los resultados obtenidos para cada fase.

4.3.1 Fase I: Variables con alto porcentaje a ocurrencia de movimientos en masa

Según estudios realizados por el IDEAM [13], se demuestra en porcentaje el grado de importancia de cada variable: Pendiente (40%) que está muy relacionada con la ocurrencia de movimientos en masa debido a que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad (proporciona el grado de inclinación de la ladera), además se relaciona directamente con las tensiones de cortes tangenciales y normales en la formación superficial y en suelos, puede experimentar un mayor número de ciclos hielo/deshielo o húmedo/seco, lo cual puede reducir la resistencia del suelo y hacer el área más susceptible a deslizamientos. Generalmente las pendientes más pronunciadas tienen mayor probabilidad de deslizamientos, también el Tipo de suelo (76.75%) ya que es la entrada y el regulador inicial de la precipitación pluvial en el ecosistema, el movimiento del agua tiende a modificar el estado de la materia y la energía del suelo afectando sus propiedades y esfuerzos pero sin alterar su naturaleza, así mismo la Cobertura vegetal (100%), debido a que es una interacción de la dinámica natural geológica, clima y sistemas de comunidades bióticas, interrumpida por el hombre para su supervivencia y desarrollo, dicha interrupción genera o contribuye a la aparición de diferentes procesos como afectación en la evolución de las especies, deterioro de ecosistemas, cambios en el patrón de ciclos hidrológicos y cambios en las formas del relieve, lo anteriormente mencionado explicó la gran incidencia que estas variables tienen a la hora de la detonación de un movimiento en masa.

En cuanto a la búsqueda de información primaria, otro factor detonante que se logró encontrar según “FORMULACIÓN DEL PLAN MUNICIPAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN” [87], fue la Precipitación ya que con la frecuencia de esta provoca que el suelo llegue al límite de saturación y la presión de los poros induzca a una disminución de la resistencia del suelo que a su vez puede activar un deslizamiento; teniendo en cuenta que en zonas en donde la precipitación media anual sea alta y la temperatura media anual sea baja la humedad del suelo es mayor, lo cual contribuye en mayor medida a la generación de movimientos en masa.

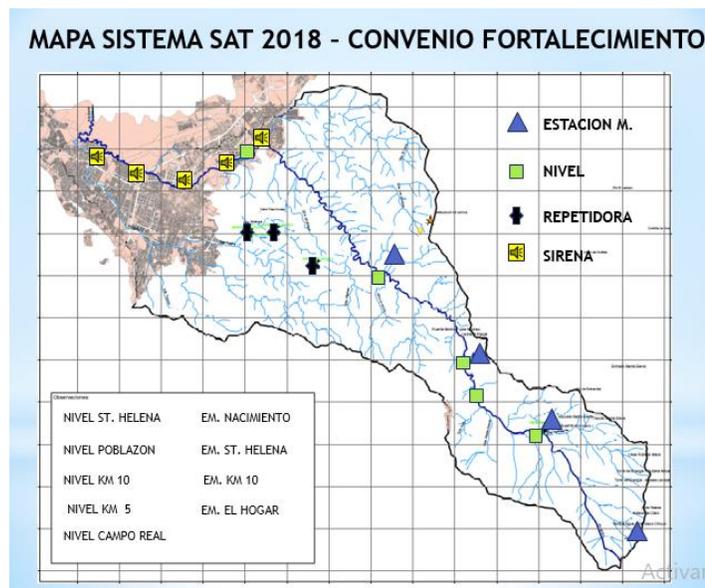
4.3.2 Fase II: Variables meteorológicas que manejan los SAT (Popayán, Medellín y Manizales)

- Sistema de Alerta Temprana de POPAYAN

Los criterios que actualmente analiza el Sistema de Alerta Temprana (SAT) del río Molino son los cuatro componentes fundamentales contemplados en la guía para la implementación emitida por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo. Componente N°1 detección y pronóstico de amenazas: Instalación de hardware hidrometeorológico (sensores del nivel de lámina de agua y estación pluviométrica), Componente N°2 evaluación de los riesgos e integración de la información: software administrativo SAT, Componente N°3 divulgación oportuna, confiable y comprensible: Equipos hardware complementarios, Componente N°4 planificación, preparación y capacitación para la respuesta en todo nivel (institucional y comunitario).

A continuación, en la “*Ilustración 39 Sistema SAT 2018 Popayán*”, se logra apreciar el mapa de amenaza subcuenca río Molino, donde se encuentra ubicado el SAT de Popayán, en este señala las estaciones meteorológicas, el nivel de la lámina de agua, repetidora y las sirenas.

Ilustración 39 Sistema SAT 2018 Popayán



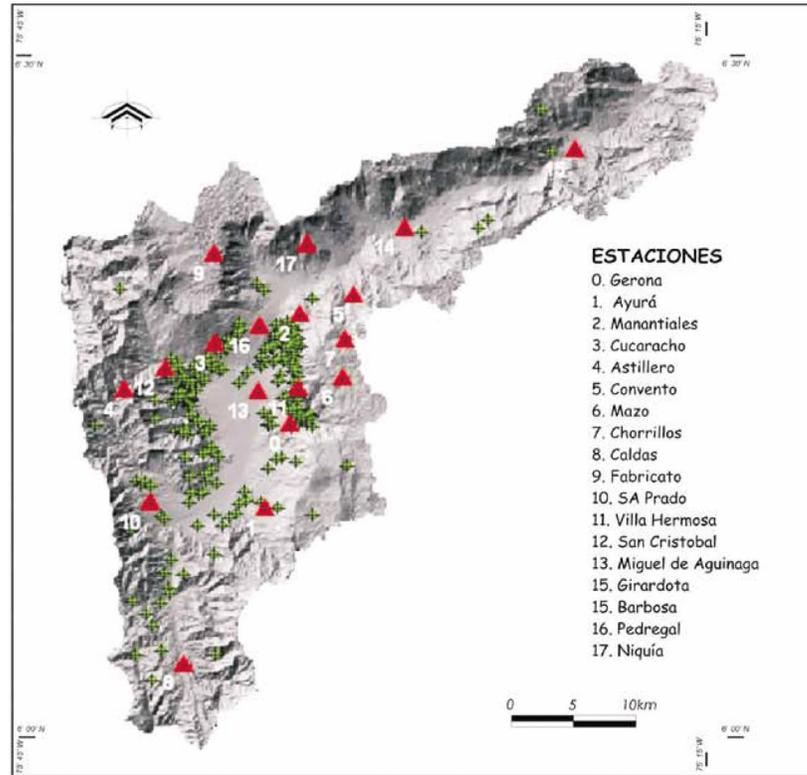
Fuente Oficina Gestión del Riesgo, Alcaldía Popayán

- Sistema de Alerta Temprana de Medellín y Valle de Aburrá

El SIATA monitorea constantemente variables atmosféricas, las cuencas y las laderas de la región a través de la Red Pluviométrica, Red Meteorológica, Red de Sensores de Nivel, Red de Humedad del suelo y Red Acelerográfica. Adicionalmente el SIATA opera un radar meteorológico y un radiómetro microondas. Toda la información generada en el proyecto se disemina y se actualiza de manera automática y en tiempo real en www.siata.gov.co y se comparte a través de diferentes redes sociales, siendo twitter y youtube las herramientas que han permitido llegar a la comunidad de manera directa.

A continuación, en la “Ilustración 40 Sistema SIATA, Medellín”, se puede apreciar la distribución de movimientos en masa en el valle de Aburra durante los últimos 20 años y ubicación de las estaciones de precipitación de EPM. Los triángulos representan las estaciones de lluvia y los movimientos en masa están representados por círculos con cruces.

Ilustración 40 Sistema SIATA, Medellín



Fuente: Sistema de alerta temprana por movimientos en masa inducidos por lluvia para el valle de Aburrá, Colombia, revista Scielo 2010

- Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas

El SIMAC está compuesto por una serie de estaciones hidrometeorológicas (6), que incluyen un pluviómetro, un termómetro y un sensor que monitorea los niveles del agua en las quebradas junto a otras estaciones de alarma sonora (6) que permiten transmitir información oportuna e instrucciones en caso de emergencia.

A continuación, en la “Ilustración 41 Sistema SIMAC Manizales”, se puede observar el mapa general de ubicación de la red de estaciones Meteorológicas, Hidrometeorológicas, de Alerta y Alarma (SAT) de las quebradas Manizales, El Guamo y Olivares.

Tabla 25 Comparación variables estudiadas VS variables SAT

VARIABLES ELEGIDAS	VARIABLES SAT POPAYAN	VARIABLES SIATA MEDELLIN	VARIABLES SIMAC MANIZALES
Pendiente (Grados de inclinación, descripción del relieve, susceptibilidad según el tipo de relieve)	Estación hidrométrica (sensores del nivel de lámina de agua)	Variables meteorológicas	Radiación solar
			Velocidad del viento
			Dirección del Viento
			Presión atmosférica
			Evapotranspiración
Tipo de suelo (Tipo de clima)		Variables hidrológicas	Temperatura
Cobertura vegetal (Cubierta biofísica)	Estación pluviométrica (mide la cantidad de precipitación en mm)	Calidad del aire	Humedad relativa
Precipitación (Estaciones meteorológicas)			Precipitación

Fuente Propia

4.3.3 Fase III: Variables a considerar para incluir en el Sistema de Alerta Temprana de la subcuenca del Río Molino

Una vez realizado los estudios pertinentes y búsqueda de información relacionada con el tema de investigación, se logró deducir que para que el sistema de alerta temprana tenga un mayor grado de efectividad a la hora de dar aviso ante un evento de deslizamiento de tierra, se deben considerar para incluir al actual SAT de la subcuenca río Molino de Popayán las siguientes variables constantes: Pendiente, Tipo de suelo, Cobertura vegetal y Precipitación, debido a la importancia mencionada anteriormente que cada una que estas tienen, también se considera importante incluir las siguientes variables hidrometereologicas y

meteorológicas debido a que estas miden las variables asociadas al comportamiento de la atmosfera: Humedad relativa, Velocidad y dirección del viento, Presión atmosférica, Radiación solar y Evapotranspiración.

Estas variables fueron elegidas por medio del cuadro comparativo y fueron escogidas debido a los distintos parámetros que manejan los SAT de Medellín y Manizales, ya que actualmente el sistema de alerta temprana de la subcuenca río Molino de Popayán los tipos de parámetros que mide son: Estación hidrométrica (sensores del nivel de lámina de agua) y Estación pluviométrica (mide la cantidad de precipitación en mm), y de acuerdo al análisis se determinó que se debe incluir humedad relativa, ya que el actual sistema mide la cantidad de precipitación pero no mide humedad y la humedad es importante porque de ella depende la saturación del suelo, lo que hace que la zona corra el riesgo de que se presenten deslizamientos de tierra, también incluir velocidad y dirección del viento debido a que el viento es un eficaz agente de erosión de materiales finos y sueltos que son capaces de levantar, arrancar y transportar partículas finas como arcillas y limos lo que ocasiona el debilitamiento del terreno, de esta forma ayudan a provocar el movimiento en masa junto con la influencia que tiene la topografía del terreno y la eficacia protección de la vegetación; en cuanto al actual SAT de Popayán cuenta con la estación hidrometeorológica la cual mide por medio de sensores los niveles de lámina de agua, al igual que la estación pluviométrica, sin embargo se considera indispensable agregar variables meteorológicas como la presión atmosférica y la radiación solar ya que estos rayos UV al ser tan intensos van directamente hacia el suelo provocando poros en el mismo empeorando en las alturas de la cordillera porque hay menos margen de atmósfera, debido a que los niveles de calor a medida que aumentan deterioran la capa de ozono, lo que combinado con la falta de viento y la alta humedad aumentan la presión atmosférica ocasionando junto con el clima y las lluvias un desprendimiento de tierra que al caer sobre los ríos provocan desbordamiento, así como al llegar a las alturas se condensa generando

abundantes precipitaciones, por ende los eventos de movimientos en masa; finalmente el poder evaporante de la atmósfera se caracteriza por la cantidad de agua que la atmósfera es capaz de absorber si dispone de toda el agua necesaria bajo determinadas condiciones meteorológicas como las variables mencionadas y analizadas anteriormente, el SAT de Popayán cuenta con evaluación de los riesgos mediante un pluviómetro pero le hace falta una medida de evaporación, a pesar de que es una magnitud difícil de medir se debería buscar un proceso que represente las condiciones medias de una región determinada, en este caso en las zonas priorizadas para que de esta forma el poder evaporante de la atmosfera influya en la transpiración de las plantas y la humedad del suelo, estas al estar tan secas las raíces no pueden absorber agua desde el suelo y va a ocasionar el deterioro de la cobertura vegetal lo que hace que la zona sea más propensa a deslizamientos de tierra; estos mencionados anteriormente son los criterios que manejan los otros sistemas, se consideran necesarios por lo cual se proponen para que se incluyan en el actual SAT de Popayán.

Debido a la importancia de cada variable para la detonación de movimientos de remoción en masa se considera de gran importancia incluir las variables anteriormente mencionadas en el Sistema de Alerta Temprana para la subcuenca río Molino de la ciudad de Popayán, para obtener una herramienta técnica y confiable que soporte la reducción de riesgos y la preparación ante desastres, con el objetivo de proteger a las personas y sus medios de vida expuestos a peligros.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Las áreas elegidas a priorizar son tomadas de los escenarios de riesgo del municipio y la información oficial que tiene la oficina de Gestión del Riesgo en la Alcaldía de Popayán, en cuanto a la localización de las áreas para el análisis de las variables que influyen en los movimientos de remoción en masa en la subcuenca del Río Molino se contó con el mapa de *AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA*, el cual permitió observar el nivel de amenaza por deslizamientos de tierra que presenta la parte alta, media y baja de la subcuenca, en base a esto se priorizaron los barrios que se encuentran mayormente vulnerables a deslizamientos y se hizo la respectiva verificación de campo para cada una de las zonas.
- Luego de realizar una búsqueda exhaustiva de la principales variables que influyen en los movimientos de remoción en masa se logró determinar que existen factores geomorfológicos, suelos y cobertura de la tierra, los cuales poseen diferentes variables con diversos grados de importancia dados en porcentajes, como lo es el caso de la variable Pendiente con un 40% según el factor geomorfológico, ya que proporciona el grado de inclinación de la ladera y de esta forma determina la velocidad del deslizamiento. El factor suelo con la variable Tipo de suelo que tiene un 76,75% de importancia, puesto que permite la entrada y regulación inicial de la precipitación pluvial en el ecosistema modificando y afectando el estado de la materia y sus propiedades. La Cobertura Vegetal que posee un 100% dado que permite conocer que tan protegido se encuentra el suelo del impacto del agua. Por último la Precipitación, teniendo en cuenta que afecta la estabilidad de las laderas ocasionando un desprendimiento de la tierra cuando el suelo está completamente saturado de agua.

- Teniendo en cuenta los antecedentes de algunos de los Sistemas de Alerta Temprana de Colombia, se ve necesario realizar una comparación entre el SAT del Río Molino de la ciudad de Popayán y los sistemas de alerta temprana de la ciudad de Medellín y Manizales para determinar las principales variables a incluir en el SAT de la subcuenca Río Molino de la ciudad de Popayán. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se seleccionaron cuatro variables constantes a incluir que son: Pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal y Precipitación; y cinco variables hidrometeorológicas y meteorológicas que son: Humedad relativa, Velocidad y dirección del viento, Presión atmosférica, Radiación solar y Evapotranspiración; con el fin de hacer del SAT de Popayán un sistema más eficiente que ayude a la toma de decisiones basadas en información y la intervención oportuna de los organismos de respuesta teniendo accesibilidad a la información en tiempo real.
- La clasificación de susceptibilidad del territorio a los movimientos de masa desarrollado y propuesto para la parte media de la subcuenca río Molino que fue la zona de estudio muestra un grado de correlación medio con respecto a un inventario de movimientos en las zonas priorizadas. El índice de movimientos de masa por clase de susceptibilidad (muy baja, media y alta), indica que se trata de sectores que se encuentran en riesgo a deslizamientos de tierra.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda verificar con exactitud la información tanto teórica como cartográfica que brindan las instituciones, debido a que estas no pueden estar actualizadas o pueden tener algún error que provoca inconvenientes a la hora de aplicar estos documentos a dicha investigación.

- Es necesario profundizar en los factores detonantes de los movimientos de remoción en masa que se puedan incluir en los sistemas de alerta temprana, puesto que la información relacionada con el tema es muy escasa y las instituciones que tienen información muchas veces tardan en dar respuesta.
- Se debe desarrollar la capacidad de análisis del riesgo a nivel de todas las instituciones involucradas con la finalidad de tomar decisiones en el ordenamiento y desarrollo territorial referente a la subcuenca del río Molino.
- Se recomienda incluir las variables (pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal, precipitación, variables meteorológicas y variables hidrometeorológicas) en el sistema de alerta temprana de la subcuenca Río Molino de la ciudad de Popayán con el fin de brindar información oportuna y eficaz para la reducción del riesgo y la preparación ante desastres.
- Mejorar la capacidad de difusión de la información e incrementar los esfuerzos y las acciones en las comunidades vulnerables, así como ampliar la red de estaciones del sistema de alerta temprana de la ciudad de Popayán sobre la subcuenca Río Molino.
- Tener en cuenta los diferentes aportes que se realizan de procesos investigativos para el mejoramiento de los sistemas de alerta temprana que puedan hacer del SAT un sistema más eficiente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Vega Mora y F. J. Díaz, «Evaluación integral del riesgo volcánico del Cerro Machín, Colombia», *Investig. Geográficas*, n.º 81, pp. 66-78, ago. 2013.
- [2] O. Echeverri y Y. Valencia, «Análisis de los deslizamiento en la cuenca de la Quebrada La Iguana de la ciudad de Medellín a partir de la integración lluvia _pendiente_ formación geológica», *Dyna*, vol. 71, n.º 142, pp. 33-45, 2004.
- [3] «Concepto de Deslizamientos, Avalanchas y Movimientos de Tierra: Desastres Naturales en los que Interviene el Suelo | Un Universo invisible bajo nuestros pies». .
- [4] K. M. Scott, J. L. Macias, J. A. Naranjo, S. Rodriguez, y J. P. McGeehin, «Catastrophic debris flows transformed from landslides in volcanic terrains: mobility, hazard assessment and mitigation strategies», USGS Numbered Series 1630, 2001.
- [5] «Construcción del riesgo, desastre y gestión ambiental urbana. (Perspectivas en debate)», *ResearchGate*. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/237704117_Construccion_del_riesgo_desastre_y_gestion_ambiental_urbana_Perspectivas_en_debate. [Accedido: 25-feb-2019].
- [6] R. Ardila, «Calidad de vida: una definición integradora: una definición integradora», *Rev. Latinoam. Psicol.*, vol. 35, n.º 2, pp. 161-164, 2003.
- [7] A. H. Y, «FLUJOS DE BARRO EN LA ZONA PREANDINA DE LA REGION METROPOLITANA: CARACTERISTICAS, CAUSAS, EFECTOS, RIESGOS Y MEDIDAS PREVENTIVAS», *Andean Geol.*, vol. 0, n.º 24, ago. 2010.
- [8] J. Lugo-Hubp *et al.*, «Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: Causa y efectos», *Rev. Mex. Cienc. Geológicas*, vol. 22, n.º 2, pp. 212-228, 2005.
- [9] L. C. Bolaños Martínez y F. J. Castro Caicedo, «Evaluación de la implementación de sistemas automatizados de alerta temprana en tiempo real dirigidos a disminuir los riesgos que representan las amenazas por inundaciones y avenidas torrenciales en la subcuenca Rio Molino, municipio de Popayán, departamento del Cauca», 2016.
- [10] «Instituto Geográfico Agustín Codazzi», *Canal institucional*. [En línea]. Disponible en: <https://www.canalinstitucional.tv/tags/instituto-geografico-agustin-codazzi>. [Accedido: 25-feb-2019].
- [11] L. Villaquirán López, «Identificación de las condiciones naturales y antrópicas que generan riesgo por inundación del río Molino en el municipio de Popayán-Colombia.», may 2017.
- [12] «Consejo Extraordinario Departamental de Gestión del Riesgo de Desastres». [En línea]. Disponible en: <http://www.crc.gov.co/index.php/622-consejo-extraordinario-departamental-de-gestion-del-riesgo-de-desastres>. [Accedido: 25-feb-2019].

- [13] «METODOLOGÍA PARA LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD GENERAL DEL TERRENO A LOS MOVIMIENTOS EN MASA». [En línea]. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152732/Metodologia+suscept+FRM_oficial_final.pdf/6ded04e2-9378-440f-8902-2e6c92fcc745. [Accedido: 25-feb-2019].
- [14] «El 80% de la población colombiana habita bajo riesgo geológico». [En línea]. Disponible en: <https://www.catorce6.com/actualidad-ambiental/regionales/17118-el-80-de-la-poblacion-colombiana-habita-bajo-riesgo-geologico>. [Accedido: 06-jun-2019].
- [15] «Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento del Cauca | Casa del Cauca». .
- [16] C. C. G. PAOLA ANDREA RUIZ, «FORMULACIÓN DEL PLAN MUNICIPAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN». [En línea]. Disponible en: <https://mail.google.com/mail/u/0/?tab=rm#inbox/FMfcgwxwCgzGdDvRzCgtCZptnMrQspdG?projector=1>. [Accedido: 06-jun-2019].
- [17] «Medidas de seguridad en caso de Derrumbe o Deslizamiento». [En línea]. Disponible en: <https://www.cne.go.cr/index.php/gestireventiva-la-instituci40/36-educacion-y-asesoria/79-derrumbe>. [Accedido: 25-feb-2019].
- [18] J. C. B. Liliana Recaman, «Plan de Ordenacion y Manejo subcuenca Rio Molino», *studylib.es*. [En línea]. Disponible en: <https://studylib.es/doc/7454481/plan-de-ordenacion-y..> [Accedido: 25-feb-2019].
- [19] «Plan de Ordenamiento Territorial, POT». [En línea]. Disponible en: <http://www.popayan.gov.co/ciudadanos/la-alcaldia/planeacion-gestion-y-control/plan-de-ordenamiento-territorial-pot>. [Accedido: 02-mar-2019].
- [20] A. Marcano, «Metodología para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa desencadenados por la sismicidad», *Rev. Investig.*, vol. 40, n.º 87, pp. 149-174, abr. 2016.
- [21] M. Quira y Y. Samira, «Zonificación de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la cuenca del río Patía–departamento del Cauca», jun. 2017.
- [22] J. H. C. Acosta, «Las avenidas torrenciales: una amenaza potencial en el valle de Aburrá.», *Gest. Ambiente*, vol. 14, n.º 3, pp. 45-50, sep. 2011.
- [23] H. V. Sierra, «Geografía Económica Colombiana», *Rev. Fac. Derecho Cienc. Políticas*, vol. 1, n.º 1, pp. 56-66, 1950.
- [24] «INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI - IGAC». [En línea]. Disponible en: http://www2.igac.gov.co/igac_web/contenidos/plantilla_productos_mapa.jsp?idMenu=131. [Accedido: 02-mar-2019].
- [25] G. Medina y J. David, «Modelamiento morfométrico y análisis multitemporal del uso del suelo y cobertura vegetal de la subcuenca del río Molino ubicada en el municipio de Popayán, departamento del Cauca, utilizando la metodología Corine Land Cover con imágenes de sensores remotos.», oct. 2015.

- [26] «La avalancha de Popayán era una tragedia anunciada», 26-dic-2013. [En línea]. Disponible en: <https://diariodelcauca.com.co/noticias/nacional/la-avalancha-de-popay%C3%A1n-era-una-tragedia-anunciada-68807>. [Accedido: 14-ago-2019].
- [27] «resolucion-0883-crc.pdf». [En línea]. Disponible en: <http://acueductopopayan.com.co/wp-content/uploads/2012/08/resolucion-0883-crc.pdf>. [Accedido: 13-ago-2019].
- [28] «Resolucion-0509-de-2013.pdf». [En línea]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/cuencas-hidrograficas/Resolucion-0509-de-2013.pdf>. [Accedido: 04-mar-2019].
- [29] «colombia_99-93.pdf». [En línea]. Disponible en: http://www.oas.org/dsd/fida/laws/legislation/colombia/colombia_99-93.pdf. [Accedido: 04-mar-2019].
- [30] «Ley 1450 de 2011 Nivel Nacional». [En línea]. Disponible en: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=43101>. [Accedido: 04-mar-2019].
- [31] «EL CONGRESO DE COLOMBIA - LEY 1523 DE 2012». [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/24189/390483/11.+LEY+1523+DE+2012.pdf/4e93527d-3bb8-4b53-b678-fbde8107d340?version=1.2>. [Accedido: 04-mar-2019].
- [32] «Ley 388 de 1997 | Secretaría Distrital del Hábitat». [En línea]. Disponible en: <https://www.habitatbogota.gov.co/transparencia/normatividad/normatividad/ley-388-1997>. [Accedido: 05-mar-2019].
- [33] «NSR-10». [En línea]. Disponible en: <https://www.idrd.gov.co/sitio/idrd/sites/default/files/imagenes/9titulo-i-nsr-100.pdf>. [Accedido: 13-ago-2019].
- [34] «Decreto_2811_de_1974.pdf». [En línea]. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_2811_de_1974.pdf. [Accedido: 06-jun-2019].
- [35] «decreto-1729-2002.pdf». [En línea]. Disponible en: <http://acueductopopayan.com.co/wp-content/uploads/2012/08/decreto-1729-2002.pdf>. [Accedido: 13-ago-2019].
- [36] «Decreto número 3600 de 2007, por el cual se reglamentan las disposiciones de las Leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 relativas a las determinantes de ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo y se adoptan otras disposiciones», *vLex*. [En línea]. Disponible en: <https://diario-oficial.vlex.com.co/vid/urbanisticas-parcelacion-edificacion-51317973>. [Accedido: 04-mar-2019].
- [37] D. Darwinlaexhibicion, «Decreto 1640 en pro de las cuencas hidrográficas», *Todos por el Agua*, 03-sep-2012. .
- [38] «Decreto 1807 de 2014 - Gestor Normativo Función Pública». [En línea]. Disponible en:

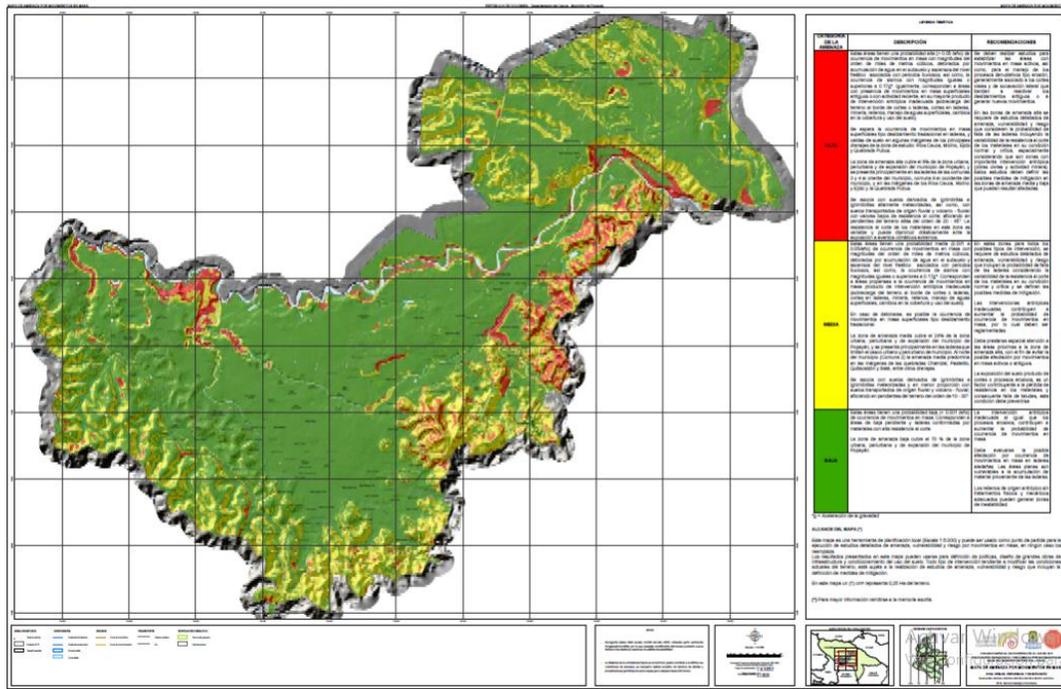
- <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>.
[Accedido: 12-ago-2019].
- [39] «Guía para la Implementación de Sistemas de alerta temprana». [En línea]. Disponible en: https://intranet.meta.gov.co/secciones_archivos/318-18266.pdf. [Accedido: 04-mar-2019].
- [40] «SIATA - Sistema de Alerta Temprana del valle de Aburrá». [En línea]. Disponible en: https://siata.gov.co/sitio_web/index.php/nosotros. [Accedido: 02-mar-2019].
- [41] sostenibilidad.semana.com, «ALCLIMA - Buenas prácticas en adaptación y mitigación al cambio climático - De la cabañuela a la medición científica», *El proyecto que logró pasar en Caldas de la cabañuela a la medición científica*. [En línea]. Disponible en: <https://sostenibilidad.semana.com/medioambiente/articulo/el-proyecto-logro-pasar-caldas-cabanuela-medicion-cientifica/33106>. [Accedido: 02-mar-2019].
- [42] P. A. J. R., «Corporación Autónoma Regional de La Guajira», *Corporación Autónoma Regional de La Guajira*. [En línea]. Disponible en: <http://corpoguajira.gov.co/wp/>. [Accedido: 04-mar-2019].
- [43] «Bogotá fortalece su Sistema de Alertas - visualización - Idiger». [En línea]. Disponible en: <http://www.idiger.gov.co/-/bogota-fortalece-su-sistema-de-alertas>. [Accedido: 04-mar-2019].
- [44] «Tesis SAT electrónica - leidy.tonguino.b@uniautonomo.edu.co - Correo de Corporación Universitaria Autónoma del Cauca». [En línea]. Disponible en: <https://mail.google.com/mail/u/0/?tab=rm#inbox/FMfcgxwCgVcWWjfqFnRQVgBjXxLKGtlh?projector=1&messagePartId=0.1>. [Accedido: 09-may-2019].
- [45] D. N. de Bibliotecas, «Repositorio institucional UN». [En línea]. Disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/view/person/Duque_Escobar=3AGonzalo=3A=3A.html. [Accedido: 04-mar-2019].
- [46] Colombia, Ministerio de Minas y Energía, y Servicio Geológico Colombiano, *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa: escala detallada*. 2015.
- [47] N. F. UNISDR, «United nations office for disaster risk reduction». [En línea]. Disponible en: <https://www.unisdr.org/2004/campaign/booklet-spa/page9-spa.pdf>. [Accedido: 04-mar-2019].
- [48] «Jornada Complementaria». [En línea]. Disponible en: https://medellin.edu.co/images/ovas/medioambiente/pages/gestion_tema1_6.html. [Accedido: 14-ago-2019].
- [49] «CartillaMovMasa.pdf». [En línea]. Disponible en: https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/SubportalDelCiudadano_2/PlandeDesarrollo_0_8/Publicaciones/Shared%20Content/Documentos/2016/CartillaMovMasa.pdf. [Accedido: 05-mar-2019].
- [50] «Riesgo por Movimientos en Masa - Idiger». [En línea]. Disponible en: <https://www.idiger.gov.co/rmovmasa>. [Accedido: 12-ago-2019].

- [51] M. F. G. Rojas, «Análisis de movimientos en masa mediante la aplicación de SIG en la ciudad de Villavicencio en el sector cerro de Buenavista», p. 62, 2018.
- [52] C. Sanhueza Plaza y L. Rodríguez Cifuentes, «Análisis Comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales», *Rev. Constr.*, vol. 12, n.º 1, pp. 17-29, abr. 2013.
- [53] F. L. y Oria (flasso@ciccp.es), «REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS». [En línea]. Disponible en: http://ropdigital.ciccp.es/detalle_articulo.php?registro=16170&anio=1942&numero_revista=2724. [Accedido: 04-mar-2019].
- [54] «MORFOMETRIA DE CUENCAS». [En línea]. Disponible en: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoreno/HIDRO/MORFOMETR%CD A%20DE%20CUENCAS.pdf>. [Accedido: 21-mar-2019].
- [55] «Geomorfología Dinámica y Climática». [En línea]. Disponible en: http://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/geomorfologia/html/1_1_3.html. [Accedido: 21-mar-2019].
- [56] glosarios@servidor-alicante.com, «Morfogénesis en áreas de montaña (Geografía General)», *glosarios@servidor-alicante.com*, 13-ago-2015. [En línea]. Disponible en: <https://glosarios.servidor-alicante.com/geografia-general/morfogenesis-en-areas-de-montanya>. [Accedido: 21-mar-2019].
- [57] E. Aristizábal, M. F. Gamboa, y F. J. Leoz, «SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR MOVIMIENTOS EN MASA INDUCIDOS POR LLUVIA PARA EL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA», *Rev. EIA*, p. 15.
- [58] O. A. C. C, P. Q. P, A. A. M, A. M. O. R, y E. B. D, «Sismos y lluvias, factores detonantes de deslizamientos de laderas en las regiones montañosas de Puebla, México», *E-Gnos.*, n.º 4, p. 0, 2006.
- [59] D. S. Fernández, «Procesos de remoción en masa y erosión fluvial en la quebrada del río Los Sosa, provincia de Tucumán», p. 12.
- [60] «Definiciones y conceptos básicos». [En línea]. Disponible en: <http://osso.org.co/docu/publicac/1996/planii/cap01/text02.htm>. [Accedido: 04-mar-2019].
- [61] «Elementos de Una Falla», *Scribd*. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/283904768/Elementos-de-Una-Falla>. [Accedido: 04-mar-2019].
- [62] G. Vargas, L. Ortlieb, y J. Rutllant, «Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur», *Rev. Geológica Chile*, vol. 27, n.º 2, pp. 157-176, dic. 2000.
- [63] «Tipos de suelos».
- [64] «Suelo: Concepto, Tipos, Composición y Características». [En línea]. Disponible en: <https://concepto.de/suelo/>. [Accedido: 06-jun-2019].
- [65] glosarios@servidor-alicante.com, «Pendiente topográfica (Sistemas de Información Geográfica)», *glosarios@servidor-alicante.com*, 13-ago-2015. [En línea]. Disponible en: <https://glosarios.servidor-alicante.com/sistemas-informacion-geografica/pendiente-topografica>. [Accedido: 09-jun-2019].

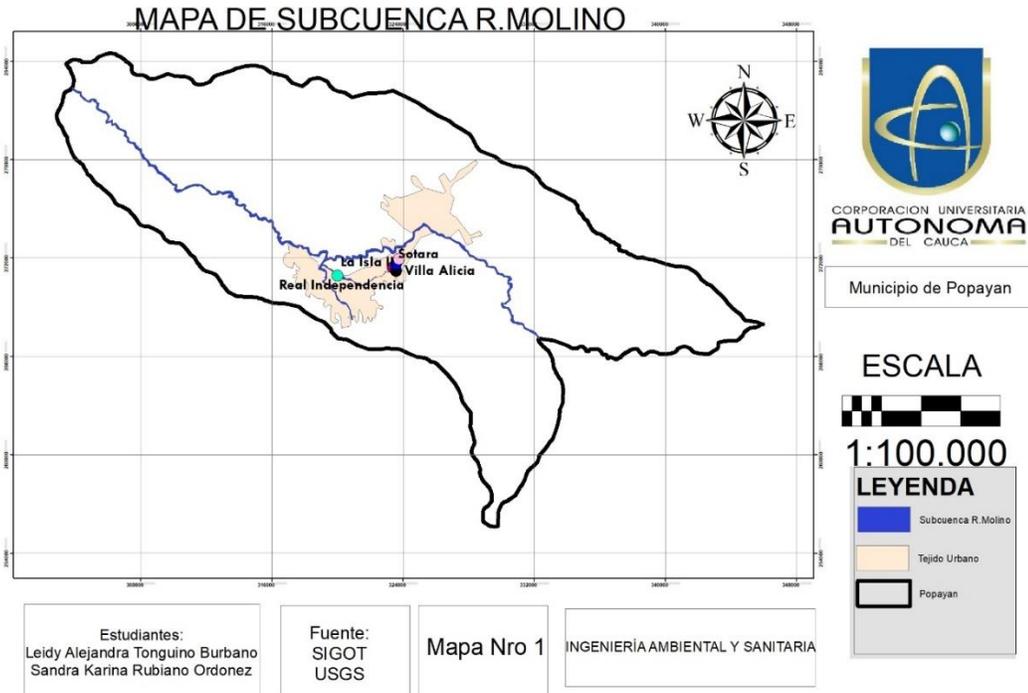
- [66] «Estado - IDEAM». [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/24189/390483/11.+LEY+1523+DE+2012.pdf/4e93527d-3bb8-4b53-b678-fbde8107d340?version=1.2>. [Accedido: 04-mar-2019].
- [67] «Artículos - cobertura vegetal - Instituciones Iberoamericanas - Plataforma de Institutos Geográficos y Cartográficos de América latina, España, Portugal». [En línea]. Disponible en: http://www.geoinstitutos.com/art_03_cober2.asp. [Accedido: 06-jun-2019].
- [68] «COBERTURA VEGETAL». [En línea]. Disponible en: <http://www.climagri.eu/index.php/es/cobertura-vegetal>. [Accedido: 06-jun-2019].
- [69] «Precipitación - Ciclo hidrológico (del agua)». [En línea]. Disponible en: <https://www.ciclohidrologico.com/precipitacin>. [Accedido: 06-jun-2019].
- [70] «CLASIFICACIÓN DE LOS CLIMAS», p. 18.
- [71] G. L. Pérez, «UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS ESCUELA DE POSGRADOS BOGOTÁ D. C.», p. 337, 2017.
- [72] J. M. R. Rondón *et al.*, «CONTRATISTA: CONTROLES DE CALIDAD»:., p. 168.
- [73] «¿Qué es un SIG? | SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA». [En línea]. Disponible en: <https://langleruben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/>. [Accedido: 06-jun-2019].
- [74] «¿Qué es ArcGIS? | ArcGIS Resource Center». [En línea]. Disponible en: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>. [Accedido: 06-jun-2019].
- [75] E. Bermejo, «¿QUÉ ES LA TECNOLOGÍA ARCGIS?», *Territorio Geoinnova - SIG y Medio Ambiente*, 05-may-2014. .
- [76] «ArcGIS». [En línea]. Disponible en: <http://www.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/features/features.html>. [Accedido: 06-jun-2019].
- [77] «Modelos digitales de elevación—Conceptos relacionados | ArcGIS». [En línea]. Disponible en: <https://learn.arcgis.com/es/related-concepts/digital-elevation-models.htm>. [Accedido: 29-jun-2019].
- [78] I. N. de E. y Geografía (INEGI), «Red Geodésica Nacional Activa». [En línea]. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/temas/geodesia_activa/. [Accedido: 06-jun-2019].
- [79] «Cómo funciona Calculadora ráster—Ayuda | ArcGIS for Desktop». [En línea]. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-raster-calculator-works.htm>. [Accedido: 30-jun-2019].
- [80] G. Sánchez y J. David, «Clasificación de Uso y Cobertura del Suelo Corine Land Cover y Elaboración de Cartografía Temática como Sustentación a él Plan General de Ordenación Forestal (PGOF) y a la Fase de Diagnostico del Plan de Ordenación de Cuencas Rio Loro y Rio las Ceibas en el Departamento de Huila», jul. 2017.

- [81] «1_Caracteristicas-del-Cauca.pdf». [En línea]. Disponible en: http://www.ired.org/miembros/ulises/presentaciones/2008-10-08_SL-para-el-Cauca/1_Caracteristicas-del-Cauca.pdf. [Accedido: 06-jun-2019].
- [82] «ORGANIZACIÓN COLPARQUES - Paraísos por descubrir en Colombia!», *ORGANIZACIÓN COLPARQUES - Paraísos por descubrir en Colombia!* [En línea]. Disponible en: <http://www.colparques.net>. [Accedido: 06-jun-2019].
- [83] «Rio Molino - Pubús». [En línea]. Disponible en: <http://www.crc.gov.co/index.php/ambiental/planes-de-ordenacion-y-manejo-de-cuencas-hidrograficas/162-rio-molino-pubus>. [Accedido: 04-mar-2019].
- [84] «Acueducto y Alcantarillado de Popayán». .
- [85] «Plan de Ordenacion y Manejo», p. 517, 2006.
- [86] «Cómo funciona Pendiente—Ayuda | ArcGIS for Desktop». [En línea]. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>. [Accedido: 04-mar-2019].
- [87] «Circular-Gestin-del-Riesgo.pdf». [En línea]. Disponible en: <http://crc.gov.co/images/PDF2017/Circular-Gestin-del-Riesgo.pdf>. [Accedido: 05-mar-2019].

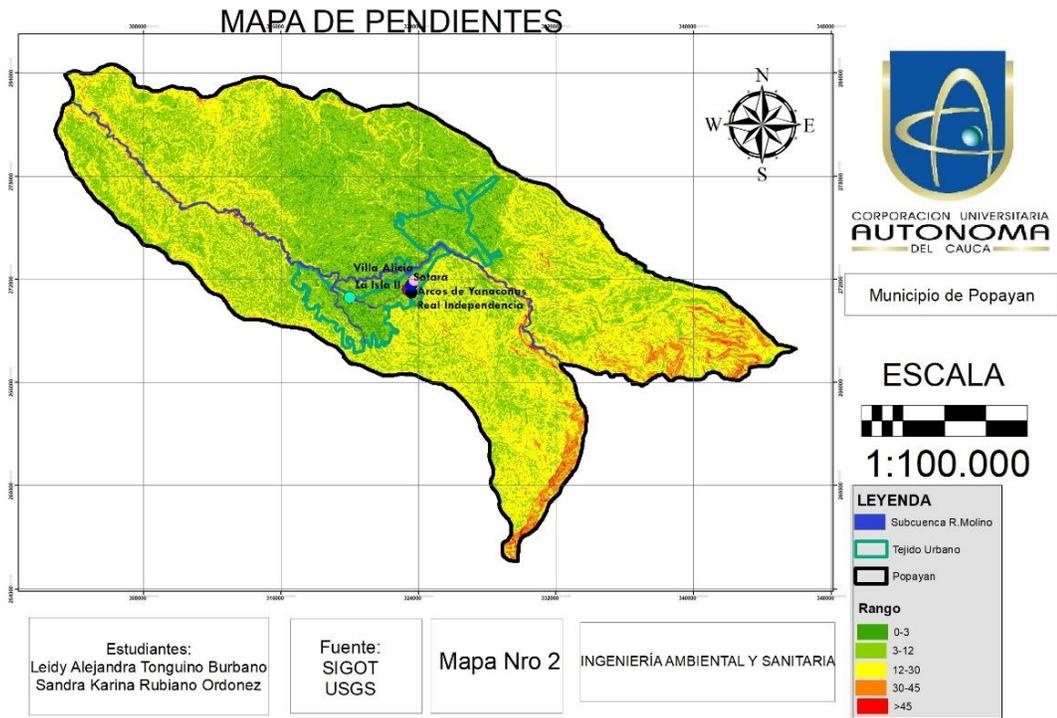
ANEXO 1



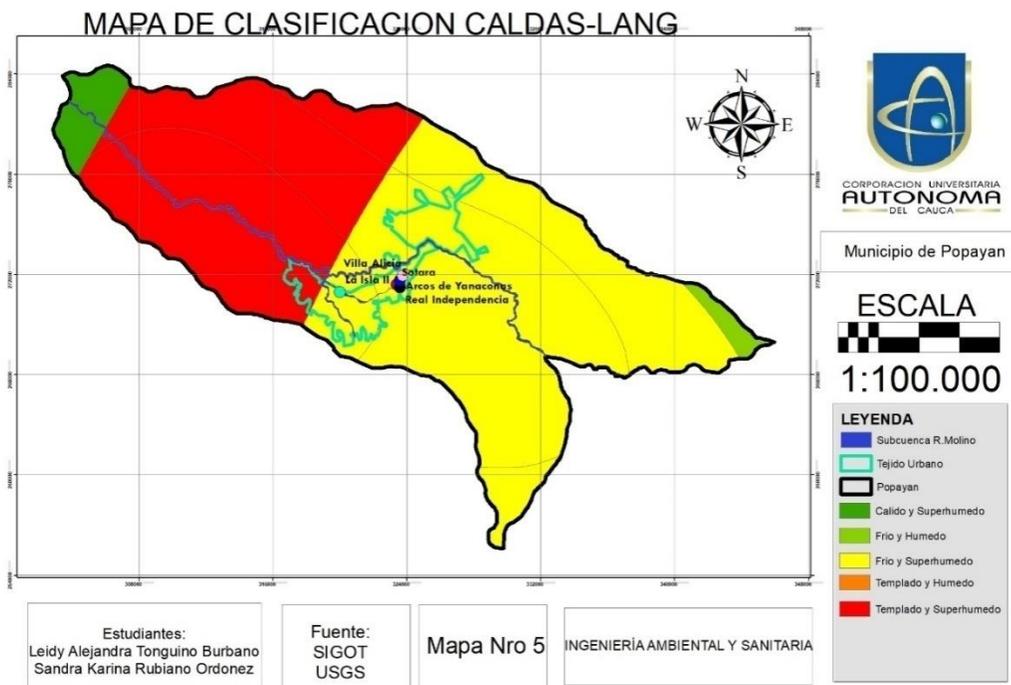
ANEXO 2



ANEXO 3



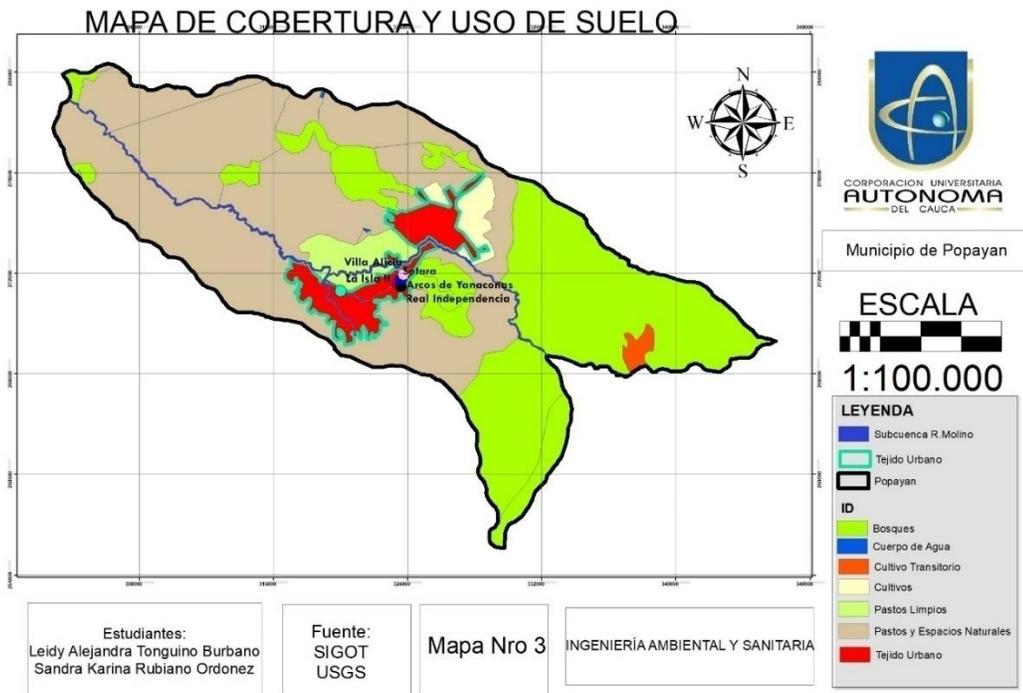
ANEXO 4



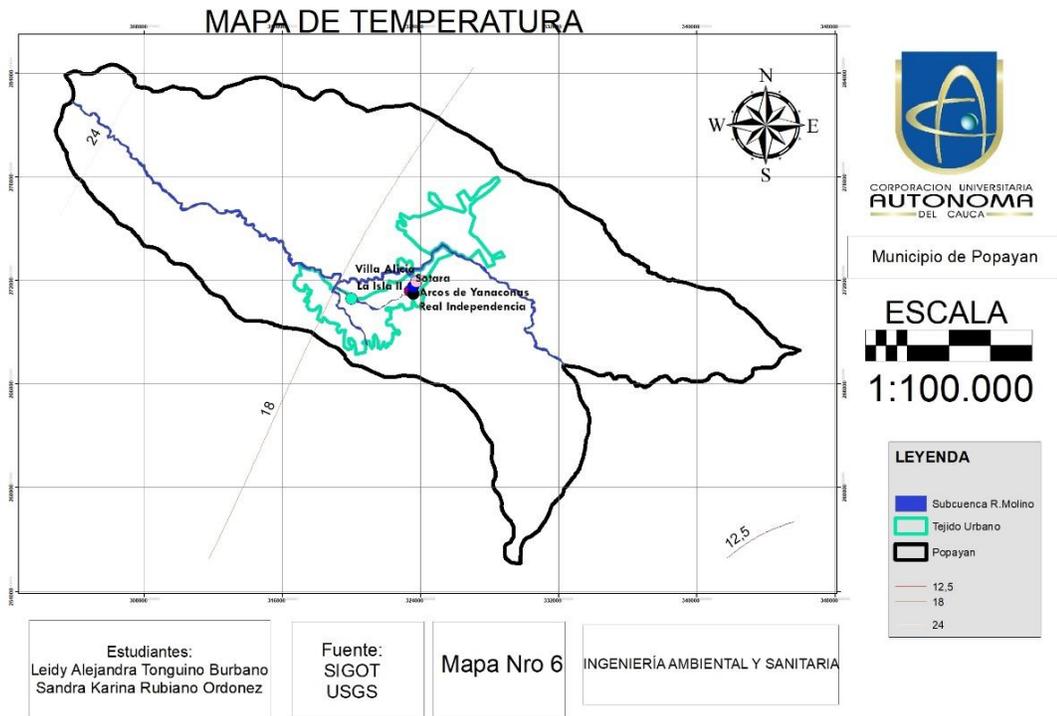
ANEXO 5



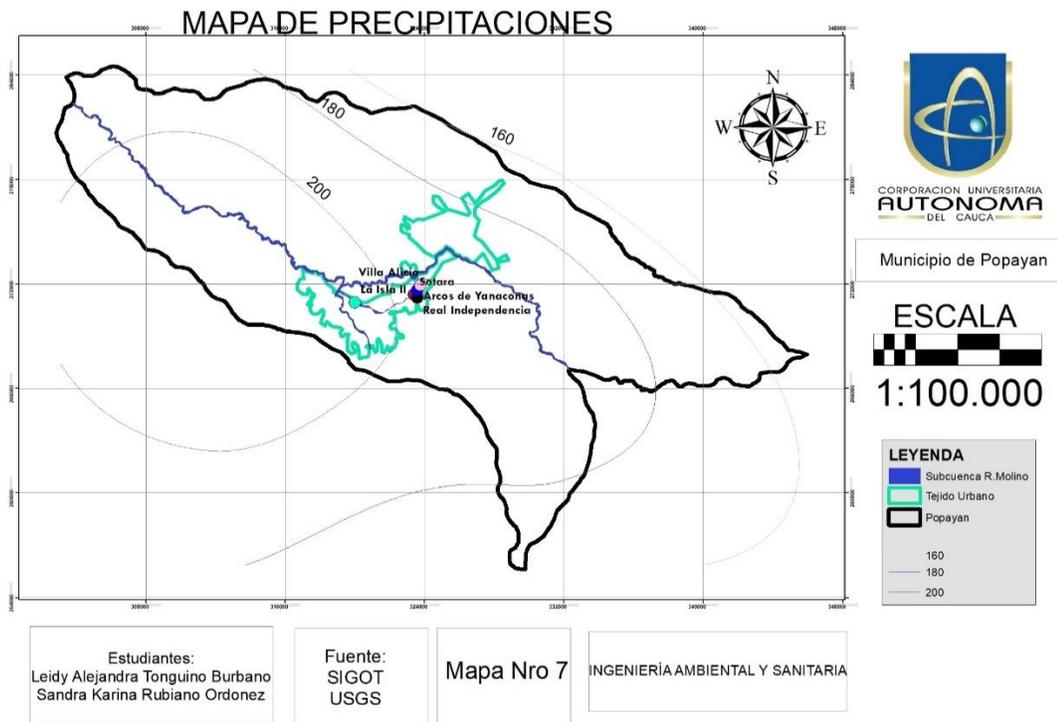
ANEXO 6



ANEXO 7



ANEXO 8



ANEXO 9

Entrevista informal realizada a JOSE ELIAS LASO, presidente de la junta del BARRIO REAL INDEPENDENCIA.

1. ¿Cuándo se fundó el barrio?

Respuesta: Legalmente se constituyó el 10 de marzo de 1999.

2. ¿Cuántas viviendas y habitantes tiene el sector?

Respuesta: Tiene 76 casas, 304 habitantes aproximadamente.

3. ¿En el sector se han presentado deslizamientos?

Respuesta: deslizamientos no, inundaciones si y hay una zona del sector que corre el riesgo de deslizamiento.

4. ¿Hace cuánto ocurrió el último movimiento en masa?

Respuesta: la inundación fue hace seis años, se inundaron 4 casas.

5. ¿Las autoridades municipales les han prestado algún tipo de ayuda cuando han ocurrido estos eventos?

Respuesta: Si, riesgos y desastres monitorea la subcuenca rio Molino que atraviesa por el sector.

ANEXO 10



ANEXO 11



ANEXO 12



ANEXO 13

