



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
CARRERA RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESTUDIO GEOESPACIAL MEDIANTE IMÁGENES
SATELITALES DEL RECURSO AGUA Y SUELO, PARA LA
DEFINICIÓN DE ZONAS DE RIESGO A INUNDACIÓN Y
DESLIZAMIENTO EN LA SIERRA NORTE

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

AUTOR: SEGUNDO BENJAMÍN GUALAVISÍ IGUAGO

DIRECTOR: Ing. JORGE DANIEL CÓRDOVA LLIQUÍN, MSc.

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, Segundo Benjamín Gualavisí Iguago

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Segundo Benjamín Gualavisí Iguago, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor/autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



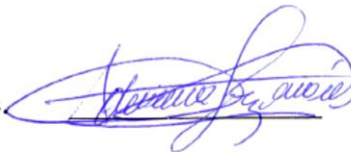


Segundo Benjamín Gualavisí Iguago

172611930-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
CARRERA DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **ESTUDIO GEOESPACIAL MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES DEL RECURSO AGUA Y SUELO, PARA LA DEFINICIÓN DE ZONAS DE RIESGO A INUNDACIÓN Y DESLIZAMIENTO EN LA SIERRA NORTE**, realizado por el señor: **SEGUNDO BENJAMIN GUALAVISI IGUAGO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Alex Vinicio Gavilanes Montoya, PhD. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 _____	2024-05-29
Ing. Jorge Daniel Córdova Lliquín, MSc. DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	 _____	2024-05-29
Ing. Adriana Catalina Guzmán Guaraca, MSc, ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	 _____	2024-05-29

DEDICATORIA

Este proyecto de tesis lo dedico con profundo cariño y gratitud a las personas que depositaron su confianza en mí y me acompañaron incondicionalmente en cada etapa de este arduo pero gratificante camino. En primer lugar, a mi amada mujer, mi compañera de vida, quien creyó firmemente en mi capacidad y supo brindarme su comprensión y apoyo inquebrantable. Ella, además, me obsequió el más preciado tesoro, nuestro maravilloso hijo, fuente inagotable de inspiración y motivación.

Asimismo, dedico este logro a mis queridos padres, quienes, a pesar de las limitaciones económicas y la distancia física, siempre estuvieron presentes, alentándome y brindándome su respaldo incondicional. Su amor, sacrificio y enseñanzas han sido el pilar fundamental en mi formación personal y profesional.

Finalmente, extendiendo esta dedicatoria a todas aquellas personas cercanas que, con su amistad sincera y gestos solidarios, fueron un soporte invaluable durante esta etapa crucial de mi vida. Sin su ayuda desinteresada y sus palabras de aliento, hubiera sido imposible concretar con éxito este proceso académico que hoy culmina con orgullo y satisfacción.

Benjamín

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, expreso mi profunda gratitud a Dios Todopoderoso, por brindarme la fortaleza necesaria para superar los desafíos y momentos difíciles que se presentaron a lo largo de esta travesía académica. Pero también agradezco por las bendiciones y alegrías que engalanaron este camino, permitiéndome esforzarme aún más. El mayor regalo que la vida me ha obsequiado, mi amado hijo, fruto del amor con mi mujer, ha sido el pilar fundamental que me ha impulsado a perseverar día a día.

Deseo extender un especial agradecimiento a la Ingeniera Adriana Guzmán y al Ingeniero Daniel Córdova, quienes con su invaluable guía y apoyo han hecho posible la culminación de este anhelo. Al abrirme las puertas para el desarrollo de mi tesis y brindarme la confianza que todo estudiante anhela, demostraron ser los mentores más excepcionales que un alumno pudiese tener. Palabras no alcanzan para expresar la profunda gratitud que les profeso. Un Dios les pague infinitamente por haberme acompañado y bendecido con su presencia en este anhelado camino.

Finalmente, expreso mi más profunda gratitud a quienes han sido el pilar inquebrantable en este arduo pero gratificante sendero: mi nueva familia, mis apreciados suegros, y mis amados padres. Con su constante respaldo y generosidad al proveerme los recursos económicos necesarios, han hecho posible la anhelada consecución de mis estudios superiores.

Benjamín

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. Problema de investigación	3
1.1 Planteamiento del Problema	3
1.2. Objetivos.....	4
<i>1.2.1. Objetivo general</i>	<i>4</i>
<i>1.2.2. Objetivos específicos</i>	<i>4</i>
1.3. Justificación.....	5
1.4. Hipótesis	7
<i>1.4.1. Nula</i>	<i>7</i>
<i>1.4.2. Alterna.....</i>	<i>7</i>

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Relieve.....	8
<i>2.1.1. Topografía.....</i>	<i>8</i>
<i>2.1.2. Clasificación de la pendiente</i>	<i>9</i>
<i>2.2. Cobertura y uso de suelo</i>	<i>10</i>
<i>2.2.1. Geovisor del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica</i>	<i>10</i>
2.3. Escorrentía superficial	11
<i>2.3.1. Método de número de curva</i>	<i>11</i>
<i>2.3.1.1. Grupo hidrológico</i>	<i>12</i>
<i>2.3.1.2. Humedad antecedente.....</i>	<i>12</i>
<i>2.3.1.3. Cobertura vegetal.....</i>	<i>13</i>
<i>2.3.1.4. Prácticas de manejo del suelo</i>	<i>13</i>

2.3.1.5.	<i>Número de curva</i>	13
2.3.1.6.	<i>Potencial de retención máxima (S)</i>	14
2.3.1.7.	<i>Cuantificación de pérdidas iniciales (I_o)</i>	14
2.3.1.8.	<i>Caudal de escorrentía</i>	14
2.4.	Balance Hídrico	14
2.4.1.	<i>Precipitación</i>	15
2.4.1.1.	<i>Formas de medir la precipitación</i>	15
2.4.2.	Temperatura ambiente	16
2.4.2.1.	<i>Formas de medir la temperatura</i>	16
2.4.1.6.	<i>Modelo satelital de precipitación y de temperatura</i>	17
2.4.2.1.	<i>Determinación del balance hídrico de forma espacial</i>	18
2.4.2.2.	<i>El balance climático espacial</i>	19
2.4.2.3.	<i>La precipitación mensual</i>	21
2.4.2.4.	<i>Pérdida o adición potencial de agua en el suelo (P-ETP)</i>	22
2.4.2.5.	<i>Capacidad de agua disponible (CAD)</i>	22
2.4.2.6.	<i>Agua almacenada en el suelo (ARM)</i>	23
2.4.2.7.	<i>Alteración mensual de almacenamiento de agua (ALT)</i>	23
2.4.2.9.	<i>Déficit hídrico</i>	24
2.4.2.10.	<i>Exceso hídrico</i>	24
2.5.	Análisis Espacial	25
2.5.1.	<i>Método de superposición ponderada</i>	25
2.5.2.	<i>Técnica de Weighted Overlay en los Sistemas de Información Geográfica</i>	25
2.5.2.1.	<i>Superposición ponderada</i>	25
2.5.2.2.	<i>Evaluación multicriterio</i>	25
2.5.2.3.	<i>Análisis multicriterio basado en SIG (Álgebra de mapas)</i>	26
2.6.	Zonas de riesgo	26
2.6.1.	<i>Zonas de riesgo de inundación</i>	26
2.6.1.2.	<i>Qué es una zona de inundación</i>	27
2.6.1.3.	<i>Características de zonas inundables</i>	28
2.6.1.4.	<i>Factores que condicionan una inundación</i>	28
2.6.2.	<i>Zonas de riesgo a deslizamiento</i>	29
2.6.2.2.	<i>Características de una zona propensa a deslizamiento</i>	30
2.6.2.3.	<i>Los factores que condicionan un deslizamiento</i>	31

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	32
3.1.	Localización.....	32
3.1.1.	<i>Ubicación geográfica</i>	<i>33</i>
3.2.2.	<i>Nivel de investigación</i>	33
3.2.3.	<i>Tipo de estudio</i>	34
3.2.4.	<i>Documental.....</i>	<i>35</i>
3.2.5.	<i>Caracterizar el relieve.....</i>	<i>35</i>
3.2.5.3.	<i>Índice Topográfico de Humedad (ITH).....</i>	<i>36</i>
3.2.6.	<i>Identificar su cobertura y uso de suelo.....</i>	<i>38</i>
3.2.7.5.	<i>Potencial de retención máxima (S).....</i>	<i>42</i>
3.2.7.6.	<i>Cálculo de las pérdidas iniciales (IO)</i>	<i>43</i>
3.2.7.7.	<i>Caudal de escorrentía</i>	<i>43</i>
3.2.8.	<i>Balance hídrico climático.....</i>	44
3.2.8.1.	<i>Cálculo de la Temperatura media mensual (Tm).....</i>	<i>44</i>
3.2.8.2.	<i>Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETPm).....</i>	<i>44</i>
3.2.8.3.	<i>Obtención de la Precipitación media mensual (Pm).....</i>	<i>45</i>
3.2.8.4.	<i>Cálculo de la Pérdida o adición potencial de agua en el suelo (P-ETP).....</i>	<i>45</i>
3.2.8.5.	<i>Determinación de la Capacidad de agua disponible (CAD).....</i>	<i>46</i>
3.2.8.6.	<i>Agua almacenada en el suelo (ARM)</i>	<i>47</i>
3.2.8.7.	<i>Alteración mensual de almacenamiento de agua (ALT).....</i>	<i>49</i>
3.2.8.8.	<i>Evapotranspiración Real (ETR).....</i>	<i>49</i>
3.2.8.9.	<i>Deficiencia hídrica (DEF).....</i>	<i>49</i>
3.2.8.10.	<i>Exceso hídrico (EXC).....</i>	<i>50</i>
3.2.8.11.	<i>Balance Hídrico Climático (BHC)</i>	<i>50</i>
3.2.8.12.	<i>Promedio anual del balance hídrico climático (BHC).....</i>	<i>51</i>

CAPITULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	55
4.1.2.	Mapa del índice topográfico de humedad	57
4.2.	Cobertura y uso del suelo.....	59
4.3.	Determinar la escorrentía superficial y balance hídrico	61
4.3.1.	<i>Grupo hidrológico.....</i>	<i>61</i>
4.3.2.	<i>Número de curva</i>	<i>63</i>

4.4.	Definir las zonas riesgo a inundación y deslizamiento	69
4.4.1.	<i>Zonas de riesgo a inundación de 2021</i>	69
4.4.2.	<i>Zonas de riesgo a inundación de 2015.....</i>	71
4.4.3.	<i>Zonas de Riesgo a deslizamiento 2021</i>	73
4.4.4.	<i>Zonas de Riesgo a deslizamiento 2015.....</i>	75

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
CONCLUSIONES.....	78
RECOMENDACIONES.....	80
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS 8	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Clases de gradiente de la pendiente.....	9
Tabla 2-2: Clasificación de la susceptibilidad a deslizamientos con base a la observación de la morfología del terreno.....	29
Tabla 3-1: Ubicación de la sierra norte de Ecuador.....	33
Tabla 3-2: Clases de gradiente de la pendiente.....	36
Tabla 3-3: Valores de grado de amenazas del índice topográfico de humedad.....	38
Tabla 3-4: Porcentaje de inundación.....	38
Tabla 3-5: Grupos hidrológicos	39
Tabla 3-6: Conversión del número de curva de la condición ii a las condicionales i y iii.....	40
Tabla 3-7: Número de curva según grupo hidrológico y cobertura vegetal y/o uso del Suelo ..	41
Tabla 3-8: Clasificación de cobertura y cultivo de ciclo corto, pastos,	46
Tabla 3-9: Ponderación de la superposición de inundaciones de 2021.....	53
Tabla 3-10: Ponderación de la superposición de inundaciones de 2015.....	53
Tabla 3-11: Ponderación de la superposición de deslizamiento de 2021.....	54
Tabla 3-12: Ponderación de la superposición de deslizamiento de 2015.....	54

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Cálculo de disponibilidad de agua en el suelo.	15
Ilustración 3-1: Localización de área de estudio.	32
Ilustración 4-1: La clasificación de la pendiente de la FAO	55
Ilustración 4-2: Mapa de la clasificación de la pendiente de la FAO porcentual.	56
Ilustración 4-3: Índice topográfico de humedad (ITH).	57
Ilustración 4-4: Índice topográfico de Humedad porcentual (%).....	58
Ilustración 4-5: Mapa de uso del suelo MAATE.....	59
Ilustración 4-6: Porcentajes del uso del suelo.	60
Ilustración 4-7: Grupos hidrológicos de suelos de la región Sierra Norte.....	61
Ilustración 4-8: Porcentajes del Grupo Hidrológico.....	62
Ilustración 4-9: Número de curva de la Sierra Norte	63
Ilustración 4-10: Escurrimiento superficial.....	65
Ilustración 4-11: Porcentajes de escorrentía superficial.....	65
Ilustración 4-12: Balance hídrico climático 2021.	66
Ilustración 4-13: Balance hídrico climático 2015.	68
Ilustración 4-14: Mapa de riesgo a inundación 2021.	69
Ilustración 4-15: Porcentajes para zonas de riesgo a inundación 2021	70
Ilustración 4- 16: Mapa de riesgo a inundación 2015	72
Ilustración 4- 17: Porcentaje para zonas de riesgo a inundación 2015.....	72
Ilustración 4-18: Mapa de Riesgo a deslizamiento 2021.....	73
Ilustración 4-19: Porcentajes de Riesgo a deslizamiento 2021	74
Ilustración 4-20: Zonas de riesgo a deslizamiento 2015.	75
Ilustración 4-21: Porcentajes para zonas de riesgo a deslizamientos 2015.	76

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: TEMPERATURA 2015

ANEXO B: PRECIPITACIÓN 2015

ANEXO C: EVAPOTRANSPIRACIÓN

ANEXO D: EVPO REAL

ANEXO E: TEMPERATURA 2021

ANEXO F: EVAPOTRANSPIRACIÓN 2021

ANEXO G: PRECIPITACIÓN 2021

ANEXO H: BALANCE HÍDRICO 2021

ANEXO I: EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL 2021

RESUMEN

Esta presente investigación tuvo como objetivo principal evaluar las condiciones geospaciales del recurso agua y suelo en la sierra norte del Ecuador, utilizando imágenes satelitales para la identificación de zonas propensas a inundaciones y deslizamientos de tierra. Mediante un análisis multitemporal de imágenes satelitales, en el cual, nos permita generar mapas temáticos de la caracterización de los patrones de drenaje, los tipos de suelo, escorrentía superficial, cobertura vegetal y las pendientes del terreno. Estos mapas fueron integrados en un sistema de información geográfica (SIG) para realizar la evaluación multicriterio, considerando factores como uso de suelo, índice topográfico de humedad, escurrimiento superficial, la clasificación de la pendiente de la FAO y balance hídrico climático en la región, considerando un año con exceso hídrico y otro con déficit hídrica. Así, se logró delimitar áreas vulnerables a riegos a inundaciones y deslizamientos, lo cual contribuirá a la elaboración de planes de gestión de riesgos y a una mejor toma de decisiones para la mitigación de los impactos negativos en las comunidades más vulnerables en la región. Estos resultados obtenidos demuestran la gran importancia de la teledetección y las herramientas geospaciales en la evaluación de los recursos naturales y la prevención de desastres que se han ido generando mediante el pasar de los años.

Palabras clave: <TELEDETECCIÓN>, <IMÁGENES SATELITALES>, <RECURSOS HÍDRICOS>, <RECURSOS EDÁFICOS>, <ZONAS DE RIESGO>, <INUNDACIONES>, <DESLIZAMIENTOS>, <ANÁLISIS MULTITEMPORAL>.

0620-DBRA-UPT-2024

05-06-2024



ABSTRACT

The main objective of this research was to evaluate the geospatial conditions of water and soil resources in the northern highlands of Ecuador, using satellite images to identify areas prone to flooding and landslides. Through a multitemporal analysis of satellite images, which allows us to generate thematic maps of the characterization of drainage patterns, soil types, surface runoff, vegetation cover and slopes of the terrain. These maps were integrated into a geographic information system (GIS) to perform the multi-criteria evaluation, considering factors such as land use, topographic humidity index, surface runoff, FAO slope classification and climatic water balance in the region, considering one year with excess water and another with water deficit. Thus, it was possible to delimit areas vulnerable to flood and landslide risks, which will contribute to the preparation of risk management plans and to better decision-making for the mitigation of negative impacts on the most vulnerable communities in the region. These results demonstrate the great importance of remote sensing and geospatial tools in the evaluation of natural resources and disaster prevention that have been generated over the years.

Key words: <TELEDETECTION>, <SATELLITE IMAGES>, <WATER RESOURCES,&br/><EDAPHIC RESOURCES>, <RISK ZONES>, <FLOODING>, SLIDING
<MULTITEMPORAL ANALYSIS>



Lic. Lorena Hernández A. Mcs.

180373788-9

INTRODUCCIÓN

Ecuador es un país extremadamente vulnerable a muchos peligros naturales, geológicos, climáticos y provocados por el hombre, y la actividad humana está acelerando e intensificando exponencialmente cada uno de estos peligros. Estos fenómenos varían en intensidad y pueden ser causados por factores hidrometeorológicos como sequías e inundaciones, así como por fenómenos geológicos, erupciones volcánicas y deslizamientos de tierra (Bello, Bustamante y Pizarro 2020).

Históricamente, Ecuador ha experimentado una recurrencia significativa de estas amenazas naturales, que han causado daños sustanciales a la población y su entorno, como resultado, es imperativo desarrollar metodologías, llevar a cabo análisis, identificar zonas de riesgo y determinar estrategias efectivas de gestión del riesgo en todo el territorio ecuatoriano (Bello, Bustamante y Pizarro 2020).

La zona norte de la serranía ecuatoriana, en particular, ha experimentado un aumento significativo en la vulnerabilidad a amenazas naturales, principalmente inundaciones y deslizamientos. La rápida expansión urbana en las cabeceras cantonales de esta región ha contribuido a esta problemática, en parte debido a la falta de información disponible para la comunidad. Estudios y análisis de la zona han revelado que los fenómenos geodinámicos más frecuentes en los últimos años son las cenizas volcánicas, inundaciones y riesgos. Estos eventos naturales han llevado a considerar la zona como de alto riesgo de susceptibilidad y peligro de deslizamientos del suelo, y han mostrado un incremento en su frecuencia en las últimas décadas en la Sierra Norte del Ecuador, (Kumar y Watanabe 2021).

El análisis de los riesgos de inundaciones y deslizamientos de tierra se apoya en una serie de fuentes para difundir investigaciones clave sobre el tema en estudio, incluidas estadísticas e informes de la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos del Ecuador, el Gobierno Autónomo Descentralizado y el Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Información. Este trabajo se ha convertido en una importante fuente de información para determinar tanto los niveles de amenaza como la vulnerabilidad a los desastres naturales que ocurren con el tiempo (Lacreu, 2019).

Comprender el concepto de zonas de riesgo de inundaciones y deslizamientos de tierra es importante para prevenir y minimizar los impactos de estos fenómenos naturales. El uso de herramientas geoespaciales a través de imágenes de cuerpos de agua y terrestres, se convierten en una herramienta valiosa para comprender el propósito de este trabajo de investigación, cuyo objetivo principal es utilizar imágenes satelitales de alta resolución para identificar factores

estrechamente relacionados con estos peligros, como el terreno, Vegetación y uso del suelo. Se espera que los resultados de este estudio sean útiles para las autoridades regionales y locales al facilitar la planificación e implementación de medidas de prevención y mitigación de riesgos naturales (Subsecretaría de Calidad Ambiental Dirección de Normativa y Control Ambiental 2009).

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

El manejo de los recursos naturales en el Ecuador y en el mundo representa un reto permanente para técnicos, científicos, comunidades y tomadores de decisiones. Por un lado, las políticas públicas que promueven su conservación recurrentemente resultan insuficientes para un manejo adecuado de éstos, en virtud de que se encuentran influenciados por distintas presiones que complica el escenario.

El uso del suelo y del agua trae consigo profundas dinámicas y relaciones que ocasionan con frecuencia afectaciones que incrementan los riesgos en determinadas zonas. En este contexto, el aumento de la frontera agrícola, la pérdida de cobertura vegetal, el debilitamiento de bosques y las prácticas de uso del agua a través de mecanismos poco eficientes provocan un constante debilitamiento de las estructuras edáficas.

Por otra parte, estas mismas causas, a las que se suman la intervención no controlada sobre cauces naturales (ríos y quebradas) problematizan aún más estas realidades en todo el país. En este sentido, surge la necesidad de definir las zonas de riesgo de inundaciones y deslizamientos en la Serranía Norte.

Este es un desafío complejo debido a las dinámicas sociales y a la expansión urbana rápida y relativamente desordenada que ha tenido lugar en la región en las últimas décadas, la caracterización del territorio debe ser holística, considerando tanto la delimitación física y exposición ante amenazas naturales, como también las dinámicas sociales y procesos que influyen en la funcionalidad del territorio. Esta complejidad es debido a que la expansión urbana puede generar cambios en los patrones de drenaje natural, aumentar la impermeabilización del suelo y la deforestación, lo que a su vez incrementa el riesgo de inundaciones y deslizamientos de suelo.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), resulta ser una herramienta útil de estimación ya que nos permite almacenar, procesar, manipular y visualizar bases de datos espaciales. Por lo tanto, son una buena opción para apoyar la planificación y gestión de los recursos naturales (González et al. 2016).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Definir las zonas de riesgo de inundaciones y deslizamiento en la Sierra Norte del Ecuador.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el relieve.
- Identificar la cobertura y el uso del suelo.
- Determinar la escorrentía superficial y balance hídrico.
- Definir las zonas riesgo a inundación y deslizamiento.

1.3. Justificación

La región montañosa del norte del Ecuador se caracteriza por un terreno accidentado y susceptible a fenómenos naturales como inundaciones y deslizamientos de tierra. Estos eventos representan amenazas significativas para la población local, la infraestructura y los recursos naturales, por ende, es imperativo desarrollar estrategias de gestión del riesgo respaldadas por un enfoque geoespacial integral, aprovechando las tecnologías avanzadas de sistemas de información geográfica (SIG) y el análisis de imágenes de agua y suelo.

La correcta manipulación de la información geoespacial ofrece una herramienta significativa para analizar y anunciar eventos vinculados con el agua y el suelo. Además, que permite determinar patrones, tendencias y variaciones en la cubierta terrestre y cuerpos hídricos, estableciendo así una base firme para la definición concisa de zonas de riesgo a inundaciones y deslizamientos.

Esto está influenciado por complejas interrelaciones entre los sistemas meteorológicos, hidrológicos y edafológicos, a menudo afectados por la acción humana y sus actividades productivas. La extracción de recursos, la explotación agropecuaria, la minería y otras actividades afectan directamente la estabilidad de montañas, riberas de ríos, páramos y diversos ecosistemas en el país.

La prevención, basada en información previamente sistematizada, es una alternativa viable que posibilita una mejor preparación ante estos riesgos. En este sentido, la evaluación del balance hídrico en las provincias de Pichincha, Imbabura y Carchi, junto con una caracterización topográfica y edáfica, permitirá construir metodologías robustas para la gestión de riesgos en este sector.

La determinación de zonas de riesgo se complementará con el análisis del balance hídrico de la región. Este enfoque permitirá evaluar la relación entre las precipitaciones, la infiltración del agua en el suelo y los posibles excesos que podrían desencadenar inundaciones o deslizamientos. La combinación de métodos geoespaciales y principios hidrogeológicos proporcionará una comprensión integral de los procesos naturales involucrados.

La relevancia del presente estudio se basa principalmente en la capacidad de aportar una amplia información cualitativa y cuantitativa acerca de las áreas más propensas a riesgos naturales. La elaboración de mapas de riesgo geoespaciales permitirá Tanto a autoridades como a planificadores urbanos poner en marcha medidas de mitigación. Adicionalmente la perspectiva

del presente estudio influirá de manera positiva al desarrollo sostenible de la zona protegiendo vidas y ecosistemas.

En definitiva, esta investigación nos permite manifestar un paso trascendental enfocado a la interpretación y gestión eficaz de los riesgos naturales en la zona norte de la sierra ecuatoriana, empleando instrumentos sofisticados de sistemas de información geográfica, hidrogeología y análisis de riesgos. La fusión de estas técnicas otorgará fundamento científico contundente para de esta manera aportar en la toma de decisiones pertinentes y en la implementación de estrategias de gestión de riesgo en la zona de estudio.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Nula

- La metodología planteada no permite identificar zonas de riesgo a deslizamiento e inundaciones en la Sierra Norte del Ecuador.

1.4.2. Alterna

- La metodología planteada permite identificar zonas de riesgo a deslizamiento e inundaciones en la Sierra Norte del Ecuador.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Relieve

Es un conjunto de formas que aparecen en la superficie terrestre. En particular, la topografía es una rama de la geografía física dedicada al estudio, descripción y caracterización de la topografía terrestre; curiosamente, la diversidad de formas presentes en la superficie de la Tierra, tal como la conocemos actualmente, es el resultado de una serie de procesos que tuvieron lugar durante millones de años y continúan hasta el día de hoy (González et al. 2016).

2.1.1. Topografía

La topografía como factor formador del suelo tiene atributos como pendiente, curvatura y superficie de drenaje, que por efecto de la gravedad se convertirán en factores reguladores de la redistribución de materiales en las pendientes del suelo, mediante la acción de corrientes superficiales, que se refiere al desarrollo de una serie de suelos con diferentes propiedades a lo largo de una pendiente debido a la influencia de la topografía (Fong López 2019).

La topografía influye directamente en los procesos de meteorización y erosión del suelo, es decir, el movimiento del suelo desde su origen, regulado por la gravedad, debido a factores externos como escorrentía, viento y organismos, que mueven el suelo hacia abajo hasta la zona de deposición. Se ha descubierto que ciertos tipos de suelo tienden a existir en terrenos específicos y, debido a las pendientes, existirá un conjunto diferente de tipos de suelo a lo largo de la extensión de la pendiente. Cada uno de estos suelos tiene características verticales diferentes, aunque esta secuencia se repite en pendientes similares de la región (Fong López 2019).

El espesor de la matriz del suelo depende en parte de la pendiente topográfica en relación con la erosión, que también afecta la redistribución de los clastos dependiendo del tamaño de los clastos y la materia orgánica. Algunos efectos de la topografía pueden estar relacionados con la orientación de la pendiente, afectando así la incidencia de la radiación solar. Los cambios en la temperatura del suelo están relacionados con la intensidad de la radiación solar recibida y por tanto con cambios en la evapotranspiración potencial y las tasas de procesos físicos y químicos. Las laderas orientadas al sur de la sierra Norte del Ecuador; tienden a tener menos cobertura vegetal, aunque se desconoce su productividad primaria neta anual (vegetación). Aunque todavía

necesitamos comprender mejor los procesos de deposición, erosión, entierro y descomposición, hay evidencia de que los niveles de dióxido de carbono son más altos en los suelos de las laderas septentrionales que están mejor protegidos de la luz solar (Fong López 2019).

2.1.2. Clasificación de la pendiente

Tabla 2-1. Clases de gradiente de la pendiente.

Clase	Descripción	%
01	Plano	0-0,2
02	Nivel	0,2-0,5
03	Cercano al nivel	0,5-1,0
04	Muy ligeramente inclinado	1,0-2,0
05	Ligeramente inclinado	2-5
06	Inclinado	5-10
07	Fuertemente inclinado	10-15
08	Moderadamente escarpado	15-30
09	Escarpado	30-60
10	Muy escarpado	>60

Fuente: (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) 2009).

La ubicación de la pendiente considera la inclinación de una superficie el sitio, para medir esta característica se emplea el método de clinómetro hacia la dirección que se encuentra más empinada. El ángulo de inclinación puede variar de acuerdo con cada zona diferente, por ello, se realiza registros sobre la existencia de alguna alteración de pendientes debido a que puede ser por factores naturales el grado de movimiento. En la tabla 2-1 muestra las clases del gradiente de pendiente expresado en porcentaje de acuerdo a las categorías establecidas por la FAO (FAO, 2009, pág.12).

2.1.3. Índice topográfico de humedad

El índice de humedad del suelo proporciona una descripción de la humedad del suelo; a medida que aumenta el área específica, disminuye la pendiente, el índice de humedad del suelo y el contenido de humedad disminuyen. Al combinar datos de gradiente y área, el índice tiene en cuenta la Geometría de pendientes locales y ubicación en el paisaje. Por tanto, este indicador tiene una alta correlación con la humedad del suelo. Comparado con un campo específico. El índice de humedad controla la acumulación de escorrentía, la humedad del suelo, la profundidad del nivel

freático, la evaporación, la profundidad del suelo, la materia orgánica, el contenido de limo y arena y la distribución de la cubierta vegetal; por lo tanto, es ampliamente utilizado en estudios de vegetación, agricultura, hidrología y topografía (López, 2006, pág.17).

2.2. Cobertura y uso de suelo

Según INSTITUTO DE GEOGRAFIA DE LA UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO (2021) la cobertura del suelo se refiere al material físico que existe sobre la superficie terrestre, mientras que el uso del suelo está relacionado con las labores que la sociedad realiza en la superficie terrestre para obtener ciertos beneficios o productos. Lo cual nos permite generar mapas de cobertura y uso de suelo se utilizan diferentes métodos y recursos para identificar, comprender y utilizarlos, para ello se emplea sensores remotos y sistemas de información geográfica, utilizando software avanzado de procesamiento de imágenes, monitoreo de los diferentes cambios en la superficie de la tierra (primavera y verano) (Mela 2019, pág.1).

2.2.1. *Geovisor del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica*

Esta plataforma que se encuentra en el geovisor del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MATTE) tiene como finalidad impulsar la preservación, protección, restauración de los recursos naturales existentes en el país. Asimismo, esta institución nos permite fomentar políticas y gestión ambiental con el propósito de respaldar la disposición de vida de los moradores de la zona (MAATE, 2023).

Esta institución gubernamental cuenta con un sistema que integra varias funciones y servicios en lo que incluye programas, leyes, convocatorias hacia otras organizaciones públicas o privadas, entre otras funciones (MAATE).

La institución ha desarrollado un geo portal que permite el acceso a información geográfica, además se puede investigar, analizar e identificar lugares y datos de una zona específica. Una de las ventajas que brinda esta herramienta en la optimización de procesos (Gutiérrez Urueña y Ubaque Mozo 2016).

El geo portal contiene la siguiente información vectorial referente a:

- Infraestructura de industrias y servicios
- Cobertura de la Tierra
- Demarcación

- Gestión ambiental
- Hidrográfica y oceanografía.

2.3. Escorrentía superficial

Según (Somoza Sandino y Cuadra Molina, 2023) señalan que la escorrentía superficial se refiere a la trayectoria de las precipitaciones de manera natural sobre la superficie terrestre, las cuales pueden contaminar un cuerpo hídrico o infiltrarse a través de componentes naturales.

La relación entre el escurrimiento superficial, la topografía y la cobertura del suelo es que el agua de lluvia puede infiltrarse en el suelo, ser utilizada por las plantas, regresa a la atmósfera a través de la evaporación, formar parte de la humedad del suelo bajo diferentes usos de la tierra y vegetación. El escurrimiento superficial fluye rápidamente río abajo hacia los cursos de agua, provocando flujos máximos que siempre son una preocupación. La escorrentía no sólo desperdicia agua de lluvia que podría impulsar la producción de cultivos y reponer las aguas subterráneas, sino que a menudo causa inundaciones, deslizamientos, daña carreteras, tierras de cultivo, erosiona el suelo y, a veces, se deposita en ríos y estanques río abajo (Álvarez Pulido, Yustres Quintero y Ivanova 2020).

Para determinar la escorrentía de agua superficial se utilizó un modelo desarrollado por los Servicios de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USSCS) que se conoce como método de Numero de Curva (Henríquez y Azócar, 2006).

2.3.1. Método de número de curva

El número de curva (CN) es un método para medir la infiltración efectiva producida por la precipitación en una determinada zona, el Instituto de Conservación de Recursos Naturales desarrolló un parámetro práctico llamado número de curva (CN). El análisis determina el escurrimiento potencial a partir de la combinación de información referente a la cobertura del suelo y los grupos hidrológicos del suelo en el área de estudio. Utilizado por primera vez en la década de 1970, el método del número de curvas del Servicio de Conservación de Suelos de EE. UU, es un modelo conceptual ampliamente utilizado en hidrología para determinar la precipitación neta o la escorrentía directa de las tormentas. La amplia aceptación de este método es su simplicidad y facilidad de uso en cuencas con información hidrológica mínima (Villarroya, Farias y Amarilla, 2013).

2.3.1.1. Grupo hidrológico

El método de NC método se apoya principalmente en la caracterización de las propiedades físicas relacionadas con la conductividad hidráulica, que determinan la tasa de infiltración del suelo.

El Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) clasifica los suelos en cuatro grupos hidrológicos (A, B, C, D) según las características de infiltración del suelo.

- Grupo A. Bajo potencial de escorrentía: Estos suelos tienen alta permeabilidad incluso cuando están muy húmedos. Están formados por arena o grava, son profundos y están excesivamente drenados. Tienen alta permeabilidad al agua.
- Grupo B. Potencial de escorrentía bajo a moderado: estos suelos tienen una permeabilidad moderada en condiciones muy húmedas. Tienen una profundidad media a profunda, un drenaje medio a bueno, una textura media fina a gruesa y una permeabilidad media lenta a media. Tienen una permeabilidad al agua moderada.
- Grupo C Mayor potencial de escorrentía: Estos suelos tardan en infiltrarse cuando están muy húmedos. Consisten en una capa que impide que el agua fluya hacia abajo; su textura es media a fina. La capacidad de drenaje de estos suelos puede ser pobre o moderada, y a poca profundidad (50-100 cm) su permeabilidad es de lenta a muy lenta. Tienen baja permeabilidad al agua.
- Grupo D: alto potencial de escorrentía: Cuando estos suelos están muy húmedos la penetración es muy lenta. Consisten en arcillas con alto potencial de hinchamiento; niveles de agua persistentemente altos; suelos con una capa de arcilla en la superficie; suelos poco profundos. Tu velocidad de transferencia es lenta (Carrillo, 2010).

2.3.1.2. Humedad antecedente

La tasa de absorción disminuye a medida que aumenta el contenido de agua del suelo. Algunos tipos de arcilla se expanden cuando se mojan y se contraen cuando derrochan agua. La turgencia previene la infiltración, mientras que la contracción de la arcilla puede causar grietas en el suelo y aumentar el flujo a través de los macroporos (Ruiz y Martinez, 2015). Una vez conocida la correspondiente GH y cobertura vegetal del terreno en estudio, es necesario considerar las condiciones de humedad previas del suelo, es decir, el estado de humedad del suelo antes de la precipitación. Se define por tres condiciones básicas, tomando en cuenta el contenido de humedad

del suelo, determinado en base a la precipitación de los últimos 5 a 10 días, si la precipitación es menor a 12.5mm se llama seco (I); si la precipitación está entre 12,5mm, se denomina mediana (II). 12,7 – 38,1mm y húmedo (III), valores superiores a 38,1mm. Una vez determinadas las condiciones de humedad a las que está expuesto el suelo, se representa el NC correspondiente a las condiciones I y III (Gaspari, Rodríguez Vagaría y Senisterra 2013).

2.3.1.3. Cobertura vegetal

La vegetación se puede definir como la capa de vegetación natural que recubre la superficie terrestre, constituida por una gran cantidad de biomasa con diferentes características geomorfológicas y ambientales, que van desde pastizales hasta áreas de bosques naturales. Esto también incluye la vegetación creada por el hombre, como las tierras de cultivo (Maza, 2009).

La vegetación es la manifestación evolutiva de un conjunto de especies vegetales en un lugar y tiempo, como tal es un elemento indicativo del estado o condición de los ecosistemas.

La cobertura vegetal y el uso de la tierra forman una expresión colectiva de plantas nativas o importadas y usos antropogénicos del ambiente biofísico de la región. Es uno de los fenómenos espaciales más importantes del paisaje natural y cultural de la región (Álvarez y Vanessa, 2016).

2.3.1.4. Prácticas de manejo del suelo

Existe una necesidad cada vez mayor de una gestión integrada de la fertilidad del suelo para mantener y mejorar la productividad del suelo. Deben fomentarse prácticas responsables de gestión de la tierra basadas en las características locales. Incluso a nivel local, la práctica de gestión de la fertilidad del suelo varían entre los agricultores, ya que sus conocimientos y percepciones a menudo se basan en la experiencia, lo que les permite detectar diferencias en los niveles de fertilidad del suelo en sus explotaciones (Castillo et al. 2020).

Existen diversas prácticas de manejo, y son: agroforestería, labranza mínima, siembra en contorno (curvas de nivel), barreras vivas, zanjas de ladera, terrazas de base angosta e hileras de árboles, entre otras (Raudes y Sagastume, 2009).

2.3.1.5. Número de curva

El indicador hidrológico es el número de curva (CN) el cual se utiliza para establecer el potencial de escorrentía de una región o cuenca hidrológicas. Las cuencas hidrológicas se distinguen en

función de unas cuantas características físicas de territorios, densidades, como tipos, tratamientos de coberturas y grupos hidrológicos de suelos (Delgado 2023).

2.3.1.6. *Potencial de retención máxima (S)*

La cantidad máxima de lluvia absorbida por la cuenca se denomina S (Piqueras, 2010). La máxima tasa de retención potencial se obtiene mediante una curva numérica según la siguiente fórmula (Francisco et al. 2010):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

2.3.1.7. *Cuantificación de pérdidas iniciales (I_o)*

Llamada también abstracción inicial o pérdida inicial en este caso se relacionan con la interceptación de cultivos, la infiltración al inicio de las tormentas y el almacenamiento en depresiones de la superficie; esta variable no es fácil de estimar, por lo que generalmente se supone que es una función de la retención superficial máxima (S) (Ciapparelli, 2021).

2.3.1.8. *Caudal de escorrentía*

La escorrentía generadora de corrientes se distingue en primer lugar como escorrentía rápida que fluyen sobre las superficies de los suelos y por tanto llega al cauce del río en poco tiempo; Estos volúmenes de agua son responsables del flujo máximo de inundación, seguido por la escorrentía subsuperficiales y la escorrentía subterránea, que se filtra lentamente en los canales y causa el flujo base, una red entre tormentas (Mero, 2019).

2.4. Balance Hídrico

El balance hídrico del suelo refleja la cantidad de agua en el suelo en relación con su valor máximo, expresada como porcentaje. Valores inferiores al 50% indican una reducida disponibilidad de agua en el suelo, lo que puede estresar la vegetación. La cantidad de agua disponible (almacenamiento) en el suelo para cada zona se estima con base en datos proporcionados por imágenes satelitales. Para calcular la cantidad de agua disponible en el suelo es necesario estimar variables como la evapotranspiración, la precipitación y el almacenamiento de agua para cada zona. El suelo del periodo anterior, expresado como una ecuación, el número de capas necesarias para determinar estas variables son: uso del suelo, propiedades físicas del

suelo y contenido de humedad (capacidad de campo, punto de marchitez permanente, profundidad del suelo, etc.) (INIA 2019).

$$\nabla_i = \nabla_{i-1} + Pp_e + Riego - ET - Esc - Pprof$$

Ilustración 2-1: Cálculo de disponibilidad de agua en el suelo.

Fuente: (INIA 2019).

2.4.1. Precipitación

La precipitación es un fenómeno natural cuando el agua se desprende de las nubes y llega a la superficie terrestre en forma de lluvia, granizo, nieve o condensación. Este factor juega un papel crucial en el ciclo hidrológico y es crucial en la distribución del agua en el medio natural (Schneider 1992).

Las cantidades de precipitación y la distribución espacial varían según la ubicación geográfica y los factores climáticos locales. Los patrones de precipitación influyen en la disponibilidad de agua dulce, el crecimiento de las plantas, la erosión del suelo y la formación de cuerpos de agua, entre otros procesos naturales (Sillero Medina, Hueso Gonzalez y Ruiz Sinoga 2019).

La precipitación es elemental en varias disciplinas como la meteorología, hidrología, la agricultura y la adecuada gestión de los recursos hídricos, así facilitando la realización de análisis de sequías, estudios de disponibilidad de agua, pronósticos climáticos y evaluaciones de riesgos naturales a inundaciones y deslizamientos de tierra (Schneider 1992).

2.4.1.1. Formas de medir la precipitación

La precipitación es un factor clave para comprender los procesos hidrológicos y los riesgos asociados con inundaciones y deslizamientos de tierra regionales. El propósito de su investigación es utilizar imágenes satelitales para analizar los recursos hídricos y terrestres para identificar áreas de riesgo de inundaciones y deslizamientos de tierra en la Sierra norte (McGuffie y Henderson Sellers 2005). Para lograr este objetivo, es necesario obtener datos de precipitación precisos y fiables. A continuación, se presentan algunas técnicas de medición de la precipitación que pueden ser relevantes para su investigación (Schneider 1992) Satélites meteorológicos estos satélites están equipados con sensores remotos que pueden estimar las precipitaciones mediante mediciones indirectas, como la detección de nubes y la estimación de su contenido de agua. Estos satélites capturan imágenes y datos en diferentes longitudes de onda y proporcionan información sobre la distribución espacial y temporal de la precipitación (Dingman, 2015). Radar meteorológico estos

radares meteorológicos utilizan ondas de radio para detectar y medir la precipitación en un área específica (Dingman, 2015). Estaciones meteorológicas estas estaciones meteorológicas también pueden registrar datos de lluvia en un lugar utilizando instrumentos como pluviómetros y otros tipos de sensores (McGuffie y Henderson-Sellers, 2005).

2.4.2. Temperatura ambiente

La temperatura influye directamente en el ciclo hidrológico, ya que determina la evapotranspiración potencial y real en una región determinada. Esto, a su vez, afecta la disponibilidad de agua en el suelo, los caudales de ríos y la humedad del suelo, factores que inciden en la susceptibilidad a inundaciones y deslizamientos (Dingman, 2015).

Mediante el uso de imágenes satelitales, es posible estimar la temperatura de la superficie terrestre a través de la radiación emitida, por ejemplo, con sensores térmicos como los del satélite Landsat. Estos datos de temperatura superficial son útiles para caracterizar condiciones climáticas locales y regionales (Dingman, 2015).

En zonas montañosas como la Sierra Norte, donde existen fuertes gradientes altitudinales, las temperaturas presentan una gran variabilidad espacial. Esto se debe al efecto de disminución de temperatura con la altitud, conocido como gradiente adiabático (Barry y Chorley, 2003). Comprender estos patrones de temperatura es esencial para modelar correctamente los procesos hidrológicos y de estabilidad de laderas (Dingman, 2015).

En cuanto a su relación con inundaciones, la temperatura actúa como un factor detonante al regular la velocidad de fusión nival y, por lo tanto, el ingreso de agua al sistema fluvial. Las temperaturas más altas pueden provocar una fusión más rápida y aumentar el riesgo de crecidas e inundaciones repentinas fluvial (Dingman, 2015).

Por otro lado, en el caso de deslizamientos de tierra, la temperatura afecta la estabilidad de las laderas al influir en la evapotranspiración y, en consecuencia, en el contenido de humedad del suelo. Los suelos más húmedos y saturados son más propensos a deslizarse, especialmente en combinación con fuertes precipitaciones (Dingman, 2015).

2.4.2.1. Formas de medir la temperatura

Existen diversas formas de medir la temperatura, tanto de manera directa como indirecta:

a. Mediciones in situ:

✓ Estaciones meteorológicas terrestres: Proporcionan datos de temperatura del aire a nivel del suelo mediante termómetros convencionales o sensores digitales (Ahrens, 2009).

✓ Sensores de temperatura del suelo: Colocados a diferentes profundidades para registrar la temperatura en el perfil edáfico (McGuffie y Henderson Sellers 2005).

b. Teledetección:

✓ Sensores térmicos en satélites: Miden la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre y la relacionan con su temperatura mediante algoritmos de transferencia radiativa (McGuffie & Henderson Sellers, 2005). Ejemplos son los sensores Landsat TM/ETM+, MODIS, ASTER.

✓ Estimación a partir de otras bandas: La temperatura también puede estimarse indirectamente a partir de la radiación visible, infrarroja cercana y de otras longitudes de onda, utilizando modelos empíricos de transferencia radiativa (McGuffie & Henderson Sellers, 2005).

c. Modelado climático:

✓ Modelos de circulación general: Simulan los patrones de temperatura atmosférica y superficial a escala regional o global, basados en principios físicos y condiciones iniciales (McGuffie & Henderson Sellers, 2005).

✓ Modelos de elevación digital: Permiten estimar temperaturas en áreas montañosas a partir de la altitud, aplicando factores de corrección climática (Rolland, 2003).

La elección del método dependerá de factores como la escala del estudio, la resolución espacial y temporal requerida, la disponibilidad de datos y los recursos disponibles. Las mediciones in situ son puntuales pero precisas, mientras que la teledetección proporciona una cobertura espacial más amplia a expensas de una menor resolución temporal. Los modelos climáticos son útiles para grandes áreas y simulaciones futuras (McGuffie & Henderson Sellers, 2005).

2.4.1.6. Modelo satelital de precipitación y de temperatura

En los estudios geoespaciales enfocados en evaluar el riesgo de inundaciones y deslizamientos, es fundamental contar con estimaciones precisas de precipitación y temperatura a escala espacial y temporal adecuada. Los modelos satelitales han demostrado ser herramientas valiosas para este propósito, especialmente en regiones con escasa cobertura de estaciones meteorológicas terrestres (Weng, Lu y Schubring 2004).

Modelos satelitales de precipitación

- Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM): Utiliza un radar de precipitación (PR) y un radiómetro de microondas (TMI) para estimar la precipitación en los trópicos y subtrópicos (Kummerow et al., 1998).

- Global Precipitation Measurement (GPM): Sucesora de TRMM, combina observaciones de múltiples satélites con un conjunto de algoritmos para generar estimaciones globales de precipitación (Hou et al., 2014).

- PERSIANN (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks): Estimación de la precipitación a partir de datos multispectrales de satélites geostacionarios y de órbita baja utilizando redes neuronales artificiales (Sorooshian et al., 2000).

Modelos satelitales de temperatura

- Landsat: Los sensores Landsat TM/ETM+/OLI tienen bandas térmicas que permiten estimar la temperatura superficial con alta resolución espacial (Weng, Lu y Schubring 2004).

- ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer): Proporciona mediciones de temperatura superficial y emisividad con cinco bandas térmicas (Gillespie et al., 1998).

- Modelo TerraClimate: es un conjunto de datos mensuales sobre el balance hídrico climático y climatológico de la superficie terrestre mundial. Utiliza interpolación asistida por el clima para combinar la normalidad climática de alta resolución espacial del conjunto de datos (Piles et al., 2011).

2.4.2.1. Determinación del balance hídrico de forma espacial

En los estudios geoespaciales orientados a definir zonas de riesgo a inundaciones y deslizamientos, el balance hídrico es un componente clave a considerar. Este parámetro representa la distribución de la entrada y salida de agua en un sistema, y su cuantificación espacial es esencial para comprender los procesos hidrológicos y de estabilidad de laderas en una región determinada (Thornthwaite 1948)

Una de las metodologías ampliamente utilizadas para determinar el balance hídrico espacial es la combinación del método de Thornthwaite con datos obtenidos mediante técnicas de teledetección. A continuación, se describe este enfoque:

Cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) mediante el método de Thornthwaite:

- Se estima la ETP mensual utilizando únicamente datos de temperatura media mensual y la latitud de la zona de estudio.
- El método de Thornthwaite utiliza un índice de calor anual basado en la suma de las temperaturas mensuales elevadas a una potencia (Thornthwaite 1948).

Estimación de la precipitación a partir de imágenes satelitales:

- Se utilizan productos de precipitación derivados de sensores como TRMM, GPM o técnicas multi-sensor para obtener estimaciones de precipitación mensual con cobertura espacial detallada (Behrangi et al., 2009; Tapiador et al., 2012).

Cálculo del balance hídrico mensual:

- Se aplica la ecuación de balance hídrico: $\text{Precipitación} - \text{ETP} = \text{Exceso o Déficit}$
- Esto se realiza para cada celda o píxel de la imagen satelital, obteniendo así una representación espacial del balance hídrico mensual.

Análisis de patrones espaciales y temporales

- Se identifican áreas con excesos hídricos recurrentes, susceptibles a inundaciones.
- Se detectan zonas con déficits prolongados, que pueden influir en la estabilidad de laderas.

Esta metodología combina la simplicidad y amplia aceptación del método de Thornthwaite con la cobertura espacial detallada proporcionada por los datos satelitales de precipitación. Sin embargo, es importante considerar las limitaciones y fuentes de error inherentes a ambos enfoques, y realizar validaciones con mediciones in situ cuando sea posible (Thornthwaite 1948)

El resultado final es una caracterización espacial y temporal del balance hídrico en la región de estudio, que puede ser utilizada como insumo en modelos hidrológicos y de estabilidad de laderas para evaluar el riesgo de inundaciones y deslizamientos (Thornthwaite 1948).

2.4.2.2. El balance climático espacial

El balance hídrico climático espacial es una extensión del concepto de balance hídrico climático que incorpora la dimensión espacial, permitiendo analizar la distribución y el movimiento del agua en un sistema a través del espacio. Esta perspectiva espacial es fundamental en estudios geoespaciales de riesgos naturales, como inundaciones y deslizamientos, ya que estos eventos

tienen una distribución heterogénea en el territorio (Behrangi et al., 2009; Hou et al., 2014; Sorooshian et al., 2000).

La ecuación general del balance hídrico climático espacial es la misma que la del balance hídrico climático:

$$P = ETR + R + \Delta S$$

Donde: P = Precipitación ETR = Evapotranspiración real R = Escorrentía superficial y subterránea
 ΔS = Cambio en el almacenamiento de agua en el suelo y acuíferos

Sin embargo, en este caso, cada uno de los componentes se considera como una variable espacialmente distribuida, es decir, varía en función de la ubicación geográfica (Dingman, 2015).

La determinación del balance hídrico climático espacial se basa en la integración de datos obtenidos de técnicas de teledetección, modelos hidrológicos distribuidos y sistemas de información geográfica (SIG). Algunos aspectos clave son:

Precipitación espacial: Se estima a partir de productos de precipitación derivados de satélites meteorológicos, como TRMM, GPM y PERSIANN, que proporcionan estimaciones de precipitación a escalas espaciales y temporales adecuadas (Behrangi et al., 2009; Hou et al., 2014; Sorooshian et al., 2000).

Evapotranspiración real espacial: Se calcula a partir de modelos que utilizan datos de teledetección, como temperatura de superficie, índices de vegetación y humedad del suelo, obtenidos de sensores como MODIS, Landsat y sensores de microondas (Nagler et al., 2005; Nouri et al., 2014; Zhang et al., 2019).

Escorrentía espacial: Se modela mediante técnicas hidrológicas distribuidas que incorporan datos espaciales de topografía, tipos de suelo, cobertura vegetal y precipitación, obtenido a partir de imágenes satelitales y modelos de elevación digitales (Beven & Kirkby, 1979; Refsgaard, 1997).

Cambio en almacenamiento espacial: Se estima a partir de datos de humedad del suelo y agua superficial, obtenidos mediante sensores remotos de microondas y ópticos, así como de modelos hidrológicos distribuidos (Sánchez García et al., 2019).

2.4.2.3. La precipitación mensual

Esta precipitación mensual es un factor esencial en climatología, meteorología e hidrología la cual hace referencia a la cantidad total de agua en forma líquida o sólida que desciende en una ubicación específica en el periodo de un mes (Dingman, 2015; Tapiador et al., 2012). Sus particularidades y la relevancia de la precipitación mensual se puntualizan a continuación:

Medición y definición: Se mide mediante instrumentos como pluviómetros, estaciones meteorológicas, o se evalúa indirectamente mediante técnicas de teledetección como radares meteorológicos e imágenes satelitales. Su precipitación mensual se manifiesta en milímetros (mm) o pulgadas y describe la altura del agua estancada encima de una superficie plana a lo largo del mes (Dingman, 2015; Tapiador et al., 2012).

Variabilidad espacial y temporal: La precipitación mensual exhibe una gran variabilidad espacial y temporal. Puede variar significativamente en distancias cortas debido a factores como la topografía, la influencia de cuerpos de agua y los patrones de circulación atmosférica. Además, presenta una marcada variabilidad interanual e intraanual, influenciada por fenómenos como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y otros patrones climáticos (Nicholson, 2011; Ropelewski & Halpert, 1987).

Importancia hidrológica: La precipitación mensual es un dato clave para calcular los balances hídricos, estimar la escorrentía superficial y subterránea, la recarga de acuíferos y diseñar sistemas de gestión de aguas pluviales y protección contra inundaciones. Es esencial para comprender los procesos hidrológicos y la gestión de los recursos hídricos (Dingman, 2015; Ponce et al., 2000).

Impacto en la agricultura: Es un parámetro relevante para la planeación agrícola, puesto que incide en la accesibilidad del recurso hídrico para los cultivos, la planificación de riego y las labores de siembra y cosecha (Mishra & Singh, 2010).

Cambio climático y aplicaciones climatología: Su evaluación a un determinado plazo a posibilitar conocer las técnicas y variabilidades climáticas y es relevante para la adaptación y mitigación de los impactos del cambio climático. Las aplicaciones climatológicas son factores primordiales para el estudio de patrones climáticos y la localización de variaciones en el régimen de precipitación a causa del cambio climático (Trenberth, 2011).

2.4.2.4. Pérdida o adición potencial de agua en el suelo (P-ETP).

La adicción potencial es una pérdida o ganancia de agua en el suelo (P-ETP) en un parámetro climático el cual se utiliza para la evaluación del balance hídrico climático de una zona específica. Esta medición plasma la discrepancia entre precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ETP), que se refiere a la cantidad máxima de agua que puede evaporarse y transpirar de la superficie de una vegetación estimando que no existan restricciones de agua en el suelo (Thornthwaite, 1948).

Si la P-ETP es negativo, nos muestra que la evapotranspiración potencial supera la precipitación, por lo que da como resultado un déficit hídrico en el suelo y probablemente en condiciones de sequía, por otra parte, cuando P-ETP es positiva significa que la precipitación excede la evapotranspiración potencial, por lo que se conduce a un excedente de agua en el suelo y eventualmente a la recarga de agua subterráneas o a la escorrentía superficial (Thornthwaite, 1948).

2.4.2.5. Capacidad de agua disponible (CAD)

La capacidad de agua disponible (CAD) es una definición central en la gestión de recursos hídricos y en su agricultura. Concibe referencia a la cantidad de agua existente en las plantas a la vez estas pueden proveer y usar en un perfil de suelo específico en un lugar determinado (Thornthwaite, 1948).

Esta se describe como la discrepancia entre la cantidad de agua presente en el suelo a capacidad de campo y la cantidad de agua presente en el suelo exactamente en el punto de marchitez permanente. La capacidad de campo indica el contenido de agua en el suelo después de que este se drena por gravedad, y punto de marchitez permanente se refiere al contenido de agua debajo del cual las plantas no pueden extraer tan fácilmente el agua lo que provoca la marchitez de las mismas (Thornthwaite, 1948).

La capacidad de agua disponible CAD generalmente se expresa como milímetros de agua por metro de profundidad del suelo (mm/m) o porcentaje de volumen. Los suelos con un alto CAD pueden almacenar más agua disponible para las plantas, lo que beneficia el crecimiento y el rendimiento de los cultivos, especialmente en condiciones de sequía (Thornthwaite 1948).

2.4.2.6. Agua almacenada en el suelo (ARM)

El almacenamiento de agua en el suelo (ARM) es un parámetro clave para la gestión de los recursos hídricos y la agricultura. Representa la cantidad de agua retenida en el perfil del suelo disponible para las plantas (Payero et al. 2006).

ARM se mide en milímetros (mm) y se calcula como la diferencia entre el contenido de humedad actual del suelo y el contenido de humedad en el punto de marchitez permanente (PMP). PMP es el nivel de humedad en el suelo que dificulta que las plantas absorban agua y hace que se marchiten (Payero et al. 2006).

ARM es un indicador esencial de la disponibilidad de agua para plantas y se emplea para identificar las necesidades de riego y planificar eficazmente el suministro de agua (Payero et al. 2006).

2.4.2.7. Alteración mensual de almacenamiento de agua (ALT)

El cambio mensual en el almacenamiento de agua (ALT) es una medida utilizada en hidrología para determinar los cambios en el almacenamiento de agua en un sistema durante un mes. Este factor es importante para comprender el balance hídrico climático y la dinámica de los recursos hídricos en una región determinada (Dingman 2015). ALT se calcula como la diferencia entre la entrada de agua (precipitación, afluencia, etc.) y la salida de agua (evaporación, salida, etc.) al sistema durante un mes. Los valores positivos de ALT indican un aumento neto del almacenamiento de agua, mientras que los valores negativos indican una disminución del almacenamiento de agua (Dingman 2015). La ALT generalmente se expresa en milímetros (mm) de altura equivalente del agua sobre una superficie determinada, lo que permite una fácil comparación de los cambios en el almacenamiento de agua entre regiones y escalas espaciales (Dingman 2015).

2.4.2.8. Evapotranspiración Real (ETR)

La evapotranspiración real (ETR) es la cantidad de agua que realmente se pierde a la atmósfera mediante el proceso combinado de evaporación de la superficie del suelo y transpiración de las plantas. Es un concepto fundamental en hidrología, agricultura y gestión de recursos hídricos (Bai & Shen, 2020).

La ETR se distingue del potencial de evapotranspiración (ETP), que describe la cantidad máxima de agua que puede evaporarse y transpirar de la superficie de una vegetación en ausencia de restricciones de agua en el recurso suelo. La ETR suele ser menor que la ETP ya que está sujeta a la disponibilidad de agua en el suelo (Bai & Shen,2020).

La ETR se ve afectada por varios factores, como las condiciones climáticas (radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento), tipo y condición de la vegetación, propiedades del suelo y disponibilidad de agua en el perfil del suelo (Bai & Shen,2020).

2.4.2.9. Déficit hídrico.

Los términos deshidratación y estrés a menudo se usan indistintamente, pero definen condiciones diferentes. A medida que disminuye la cantidad de agua en el suelo disponible para las plantas (=escasez), el contenido de agua de las plantas se ve afectado. La reducción del contenido de agua en los tejidos vegetales provoca cambios en los procesos metabólicos, lo que afecta negativamente al crecimiento y desarrollo de las plantas (= estrés hídrico). El alcance de los efectos negativos y los procesos metabólicos involucrados dependen de la especie, el momento del ciclo ontogenético (la sensibilidad puede variar a lo largo del ciclo ontogenético) y la intensidad y duración del estrés hídrico (Chimenti, 2022).

El déficit hídrico está relacionado con la cantidad de vapor de agua que le faltan a la atmósfera cuando está se mantiene saturada a una temperatura determinada. Esto atribuye a la humedad relativa y la temperatura ambiente. Este indicador marca periodos de posible estrés hídrico por baja humedad relativa, altas temperaturas, y periodos de peligro por plagas y enfermedades por exceso de humedad relativa y bajas temperaturas (Parra, 2022).

Esta escasez de agua se debe a varios motivos, ya sea precipitaciones insuficientes, mala gestión de agua y cambio climático. Por ende, esto hace que influya a muchas partes del planeta y trae consigo graves consecuencias para la salud, tanto humana, agricultura a la vida silvestre y el medio ambiente (Parra, 2022).

2.4.2.10. Exceso hídrico.

El exceso hídrico en un área o cuenca hidrográfica hace referencia a una cualidad en la que el recurso hídrico disponible supera la habilidad de almacenamiento e infiltración del suelo, ocasionando una inestabilidad en el balance hídrico natural (Mungaray, 2020).

Las causas pueden ser por diversos factores pueden contribuir al exceso hídrico en una cuenca hidrográfica como: Precipitaciones intensas, impermeabilización, deforestación, cambio del uso del suelo, daños a la infraestructura, pérdidas agrícolas y desplazamientos poblacionales.

2.5. Análisis Espacial

2.5.1. Método de superposición ponderada

El método de superposición ponderada (WOP) se refiere a una técnica de análisis espacial multicriterio que facilita organizar y evaluar distintas capas de información geográfica para la toma de decisiones espaciales. Esta metodología sustenta la superposición de capas de información, asignando pesos a cada capa conforme a su relevancia en el desarrollo de toma de decisiones (Lopez, 2021).

2.5.2. Técnica de Weighted Overlay en los Sistemas de Información Geográfica

2.5.2.1. Superposición ponderada

La superposición ponderada es una herramienta que aplica uno de los métodos de análisis de superposición más utilizados para resolver problemas de criterios múltiples, como la selección de sitios y los modelos de idoneidad. En el análisis de superposición ponderada, cada paso del análisis de superposición general sigue a cada paso del análisis de superposición general. Como ocurre con todos los análisis de superposición, en un análisis de superposición ponderada usted define el problema, descompone el modelo en submodelos e identifica las capas de entrada.

Debido a que las capas de condiciones de entrada tendrán diferentes sistemas de numeración con diferentes rangos, para combinarlas en un solo análisis, cada celda para cada condición debe reclasificarse de acuerdo con una escala de preferencia común (por ejemplo, 1 a 10, donde 10 es más beneficioso). Una preferencia especificada en una escala común implica la preferencia del fenómeno por ese estándar. Los valores de preferencia son proporciones relativas (Echeverry Hernández y Marriaga Rocha 2018).

2.5.2.2. Evaluación multicriterio

Evaluación multicriterio: La evaluación multicriterio ha sido desarrollada para ser implementada en rásters, para ello se parte de información básica conformada por variables en forma de mapas o capas, realizado fuera del programa de evaluación. Este criterio propone una distribución

espacial de habilidades que se puede transformar en dos variantes: factores discretos cuando las habilidades se presentan como dicotómicas (sí/no) y factores continuos cuando las habilidades se presentan como una amplia gama de posibilidades (Kubes 2019).

2.5.2.3. Análisis multicriterio basado en SIG (Álgebra de mapas)

Aparte de las utilidades básicas, uno de los usos fundamentales del SIG es obtener nuevas capas de información a partir de información previamente disponible. Para este propósito existe un conjunto de herramientas computacionales con matrices de datos que aceptan el nombre común de Álgebra de Mapas, el cual consiste en un extenso conjunto de operadores; realizar en una o más capas ráster de entrada para producir una o más capas ráster. Por operadores nos referimos a algoritmos que realizan la misma operación en todas las celdas de una capa ráster (Kubes 2019).

2.6. Zonas de riesgo

2.6.1. Zonas de riesgo de inundación

Las inundaciones, uno de los fenómenos naturales más destructivos del mundo, plantean un desafío significativo en Ecuador, particularmente en la zona norte de la serranía que alberga en los Andes ecuatorianos, esta definición de zonas de riesgo a inundación emerge como un proceso intrincado que demanda la integración de diversas disciplinas, entre ellas la ingeniería, la hidrología, la geología y la geografía, el propósito fundamental de este proceso radica en identificar áreas con mayor probabilidad de sufrir inundaciones (Arguello 2023).

Diversos métodos son empleados para la delimitación de zonas de riesgo a inundación, mediante un enfoque común implica la utilización de modelos hidrológicos, los cuales permiten estimar la probabilidad de ocurrencia de inundaciones en áreas específicas, También se utilizaron otros métodos, incluido el análisis de imágenes satelitales, la revisión de datos históricos y la aplicación de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) (Arguello 2023).

En el contexto de la zona norte de la serranía ecuatoriana, múltiples estudios han sido llevados a cabo con el propósito de definir zonas de riesgo a inundación. Un estudio del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) en 2018 empleó un modelo hidrológico para identificar áreas con mayor probabilidad de inundación (Lucero Peralta 2020, pág. 13).

En paralelo, un estudio efectuado por la Universidad Politécnica Salesiana en 2022 utilizó imágenes satelitales para identificar áreas previamente inundadas. Este análisis identificó que las cuencas de los ríos Chota, Mira y Guayllabamba son particularmente susceptibles a inundaciones, la convergencia de estos estudios corrobora que las áreas de mayor riesgo de inundación en la zona norte de la serranía ecuatoriana coinciden con las cuencas de los principales ríos de la región. Estas áreas enfrentan riesgos de inundación derivados de factores tales como la topografía, el clima y la actividad humana. Estos hallazgos subrayan la necesidad de estrategias de gestión de riesgos focalizadas y medidas preventivas en estas regiones vulnerables (Lucero Peralta 2020, pág. 13).

Las cinco parroquias urbanas que conforman el municipio de Ibarra, Radolo Rosa de Prioratto, Guayaquil de Alpachaca, El Zaglario, San Francisco y Caranqui, se ubican en Tawando La cuenca hidrológica del río, por donde fluyen aguas residuales a través de la ciudad, en algunos casos Estos canales naturales provocan inundaciones en zonas centrales densamente pobladas, no por el desbordamiento del agua de lluvia en sí, sino debido a que las tierras altas donde se concentran las actividades mineras (Parroquia de Kalanki) Material de arrastre, rocas liberadas desde las laderas de la región cercanas al volcán Imbabura obstruyeron las redes de agua de lluvia y canales de riego (Lucero Peralta 2020, pág. 13).

2.6.1.2. Qué es una zona de inundación.

Es una zona de inundación que hace referencia a una zona sujeta a inundaciones, por ende, se caracteriza por ser un área de tierra baja, que sea localizada cerca de cuerpos de agua como: ríos, lagos o mares, que está expuesta a inundaciones periódicas (Lamos, 2021). A su vez estas inundaciones pueden ser causadas debido a varios eventos climatológicos como lluvias intensas, desbordamiento de mares o ríos, marejadas ciclónicas entre otras.

Las áreas propensas a inundaciones tienen características distintivas, como una topografía plana o con una leve pendiente, suelos permeables con capacidad limitada para drenar el agua y vegetación adaptada a condiciones húmedas permanentes o temporales. Además, en estas zonas es común encontrar asentamientos humanos, lo que aumenta la vulnerabilidad frente a eventos de inundación (Lamos, 2021).

Por otra parte, las zonas más sensibles a inundaciones representan riesgos significativos para la sociedad y el medio natural, por lo cual, estos puedan ocasionar pérdidas humanas y daños materiales, ya sea en viviendas, infraestructuras y cosechas. Asimismo, las inundaciones traen consigo sustancias que contaminan a la calidad del recurso hídrico y del recurso suelo,

condiciones de humedad y estancamiento de agua que impulsa la transmisión de insectos como mosquitos y un sin número de transportadores de enfermedades (Bernan, 2022).

2.6.1.3. Características de zonas inundables

Las precipitaciones, los regímenes hidrológicos y los caudales anuales exhiben grandes variaciones espaciales relacionadas con importantes cambios geomorfológicos (por ejemplo, topografía, clima) en sus cuencas. Las precipitaciones en el Amazonas son más regulares que en los Andes, aumentando de 1.300mm por año en las estribaciones orientales de la Cordillera de los Andes a 3.000mm por año en la llanura amazónica (Castro y Romero 2013).

La llanura es la parte más baja inundada del río de tierras bajas y está formada por llanuras, terrazas bajas y abanicos aluviales, que pueden estar sujetos a inundaciones permanentes esporádicas (más de 8 meses) e inundaciones temporales (días, semanas y meses) (Castro y Romero 2013).

Los suelos en estos mesomorfos llanos corresponden a suelos aluviales de estructura estratificada, desaturada e hidromórfica, con capas orgánicas o minerales y estructura indiferenciada; suelos ferríticos muy arcillosos; suelos ferruginosos andinos; suelos hidratados profundos (Castro y Romero 2013).

2.6.1.4. Factores que condicionan una inundación

- Parámetros positivos de precipitación anormal.
- Parámetros de proximidad a fuentes de agua.
- Factores condicionantes. Parámetros (magnitud e intensidad) de una misma zona geográfica del evento y su distribución en el espacio y el tiempo
- Parámetros de relieve con pesos ponderados.
- Parámetros para consideraciones de tipo de suelo.
- Desencadenar. Liberar cuantificación de eventos y/o agrupaciones de eventos que puedan crear peligros dentro de un área geográfica específica.
- Parámetros hidrometeorológicos.
- Inducida artificialmente (Porta Zapata 2020).

2.6.2. Zonas de riesgo a deslizamiento

La susceptibilidad es una propiedad de un terreno que indica qué tan favorables o desfavorables son sus condiciones para la ocurrencia de deslizamientos. "El estudio de la susceptibilidad a deslizamientos permite identificar áreas propensas a estos fenómenos, que pueden verse afectadas por la litología del material o por factores geomorfológicos e hidrológicos que pueden ser propios del ambiente en el que se ubica el deslizamiento. Material. La susceptibilidad se define según a La probabilidad de que un fenómeno ocurra en un área debido a las condiciones topográficas locales. Los factores desencadenantes como la precipitación, la actividad sísmica y la actividad volcánica no se consideran en la definición. La sensibilidad generalmente indica la facilidad con la que ocurre un fenómeno según las condiciones topográficas locales. La sensibilidad es la topografía. Atributo de una propiedad que indica cuán favorables o desfavorables son sus condiciones para la ocurrencia de deslizamientos (Cabrera Malla 2021).

Tabla 2-2. Clasificación de la susceptibilidad a deslizamientos con base a la observación de la morfología del terreno

Susceptibilidad	Criterio
VI Muy alta	Taludes con deslizamientos activos. Los movimientos pueden ser continuos o estacionarios.
V Alta	Taludes sujetos con frecuencia a actividades de deslizamiento. La activación de los deslizamientos resulta cuando ocurren eventos con intervalos de recurrencia menor a cinco años.
IV Medianamente alta	Taludes con actividad de deslizamientos poco frecuente. La activación de deslizamientos ocurre en los eventos con intervalos de recurrencia mayores a cinco años
III Mediana	Taludes con antigua evidencia de actividad de deslizamiento, pero que no han presentado movimientos en los últimos cien años.
II Baja	Taludes que no muestran evidencia de actividad previa de deslizamientos, pero que se consideran probables que se desarrollen en el futuro. Sin embargo, los análisis de esfuerzos como la analogía con otros taludes o el análisis de los factores muestran una posibilidad baja de que lleguen a presentarse deslizamientos.
I Muy baja	Taludes que no muestran evidencia de actividad previa de deslizamientos y que, por análisis de esfuerzos, analogías con otros taludes, o por análisis de los factores de estabilidad, se considera muy improbable que se desarrollen deslizamientos en el futuro previsible.

Fuente: (Cabrera Malla 2021).

2.6.2.2. Características de una zona propensa a deslizamiento

Los deslizamientos de tierra en cuencas hidrográficas son fenómenos geológicos que representan un riesgo significativo para la vida humana, la infraestructura y el medio ambiente. La identificación de zonas propensas a deslizamientos es crucial para la planificación del desarrollo urbano y la implementación de medidas de mitigación (Castro, 2018)

Características geológicas:

Pendientes pronunciadas: Las áreas con pendientes mayores a 25° son más susceptibles a deslizamientos, especialmente si la pendiente es uniforme y continúa.

Los tipos de suelos: Los suelos arenosos, arcillosos o con baja cohesión son los más propensos a deslizamiento, especialmente si están saturados de agua.

La presencia del material rocoso: Su existencia de rocas fragmentadas o meteorizadas maximiza la posibilidad a deslizamientos.

La Precipitación intensa: Lluvias vigorosas y perdurables pueden saturar el suelo y desatar deslizamientos.

Permeabilidad e infiltración: Los suelos con alta y baja permeabilidad pueden producir exceso de agua, aumentando el riesgo a deslizamientos.

Los Niveles freáticos altos: El nivel freático va incrementando la presión del recurso hídrico en el suelo, lo que lo desequilibra y desata a un deslizamiento.

Características de la vegetación

Deforestación: La tala de árboles reduce la cohesión del suelo y aumenta la erosión, lo que puede conducir a deslizamientos.

La cobertura vegetal: SU existencia de vegetación compacta y profunda aporta a equilibrar el recurso suelo y precautelar deslizamientos (Dennys, 2020).

2.6.2.3. Los factores que condicionan un deslizamiento

Son deslizamientos de tierra que son sucesos geológicos complejos que algunas veces son restringidos por diversos factores. La percepción de estos factores es esencial para la valoración del riesgo a deslizamiento y la ejecución de medidas de mitigación y prevención (Vellonce, 2021).

Dentro de los factores predisponentes tenemos:

La geología: tiene que su composición geológica del territorio existe las fallas geológicas, la meteorización de las rocas y la pendiente del terreno son parámetros que incrementan la vulnerabilidad a deslizamientos (Vellonce, 2021).

La hidrología: Tiene una cantidad o intensidad de las precipitaciones, la presencia de niveles freáticos altos, la infiltración del agua en el suelo y el caudal de los ríos influyen directamente en la solidez del territorio (Vellonce, 2021).

Vegetación: La deforestación, la erosión del suelo y la falta de cobertura vegetal pueden reducir la cohesión del terreno y aumentar el riesgo de deslizamientos (Vellonce, 2021)

Factores desencadenantes

Precipitación intensa: Lluvias fuertes y prolongadas son el principal factor desencadenante de deslizamientos.

La actividad sísmica: Eventos que se originan vibraciones como los terremotos y que perturban la estabilidad del terreno provocando así deslizamientos a gran escala.

La Actividad humana: Tiene obras en construcción, excavaciones, tala de árboles y otras actividades antropogénicas modifican el equilibrio del terreno por ende se incrementa el riesgo a deslizamientos.

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Localización

El presente estudio se realizó en la Sierra Norte del Ecuador, área geográfica que abarca las provincias de Imbabura, Pichincha y Carchi. La zona se caracteriza por un terreno montañoso, con altitudes que oscilan entre los 2.000 y los 4.000 metros sobre el nivel del mar. El clima es predominantemente templado, con temperaturas que oscilan entre los 15 y los 25 grados centígrados. Además de sus ricos paisajes, la Cordillera del Norte también es conocida por su biodiversidad única, que incluye una amplia variedad de flora y fauna, también es notable la diversidad cultural de la zona, con una población que incluye comunidades indígenas, mestizas y blancas (Jaramillo 2016).

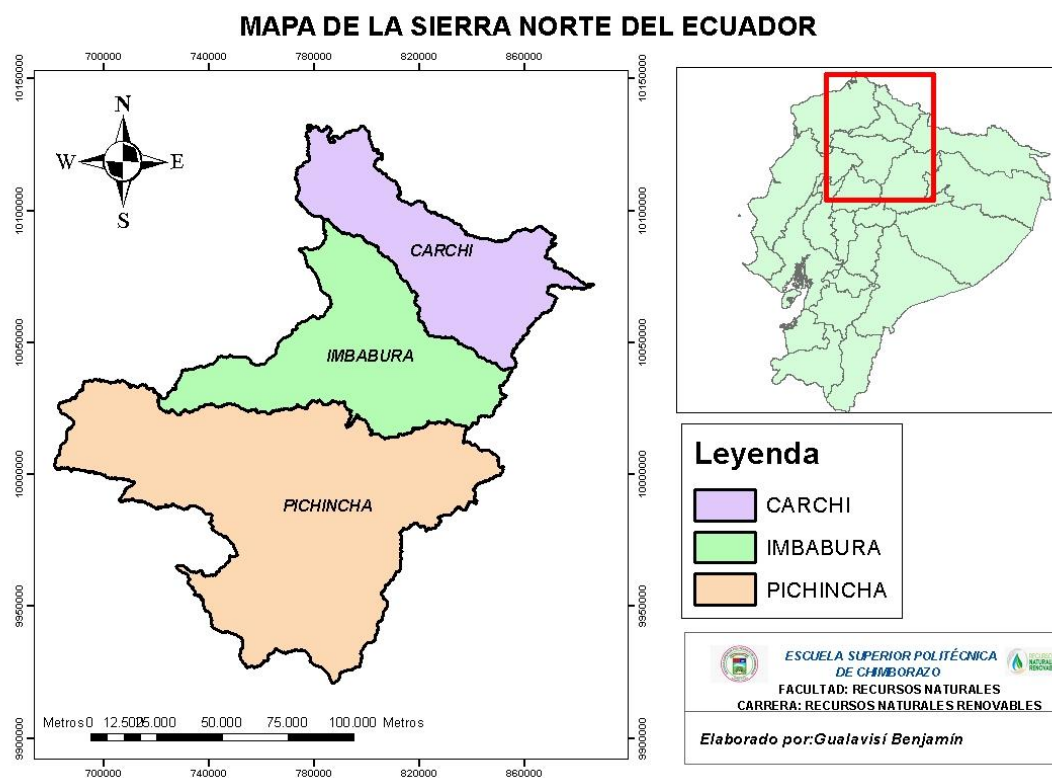


Ilustración 3-1: Localización de área de estudio.

Realizado por: Gualavisí, B, 2024.

3.1.1. Ubicación geográfica

Tabla 3-1: Ubicación de la sierra norte de Ecuador.

PICHINCHA	IMBABURA	CARCHI
Coordenadas proyectadas en UTM: Zona 17S, Datum WGS 84:	Coordenadas proyectadas en UTM: Zona 17S, Datum WGS 84:	Coordenadas proyectadas en UTM: Zona 17S, Datum WGS 84:
Latitud: X (Sur)= 1° 2' 50"	Latitud: X (Norte)= 0°21'6.16"	Latitud: X (Norte)= 1°12'43" y 0°21'50"
Longitud Y (Oeste)= 79° 49' 7"	Longitud Y (Oeste)= 78°7'20.39"	Longitud Y (Oeste)=77°31'36" y 38°33'12"
Altitud Z: 2.816 m.s.n.m	Altitud Z: 2.398 m.s.n.m	Altitud Z: 2.006 m.s.n.m
LIMITES		
Al Norte: Imbabura y Esmeraldas	Al Norte: Carchi	Al Norte: República de Colombia
Al Sur: Cotopaxi	Al Sur: Pichincha	Al Sur: Imbabura
Al Oeste: Santo domingo de los Tsáchilas	Al Oeste: Esmeraldas	Al Oeste: Esmeraldas
Al Este: Sucumbíos y Napo	Al Este: Sucumbíos	Al Este: Sucumbíos
Superficie: 9536 km ²	Superficie: 4588 km ²	Superficie: 3780 Km ²

Realizado por: Gualavisí, B,2024.

3.2. Métodos, técnicas de investigación

3.2.1. Enfoque de la investigación

Este estudio tiene como objetivo principal emplear tecnologías geoespaciales, como imágenes satelitales y SIG, para analizar el recurso agua y suelo en la Sierra Norte, con el fin de identificar y definir zonas de riesgo a inundación y deslizamiento. La investigación busca proporcionar una base científica para la gestión de riesgos naturales en la región, contribuyendo a la planificación del uso del suelo y a la mitigación de posibles eventos catastróficos.

3.2.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación asociado al estudio geoespacial mediante imágenes satelitales del recurso agua y suelo para la definición de zonas de riesgo a inundación y deslizamiento en la sierra norte es de carácter aplicado, por ende, la investigación aplicada se distingue por su finalidad de abordar problemas o necesidades prácticas específicas. En este caso, la problemática

focalizada es la delimitación de áreas de riesgo ante posibles inundaciones y deslizamientos en la sierra norte, este enfoque implica la recopilación y análisis de datos geoespaciales diversos, como imágenes satelitales, datos de precipitación y topografía, entre otros. Estos datos son analizados meticulosamente para identificar las características que contribuyen al riesgo de inundación y deslizamiento.

Una vez identificadas dichas características de riesgo, se procede a la confección de mapas de riesgo. Estos mapas se convierten en herramientas esenciales para informar tanto a las autoridades competentes como a la población acerca de las áreas susceptibles a estos eventos, esta relevancia de la investigación aplicada radica en su capacidad para abordar problemáticas concretas, como es el caso de la gestión del riesgo de desastres en la sierra norte. En este contexto, el estudio geoespacial mediante imágenes satelitales del recurso agua y suelo se erige como una herramienta crucial.

Resumidamente, esta metodología posee las siguientes ventajas:

- ✓ Son procesos tecnológicos escalables y de aplicar a grandes extensiones de superficies.
- ✓ Se puede identificar superficies a riesgo en terrenos remotos o de difícil acceso al lugar.
- ✓ Logra actualizarse habitualmente para poseer un cálculo de cambios en las situaciones ambientales, sosteniendo así un enfoque dinámico y adaptable al entorno.

3.2.3. Tipo de estudio

El diseño de investigación implementado para llevar a cabo este estudio geoespacial mediante imágenes satelitales con el objetivo de definir zonas de riesgo por inundaciones y deslizamientos en la Sierra Norte del Ecuador es el siguiente:

Adquisición de datos:

Se adquirieron diversos conjuntos de datos geoespaciales esenciales para el análisis, incluyendo:

- a. Imágenes de modelos de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés): Se obtuvieron datos DEM de alta resolución, como los modelos SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de 29,6 metros de resolución espacial. Estos datos DEM son fundamentales para el análisis topográfico y la determinación de pendientes.

Datos cartográficos: Se recopiló información cartográfica complementaria de organismos reconocidos, Los ejemplos incluyen la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y el Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) de Ecuador. Estos datos incluyen mapas de uso y cobertura del suelo, grupos hidrológicos del suelo y más.

3.2.4. Documental

La investigación se realiza mediante la recopilación, organización y sistematización de información sobre el ensayo. Para ello se realizan búsquedas de información a través de buscadores y plataformas de documentos bibliográficos. Esto permite obtener las fuentes necesarias para un tema de investigación y seleccionar un tema específico entre literatura, revistas, libros, artículos de investigación, tesis, etc.

3.2.5. Caracterizar el relieve

3.2.5.1. Pendiente

Una vez delimitada el área de estudio, se procedió a utilizar imágenes de elevación de alta resolución obtenidas del DEM SRTM de 29,6 m. Estas imágenes permitieron determinar la pendiente del terreno, un parámetro fundamental para caracterizar el relieve de la región. La clasificación de la pendiente se realizó de acuerdo con los estándares establecidos por la FAO, lo que garantizó la consistencia y la comparabilidad de los resultados con otros estudios similares.

3.2.5.2. Clasificación de la pendiente de acuerdo con la FAO

El siguiente paso fue buscar la información sobre las categorías de pendiente establecidas por la FAO y sus respectivos rangos de valores. Esta clasificación divide las pendientes en diez categorías, desde "plano" hasta "Muy escarpado", con sus correspondientes rangos de valores en porcentajes.

Para establecer las categorías de pendientes a mis datos, se utilizó la herramienta de Raster calculator (QGIS), lo cual se aplicó una fórmula con una condicional establecida en la función "Con". Esta fórmula que se utilizó nos permite evaluar cada celda de raster de la pendiente y se determina un valor numérico y asigne a una categoría de pendiente de la FAO según el rango señalado.

Esta fórmula se utilizó en la Raster calculator

Pendiente_FAO = Con(“pendiente” <= 0.2),1, Con((“pendiente” > 0.2) & (“pendiente” <= 0.5),2, Con((“pendiente” > 0.5) & (“pendiente” <= 1),3, Con((“pendiente” > 1) & (“pendiente” <= 2),4, Con((“pendiente” > 2) & (“pendiente” <= 5),5, Con((“pendiente” > 5) & (“pendiente” <= 10),6, Con((“pendiente” > 10) & (“pendiente” <= 15),7, Con((“pendiente” > 15) & (“pendiente” <= 30),8, Con((“pendiente” > 30) & (“pendiente” <= 60),9, Con((“pendiente” > 60),10))))))))))

La fórmula de la función “Con” evalúa cada categoría de la pendiente de manera secuencial, asignando un valor numérico proporcionando a cada categoría de la FAO, por ejemplo, si el valor de la pendiente es menor o igual a 0.2, toma el valor de 1 y su categoría es “Plana”, si es mayor a 0.2 pero menor o igual a 0.5, su valor será de 2 con su categoría “Suave” y así sucesivamente hasta llegar a la categoría de muy escarpado.

Tabla 3-2. Clases de gradiente de la pendiente.

Clase	Descripción	%
01	Plano	0-0,2
02	Nivel	0,2-0,5
03	Cercano al nivel	0,5-1,0
04	Muy ligeramente inclinado	1,0-2,0
05	Ligeramente inclinado	2-5
06	Inclinado	5-10
07	Fuertemente inclinado	10-15
08	Moderadamente escarpado	15-30
09	Escarpado	30-60
10	Muy escarpado	>60

Fuente: (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) 2009).

3.2.5.3. Índice Topográfico de Humedad (ITH)

El índice de humedad del terreno del área de interés se obtiene procesando un modelo de elevación digital (MDE) siguiendo el método propuesto por José Lobo y Ulrich Kampág. El proceso implica el cálculo del Índice de Humedad del Terreno (TWI), que identifica áreas propensas a la saturación de agua. El ITH resultante se utilizó luego para analizar la susceptibilidad a inundaciones del área de estudio. Esta información topográfica es fundamental para comprender

los patrones de acumulación de agua y evaluar los riesgos asociados con las inundaciones en función de las características topográficas.

Según los pasos detallados, la fórmula utilizada para calcular el índice topográfico de humedad (ITH) en QGIS fue:

$$ITH = \ln \left(\frac{As}{\tan\beta} \right)$$

Donde:

$As = \text{Área de contribución}$

$\tan\beta = \text{Pendiente de terreno}$

Y los pasos realizados para derivar cada parámetro fueron:

Pendiente ($\tan\beta$):

Convierte la pendiente ("slope") de grados a radianes: $\text{slope} * (3.141592/180)$

$$\text{Grados a Radianes} = \text{Slope} \left(\frac{3.141592}{180} \right)$$

Grados a Rad= Permite expresar la inclinación de una pendiente en una unidad angular diferente

Calcula el valor de la tangente: $\tan(\text{rad_slope})$

$$\text{Tangente} = \tan(\text{rad}_{\text{slope}})$$

Tan= información sobre el ángulo de inclinación de una línea o superficie con respecto a un eje de referencia

Área de contribución (As):

Escala el raster de "flow accumulation" en m^2 :

$$As = (\text{flow_accumulation} + 1) * 29,6$$

As= Indica la superficie de terreno que drena hacia un punto específico en una cuenca hidrográfica

Flow accumulation= Representa la cantidad total de agua que se acumula y fluye a lo largo de una pendiente en una cuenca hidrográfica.

Guarda el resultado escalado como As

Por lo tanto, reemplazando en la fórmula general:

$$ITH = \ln((\text{flow_accumulation} + 1) * 29,6 / \tan(\text{slope} * (3.141592/180)))$$

Ln= Se utiliza para transformar la escala de la pendiente y facilitar ciertos cálculos y análisis

Flow accumulation= Representa la cantidad total de agua que se acumula y fluye a lo largo de una pendiente en una cuenca hidrográfica.

Tan= información sobre el ángulo de inclinación de una línea o superficie con respecto a un eje de referencia.

Tabla 3-3. Valores de grado de amenazas del índice topográfico de humedad.

ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE HUMEDAD	GRADO DE AMENAZA
<0	1
0.1 – 3.98	2
>3.98	3

Fuente: (Obtenida de: “Uso del índice topográfico de humedad (ith) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, estado Trujillo-Venezuela” por Roa & Kampág. 2012. Revista)

Tabla 3-4. Porcentaje de inundación

PORCENTAJE	DESCRIPCION
BAJO ÍNDICE DE HUMEDAD	1
MODERADA ÍNDICE DE HUMEDAD	2
ALTO ÍNDICE DE HUMEDAD	3

Fuente: (Obtenida de: “Uso del índice topográfico de humedad (ith) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, estado Trujillo-Venezuela” por Roa & Kampág. 2012. Revista)

Esta categorización nos facilitara en la identificación y la evaluación de la Cordillera Norte del Ecuador en función de los niveles de humedad del suelo y su correlación con los riesgos a inundaciones y los deslizamientos, que nos van a proporcionar una valiosa información para la gestión y una mejora en la planificación del territorio de la región.

3.2.6. Identificar su cobertura y uso de suelo

Para establecer la cobertura y uso de suelo se descargó la capa vectorial (shapefile) más reciente del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) del Ecuador que fue del año 2020. Una vez descargado el archivo lo abrí en el software (QGIS), luego delimitamos las áreas de estudio específicas y se permitió acceder a las tablas de atributos, para seleccionar la cobertura del suelo y las clases de uso de interés, esto proceso nos permitió analizar y visualizar los distintos tipos de cobertura terrestre en nuestra área de estudio.

3.2.7. Determinar la escorrentía superficial y balance hídrico.

3.2.7.1. El método de número de curva

Este enfoque es presentado por Gaspari, lo cual plantea una técnica sencilla para estimar la precipitación de manera efectiva, considerando su precipitación acumulada, la vegetación presente, el uso del suelo y sus condiciones de humedad del suelo. Esta metodología introduce el concepto del número de curva (CN), por ende, se asigna a cada combinación específica de su tipo de suelo y cobertura vegetal, establecido en ciertas características de la vegetación y textura del suelo.

3.2.7.2. Grupos hidrológicos.

El método propuesto incluye la categorización de los suelos en función de su clasificación hídrica, lo cual implica la identificación de cuatro grupos hidrológicos (GH) basados en su clase textural. Esta clasificación hídrica se encuentra detallada en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5. Grupos hidrológicos

Grupos Hidrológicos	Textura
A	Arenoso; Arenoso-franco; Franco-arenoso
B	Franco-limoso; Franco; Limoso
C	Franco-arcillo-arenoso; Franco-arcillo-limoso; Franco-arcilloso
D	Arcillo-arenoso; Arcillo-limoso; Arcilloso

Fuente: (Chow, 1994; López Cadenas del Llano, 1998; Muñoz Cárpena y Ritter Rodríguez, 2005; Gaspari et al 2009).

3.2.7.3. La humedad Antecedente

Es esencial tener muy en cuenta las condiciones antecedentes de humedad del suelo, que se describen al estado de humedad del suelo antes de cualquier evento de precipitación. Estas condiciones se caracterizaron en tres grupos básicos según los niveles de humedad del suelo en relación con la precipitación de los últimos 5 a 10 días: seco (I), si la precipitación es inferior a 12,5mm; moderado (II), si la precipitación esta entre 12,5mm a 38,1mm; y húmedo (III), si la precipitación supera a los 38,1mm. Una vez que se ha determinado la categoría de humedad antecedente, se puede consultar en la Tabla 3-6 para la obtención de los valores correspondientes del número de curva (CN) para condiciones secas (I) y húmedas (III), correspondientemente. Esto nos permitirá una estimación más precisa del potencial de la escorrentía que fue basada en las condiciones de humedad del suelo antes de los acontecimientos de las precipitaciones.

Tabla 3-6. Conversión del número de curva de la condición ii a las condicionales i y iii.

Numero de curva en la condición	Numero de curva correspondiente a las condiciones	
	I	III
II	I	III
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

Fuente: (Chow, 1994; López Cadenas del Llano, 1998; Muñoz Cárpena y Ritter Rodríguez, 2005; Gaspari et al 2009).

3.2.7.4. Número de curva

Diversos autores han desarrollado estas tablas para establecer el número de curva (CN), en un parámetro crucial para la estimación del escurrimiento superficial. Estas tablas consideran la definición del grupo hidrológico del suelo en función de sus particularidades de infiltración y de la cobertura vegetal y/o uso de suelo del área de estudio. Además, la tabla asume la condición de humedad antecedente un promedio (II), que representa un estado intermedio de su saturación del suelo antes del suceso de precipitación analizado. Al utilizar las tablas, los expertos pueden

obtener fácilmente el número de curva que pertenecen a características específicas del área de interés, simplificando así el cálculo de la escorrentía superficial.

Tabla 3-7. Número de curva según grupo hidrológico y cobertura vegetal y/o uso del Suelo

Cobertura vegetal y/o uso del suelo	Grupo hidrológico			
	A	B	C	D
Barbecho	77	86	91	94
Cultivos alineados R P	72	81	88	91
Cultivos alineados R B	67	78	85	89
Cultivos alineados C P	70	79	84	88
Cultivos alineados C B	65	75	82	86
Cultivos alineados C-T P	66	74	80	82
Cultivos alineados C-T B	62	71	78	81
Cultivos no alineados o surcos pequeños R P	65	76	84	88
Cultivos no alineados o surcos pequeños R B	63	75	83	87
Cultivos no alineados o surcos pequeños C P	63	74	82	85
Cultivos no alineados o surcos pequeños C B	61	73	81	84
Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T P	61	72	79	82
Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T B	59	70	78	81
Cultivos densos leguminosas R P	66	77	84	88
Cultivos densos leguminosas R B	58	72	81	85
Cultivos densos leguminosas C P	64	75	83	85
Cultivos densos leguminosas C B	55	69	78	83
Cultivos densos leguminosas C-T P	63	73	80	83
Cultivos densos leguminosas C-T B	51	67	76	80
Matorral, mezcla matorral y maleza cubierta 50%	48	67	77	83
Matorral, mezcla matorral y maleza cubierta 50-75%	35	56	70	77
Matorral, mezcla matorral y maleza cubierta >75%	30	48	65	73
Montes con pastos P	45	66	77	83
Montes con pastos R	36	60	73	79
Montes con pastos B	25	55	70	77
Bosques MP	56	75	86	91
Bosques P	46	68	78	84
Bosques R	36	60	70	76
Bosques B	26	52	63	69

Bosques MB	15	44	54	61
Prados permanentes	30	58	71	78
Pastizal P	68	79	86	89
Pastizal R	49	69	79	84
Pastizal B	39	61	74	80
Pastizal C P	47	67	81	88
Pastizal C R	25	59	75	83
Pastizal C B	6	35	70	79
Resistencia baja densidad	54	70	80	85
Resistencia alta densidad	77	85	90	92
Superficies impermeables	98	98	98	98
Espejos de agua	0	0	0	0

R: laboreo sin prácticas de conservación

C: Curvas de nivel

C-T: Curvas de nivel y terrazas abiertas

MP: Condiciones de infiltración muy pobre

P: Condición de infiltración regular

M: Condición de infiltración regular

B: Condición de infiltración buena

MB: Condición de infiltración muy buena

Fuente: (Chow, 1994; López Cadenas del Llano, 1998; Muñoz Cárpena y Ritter Rodríguez, 2005; Gaspari et al 2009).

3.2.7.5. Potencial de retención máxima (S)

Partimos de las capas de cobertura, uso de suelo, textura y grupo hidrológico para determinar el Número de Curva (NC) según la tabla de referencia propuesta por Gaspari. El NC es un parámetro adimensional que representa la capacidad de infiltración de un suelo y varía en función de las características mencionadas anteriormente.

Una vez obtenido el NC, procediste a calcular la retención potencial máxima (S) utilizando la siguiente fórmula:

$$S = 254 * \frac{100}{NC} - 1$$

S= Potencial de retención máxima de infiltración del suelo en milímetros

NC= Número de curva

3.2.7.6. Cálculo de las pérdidas iniciales (I_0)

Posteriormente, calculó las pérdidas iniciales (I_0) mediante la ecuación:

$$I_0 = 0.2 * S$$

Las pérdidas iniciales hacen referencia al volumen de agua que se pierde por diversos procesos antes de que se inicie el escurrimiento superficial. Estos procesos incluyen la interceptación por la vegetación, la infiltración inicial en el suelo y el almacenamiento superficial en depresiones e irregularidades del terreno. En conjunto, estas pérdidas iniciales determinan la cantidad de agua que se sustrae de la precipitación total antes de que comience a generarse el escurrimiento propiamente dicho.

3.2.7.7. Caudal de escorrentía

Finalmente, para establecer el escurrimiento directo (Q), aplicaste la ecuación propuesta por Gaspari:

$$Q = \frac{(P - I_0)}{(P + 4 * I_0)} = \frac{(P - 0,2 * S)}{(P + 0,8 * S)}$$

Q= Escurrimiento directo

P= Precipitación enero-2021 de 198,9mm

S= Potencial de retención máxima

Io= Calculo de pérdidas iniciales

Esta ecuación te permitió calcular el escurrimiento superficial considerando la precipitación de 198,9mm para todo el año de 2021 y las pérdidas iniciales estimadas a partir de la retención potencial máxima (S).

La fórmula que se aplicó en la Raster Calculator es:

$$ESc = \frac{Con((Power(("198,9\%" - 0,2 * "%Constante_S\%"), 2))}{("%_198,9_%" + 0.8 * "%Constante_S\%")}}{Power(("198,9\%" - 0.2 * "%Constante_S\%"), 2)}{("%_198,9_%" + 0.8 * "%Constante_S\%"), ("198,9\%" - "%Perdidas_I\%"), 0)}$$
$$Con((Power(("198,9\%" - 0.2 * "%S\%"), 2) / ("%_198,9_%" + 0.8 * "%S\%"))) == (Power(("198,9\%" - 0.2 * "%S\%"), 2) / ("%_198,9_%" + 0.8 * "%S\%"), ("198,9\%" - "%Io\%"), 0)$$

Según un artículo publicado en el diario El Comercio en enero de 2021 (Comercio ,2021), se considera un valor de precipitación de 198,9mm para el cálculo del escurrimiento superficial, tanto en el año más húmedo (2021) como en el año más seco (2015). Esta elección se fundamenta en que la precipitación desencadenó inundaciones, deslizamientos en las vías y afectaciones en el suministro de agua potable a lo largo del año, tal como reportó el periódico El Comercio. Esta precipitación de 198,9mm registrada durante el evento de inundación de 2021 se utilizó como dato de entrada en la metodología propuesta por Gaspari et al. (2013), así estimar la escorrentía superficial en ambos escenarios climáticos (año seco y año húmedo), permitiendo contar con un análisis detallado de los riesgos asociados a estos fenómenos en la región de la Sierra Norte.

3.2.8. Balance hídrico climático

Para empezar a determinar los cálculos del balance hídrico climático, lo primero que fue es utilizar el método propuesto por Thornthwaite y Mather. Este método aplicado es muy crucial en áreas de investigación como la gestión de recursos hídricos, la evaluación del riesgo a inundaciones, análisis de susceptibilidad a deslizamientos de tierra, etc. Por ende, el balance hídrico climático que se ha obtenido mediante este método nos proporcionara información valiosa para una comprensión integral del ciclo hidrológico y sus impactos en el área de estudio.

La metodología empleada consta de los siguientes pasos:

3.2.8.1. Cálculo de la Temperatura media mensual (Tm)

Se promedió los valores máximos y mínimos de temperatura mensual y se multiplicó por un factor de 0.1.

$$T_{men_Ene} = \frac{("T_{max15E.tif}" + "T_{min15E.tif}")}{2} * 0,1$$

Los valores resultantes se recortaron al área de estudio.

3.2.8.2. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETPm)

Los pasos que has seguido para calcular la Evapotranspiración Potencial (ETPm) utilizando el método de Thornthwaite como parte del balance hídrico climático. Permíteme explicar cada uno de estos pasos en detalle:

a. Cálculo del Índice de Calor (IDCalor):

Utilizaste una fórmula que involucra las temperaturas medias mensuales (en este caso, "enero", "febrero", "marzo", etc.) elevadas a una potencia de 1.514 y divididas por 5.

Estas operaciones se realizan para cada mes y luego se suman para obtener el Índice de Calor anual.

$$IDCalor = \text{Power}\left(\left(\frac{\text{"enero"}}{5}\right), 1.514 + \text{Power}\left(\left(\frac{\text{"febrero"}}{5}\right), 1.514\right) + \dots + \text{Power}\left(\left(\frac{\text{"diciembre"}}{5}\right), 1.514\right)$$

b. Cálculo de la Constante de a (Constante_a):

Esta constante se calcula a partir del Índice de Calor utilizando una fórmula polinómica específica.

$$\text{Constante}_a = 675 * \text{Power}(\text{"IDCalor"} * \text{Power}(10, -3), 3) - 77.1 * \text{Power}(\text{"IDCalor"} * \text{Power}(10, -3), 2) + 1792 * (\text{"IDCalor"} * \text{Power}(10, -5)) + 0.49329$$

c. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mensual (ETP_enero, ETP_febrero, etc.):

Se aplicó una fórmula que considera la temperatura media mensual ("Tmen_Ene"), el Índice de Calor (IDCalor) y la Constante de a.

$$\text{ETP}_{\text{enero}} = 16 * \text{Power}\left(\left(\frac{10 * \text{"Tmen_Ene"}}{\text{"IDCalor"}}\right), \text{"Constante_a"}\right)$$

$$\text{ETP}_{\text{enero}} = 16 * \text{Power}\left(\left(\frac{10 * \text{Tmen_Ener}}{\text{"IDCalor"}}\right), \text{Constante_a}\right)$$

Esta fórmula se repitió para cada mes utilizando los valores correspondientes de temperatura media.

El cálculo de la Evapotranspiración Potencial es un componente clave en el balance hídrico climático, ya que representa la cantidad máxima de agua que puede evaporarse desde el suelo y transpirar a través de las plantas en condiciones óptimas de disponibilidad de agua.

3.2.8.3. Obtención de la Precipitación media mensual (Pm)

Se recortaron los datos de precipitación al área de estudio.

3.2.8.4. Cálculo de la Pérdida o adición potencial de agua en el suelo (P-ETP)

Se restó la Precipitación media mensual (Pm) de la Evapotranspiración Potencial (ETPm) para obtener la pérdida o adición potencial de agua en el suelo.

$$PEP_{\text{enero}} = P_{\text{enero}} - ETP_{\text{enero}}$$

PEP_m= Pérdida Potencial de agua en el suelo de enero

P_m= Precipitación de enero

ETP_m= Evapotranspiración Potencial de enero

Se calculó la pérdida anual utilizando una fórmula específica.

$$PEP_{\text{anual}} = \sum_{m=1}^{12} PEP_{\text{enero}} + PEP_{\text{febrero}} + \dots$$

PEP_{anual}= Pérdida Potencial de agua en el suelo anual

3.2.8.5. Determinación de la Capacidad de agua disponible (CAD)

Se utilizaron categorías de tipo de cobertura y textura del suelo a partir de mapas de uso del suelo descargados del Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE). Posteriormente se consulta una tabla de referencia para asignar valores de agua disponible (CAD) en función de estos parámetros. Este es el proceso que usted sigue en su estudio para determinar el CAD, que es un parámetro clave en el cálculo del equilibrio hídrico climático porque representa la capacidad máxima de retención de agua en el suelo.

En la tabla, se identificaron los valores de CAD correspondientes a cada combinación de tipo de cobertura y textura del suelo, como se muestra a continuación:

Tabla 3-8. Clasificación de cobertura y cultivo de ciclo corto, pastos, bosques

Tipo de cobertura	Textura del suelo	CAD (mm)
Vegetación arbustiva y herbácea	Franco arenoso fino	150
	Franco limoso	250
	Franco arcilloso	250
Cultivo de ciclo corto, pastos	Franco arenoso fino	75
	Franco limoso	125
	Franco arcilloso	100
Bosque	Franco arenoso fino	300
	Franco limoso	400
	Franco arcilloso	400

Fuente: (Coral, García Tomaselli y Leal 2015).

La tabla permite asignar valores CAD precisos a cada área del mapa, dependiendo de su tipo de cobertura y textura del suelo. La correcta determinación del CAD es crucial para el análisis del

ciclo hidrológico porque afecta directamente a la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo y por tanto a la cantidad de agua disponible para la vegetación y los procesos hidrológicos.

El siguiente paso fue utilizar la Calculadora de Campo en QGIS para clasificar y asignar los valores de CAD a cada polígono o píxel de tus capas de entrada. Para ello, has empleado una expresión condicional basada en la combinación de los valores de las capas de tipo de cobertura (PROMSA) y textura del suelo (txs).

La fórmula que utilizaste en la Raster Calculator para la categoría "Vegetación arbustiva y herbácea" con textura "FRANCO LIMOSO", has utilizado la siguiente expresión:

(PROMSA = 'Vegetación arbustiva - Pastos plantados' OR PROMSA = 'Vegetación arbustiva - Cultivos de ciclo corto' OR PROMSA = 'Vegetación arbustiva' OR PROMSA = 'Pastos naturales - Vegetación arbustiva' OR PROMSA = 'Páramo - Vegetación arbustiva' OR PROMSA = 'Páramo' OR PROMSA = 'Vegetación arbustiva - Areas erosionadas' OR PROMSA = 'Vegetación arbustiva - Arboricultura' OR PROMSA = 'Páramo - Bosque natural' OR PROMSA = 'Nieve, glaciares' OR PROMSA = 'Cuerpos de agua' OR PROMSA = 'Arboricultura') AND txs = 'FRANCO LIMOSO'.

Lo cual así determinaríamos para cada textura de suelo que se encontró en el mapa de uso del suelo del MAATE.

3.2.8.6. Agua almacenada en el suelo (ARM)

a. Para el cálculo de SUMPEP+ (Suma de valores positivos de PEP) para el mes de enero:

Utilizaste una expresión condicional para asignar el valor de PEP_ene si este era positivo, o cero en caso contrario.

$SUMPEP+enero = Con("PEP_ene" > 0, "PEP_ene", 0)$

SUMPEP+enero = Suma de valores positivos de Perdida Potencial de agua en el suelo de enero

b. Cálculo de SUMPEP- (Suma de valores negativos de PEP) para el mes de enero:

Utilizaste una expresión condicional similar, pero asignando el valor de PEP_ene si este era negativo, o cero en caso contrario.

SUMPEP-enero = Con("PEP_ene" < 0, "PEP_ene", 0)

SUMPEP-enero = Suma de valores negativos de Perdida Potencial de agua en el suelo de enero

c. Cálculo de ARM (Agua Almacenada en el Suelo) para el mes de enero:

Aplicaste una fórmula condicional compleja que considera PEP_anual, CAD, SUMPEP+_En y SUMPEP-_ene.

Esta fórmula asegura que el valor de ARM no exceda la CAD, y utiliza una expresión exponencial cuando SUMPEP+_En es menor que CAD.

$$\begin{aligned} & \text{Con}(\text{"PEP_anual"} \geq \text{"CAD"}, \text{"CAD"}, \text{Con}(\text{"SUMPEP +_En"} > \\ & = \text{"CAD"}, \text{"CAD"}, \text{Con}(\text{"SUMPEP +_En"} / (1 - \text{Exp}(\text{"SUMPEP"} \\ & - \text{"_ene"} / \text{"CAD"})) > \\ & = \text{"CAD"}, \text{"CAD"}, \text{"SUMPEP +_En"} / (1 - \text{Exp}(\text{"SUMPEP"} \\ & - \text{"_ene"} / \text{"CAD"})))) \end{aligned}$$

PEP_anual= Perdida Potencial de agua en el suelo anual

CAD= Capacidad de Agua Disponible

SUMPEP+En= Suma de valores positivos de Perdida Potencial de agua en el suelo de enero

SUMPEP-Ene= Suma de valores negativos de Perdida Potencial de agua en el suelo de enero

Exp= se utiliza para calcular el crecimiento o decaimiento exponencial asociado a una pendiente determinada

d. Cálculo de ARM para los meses de febrero a diciembre:

Utilizaste una fórmula recursiva que calcula ARM en función del ARM del mes anterior, PEP del mes actual y CAD.

La constate (SUP) se reemplazará con las expresiones condicionales que confirmen si (PEP) y (ARM) cumplan las condiciones específicas.

$$\begin{aligned} & \text{Con}(\text{"\%PEP_2\%"} < 0, \text{"\%ARM_1\%"} * \text{Exp}(\text{"\%PEP_2\%"} / \text{"\%CAD\%"}), \text{Con}(\text{"\%PEP_2\%"} \\ & < 0) \& ((\text{"\%ARM_1\%"} + \text{"\%PEP_2\%"} \geq \text{"\%CAD\%"})) \\ & = \text{"\%CAD\%"}, \text{"\%CAD\%"}, \text{"\%ARM_1\%"} + \text{"\%PEP_2\%"})) \end{aligned}$$

Esta metodología aplicada se basa en formular las condicionales y recursivas que permitan calcular la (ARM) para cada mes del año, teniendo muy en cuenta la relación entre precipitación (PP), evapotranspiración potencial (ETP) y capacidad de almacenamiento de agua del suelo (CAD).

3.2.8.7. Alteración mensual de almacenamiento de agua (ALT)

Se calculó restando el ARM del mes actual menos el ARM del mes siguiente.

$$ALT_{\text{enero}} = ARM_{\text{enero}} - ARM_{\text{febrero}}$$

ALTenero= Alteración de almacenamiento de agua de enero

ARMenero= Agua almacenada en el suelo de enero

ARMfebrero= Agua almacenada en el suelo de febrero

3.2.8.8. Evapotranspiración Real (ETR)

Se utilizó una fórmula condicional que considera PEP, ETP (Evapotranspiración Potencial) y ALT para determinar la ETR mensual.

$$ETR1 = \text{Con}((\%PEP_1\% \geq 0), \%ETP_1\%, (\%PP_1\% - \%ALT_1\%))$$

ETR1= Evapotranspiración Real enero

PEP1= Perdida Potencial de agua en el suelo de enero

ETP1= Evapotranspiración Potencial enero

P1= Precipitación enero

ALT1= Alteración de almacenamiento de agua de enero

3.2.8.9. Deficiencia hídrica (DEF)

Se obtuvo restando la ETP mensual menos la ETR mensual.

$$DEF_{\text{enero}} = "ETP_{\text{enero}}" - "ETR_{\text{enero}}"$$

DEFenero= Deficiencia Hídrica de enero

ETPenero= Evapotranspiración Potencial enero

ETRenero= Evapotranspiración Real enero

3.2.8.10. Exceso hídrico (EXC)

Se aplicó una fórmula condicional que considera ARM, CAD, PEP y ALT para determinar el EXC mensual.

En el exceso hídrico se determinó mediante esta fórmula y por los 12 meses

$$EXC1 = \text{Con}("ARM_1" == "CAD", "PEP_1" - "ALT_1", 0)$$

EXC1= Exceso hídrico de enero

ARM1= Agua almacenada en el suelo de enero

CAD= Capacidad de Agua Disponible

PEP1= Perdida Potencial de agua en el suelo de enero

ALT1= Alteración de almacenamiento de agua de enero

3.2.8.11. Balance Hídrico Climático (BHC)

a. Cálculo del BHC mensual:

Para obtener el BHC mensual, primero se multiplica el valor de la Deficiencia Hídrica (DEF) por -1 para cada mes.

Es decir, se aplica la fórmula "%DEF1%" * -1 a cada mes, desde enero hasta diciembre.

Esto se realiza para asignar un valor negativo a la deficiencia hídrica, ya que representa una pérdida de agua en el sistema.

Posteriormente, se utiliza una fórmula condicional para asignar el valor del Exceso Hídrico (EXC) o la Deficiencia Hídrica, dependiendo de cuál sea mayor.

La fórmula utilizada es: $BHC_1 = \text{Con} ("EXC_1" \leq 0, "defici1", "EXC_1")$

BHC_1= Balance Hídrico climático de enero

EXC_1= Exceso Hídrico de enero

defici1= Deficiencia de enero multiplicado por -1

Esto significa que, si el Exceso Hídrico es menor o igual a cero, se asigna el valor de la Deficiencia Hídrica. De lo contrario, se asigna el valor del Exceso Hídrico.

3.2.8.12. Promedio anual del balance hídrico climático (BHC)

Mediante los valores mensuales del balance hídrico climático (BHC) se realizará el promedio anual.

La suma de todos los valores mensuales del (BHC) para después dividir el resultado para los 12 meses del año. Teniendo en cuenta que los valores mensuales del BHC son los siguientes: BHC_1, BHC_2, BHC_3, ..., BHC_12, por lo cual aplica la siguiente formula que es:

$$PBHC_{anual} = BHC_1 + BHC_2 + BHC_3 + BHC_4 + BHC_5 + BHC_6 + BHC_7 + BHC_8 + BHC_9 + BHC_{10} + BHC_{11} + BHC_{12}$$

Así obtendremos como resultado el promedio del balance hídrico climático, donde se pueda apreciar claramente el balance hídrico en el área de estudio de todo el año. Este valor nos indicara valores positivos existe un exceso de agua, mientras que si nos presenta valores negativos nos indican un déficit hídrico en nuestra área de investigación.

3.2.9. Definición de las zonas de riesgo a inundación y deslizamiento.

3.2.9.1. Metodología de superposición ponderada

Esta metodología utilizada por Veloza Muñoz 2020 define las áreas de riesgo a inundaciones y deslizamiento de tierra, lo cual, esta aplicación de análisis multicriterio que se utilizó la herramienta de superposición ponderada en el software de (QGis). Este método nos permitirá integrar varios factores relevantes y asignarles los pesos relativos en porcentajes del 0 a 100% en función de su importancia en la evaluación de riesgo.

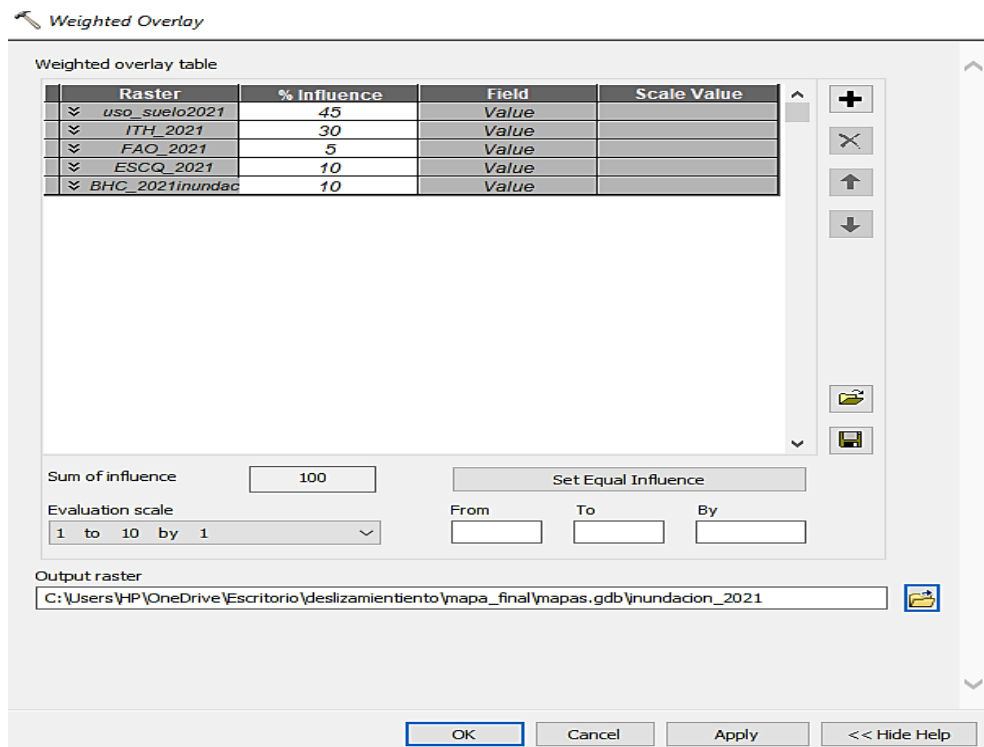
Para la evaluación del riesgo a inundaciones, se consideran los siguientes factores:

- a. Mapa de escorrentía superficial: Este mapa fue generado mediante métodos como el número de curva (CN) del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), por ende, se puede representar en la cantidad de agua que no logra penetrar en el suelo y se pierde desde la superficie, aumentando el riesgo Inundaciones.

- b. Mapa de balance hídrico climático: Para este cálculo se utilizó modelos como el de Thornthwaite y Mather, este mapa muestra la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, indicando áreas con excedentes o déficits hídricos en un año húmedo (2021) y uno seco (2015).
- c. Índice Topográfico de Humedad: Este mapa se derivó del modelo de elevación digital SRTM DEM de 29,6m y se determinara el impacto del terreno en la susceptibilidad al agua estancada y las inundaciones que son producidas por las altas precipitaciones.
- d. Clasificación de pendientes de la FAO: La clasificación de las pendientes se dividen en diferentes categorías, desde pendientes planos hasta muy escarpado, por lo cual afectaría al potencial de escorrentía y el embalse.
- e. Mapa de Cobertura y Uso del Suelo MAATE: Obtenido del Departamento de Medio Ambiente, Agua y Transición Ecológica, este mapa representa diferentes tipos de uso y uso del suelo que tienen impactos directos en la capacidad de infiltración y el riesgo de inundaciones.

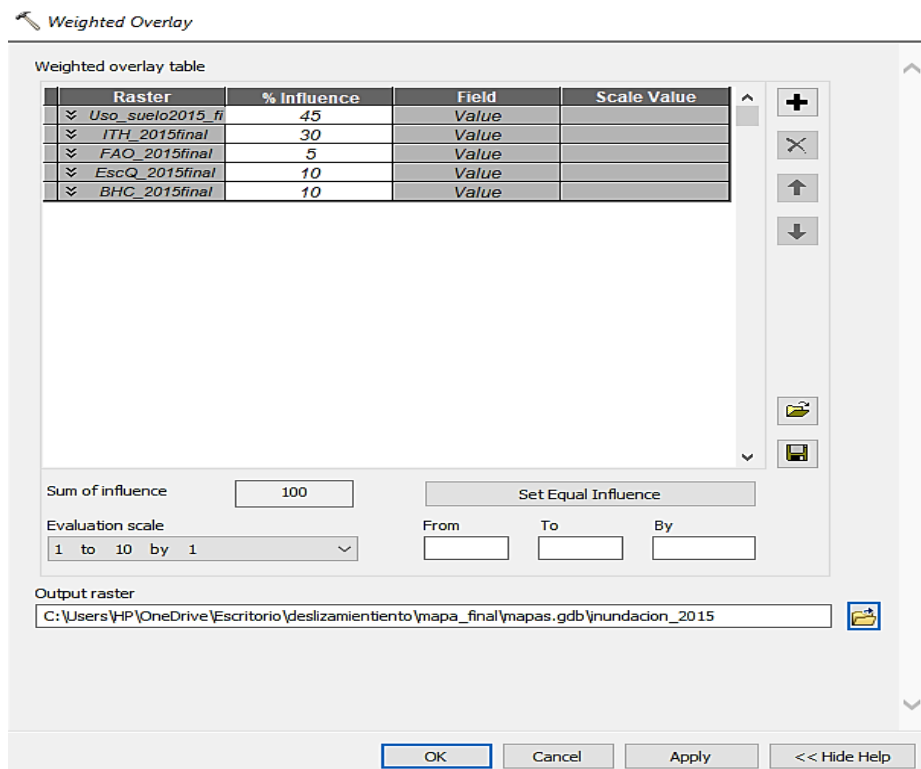
Estos factores se integran mediante la herramienta de Superposición Ponderada (Weighted Overlay) en QGIS. Se asignan pesos relativos a cada factor según su importancia en la evaluación del riesgo de inundaciones, los cuales suman un total del 100%. La superposición ponderada combina estos factores de acuerdo con sus pesos asignados, generando un mapa final que representa las zonas de riesgo a inundaciones en una escala de valores.

Tabla 3-9. Ponderación de la superposición de inundaciones de 2021



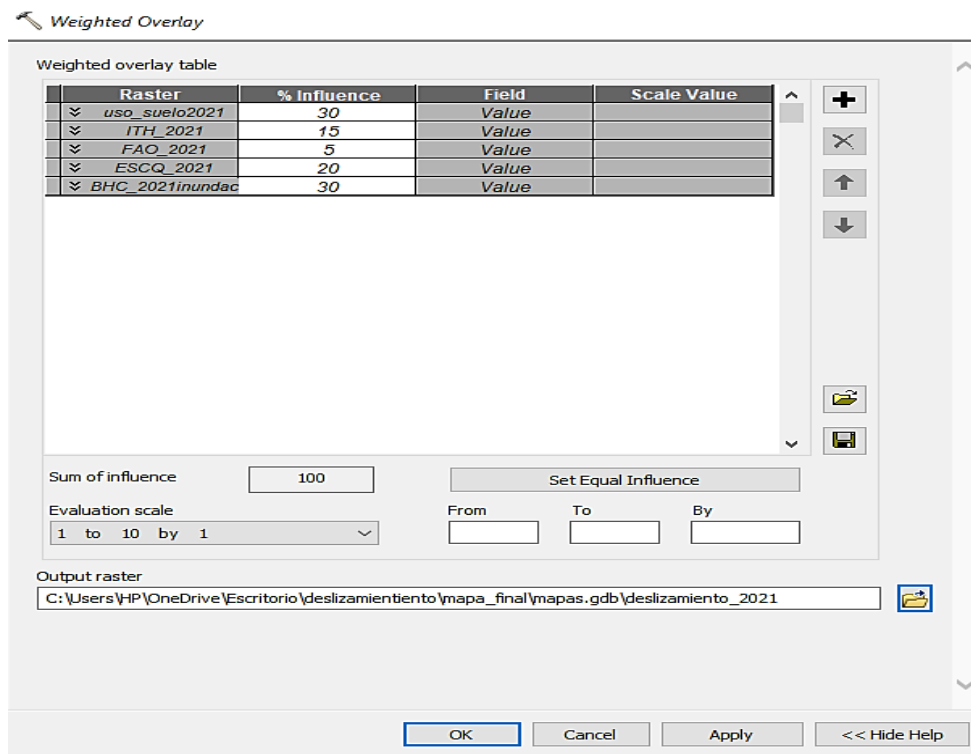
Realizado por: Gualavisí, B,2024.

Tabla 3-10. Ponderación de la superposición de inundaciones de 2015.



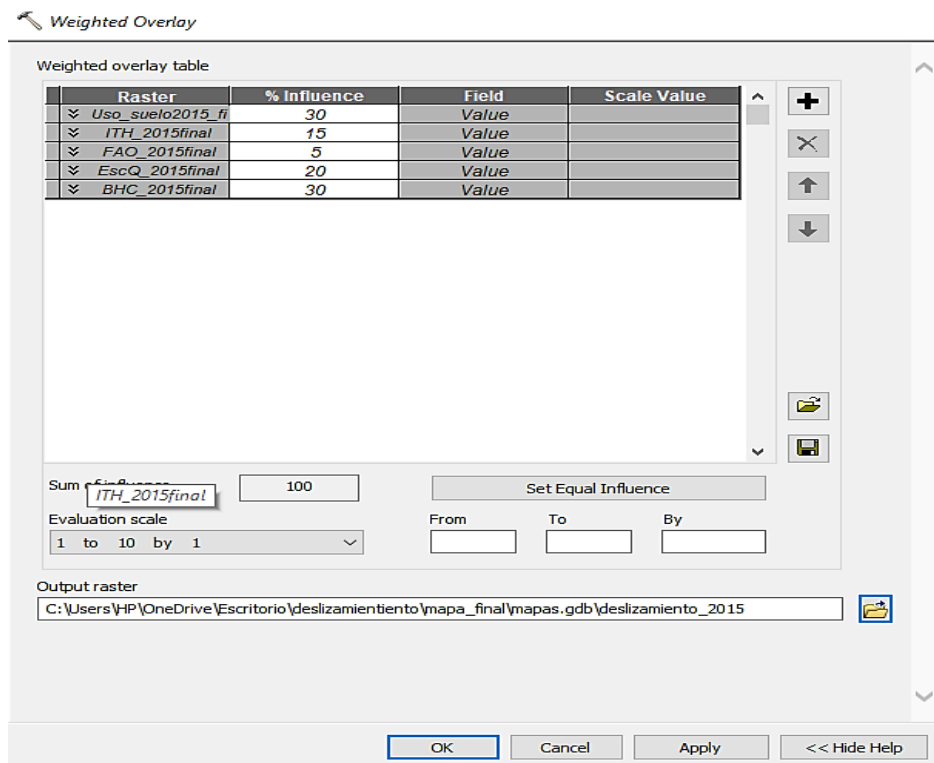
Realizado por: Gualavisí, B,2024

Tabla 3-11. Ponderación de la superposición de deslizamiento de 2021



Realizado por: Gualavisí, B, 2024.

Tabla 3-12. Ponderación de la superposición de deslizamiento de 2015



Realizado por: Gualavisí, B, 2024.

CAPITULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Caracterizar el relieve

4.1.1. Mapa de pendiente de la FAO

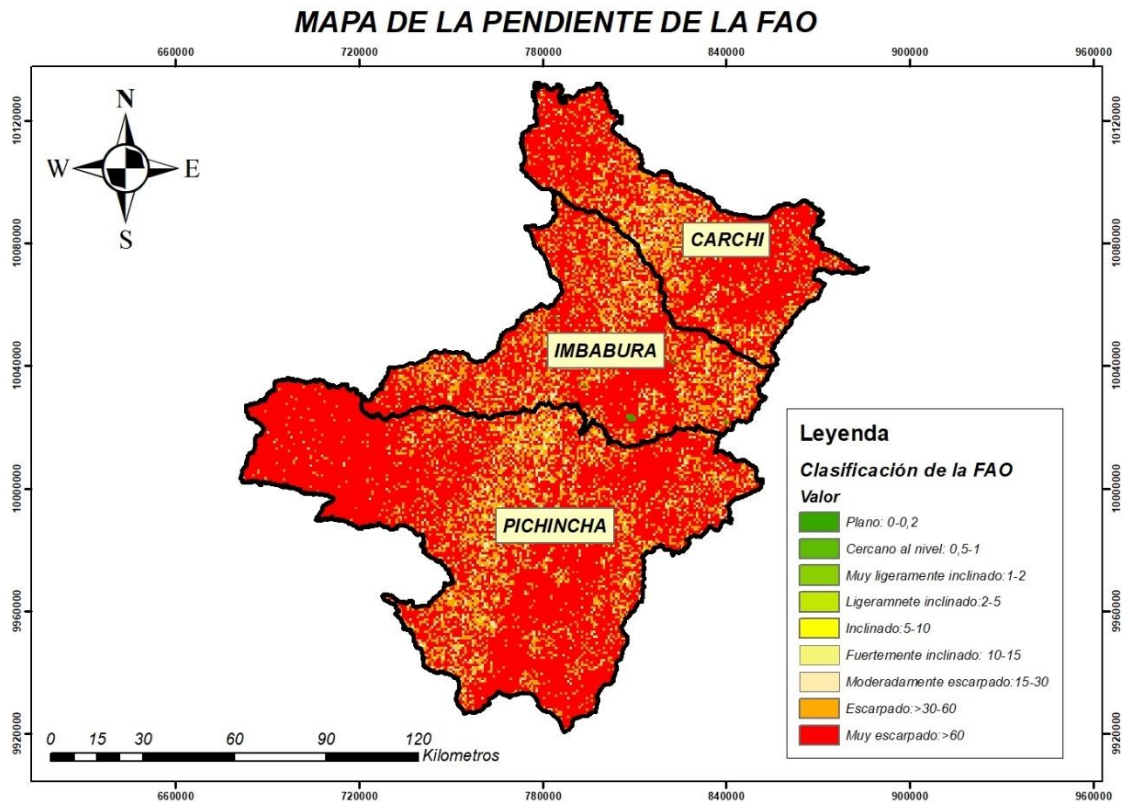


Ilustración 4-1: La clasificación de la pendiente de la FAO

Elaborado por. Gualavisi, B, 2024.

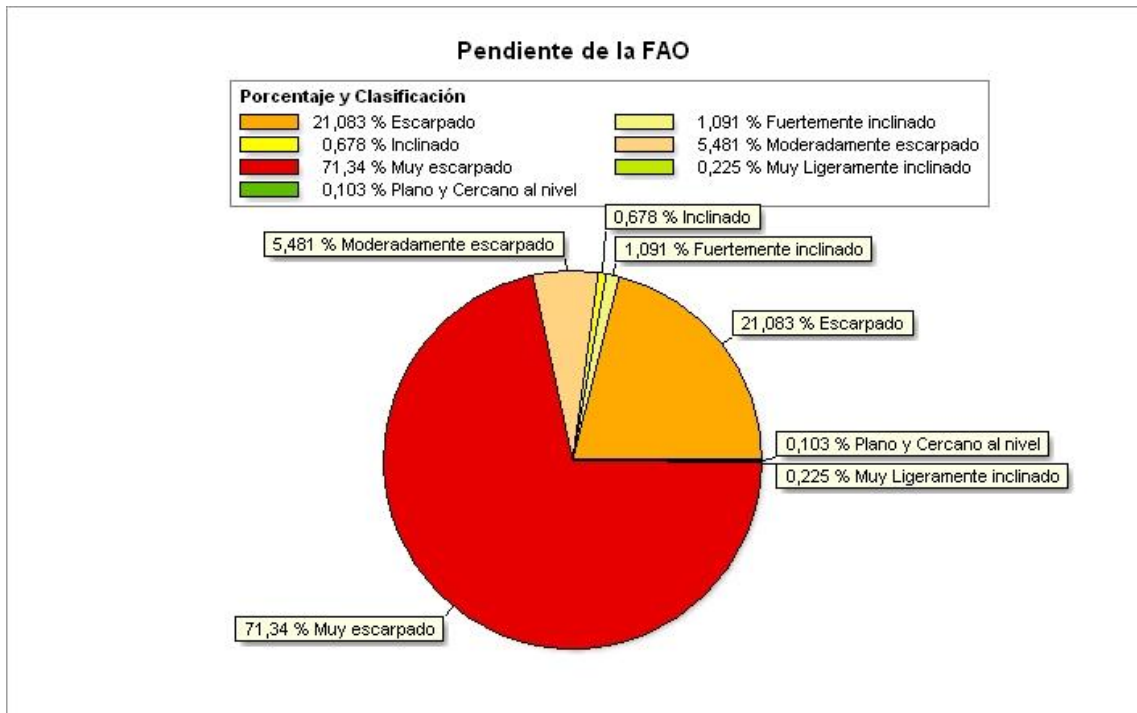


Ilustración 4-2. Mapa de la clasificación de la pendiente de la FAO porcentual.

Elaborado por. Gualavisi, B, 2024.

La ilustración 4-2 muestra el diagrama del mapa de clasificación de pendientes donde el 97,9% de la superficie del área de estudio tiene una pendiente muy escarpada y esto tiene una relación directa con los deslizamientos e inundaciones de la zona; el valor más bajo es de 0,103%, tiene una superficie plana por lo que tiene alto riesgo de inundación.

Discusión

Alonso, García y Fernández (2016) describen que la pendiente en las tres provincias de estudio corresponde a los niveles de ligeramente escarpado, moderadamente escarpado y muy escarpado; el 98% de la superficie del área de estudio no tiene riesgo de inundación; la palabra escarpado significa que un terreno tiene una gran pendiente, como las colinas, que son lugares llenos de roca, pendientes y desniveles; tomando en cuenta solo el porcentaje de escarpado, por lo que la mayor parte de pendiente es escarpada cuando hay precipitaciones el agua se arrastra hacia los lugares planos provocando inundación en esos lugares; Lazaro Nolasco (2020) dice que la inundación que es agua que se acumula en los desagües de zonas que normalmente no se inundan, por eso en la ilustración 4-16, se hizo el análisis solo del porcentaje de la pendiente plano obteniendo un porcentaje de inundación alto en esa zona de estudio, Haro (2021) menciona que el deslizamiento es el rápido desplazamiento de grandes cantidades de roca, suelo residual o sedimento en una ladera en el que el centro de gravedad de la masa desplazada se mueve hacia

abajo y hacia afuera esto se da con un riesgo algo en las zonas que tienen la pendiente plana por lo que el suelo no puede filtrar el 100% de la cantidad de agua que se almacena en estas zonas. Nuestra investigación coincide con los autores investigados con respecto al resultado del tipo de pendiente que tiene nuestra área de estudio, llegando a la conclusión que el 98% cubre el área de escarpado, esto se debe por la ubicación geográfica de nuestras provincias ya que están en la cordillera de los Andes.

4.1.2. Mapa del índice topográfico de humedad

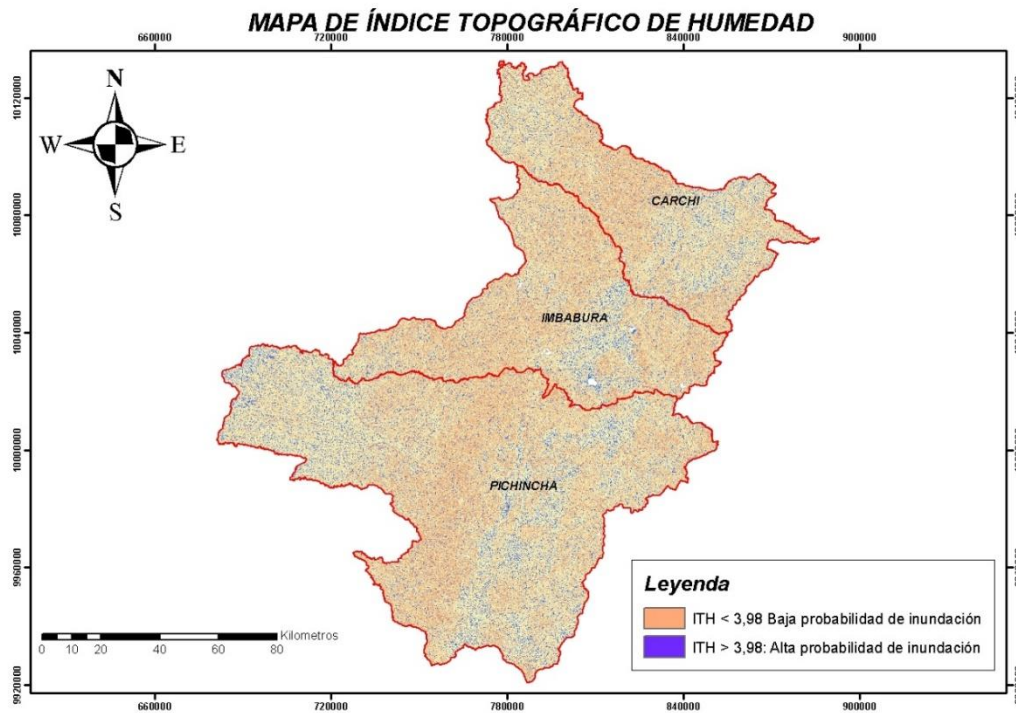


Ilustración 4-3: Índice topográfico de humedad (ITH).

Elaborado por: Gualavisi, B, 2024

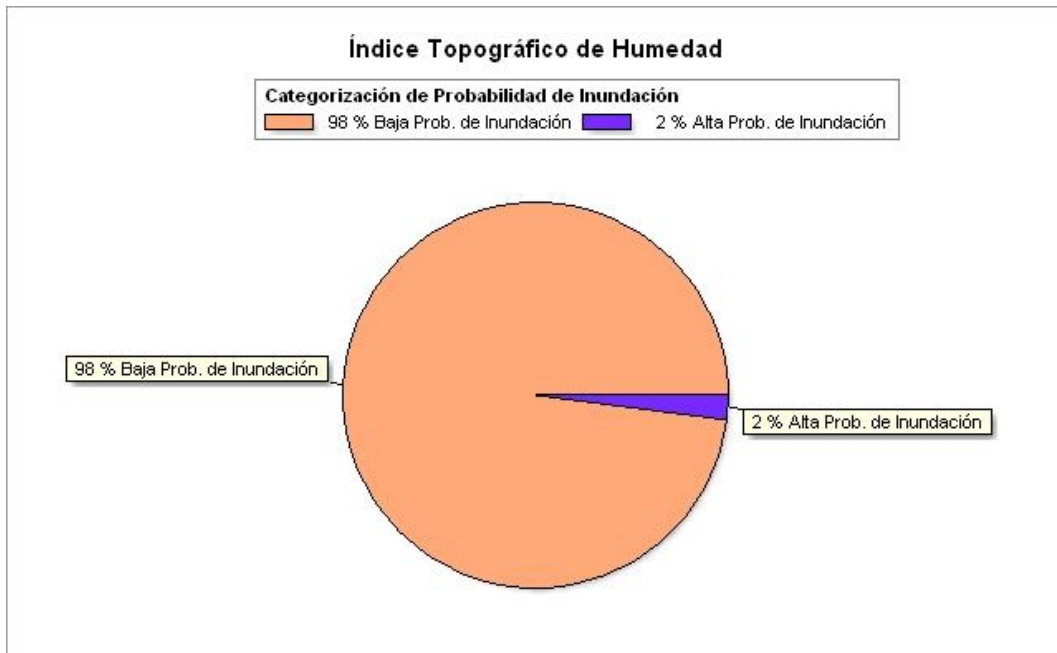


Ilustración 4-4. Índice topográfico de Humedad porcentual (%)

Elaborado por. Gualavisi, B, 2024

En la ilustración 4-4, se observa el diagrama de índice topográfico de humedad (ITH) que fluctúa entre un 98% de baja probabilidad de inundación y un 2% de alta vulnerabilidad a este fenómeno; tiene una alta probabilidad de inundación, ya que se encuentra ubicado en zonas planas o cercanas a vertientes de agua. Para identificar estos porcentajes se usó las categorías proporcionadas por el IGM, estos resultados tienen relación directa con el tipo de pendiente. Esta clasificación del ITH permite definir de manera precisa las áreas con mayor riesgo de inundación en la sierra norte de Ecuador, lo que facilita la implementación de medidas preventivas y de mitigación adecuada en estas zonas vulnerables.

Discusión

Chang y Navarrete (2023), en su investigación demostraron en un mapa del IGM zonas inundadas a través del ITH del terreno está relacionado con la humedad del suelo, esto nos permite representar esas tendencias de generación de escorrentía, porque es más probable que aparezcan contornos con mayor humedad. En nuestra investigación encontramos que el índice topográfico de humedad en la sierra norte del Ecuador presenta los siguientes resultados como: valores que van desde -10 hasta 12; estos datos indican que tiene una baja susceptibilidad de ITH $<3,98$ en terrenos convexos de altas pendientes; y de alta susceptibilidad ITH $>3,98$ en depresiones con alta convergencia de escorrentía. En la mayoría de las zonas altas de la sierra centro del Ecuador presentó mayor probabilidad de inundación.

Según el INAMHI (2017) menciona que en la zona norte de la región, las condiciones de humedad registradas fueron favorables para restaurar la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, al tiempo que crearon condiciones suficientes para el normal desarrollo del nuevo ciclo de cultivos, sin excesos ni deficiencias. En la región central, el aporte de las precipitaciones registradas es insuficiente para satisfacer la demanda de agua de los cultivos, y la demanda de agua es muy alta, lo que genera una escasez considerable de agua, por lo que los agricultores deben proporcionar agua mediante riego suplementario para asegurar el crecimiento de los cultivos. Prevenir que los cultivos sufran estrés por falta de humedad.

4.2. Cobertura y uso del suelo

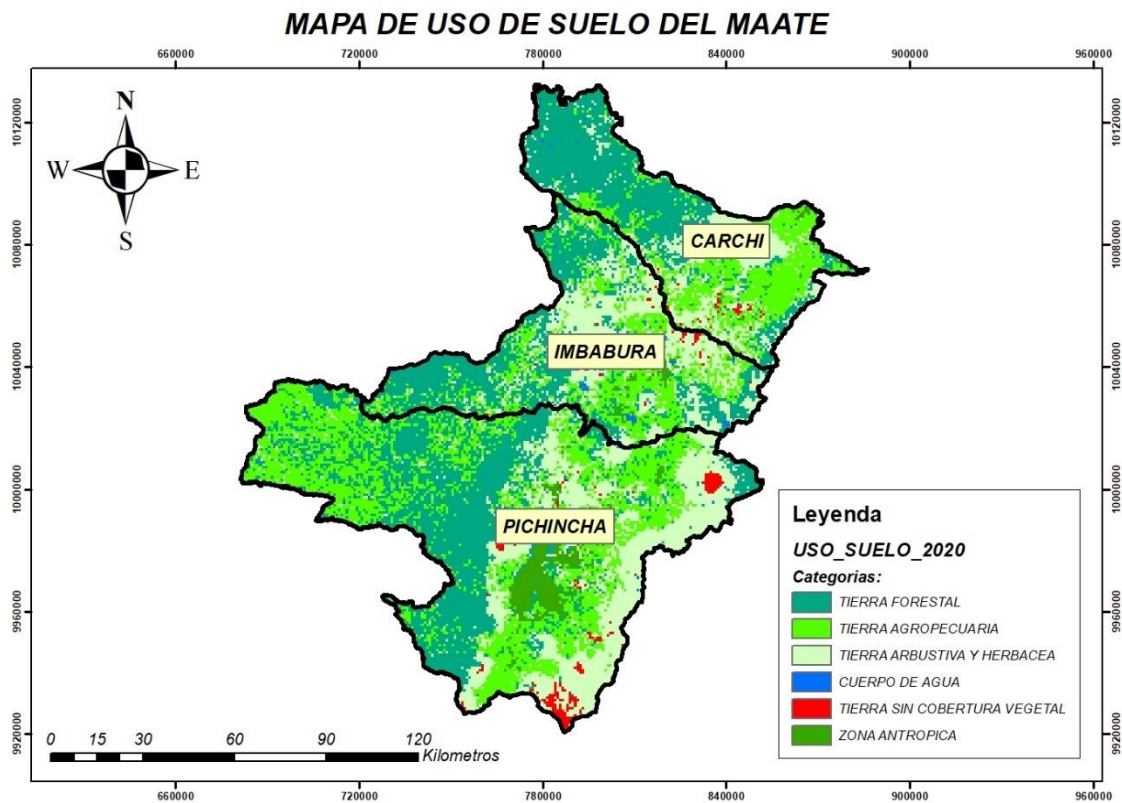


Ilustración 4-5: Mapa de uso del suelo MAATE.

Elaborado por. Gualavisi, B, 2024

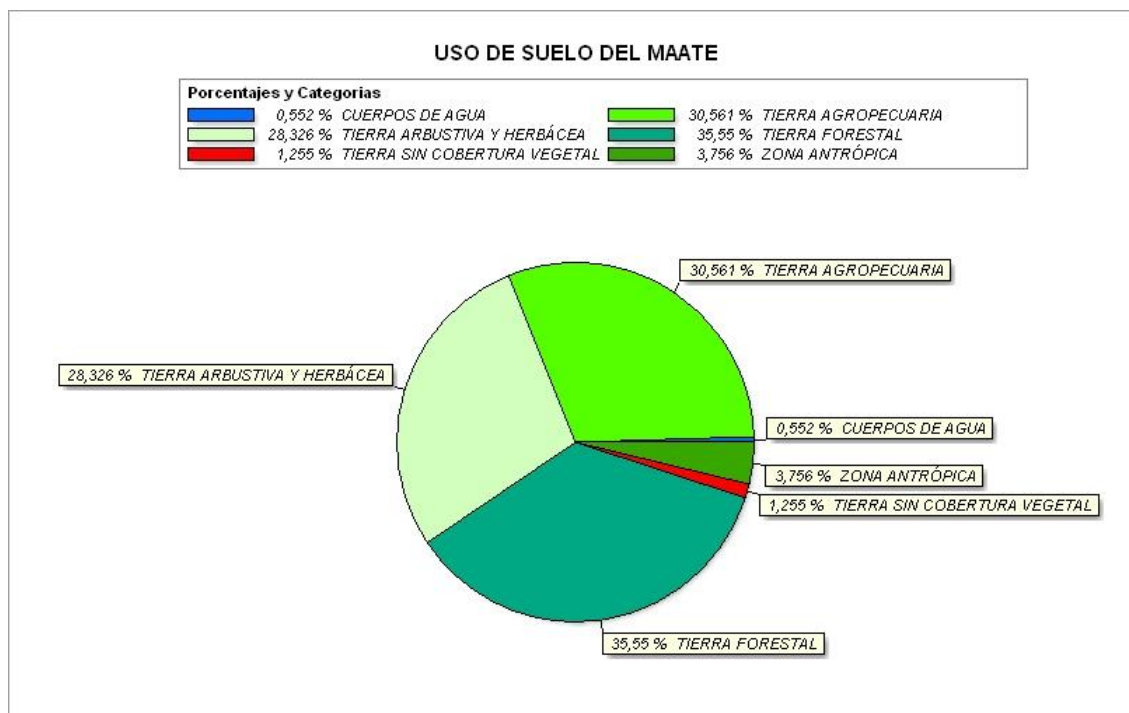


Ilustración 4-6. Porcentajes del uso del suelo.

Elaborado por. Gualavisi, B, 2024

La Ilustración 4-6 se muestra un mapa de uso de suelo proporcionado por MAATE, que representa la distribución espacial de diferentes categorías de uso de suelo dentro del área de estudio. El mapa es un insumo esencial para el análisis geoespacial porque el uso de la tierra afecta directamente el potencial de escorrentía, la susceptibilidad a inundaciones y deslizamientos de tierra, y la capacidad del agua para penetrar el suelo.

En nuestra investigación los principales usos del suelo fueron: tierra arbustiva, herbácea, tierra agropecuaria y forestal obteniendo un porcentaje de 94,5% del tipo de uso que le dan los habitantes de las provincias estudiadas; estos resultados son una fortaleza en la zona de estudio, porque la mayor cantidad del territorio tiene cubierta vegetal con abundantes raíces, lo que evita que el suelo sufra deslizamientos o erosiones cuando hay precipitación. Dentro de la zona agropecuaria se cultiva lo siguientes: cereales, forrajes, maíz, frejol, leguminosas, frutales, quinua; la mayoría de los cultivos son de ciclo corto, pero tienen abundantes raíces por lo que ayudan a que no se erosione el suelo con las precipitaciones.

Dada la importancia de contar con información actualizada, se ha decidido utilizar los mapas de uso suelo más reciente disponible del MAATE, correspondiente a un año seco (2015) y un año húmedo (2021). Esta elección permitirá analizar y comparar los efectos de las condiciones climáticas contrastantes en el riesgo de inundaciones y deslizamientos en la Sierra Norte.

Discusión

Lechón Sanchez y Chicaiza (2019), Hidrobo et al. (2015), Hidrobo et al. (2015), Moreno et al. (2022), mencionan en sus investigaciones que los usos de suelo predominantes en las provincias de Imbabura y Pichincha, es la agricultura (cereales, forrajes, maíz, frejol, leguminosas, frutales, quinua, papas), en porcentajes menores ganadería para producción de leche. Por lo que nuestra investigación coincide que el mayor porcentaje del uso del suelo está designado para la agricultura ya sea monocultivos o policultivos. En ciertas zonas de las provincias existen menor riesgo de desastres naturales, por la gran extensión de la cobertura vegetal natural (tierra forestal, tierra arbustiva y herbácea).

4.3. Determinar la escorrentía superficial y balance hídrico

4.3.1. Grupo hidrológico

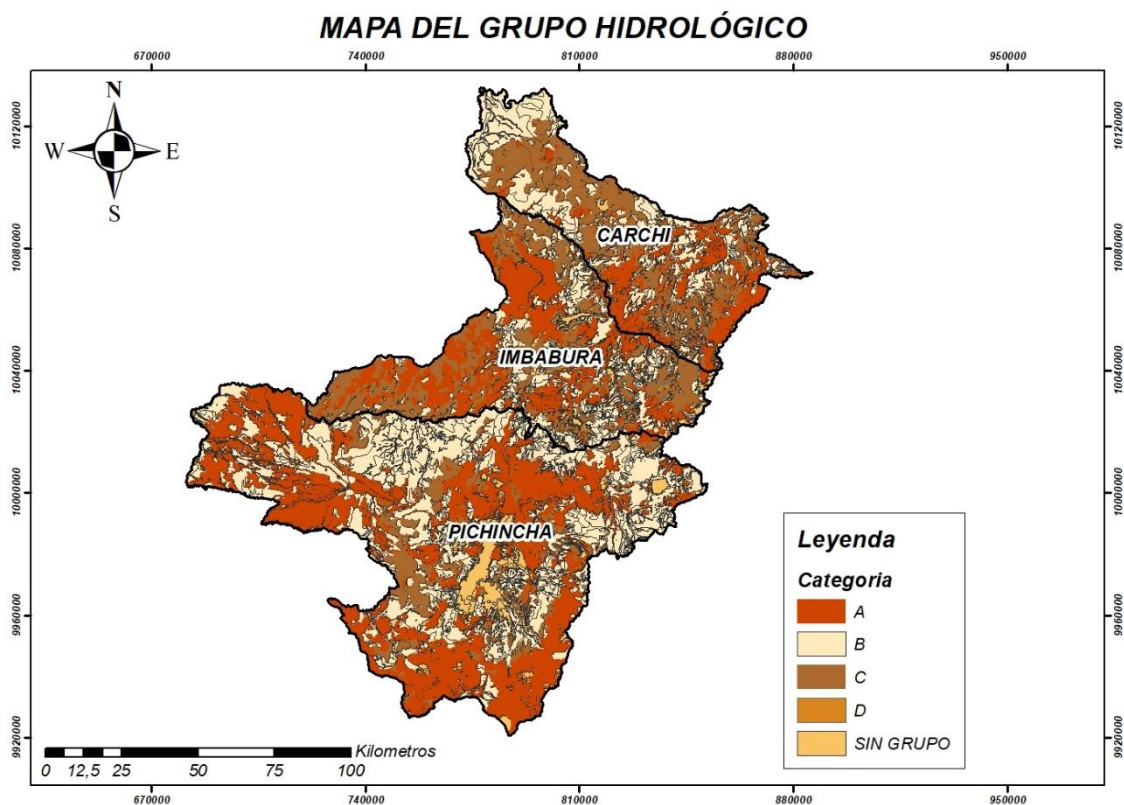


Ilustración 4-7. Grupos hidrológicos de suelos de la región Sierra Norte

Elaborado por: Gualavisí, B, 2024

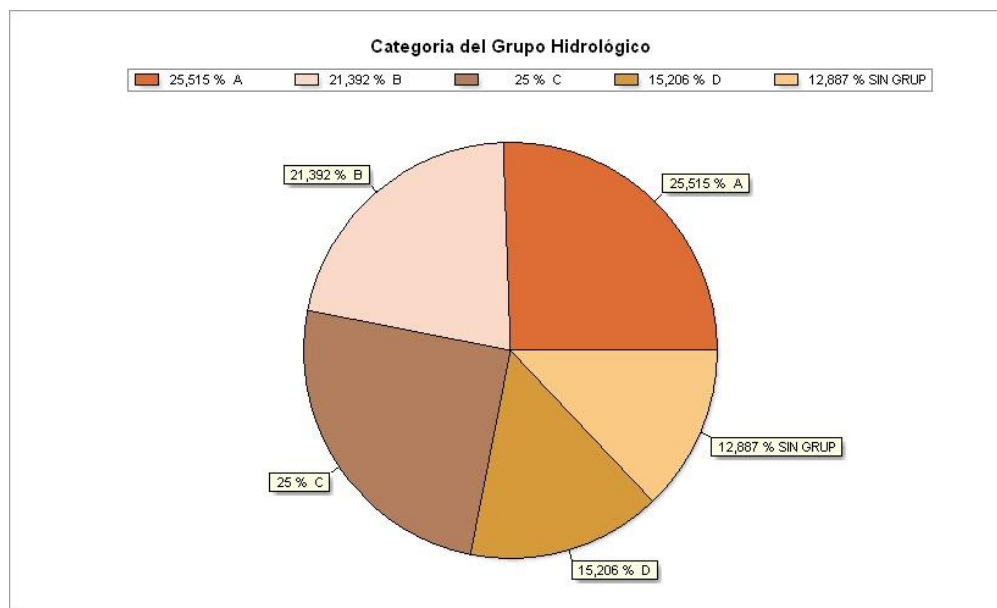


Ilustración 4-8. Porcentajes del Grupo Hidrológico

Elaborado por: Gualavisi,2024

En la ilustración 4-8 se observa los grupos hidrológicos de suelos donde predomina la categoría A con el 25,5% representando el contenido de grava en estas zonas de estudio, por lo que cuando hay precipitaciones el agua tiene mayor capacidad de infiltración y menor probabilidad de generar escorrentía, consecuentemente tiene un menor grado de deslizamiento de los suelos.

Discusión

Castillo Rosero (2016), menciona que en la provincia de Imbabura los grupos hidrológicos presentes son B, C con aproximadamente 44,6% y 54,4% de los suelos con estas categorías, en cambio en nuestra investigación se obtuvo las cinco categorías, A, B, C, D y sin Grupo con porcentajes de 25,51; 21,39; 25; 15, y 12,88 respectivamente. Por tanto, se identifica los tipos de suelos predominantes en cada área. En nuestra investigación los grupos hidrológicos que predominan son el A, B, C, que tienen relación con el tipo de pendientes ligeramente escarpado, moderadamente escarpado y muy escarpado por lo que en estas zonas no hay inundaciones.

Córdova Gutierrez, Paredes Méndez y Alulema del Salto (2017), mencionan que en la provincia de Pichincha el suelo presenta las cuatro categorías del grupo hidrológico, por lo que se visualiza en la investigación de estos autores que la categoría que más predomina es la C, en cambio en nuestro análisis se observó que la categoría A con un porcentaje de 25,51 es la que predomina es decir que el suelo tiene alta capacidad de infiltración.

4.3.2. Número de curva

De acuerdo con los valores estimados y adecuados al modelo, en base a la información bibliográfica se representa este parámetro en un mapa que indica los siguientes resultados.

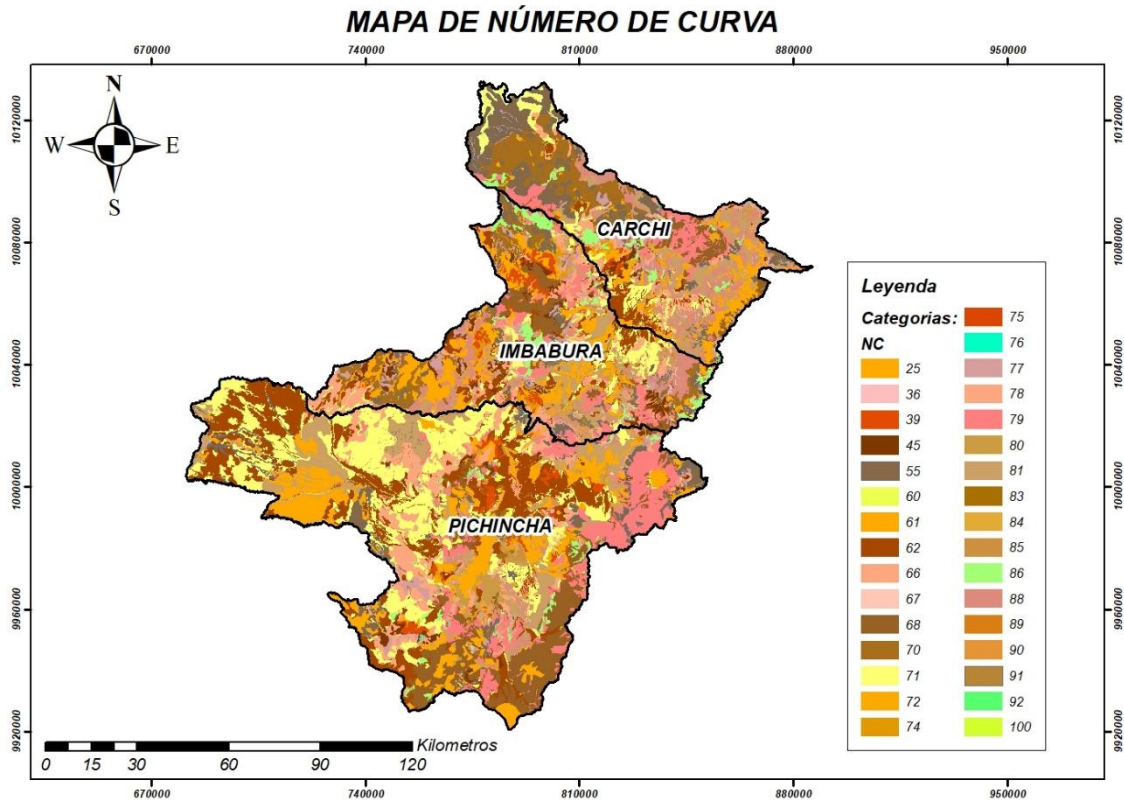


Ilustración 4-9. Número de curva de la Sierra Norte

Elaborado por: Gualavisí, B, 2024

En la ilustración 4-9 representa el número de curva (CN) de las provincias Carchi, Imbabura y Pichincha; como un parámetro clave en la estimación del potencial de escorrentía y el riesgo de inundaciones. Este valor deriva de la combinación del uso y cobertura del suelo, los grupos hidrológicos de suelos, las condiciones de humedad antecedente. Los valores de CN oscilan entre 0 y 100, donde los valores más bajos indican una mayor capacidad de infiltración y, por lo tanto, un menor potencial de escorrentía, mientras que los valores más altos representan una menor capacidad de infiltración y un mayor potencial de escorrentía.

Las provincias estudiadas con un valor de CN cercano a 0 significan una alta permeabilidad del suelo y una importante capacidad de infiltración. Esta región representa con colores más claros en el mapa y generalmente se alinean con áreas o zonas que presentan una densa cubierta vegetal, suelos bien drenados y los grupos hidrológicos de suelos con una alta capacidad de infiltración como es el caso del (Grupo “A”).

Por otro lado, las áreas con valores de CN cercanos a 100 indican una baja permeabilidad del suelo y una capacidad de infiltración limitada. Estas zonas, representadas con colores más oscuros en el mapa, suelen estar asociadas con áreas urbanizadas, suelos compactados, áreas sin cobertura vegetal y grupos hidrológicos de suelos con baja capacidad de infiltración (como el grupo D).

Es importante destacar que los valores intermedios del número de curva representan diferentes grados de permeabilidad y potencial de escorrentía, dependiendo de las características específicas del uso y cobertura del suelo, los grupos hidrológicos y las condiciones de humedad antecedente.

Discusión

Según Córdova Gutierrez, Paredes Méndez y Alulema del Salto (2017), mencionan que para obtener la curva de nivel se desarrolla dependiendo de una combinación de parámetros como el uso de la tierra, la cubierta vegetal, la hidrología del suelo y la pendiente del terreno. En la investigación realizada por los autores van los siguientes valores: 43-96, estos valores tienen similitud con la investigación realizada por nosotros. Por lo que coincidimos que el número de curva que predomina se encuentra en el rango de 55-71, de esta manera se corrobora y se observa tanto en nuestra investigación como en la del otro autor la capacidad la capacidad de permeabilidad que tiene el suelo.

4.3.3. Escurrimiento superficial

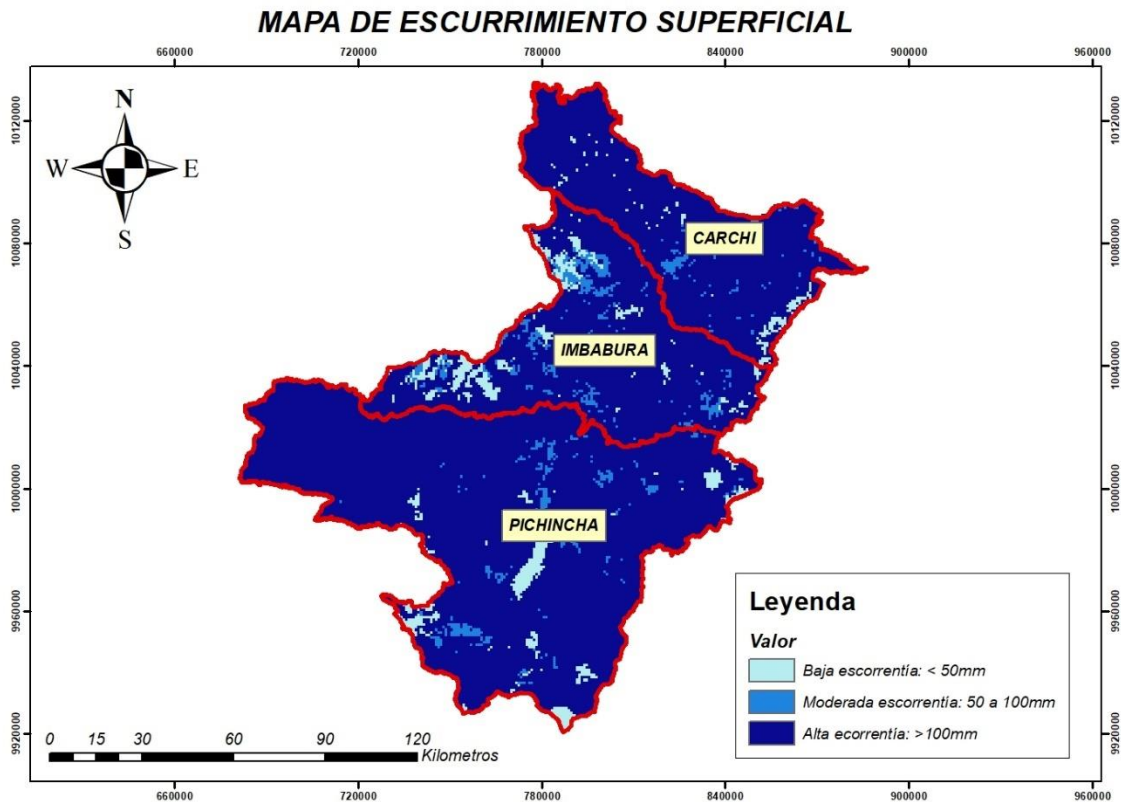


Ilustración 4-10. Escurrimiento superficial

Elaborado por: Gualavisí, B, 2024

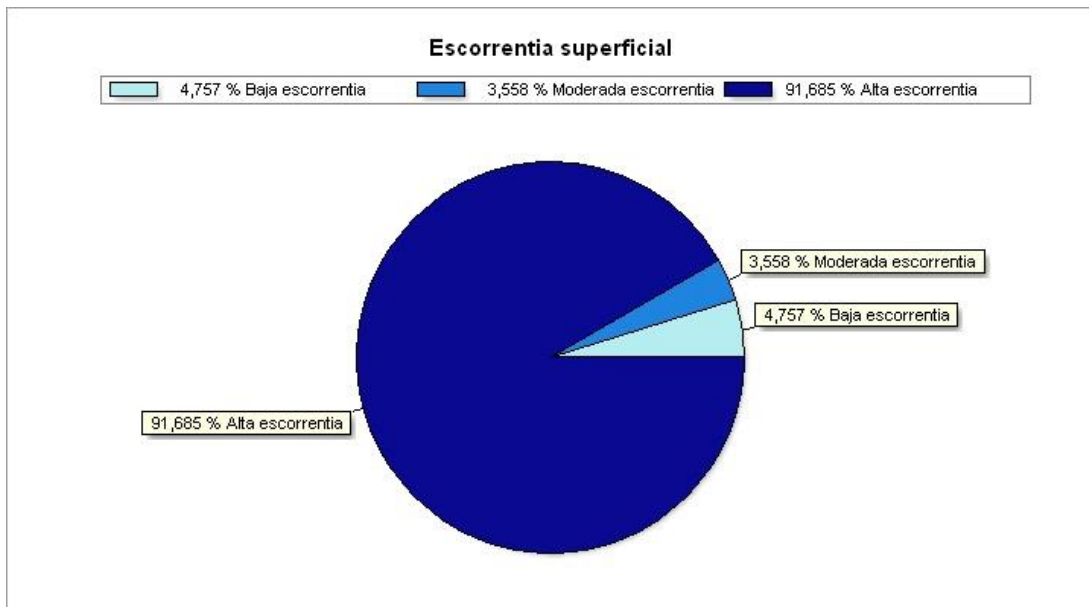


Ilustración 4-11: Porcentajes de escurrimiento superficial

Elaborado por: Gualavisí, 2024

La ilustración 4-11 presenta el diagrama del mapa de escurrimiento superficial obtenido mediante el método de Gaspari et al. (2013); del área de estudio en la sierra norte del Ecuador, el cual permitió identificar zonas propensas a inundaciones y la cantidad de agua que no logra penetrar el suelo y se escapa de la superficie. Priego et al. (2004) categoriza el escurrimiento superficial en tres niveles: bajo (<50mm), moderado (50-100mm) y alto (>100mm). En el área de estudio, el 91,685% de la superficie presenta alta escorrentía, lo que implica un riesgo elevado de inundaciones y deslizamientos. Este resultado se explica por la ubicación geográfica del área de estudio, caracterizada por una topografía accidentada, uso de suelo intensivo y un grupo hidrológico que favorece el escurrimiento superficial. Además, la clasificación de la zona como NC (no clasificada) en términos de riesgo de inundación, indica la necesidad de una evaluación más detallada y precisa de las zonas de riesgo en la región.

Discusión

Guerra (2019) menciona que el 61,80% de la superficie de Pichincha presenta escorrentía moderada, resultado que se asemeja al encontrado en la presente investigación.

4.3.3. Promedio del Balance Hídrico climático del 2021

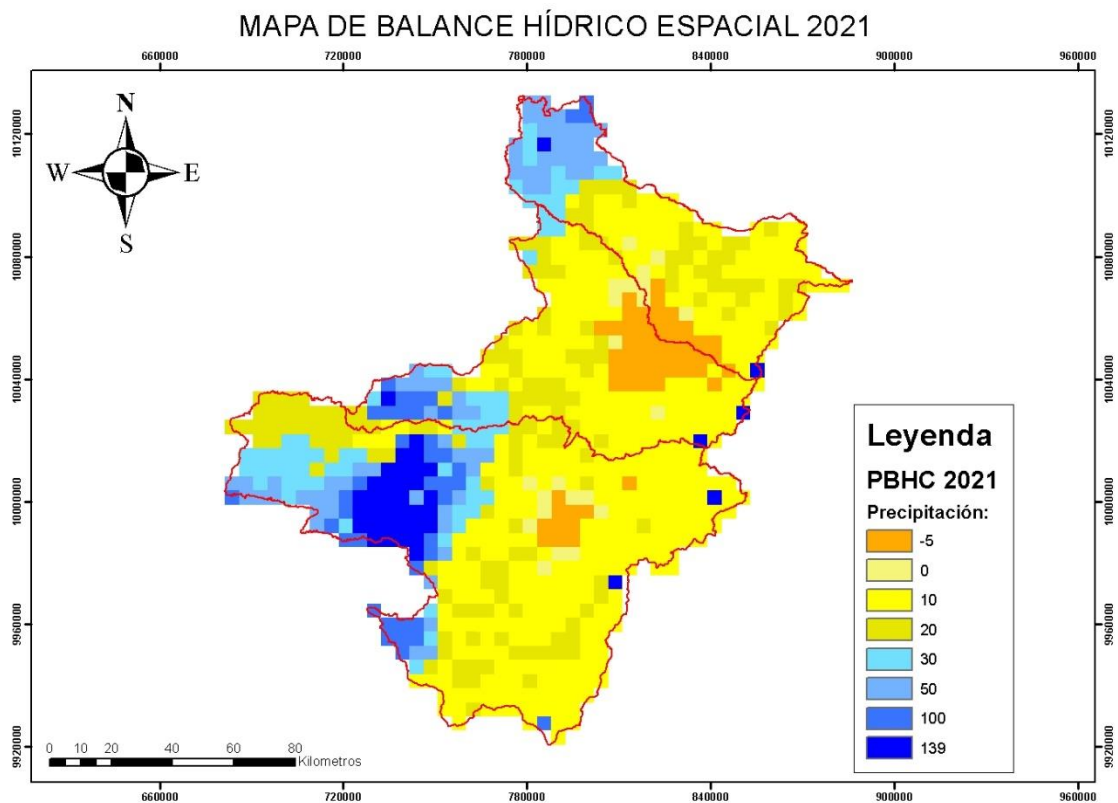


Ilustración 4-12. Balance hídrico espacial.

Elaborado por: Gualavisí, B, 2024

La ilustración 4-12 se muestra un mapa del balance hídrico climático del año 2021 obtenido mediante el método de Thornthwaite y Mather para el área de estudio de la Cordillera Norte del Ecuador. El mapa representa la diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial, proporcionando información valiosa sobre el excedente o escasez de agua en la región.

Los valores positivos indican que el suelo es propenso a inundación y deslizamiento y por lo tanto existe exceso del recurso hídrico, mientras más alto sean los valores positivos más propensos son a generar inundación por la falta de infiltración del agua.

Por otro lado, las áreas con valores negativos o cercanos a cero en el mapa del balance hídrico climático representan déficits hídricos o condiciones de equilibrio, respectivamente. Estas zonas pueden ser menos susceptibles a inundaciones, pero, aun así, es importante considerarlas en el contexto general del análisis de riesgos. Se encontró que al oeste de la provincia de Pichincha se distingue claramente que es la zona más húmeda con un valor de 139mm de precipitación por lo que esta zona está propensa a inundación y acumulación de los residuos cuando hay precipitaciones en las zonas altas de la provincia.

Cabe señalar que el mapa de balance hídrico climático se generó realizando un promedio de los valores mensuales de 12 meses del año 2021. Al adoptar este enfoque, se pudo obtener valores representativos para todo el año, lo que simplifica su integración en el análisis multicriterio ponderado, así identificar las zonas de riesgo a inundaciones y deslizamientos de tierra

Discusión

Cajamarca (2017) menciona que el balance hídrico es la cantidad de agua en un lugar determinado, en este caso es para las provincias del Carchi, Imbabura y Pichincha. A través del balance hídrico se puede cuantificar las entradas y salidas del agua de los lugares. El balance hídrico se determina a través de las precipitaciones y temperaturas de las zonas de estudio, ya sea que se encuentre en déficit o superávit. En nuestro estudio se determinó que las provincias en estudio presentaron un déficit de agua. Por ello, se demuestra que el balance hídrico puede variar de acuerdo con meses o incluso años. La provincia con mayor exceso hídrico es Pichincha ya que tiene zonas que son planas donde se produce las inundaciones cuando hay precipitaciones.

4.3.5. Promedio del Balance Hídrico climático del 2015

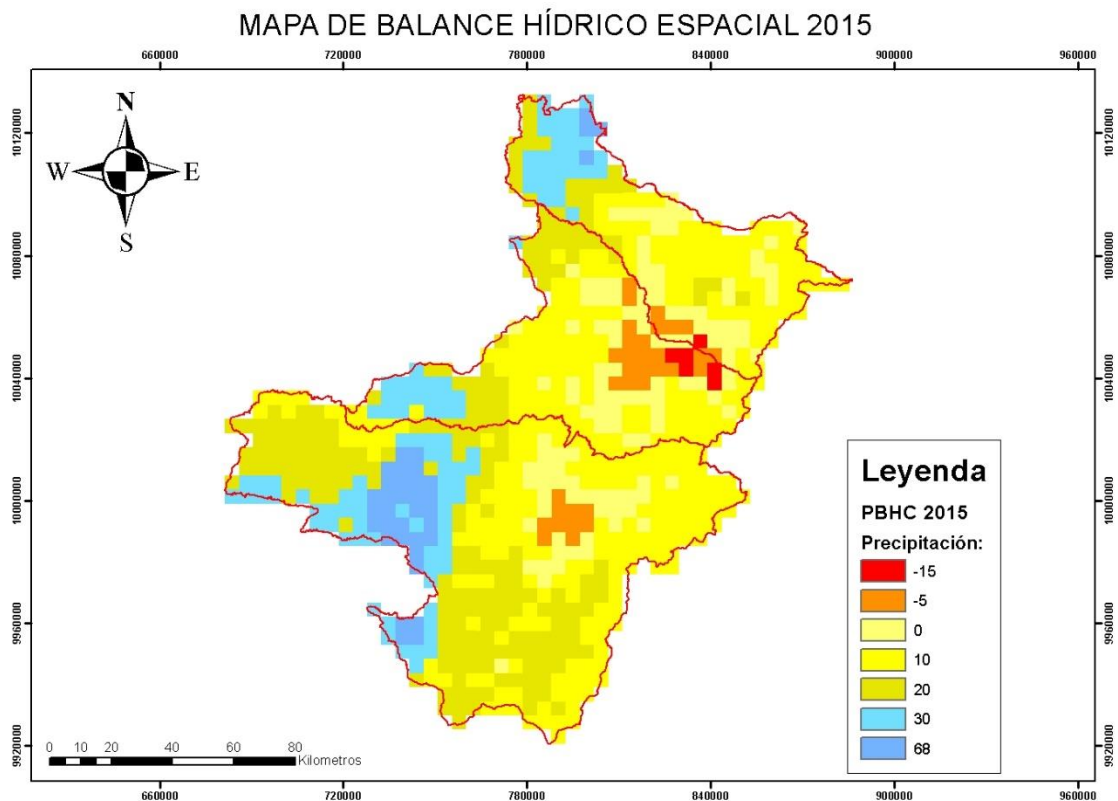


Ilustración 4-13. Balance hídrico climático 2015.

Elaborado por: Gualavisí, B, 2024

La ilustración 4-13 muestra el mapa del balance hídrico climático obtenido mediante el método de Thornthwaite y Mather para el año 2015 en el área de estudio de la Sierra Norte de Ecuador. Este año fue seleccionado debido a las fuertes sequías que ocurrieron en la región durante ese período, lo que permite evaluar el contraste con un año húmedo como el 2021 y observar las diferencias en el balance hídrico climático. En el mapa se observa que la provincia más propensa a déficit hídrico es la Provincia de Imbabura con -15 siendo el valor más alto por falta de humedad, es decir que esta zona sufre de altas sequías, por ende, se ve afectado el uso del suelo, resequedad del suelo provocando erosión de este por los vientos.

La comparación del mapa del balance hídrico climático entre un año seco (2015) y un año húmedo (2021) permitió observar los cambios en el patrón espacial del excedente o déficit hídrico en la Sierra Norte del Ecuador. Esta información es valiosa para comprender cómo las condiciones climáticas contrastantes impactan en el suministro de agua de la región, generando riesgos de inundaciones, deslizamientos de tierra y sequías.

Discusión

Kadir et al. (2019) destacaron que la región puede experimentar problemas de suministro de energía, pérdidas agrícolas, falta de agua potable y una mayor contaminación de los ríos durante las sequías. Nuestra investigación muestra que el sector agrícola es el más afectado por la humedad insuficiente, lo que puede afectar gravemente la seguridad alimentaria y las economías locales.

4.4. Definir las zonas riesgo a inundación y deslizamiento

4.4.1. Zonas de riesgo a inundación de 2021

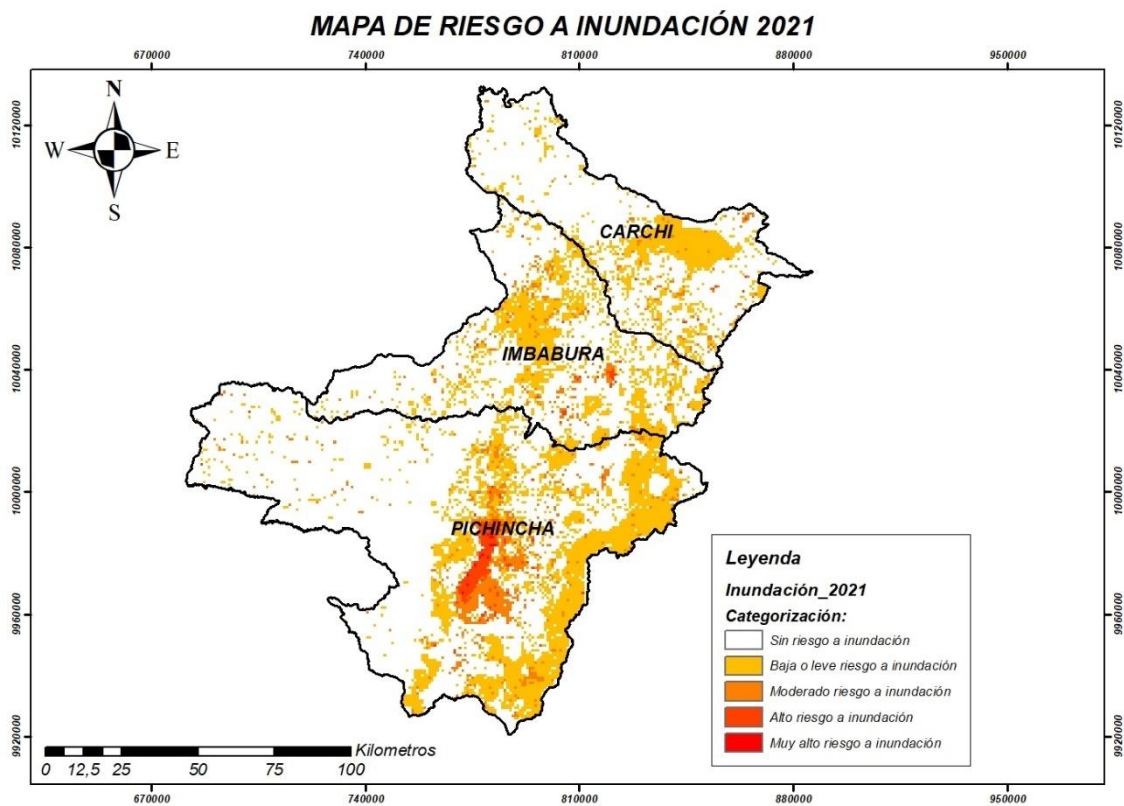


Ilustración 4-14: Mapa de riesgo a inundación 2021.

Realizado por: Gualavisi, B, 2024

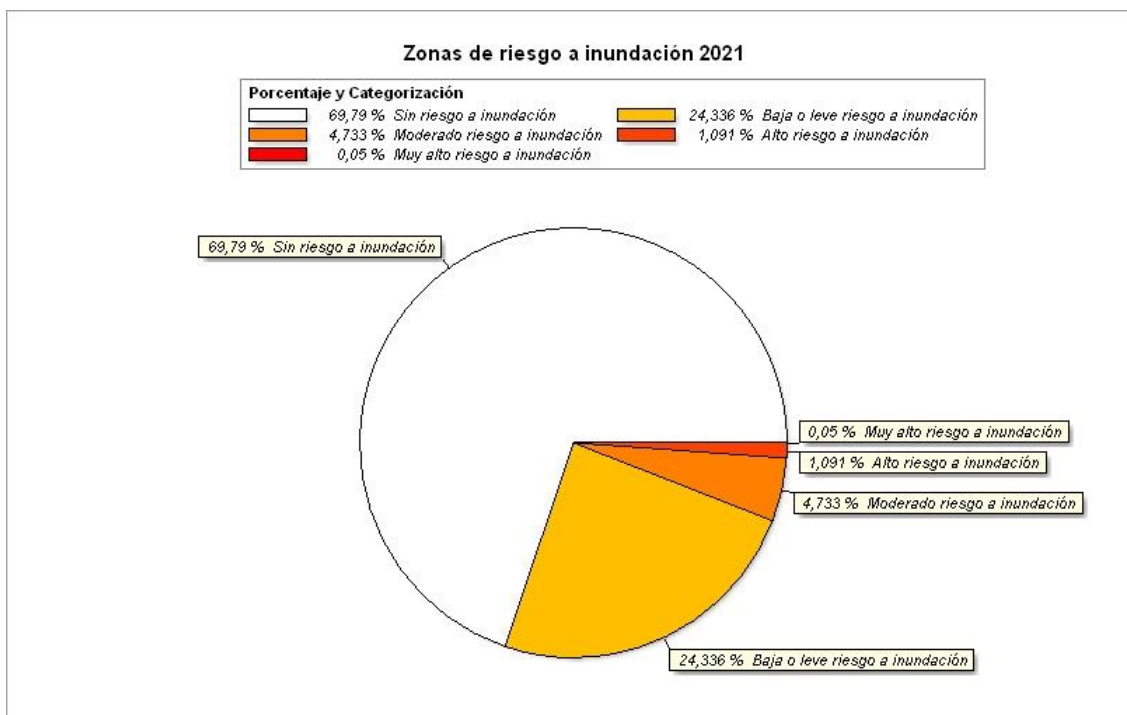


Ilustración 4-15. Porcentajes para zonas de riesgo a inundación

Elaborado por: Gualavisi, 2024

En el mapa generado en la ilustración 4-15, se identificó un 30,21% del área total de riesgo de inundación alta en la Sierra Norte del Ecuador durante el año húmedo de 2021. Este mapa permite visualizar de manera precisa las zonas más vulnerables ante eventos de inundación. Los resultados indican que el 24,336% del territorio evaluado se encuentra en la categoría de riesgo de inundación moderadamente alta, el 4,733% exhibe un riesgo de inundación alto, el 1,091% se clasifica con un riesgo de inundación muy alto, y un 0,05% presenta un riesgo de inundación muy alto. Estos porcentajes evidencian la existencia de una proporción considerable del área de estudio expuesta a diferentes niveles de riesgo de inundación en la Sierra Norte del Ecuador.

Los resultados revelan que Pichincha es la provincia más vulnerable, con un riesgo a inundaciones altísimo. En consecuencia, de las zonas con mayor riesgo a inundación al ser zonas planas y bajas donde el escurrimiento superficial se acumula más, debido a la convergencia de flujos de agua y un inadecuado drenaje. Estas áreas tienen menores ponderaciones de riesgo y requieren especial cuidado, medidas preventivas y de mitigación para minimizar el impacto de posibles inundaciones en nuestra área de estudio.

No se puede pasar por alto la importancia de los niveles de precipitación en 2021, ya que se prevé que sean elevados. Posteriormente, esto dará como resultado un aumento de la humedad dentro de la región de estudio, lo que en consecuencia amplificará la probabilidad de inundaciones. Por

el contrario, 2015 experimentó una disminución sustancial de las precipitaciones, lo que lo convirtió en un año notablemente árido. Reconocer este contexto climático es imperativo para comprender la fluctuación de los riesgos de inundaciones en las montañas del norte del Ecuador y dirigir eficazmente los esfuerzos hacia la prevención de inundaciones y la gestión de desastres.

Discusión

Según Portilla Farfán (2018), las estaciones de monitoreo en la región muestran un balance hídrico favorable durante el período invernal, con cierto superávit durante los meses de abril y mayo, y un balance hídrico desfavorable en verano, especialmente con escasez de agua en agosto. Es importante destacar que la red hidrológica se origina en los Andes, y cuando ocurre sequía, los ríos tienden a secarse, afectando a las poblaciones en las estribaciones y áreas por donde cruza la red hídrica. De igual manera, cuando se presentan lluvias intensas, pueden provocar deslizamientos de tierra e inundaciones.

Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (2024) menciona que en los últimos meses hubo mayor precipitación en el noroccidente de la región, donde consta las provincias Carchi, Imbabura y Pichincha siendo las zonas más afectadas por las fuertes precipitaciones a nivel regional donde que se produjo niveles extremos de inundaciones.

4.4.2. Zonas de riesgo a inundación de 2015

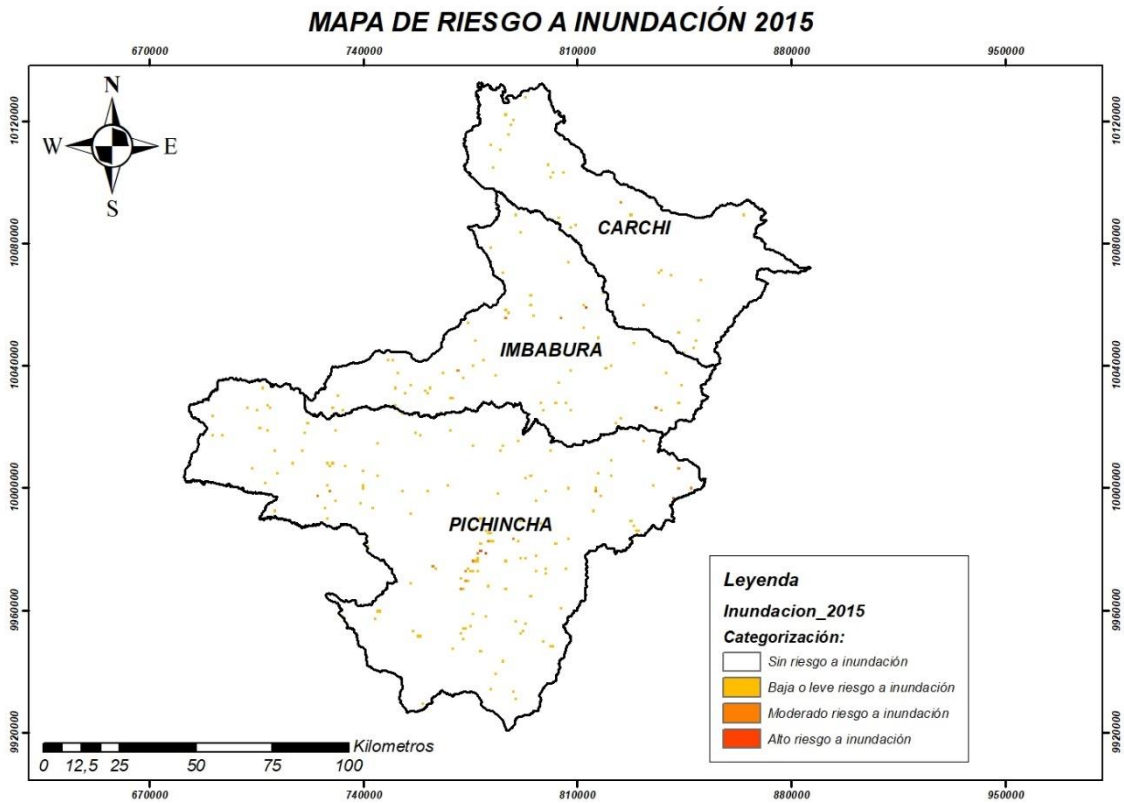


Ilustración 4- 16. Mapa de riesgo a inundación 2015

Elaborado por: Gualavisi, 2024

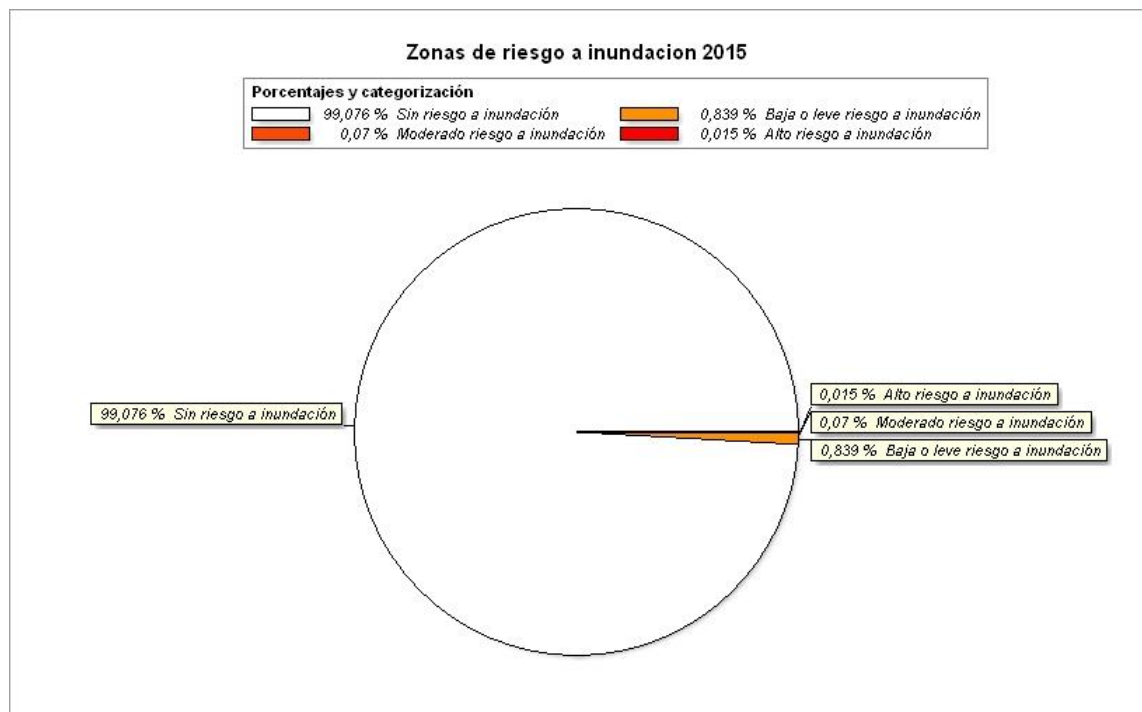


Ilustración 4- 17. Mapa de riesgo a inundación 2015

Elaborado por: Gualavisi, 2024

El mapa generado en la ilustración 4-17 representa el 0,924% del área total de riesgo de inundación alta en la Sierra Norte del Ecuador durante un año seco. Debido a que este porcentaje es bastante reducido, se tomó como referencia un año en el cual las condiciones de precipitación y escorrentía fueron deficitarias. Por lo tanto, se puede inferir que, en este escenario de año seco, no se presentaron zonas significativas con riesgo de inundación en el área de estudio.

Discusión

De acuerdo a Guzmán y Sánchez (2015), existen pocas zonas con riesgo de inundación y una menor probabilidad de crecidas de ríos en el área de estudio. Sin embargo, esta situación puede variar dependiendo del mes o año analizado, ya que en algunos casos se pueden presentar lluvias más intensas.

Es fundamental tener muy en cuenta que el riesgo a inundaciones y la probabilidad de crecidas de ríos están directamente relacionados con los patrones de precipitación en la zona. Estos patrones de precipitación pueden variar significativamente de un año para otro o incluso de un mes a otro dentro del mismo año que se realizó la investigación.

4.4.3. Zonas de Riesgo a deslizamiento 2021

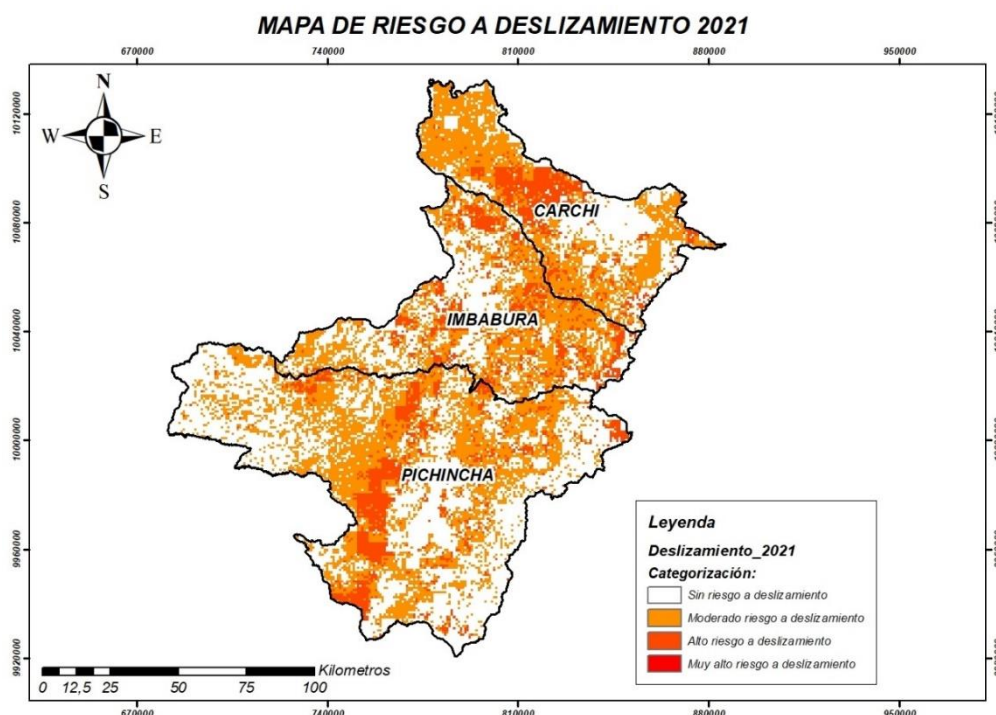


Ilustración 4-18. Mapa de Riesgo a deslizamiento 2021

Elaborado por: Gualavisi, 2024

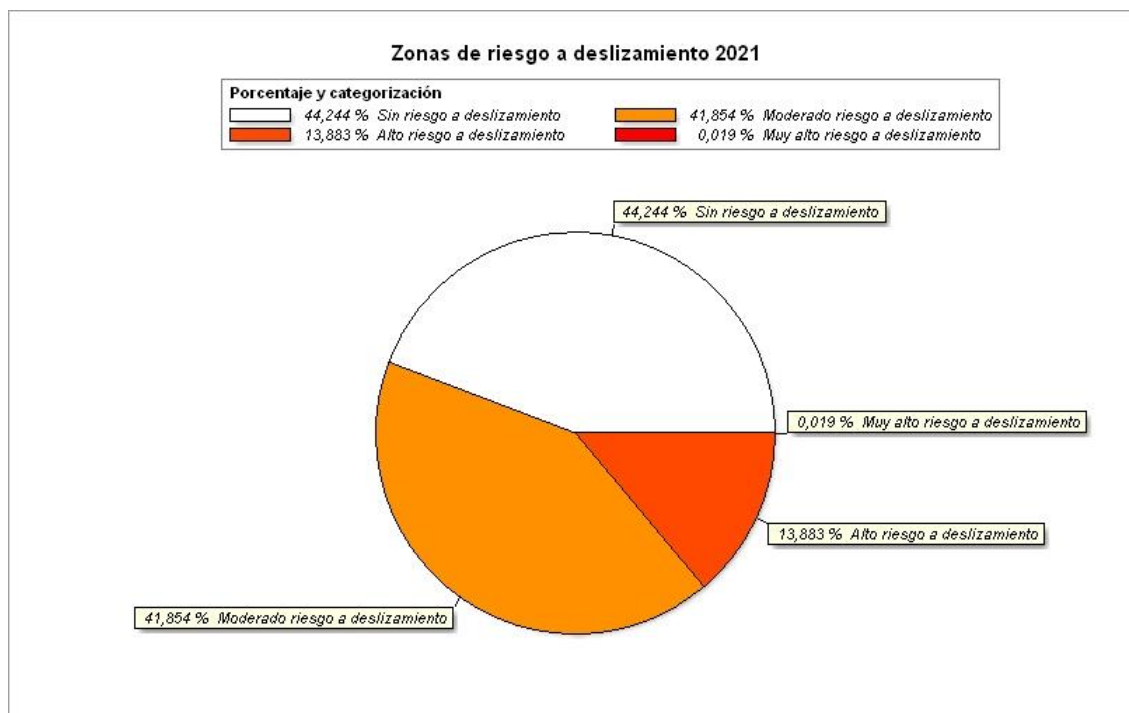


Ilustración 4-19. Porcentajes de Riesgo a deslizamiento 2021

Elaborado por: Gualavisi, 2024

En el mapa generado en la ilustración 4-19, se identificó un 55,75% del área total de riesgo de deslizamiento alta en la Sierra Norte del Ecuador. Este mapa muestra los porcentajes de áreas afectadas de acuerdo con el nivel de riesgo de deslizamiento establecido. Los resultados indican que el 35,798% del territorio evaluado se encuentra en la categoría de riesgo de deslizamiento moderadamente alta, el 41,854% exhibe un riesgo de deslizamiento alta, el 13,883% se clasifica con un riesgo de deslizamiento muy alta, y un preocupante 0,019% presenta un riesgo de deslizamiento extremadamente alto. Estos porcentajes revelan que existe una proporción considerable del área de estudio expuesta a diversos niveles de riesgo de deslizamiento en la Sierra Norte del Ecuador.

Discusión

(Ortega Ortez, 2014), menciona que los deslaves se producen como consecuencia de días consecutivos de lluvias intensas, provocando deslizamientos en laderas. Por su parte, Padrón (2019), indica que los deslizamientos corresponden a desplazamientos de masas de terreno en una pendiente. En el caso de Quito, se trata habitualmente de porciones de talud de algunos metros de altura que se vienen abajo, causando desastres al arrastrar consigo algunas viviendas o sepultar las que se encuentran más abajo.

En nuestra investigación, se identificó que los deslizamientos son provocados por fuertes precipitaciones, las cuales afectan a las pendientes debido a que el suelo ya no puede filtrar más agua, lo que ocasiona el desplazamiento de porciones de tierra hacia la superficie plana y provoca inundaciones al interrumpirse el paso del agua.

4.4.4. Zonas de Riesgo a deslizamiento 2015

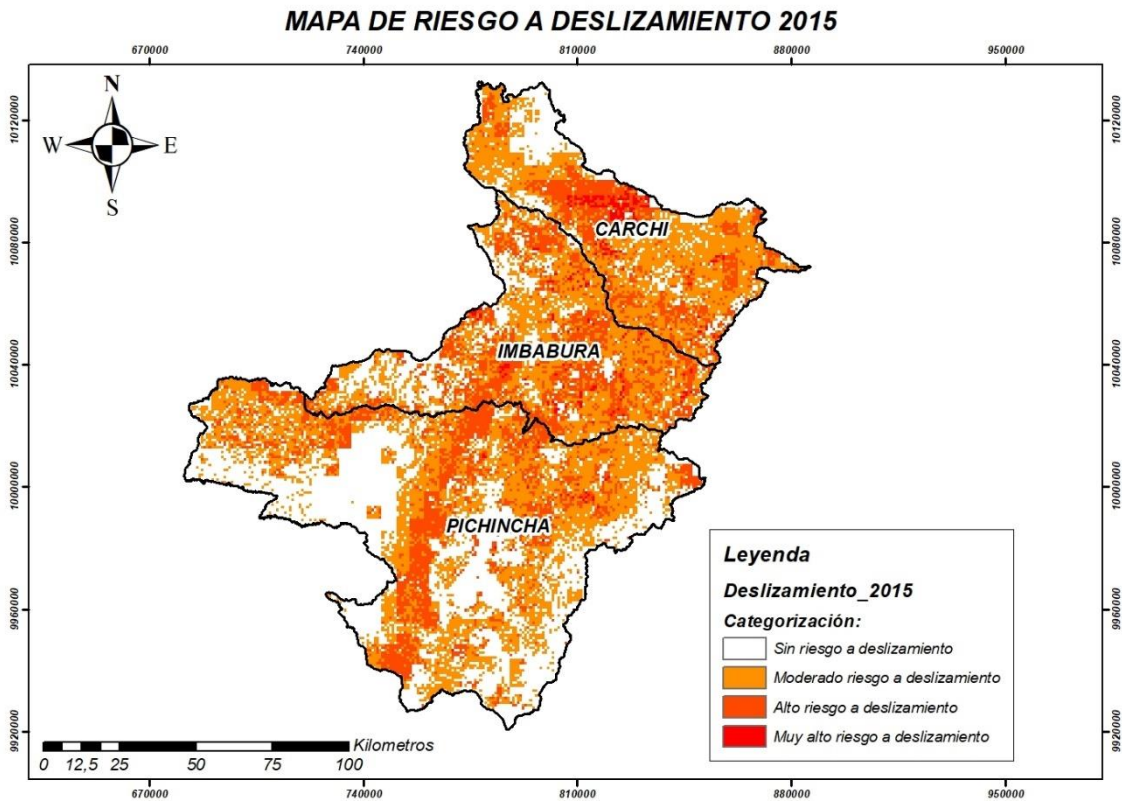


Ilustración 4-20: Zonas de riesgo a deslizamiento.

Realizado por: Gualavisi, B, 2024

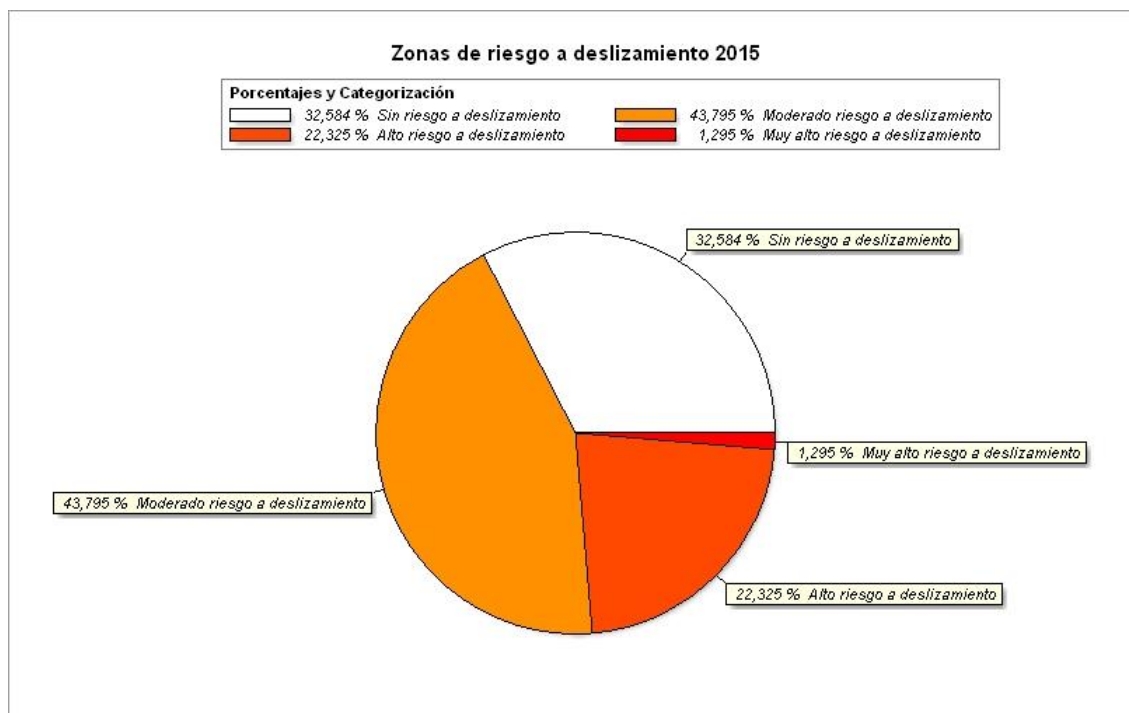


Ilustración 4-21. Porcentajes para zonas de riesgo a deslizamientos.

Elaborado por: Gualavisi, 2024

En el mapa generado en la ilustración 4-21, se identificó un 67,41% del área total de riesgo de deslizamiento alto en la Sierra Norte del Ecuador durante un año seco, caracterizado por un déficit de precipitaciones. Este mapa muestra los porcentajes de áreas afectadas según el nivel de riesgo de deslizamiento, destacando las zonas de mayor susceptibilidad ante este fenómeno, impulsado por condiciones de escasez hídrica.

Los resultados indican que el 25,627% del territorio evaluado se encuentra en la categoría de riesgo de deslizamiento moderadamente alto, el 43,795% exhibe un riesgo de deslizamiento alto, el 22,325% se clasifica con un riesgo de deslizamiento muy alto, y un preocupante 1,295% presenta un riesgo de deslizamiento extremadamente alto. Estos porcentajes revelan que existe una proporción considerable del área de estudio expuesta a diversos niveles de riesgo de deslizamiento en la Sierra Norte del Ecuador, incluso en condiciones de déficit hídrico.

Estas cifras reflejan la alta vulnerabilidad de las zonas altas de estas provincias ante los movimientos en masa o procesos de remoción en masa, los cuales pueden ocurrir no solo por exceso de precipitaciones, sino también durante períodos de escasez hídrica, como fue el caso del año analizado. Este aumento en la ocurrencia de deslizamientos, a pesar de las condiciones de déficit hídrico, puede atribuirse a factores adicionales, como actividades sísmicas o prácticas humanas que alteran la estabilidad de las laderas, como la deforestación o la construcción

inadecuada de zonas urbanas. Por ende, se observó que en este año se produjo una mayor cantidad de deslizamientos en las pendientes, a pesar de que fue un año de escasez hídrica.

Discusión

Según Guzmán y Sánchez (2015) indica en su obra "Análisis de la susceptibilidad a movimientos en masa en la Sierra Norte del Ecuador", los deslizamientos en esta región no solo se ven influenciados por las precipitaciones intensas, sino que también pueden ocurrir en períodos de déficit hídrico. El autor sostiene que, si bien las lluvias son un factor desencadenante importante, la combinación de otros factores como la geología, la pendiente del terreno, la cobertura vegetal y la actividad sísmica juegan un papel fundamental en la estabilidad de las laderas.

Guzmán y Sánchez (2015) destacaron que, durante los años secos, la precipitación insuficiente reduce la cohesión del suelo y provoca que los materiales se sequen, aumentando así la probabilidad a deslizamientos de tierra. Además, el informe señala que las actividades humanas, deforestación y la construcción inadecuada en zonas con pronunciadas pendientes puedan exacerbar al riesgo de migración masiva, independientemente de las condiciones climáticas elevadas.

En concordancia con los hallazgos de Guzmán y Sánchez, los resultados obtenidos en este estudio revelan una alta susceptibilidad a deslizamientos en las provincias de Carchi y Pichincha, incluso durante un año seco. Esta situación se atribuye a la influencia de factores como la actividad sísmica, la geología y la intervención humana en las áreas de laderas, los cuales pueden desencadenar movimientos en masa a pesar de la escasez de precipitaciones.

Consiguientemente, es necesario implementar medidas de prevenir y mitigar el riesgo a deslizamientos en la sierra norte del Ecuador, considerando no solo los periodos de fuertes lluvias sino también en las condiciones secas y la intersección de varios factores que pueden perturbar las laderas. Se deben incluir medidas de monitoreo continuo, educación comunitaria, reforestación y planificación adecuada del uso de suelo para disminuir la vulnerabilidad de la población y asegurar el desarrollo sostenible en estas áreas más vulnerables a riesgos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- En la Sierra Norte del Ecuador, el relieve predominante es escarpado, representando el 97,9% de su superficie topográfica. Según la clasificación de pendientes establecida por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), un terreno se considera escarpado cuando presenta pendientes superiores al 60%. Esta condición geomorfológica constituye el factor principal que determina el alto riesgo de deslizamientos e inundaciones en la región, siendo los deslizamientos el fenómeno de mayor preocupación debido a la extensa cobertura de laderas pronunciadas en las tres provincias que la conforman: Pichincha, Carchi e Imbabura.
- En el área de estudio, las coberturas predominantes son: forestal 35,515%, agropecuaria 30,918% y arbustiva - herbácea con el 28,075%. Estas cifras revelan que una considerable porción del territorio se encuentra bajo uso agropecuario, que, sumado a las características topográficas, de no existir un manejo de conservación se puede potenciar el riesgo a deslizamiento. Las zonas antrópicas que representan el 3,774% del territorio se localizan en zonas susceptibles de inundación. La cobertura de vegetación natural representa una superficie considerable lo cual de cierta forma contribuye a amortiguar el riesgo de inundación y deslizamiento.
- El análisis revela que el 91,865% del territorio presenta una alta escorrentía superficial, la cual coincide frecuentemente con zonas que exhiben condiciones de exceso o déficit hídricos. En las zonas con exceso de agua, el riesgo a deslizamientos de tierra aumenta significativamente cuando se combinan a factores como las pendientes pronunciadas y alta escorrentía superficial. Por el contrario, en zonas propensas a inundaciones donde coinciden la escorrentía superficial y el exceso de agua, la probabilidad de que ocurran estos eventos va aumentando.
- Al analizar y combinar los diversos datos recopilados, se destaca una marcada disparidad en la probabilidad de inundación entre los escenarios de año húmedo y año seco en las provincias de Imbabura, Carchi y Pichincha. Durante un año húmedo, la probabilidad de inundación alcanza el 30,21%, mientras que, en un año seco, este valor disminuye significativamente al 0,924%. Sin embargo, independientemente de las condiciones climáticas, se identifican claramente áreas

altamente susceptibles a inundaciones dentro del área de estudio. Por otro lado, los resultados revelan un riesgo de deslizamientos del 55,75% en el año húmedo, presente en las tres provincias analizadas, y un 67,41% de zonas de riesgo a deslizamientos en el escenario de año seco.

- Una forma de validar los resultados obtenidos a través de la metodología propuesta fue mediante la comparación con el mapa de zonas de inundación del IGM. Esta comparación permitió observar los primeros estudios realizados y los primeros acercamientos para distinguir entre zonas de inundación y deslizamiento. Asimismo, se verificó la concordancia de los resultados con el shape de zonas inundables del IGM, lo cual fortaleció la validez de la investigación.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere incrementar la densidad de estaciones meteorológicas para la revisión de precipitación y temperatura, debido que son variables importantes en la predicción de riesgo a inundación y deslizamiento.
- Se recomienda que la presente investigación podría servir para la elaboración de Planes de Gestión de Riesgos en la predicción de zonas propensas a desastres a inundación y deslizamiento.
- Se recomienda dar continuidad a la investigación sobre las zonas de riesgo a inundación y deslizamiento en la sierra norte, buscando financiamiento en instituciones públicas y privadas para validar los resultados mediante salidas de campo y delimitar con precisión la zona de estudio, con el fin de garantizar el desarrollo y la calidad de la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. **ALONSO, J.A., GARCÍA, R. de A. y FERNÁNDEZ, C.H.**, Guía de campo para la descripción de perfiles. *Departamento de Edafología*, no. January 2004, 2016.
2. **ÁLVAREZ, C. y VANESSA, S.**, *Análisis de la evolución de la gestión, uso y cobertura vegetal del suelo del Bosque Protector Aguarongo y sectores colindantes, área de estudio: San Juan y Jadán*. 2016. S.l.: s.n. ISBN 0104907126.
3. **BELLO, O., BUSTAMANTE, A. y PIZARRO, PÁG.**, Planificación para la reducción del riesgo de desastres en el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. *Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/108). Comisión económica para América Latina y el Caribe - CEPAL*. 2020. [en línea], Disponible en: <http://bibliotecadigital.ciren.cl/discover?query=Cambio+Climático+y+Desastres+Naturales+Una+perspectiva+Macrorregional%2C+2020>.
4. **CABRERA MALLA, E.M.**, *Susceptibilidad a Deslizamientos Mediante El Uso De Sig, a Escala 1: 10 000, Del Tramo Vial Comprendido Desde: El Redondel Del Barrio El Plateado Hasta El Antiguo Peaje Del Cantón Catamayo, Provincia De Loja*. 2021. S.l.: s.n. ISBN 1105150690.
5. **CAJAMARCA, R.**, Estudio del balance hídrico superficial de las cuencas hidrográficas, sector Jadán y Zhidmad en el área de interceptación con el Bosque y Vegetación Protectora Aguarongo (BVPA). *Ingeniería ambiental*, 2017.
6. **CARRILLO, M.**, Modelación hidrológica semidistribuida de micro cuencas de diferente cobertura vegetal. , 2010.
7. **CASTILLO, A., CAPA-MORA, E.D., JARAMILLO, N.D.C.F., MIGUITAMA, PÁG.G.Q. y ÁLVAREZ, L.S.J.**, Repercussion of local knowledge on soil management and conservation in Southern Ecuador. 2020. *Ciencia del Suelo*, vol. 38, no. 1, ISSN 18502067.
8. **CASTILLO ROSERO, C.E.**, Modelos de flujos secundarios de lodo en las quebradas seca y las flores. , 2016.
9. **CHANG, M. y NAVARRETE, E.**, Índice topográfico de humedad para el diagnóstico de la amenaza por inundación en la subcuenca Río Carrizal. , 2023.

10. **CIAPPARELLI, I.C.**, Estudio de la capacidad de retención de fósforo de suelos representativos de la región Pampa Ondulada (Buenos Aires), frente al agregado de altas cargas de estiércol bovino. , 2021.
11. **COMERCIO, E.**, *Norte y centro del Ecuador soportan fuertes aguaceros invernales*. 2021. S.l.: s.n.
12. **CORAL, A.C., GARCÍA TOMASELLI, J.T. y LEAL, A.C.**, Cálculo de balance hídrico usando modelamiento de datos espaciales: estudio aplicado a la cuenca del río Buena Vista, Ecuador. 2015. *Revista Formação*, vol. 22, no. May, DOI 10.33081/formacao.v1i22.3165.
13. **CÓRDOVA GUTIERRES, D., PAREDES MÉNDEZ, D. y ALULEMA DEL SALTO, R.A.**, Determinación del parámetro hidrológico número de curva en la cuenca de la quebrada El Batán, usando sistemas de información geográfica y percepción remota. 2017. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, vol. 1, no. 1, ISSN 1390-7042. DOI 10.29166/revfig.v1i1.53.
14. **DELGADO, I.**, Guía – Número de la Curva. , 2023.
15. **DINGMAN, S.L.**, *Physical Hydrology Third Edition*. 2015. S.l.: s.n. ISBN 9781478611189.
16. **ECHEVERRY HERNÁNDEZ, J.PÁG. y MARRIAGA ROCHA, L.**, Aproximación metodológica para el cálculo de índices de sensibilidad costera ante erosión. Caso de aplicación: departamento de Bolívar, Caribe colombiano. 2018. *Boletín Científico CIOH*, no. 36, ISSN 0120-0542. DOI 10.26640/22159045.436.
17. **FAO**, Guía para la descripción de suelos. , 2009.
18. **FONG LÓPEZ, L.**, Efectos de factores topográficos sobre la profundidad de suelos y la estructura vertical de su textura, capacidad de campo y almacenes de carbono en el noroeste de Baja California. 2019. *Cicese*,
19. **FRANCISCO-NICOLÁS, N., TURRENT-FERNÁNDEZ, A., FLORES-LÓPEZ, H.E., MARTÍNEZ MENES, M.R. y ENRÍQUEZ-QUIROZ, J.F.**, Estimación Del Escurrimiento Superficial Con El Método Scs-Cn En El Trópico Subhúmedo De México. 2010. *Terra Latinoamericana*, vol. 28, no. 1, ISSN 1870-9982.

20. **GASPARI, F.J., RODRÍGUEZ VAGARÍA, A.M. y SENISTERRA, E.G.**, *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas Libros de Cátedra*. 2013. S.l.: s.n. ISBN 9789503409633.
21. **GONZÁLEZ, O., BOJÓRQUEZ, J., FLORES, F., MURRAY, R. y GARCÍA, A.**, Riesgo De Erosión Hídrica Y Estimación De Pérdida De Suelo En Paisajes Geomorfológicos Volcánicos En México. 2016. *Cultivos Tropicales* [en línea], vol. 37, no. 2, ISSN 0258-5936. DOI 10.13140/RG.2.1.3942.5527. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v37n2/ctr06216.pdf>.
22. **GUERRA, M.**, ESTIMACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA ESCORRENTÍA EN MICROCUENCAS QUE DRENAN LOS PÁRAMOS DEL ECUADOR. 2019. *Facultad de Ingeniería química y Agroindustrial*,
23. **GUTIÉRREZ URUEÑA, C.E. y UBAQUE MOZO, N.A.**, Diseño y construcción de un geovisor para la localización óptima de la industria en Colombia a partir de técnicas de análisis espacial. , 2016.
24. **GUZMÁN, K. y SÁNCHEZ, L.**, Estudio de impacto ambiental y plan de manejo ambiental para el proyecto de procesamiento de leche de la Asociación agrícola ganadera 11 de junio, cantón San Miguel de los Bancos, provincia de Pichincha. *Tesis*, 2015.
25. **HARO, S.**, Plan de gestión de riesgos comunitario ante deslizamientos de la parroquia Chugá-Imbabura. , vol. 4, no. 1, 2021.
26. **HENRÍQUEZ, C. y AZÓCAR, G.**, Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. 2006. *Revista de geografía Norte Grande*, no. 36, DOI 10.4067/s0718-34022006000200004.
27. **HIDROBO, J., DA COSTA, M., PRAT, C., TRUJILLO, G., MORENO, J. y ORTEGA, C.A.**, Sistemas de producción en áreas con cangahua habilitada en la Sierra Norte de Ecuador Production systems in areas with reclaimed cangahua soils in the Northern Highlands of Ecuador. 2015. *Siembra*, vol. 2, no. 2015, ISSN 1390-8928.
28. **INAMHI**, Boletín Agrometeorológico Mensual N° 12. , 2017.

29. **INIA**, Balance Hídrico del Suelo. *INIA* [en línea], 2019. Disponible en: http://www.climatedatalibrary.cl/maproom/Monitoring/NDVI/SWB_INIA.html#tabs-1.
30. **INSTITUTO DE GEOGRAFIA DE LA UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**, USO Y COBERTURA DEL SUELO. *IGEO* [en línea], 2021. Disponible en: <https://www.institutodegeografia.org/uso-y-cobertura-del-suelo/#:~:text=La cobertura del suelo se,obtener algún beneficio o producto.>
31. **JARAMILLO, R.**, Centro de seguridad y defensa. *INSTITUTO DE ALTOS ESTUDIOS NACIONALES LA UNIVERSIDAD DE POSGRADO DEL ESTADO* [en línea], 2016. Disponible en: https://repositorio.iaen.edu.ec/bitstream/handle/24000/3899/TESINA-RAMIRO_JARAMILLO-2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
32. **KUBES, M.**, Análisis Multicriterio basado en SIG para identificar potenciales áreas para establecer un relleno sanitario en el cantón Rumiñahui de la provincia Pinchincha, Ecuador. , 2019.
33. **KUMAR, B. y WATANABE, T.**, Landslide Susceptibility Mapping and Assessment Using Geospatial Platforms and Weights of Evidence (WoE) Method in the Indian Himalayan Region: Recent Developments, Gaps, and Future Directions. 2021. *ISPRS International Journal of Geo-Information* [en línea], vol. 10, no. 3, [consulta: 30 julio 2023]. ISSN 22209964. DOI 10.3390/IJGI10030114. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijgi10030114>.
34. **LACREU, H.**, Vista desde la Geolodactica, retos para renovar la enseñanza de la Geología | Tierra didáctica. 2019. *UNICAMP* [en línea]. [consulta: 30 julio 2023]. Disponible en: <https://periodicos.sbu.unicampág.br/ojs/index.php/td/article/view/8654666/21273>.
35. **LAZARO NOLASCO, B.J.**, “Análisis De Riesgo De Desastre Originado Por Los Fenómenos Hidrometeorológicos a Fin De Reducir La Vulnerabilidad Frente a La Inundación Del Rio Huallaga En El Poblado De Colpa Alta, Distrito De Amarilis – Huánuco”. , 2019.
36. **LECHÓN SANCHEZ, L.W. y CHICAIZA, J.**, De la agricultura familiar campesina a las microempresas de monocultivo. Reestructura socio-territorial en la Sierra norte del Ecuador. 2019. *Eutopía. Revista de Desarrollo Económico Territorial*, no. 15, ISSN 1390-5708. DOI 10.17141/eutopia.15.2019.3875.

- 37.**LÓPEZ, D.**, DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO PARA LA CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE UNIDADES DE RELIEVE A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN. , 2006.
- 38.**MAATE**, Plan Estratégico Institucional. , 2023.
- 39.**MAATE**, Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica – Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, velará por un ambiente sano y el respeto de los derechos de la naturaleza o pacha mama. . 2023.
- 40.**MAZA, C.**,. CLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA COBERTURA VEGETAL SOBRE LA SUBCUENCA ZAMORA HUAYCO - CANTÓN LOJA. , no. 07, 2009
- 41.**MCGUFFIE, K. y HENDERSON-SELLERS, A.**, *A climate modelling primer*. 2005. S.l.: s.n. ISBN 0470857501.
- 42.**MELA**, Edafología. 2019.*Soil Science*, vol. 80, no. 3, ISSN 0038-075X. DOI 10.1097/00010694-195509000-00010.
- 43.**MERO, G.**, Diseño de captación superficial de agua, para su uso en riego, en las instalaciones de la granja experimental UNESUM, Cantón Jipijapa. , 2019.
- 44.**MORENO, J., YEROVI, F., HERRERA, M., YÁNEZ, D., ESPINOSA, J. y HARO, R.**, 2022. *Suelos de la Sierra*. S.l.: s.n. ISBN 9789942225573.
- 45.**ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (FAO)**, Guía para la descripción de suelos. *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*, 2009.
- 46.**ORTEGA ORTEZ, G.**, Diseño de un plan de gestión de riesgos y desastres ante eventos de deslizamientos, sismos e incendios para la pontificia universidad católica del Ecuador sede Esmeraldas. 2014., ISSN 1098-6596.
- 47.**PADRÓN, C.**, Evaluación del riesgo de desastre por deslizamiento activados por lluvia, caso estudio: barrios informales de Mamera - El Junquito. 2019. *Terra. Nueva Etapa*, vol. 35, no. 57, ISSN 2542-3266.
- 48.**PAYERO, J.O., MELVIN, S.R., IRMAK, S. y TARKALSON, D.**, Yield response of corn

to deficit irrigation in a semiarid climate. 2006. *Agricultural Water Management*, vol. 84, no. 1-2, ISSN 03783774. DOI 10.1016/j.agwat.2006.01.009.

49. **PIQUERAS, J.**, Capitulo 4. 2010. *Compendium Newtown Pa*, vol. 17, no. 3, ISSN 14222795.

50. **PORTA ZAPATA, G.L.**, Análisis de riesgo de inundación en prevención de desbordes del Río en el distrito de San Vicente de Cañate 2018. 2020. *Range Management and Agroforestry*, vol. 4, no. 1, ISSN 09712070. DOI 10.1016/j.fcr.2017.06.020.

51. **PORTILLA FARFÁN, F.**, *Agroclimatología del Ecuador*. 2018. S.l.: s.n. ISBN 9789978103104.

52. **PRIEGO, A., COTLER, H., FREGOSO, A., LUNA, N. y ENRÍQUEZ, C.**, La dinámica ambiental de la cuenca Lerma-Chapala. 2004. *Gaceta Ecológica* [en línea], no. 71, ISSN 1405-2849. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2884358.pdf>.

53. **RAUDES, M. y SAGASTUME, N.**, Manual Conservación de Suelos. , 2009.

54. **RUIZ, E. y MARTINEZ, M.**, Hidrología Aplicada Tema 4. Infiltración Y Humedad Del Suelo. *Hidrología Aplicada*, 2015.

55. **SCHNEIDER, S.**, *Introduction to climate modeling*. 1992. S.l.: s.n. 1992.

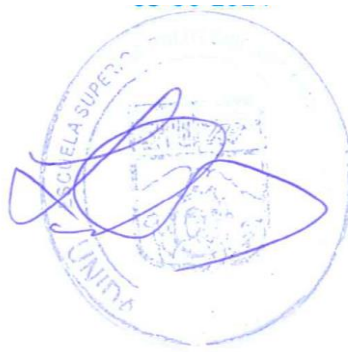
56. **SECRETARIA NACIONAL DE GESTIÓN DE RIESGOS**, Lluvias, del 29 de enero de 2024 a la fecha. , no. 53, 2024.

57. **SILLERO MEDINA, J.A., HUESO GONZALEZ, y RUIZ SINOGA, J.D.**, La precipitación geomorfológica como elemento clave en el modelado del paisaje mediterráneo. 2019. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, no. 82, ISSN 0212-9426. DOI 10.21138/bage.2780.

58. **SUBSECRETARÍA DE CALIDAD AMBIENTAL DIRECCIÓN DE NORMATIVA Y CONTROL AMBIENTAL**, Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica. , 2009.

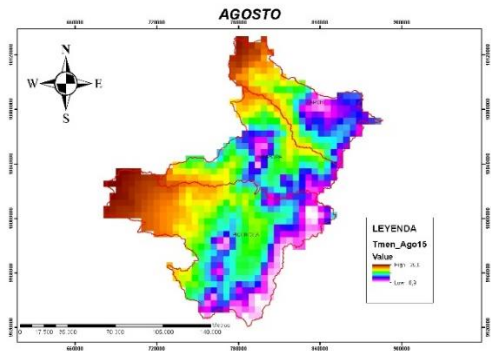
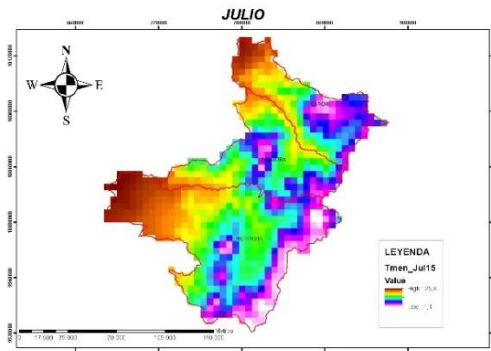
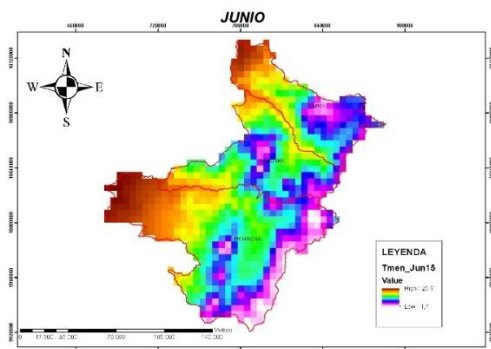
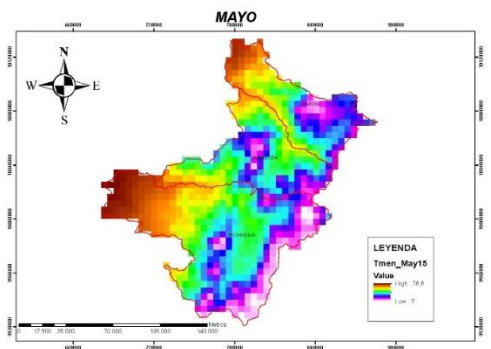
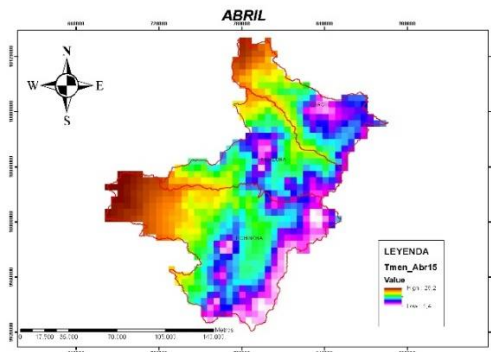
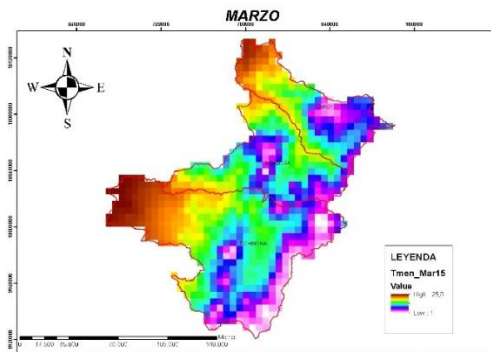
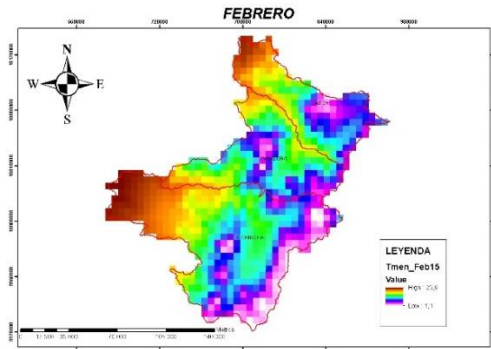
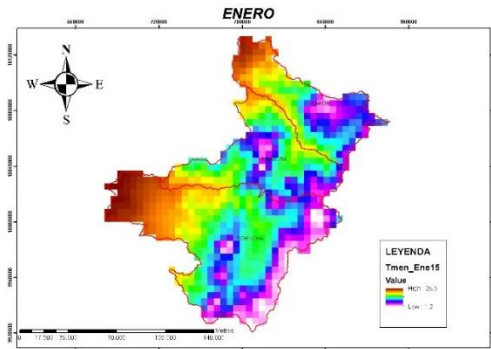
59. **THORNTHWAITE, C.**, An Approach toward a Rational Classification of Climate. 1948. *Journal of Nuclear Materials*, ISSN 00223115. DOI 10.1016/0022-3115(71)90076-6.

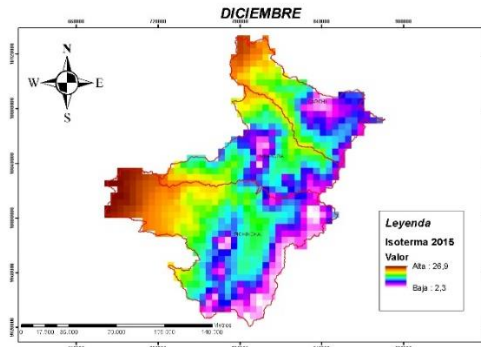
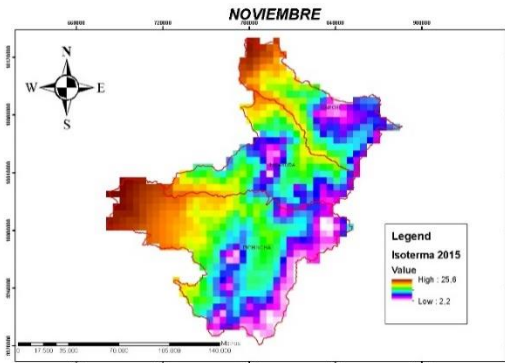
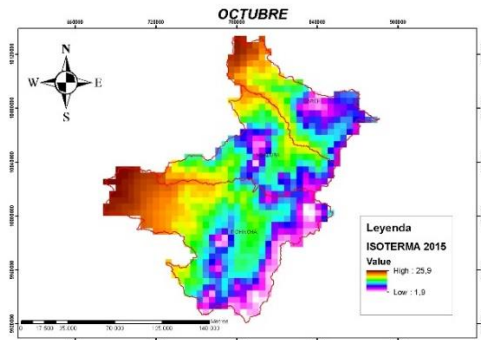
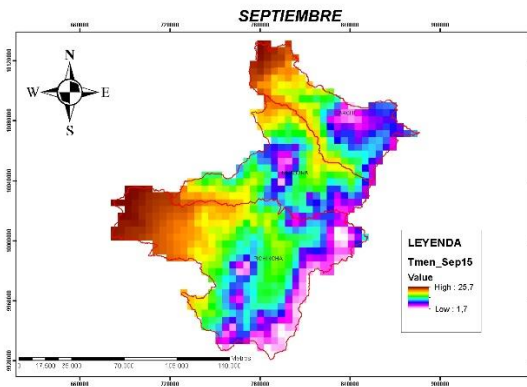
60. **VELOZA MUÑOZ, W.A.**, IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS SUSCEPTIBLES A MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE MACANAL – BOYACÁ COMO INSUMO PARA PLANES DE GESTIÓN DE RIESGO DE DESASTRES. *ESPECIALISTA EN GEOMÁTICA* 2020. [en línea], Disponible en: <http://hdl.handle.net/10654/36638>.
61. **VILLARROYA, J. FARIAS, H.D. y AMARILLA, M.E.**, Estimación del parámetro hidrológico del Número de Curva NC : Automatización del cálculo mediante S .I.G . y nuevas fuentes de información cartográfica . Caso del área urbana de Pozo Hondo. 2013. *IIX Joranda de Ciencia y Tecnología NOA*, vol. 3, no. 1,
62. **WENG, Q., LU, D. y SCHUBRING, J.**, Estimación de la relación entre la temperatura de la superficie terrestre y la abundancia de vegetación para estudios de islas de calor urbanas - ScienceDirect. . 2004.



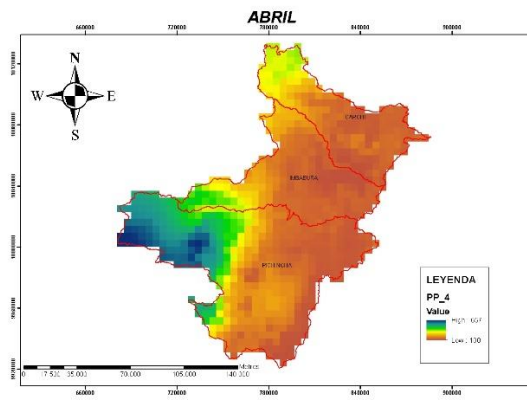
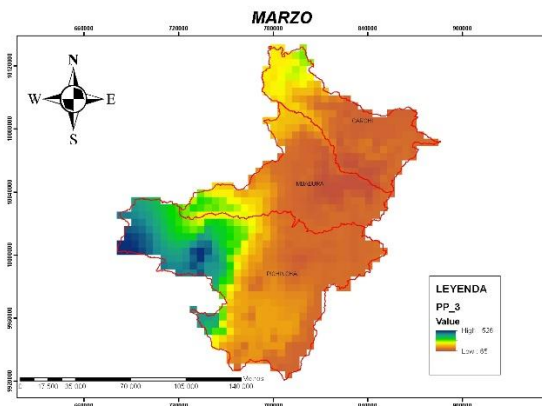
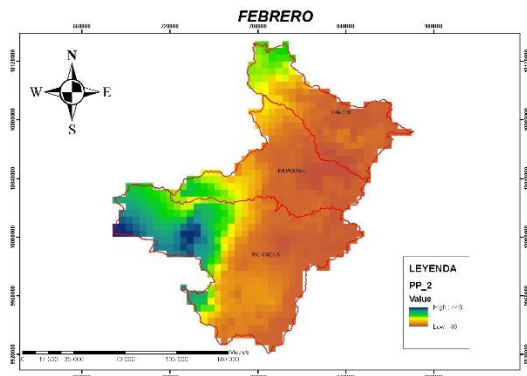
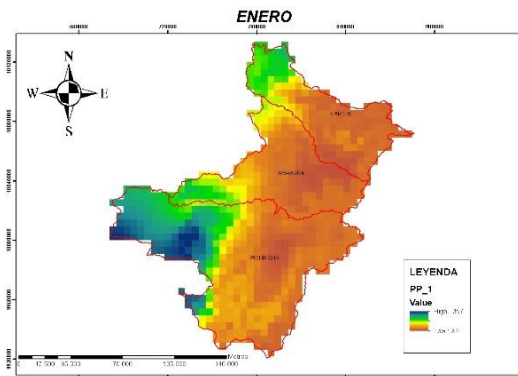
ANEXOS

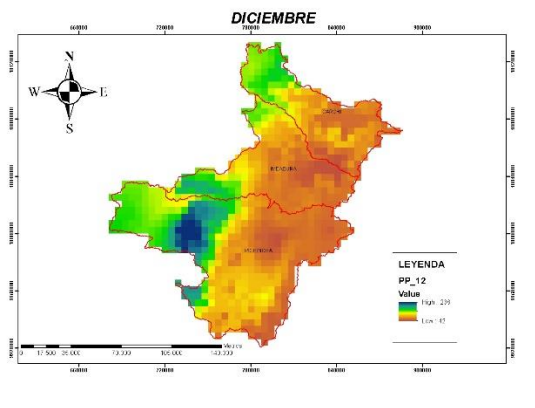
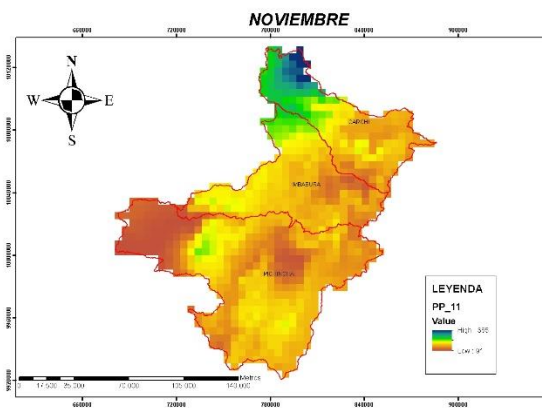
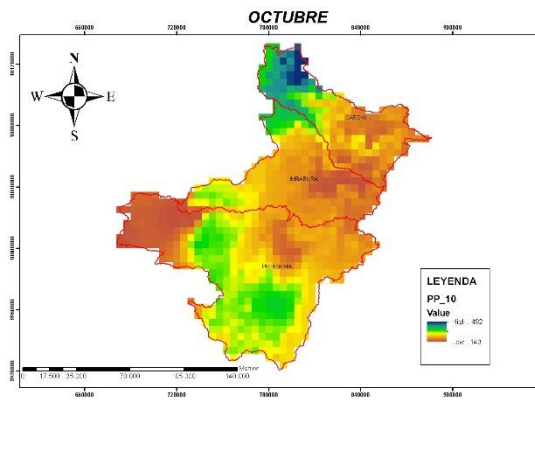
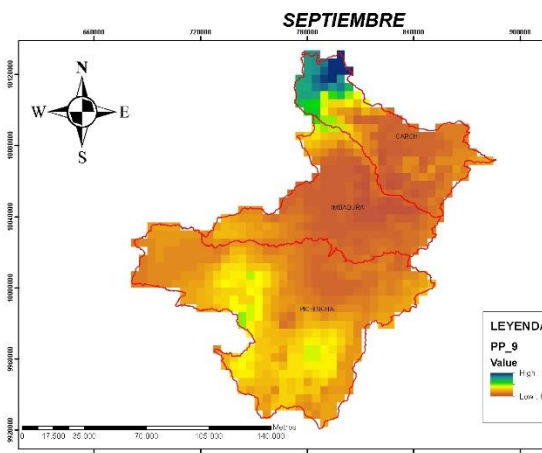
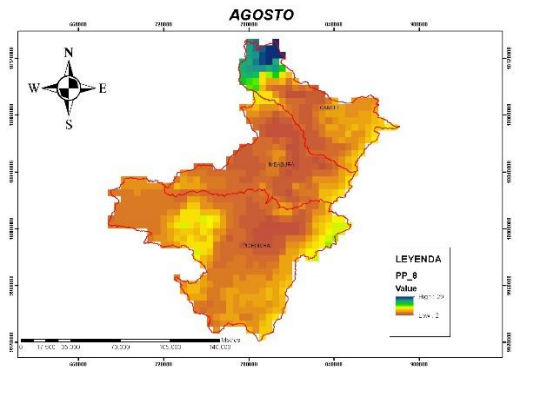
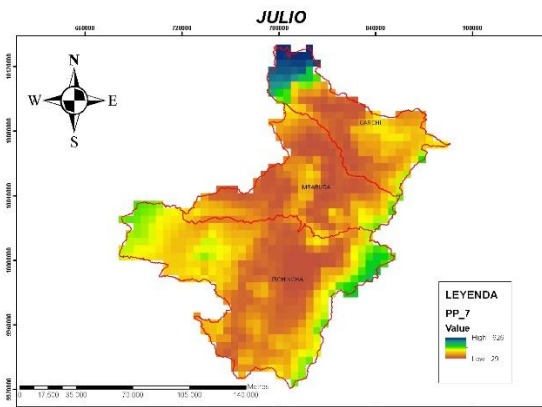
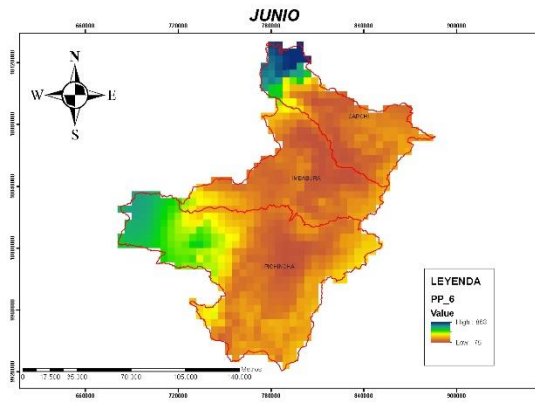
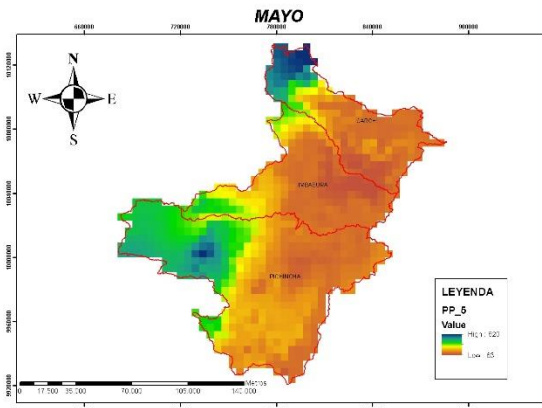
ANEXO A: TEMPERATURA 2015



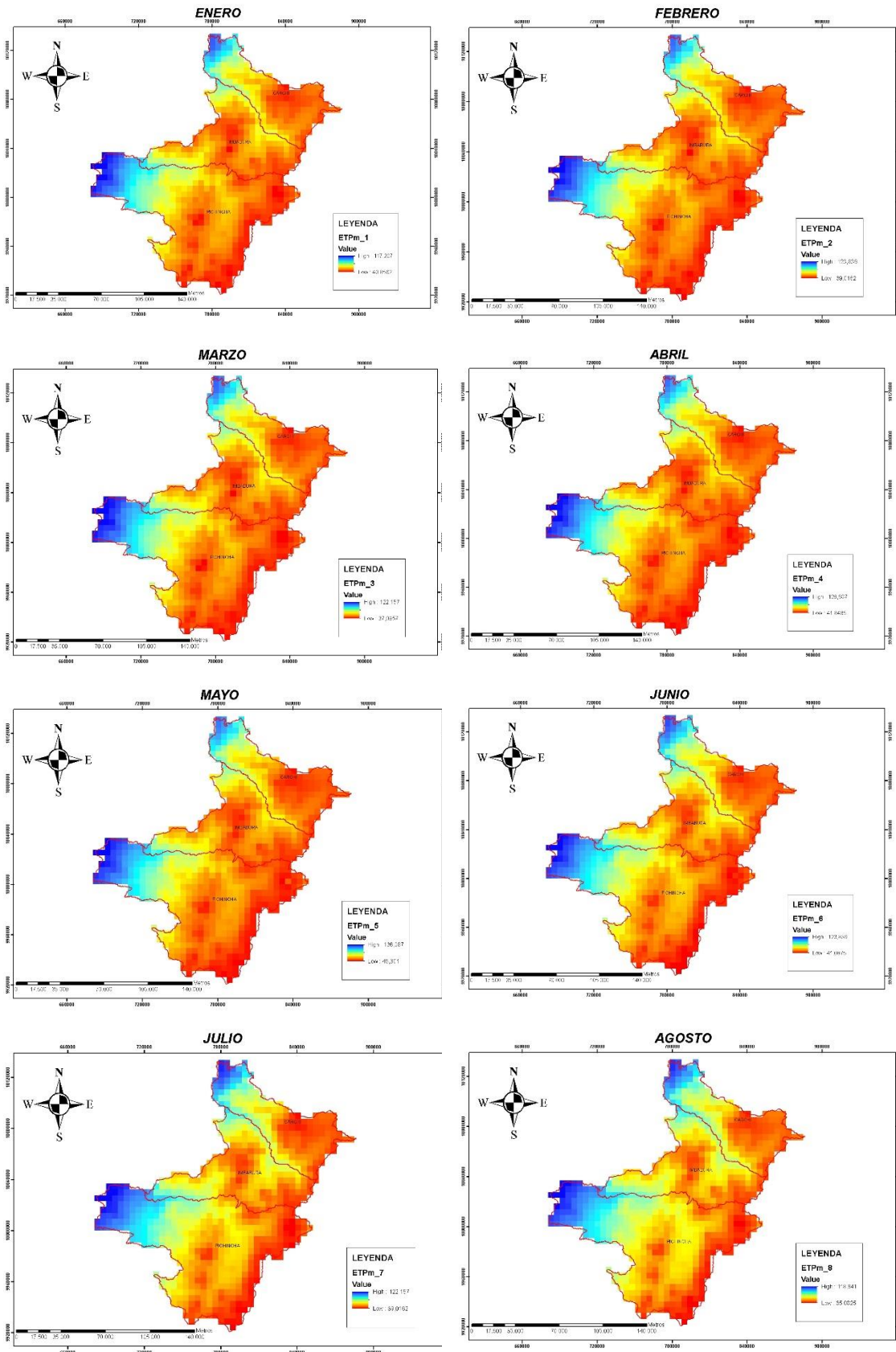


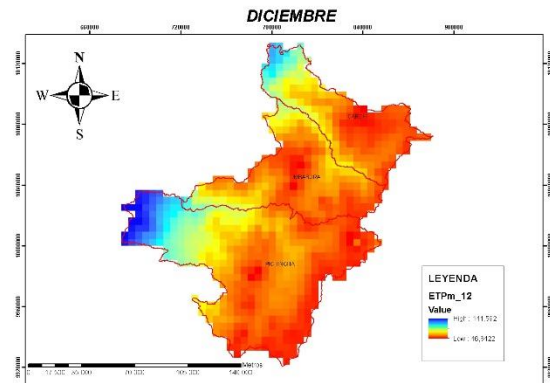
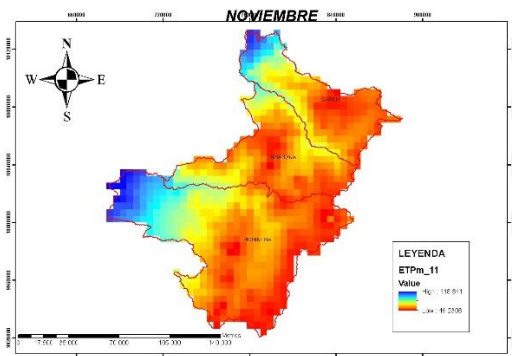
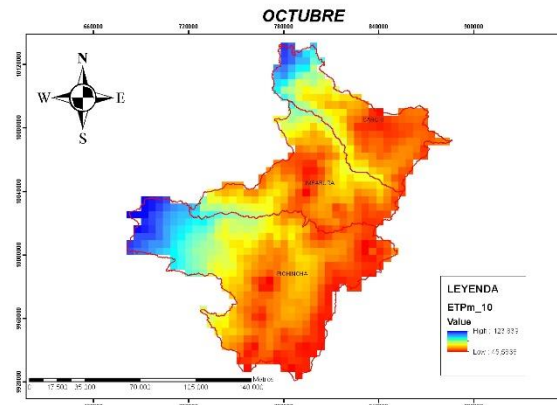
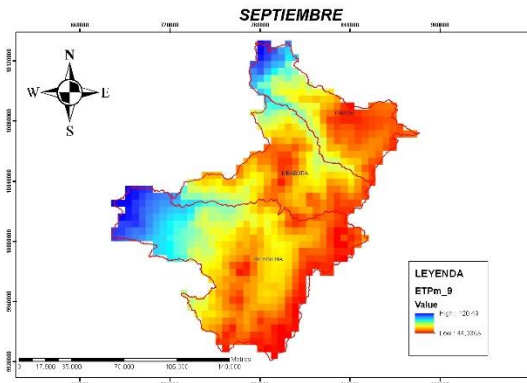
ANEXO B: PRECIPITACIÓN 2015



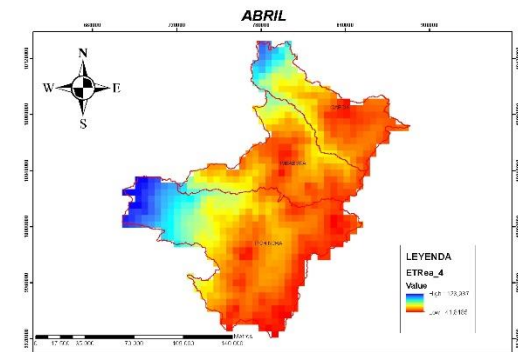
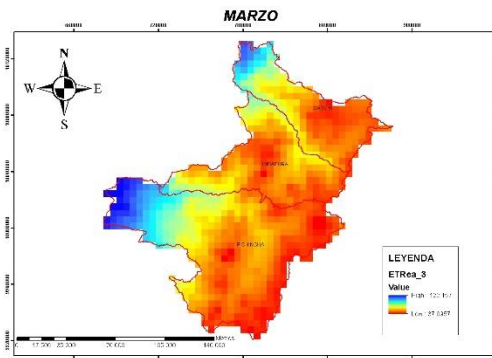
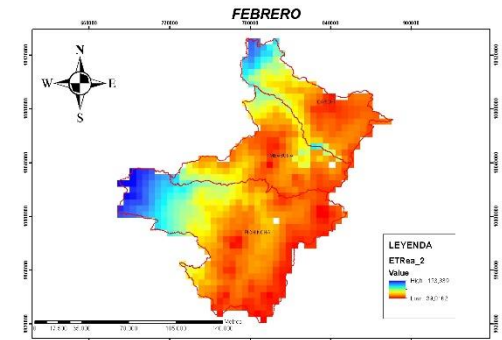
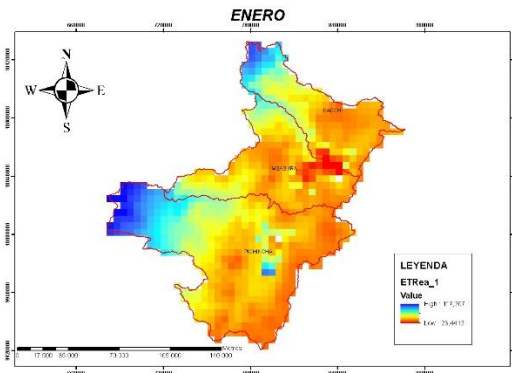


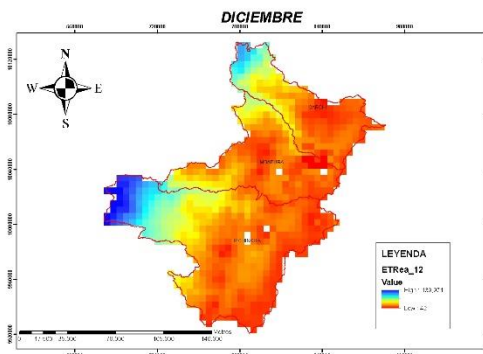
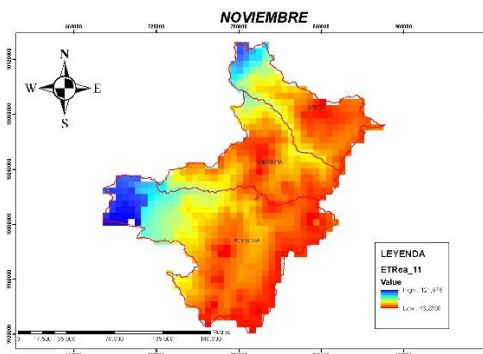
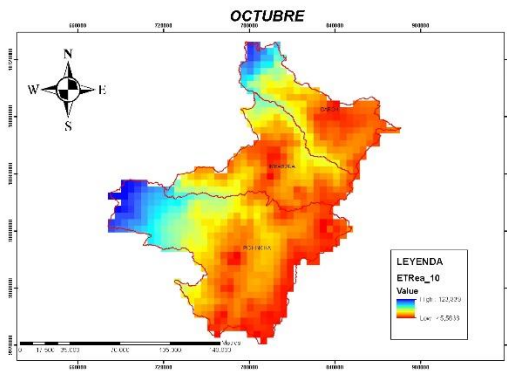
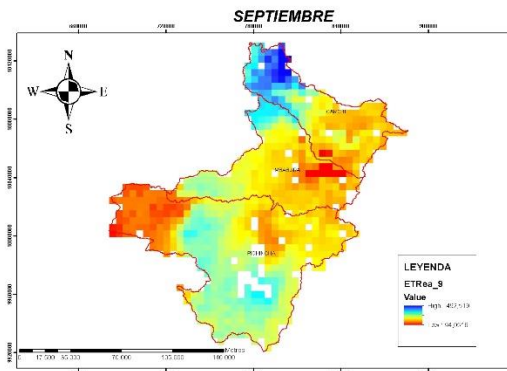
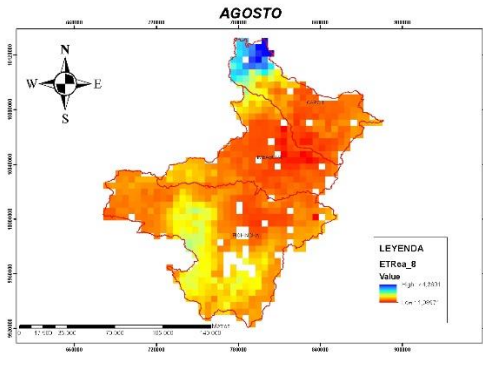
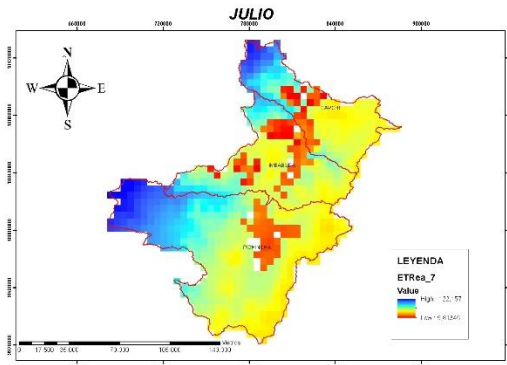
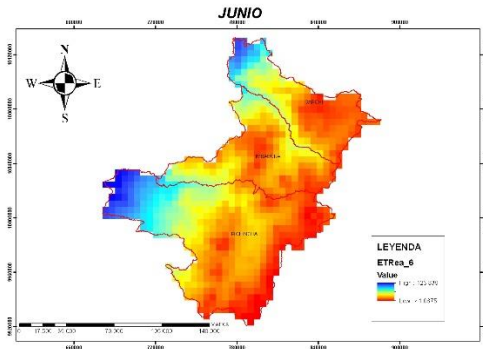
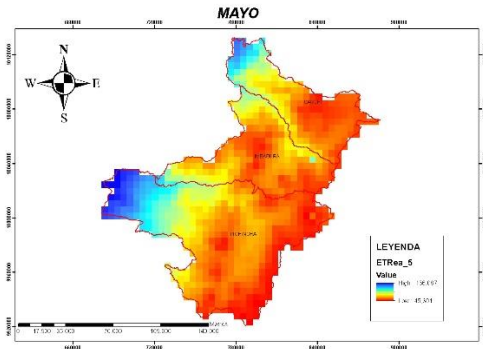
ANEXO C: EVAPOTRANSPIRACIÓN



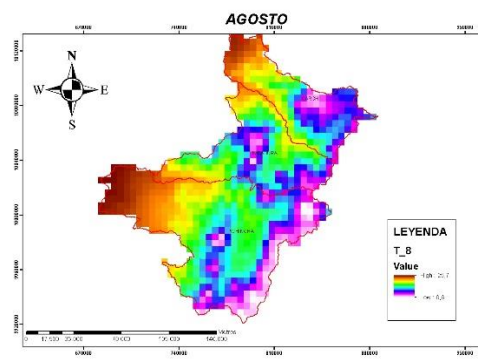
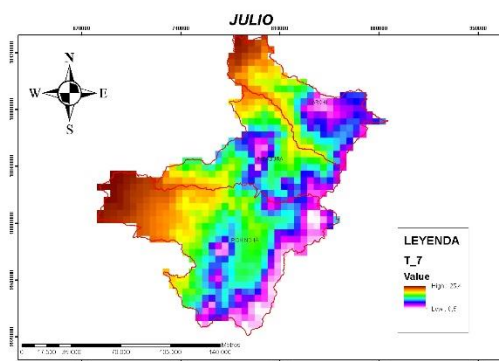
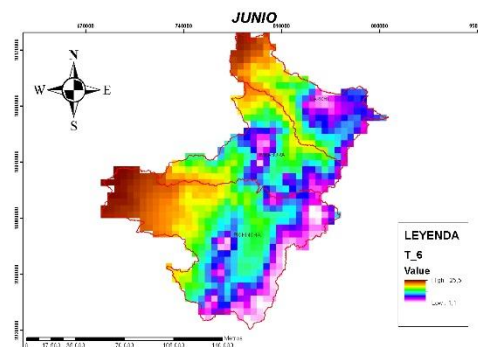
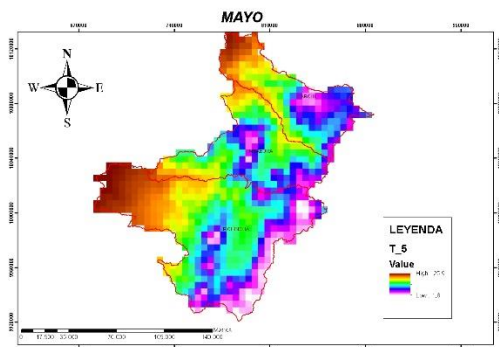
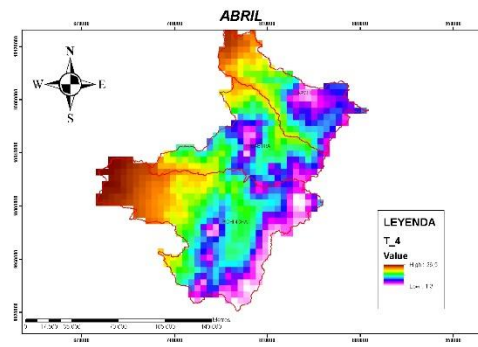
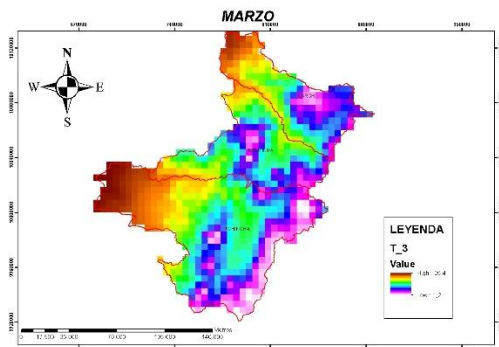
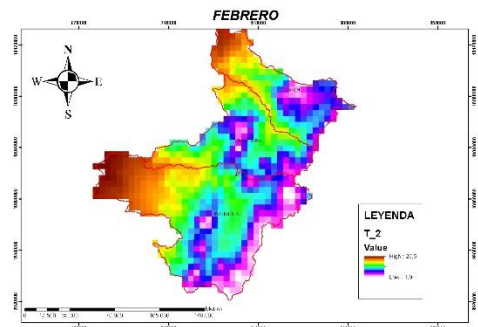
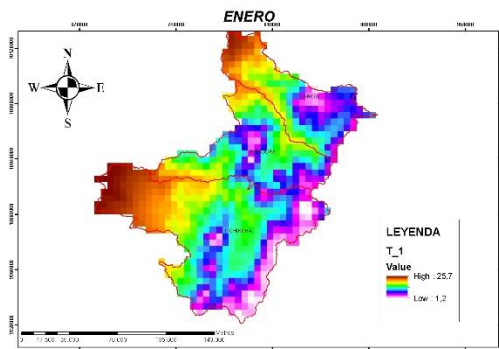


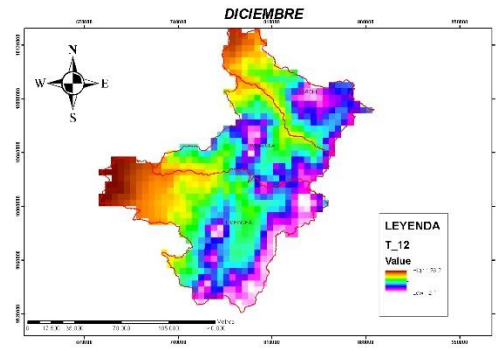
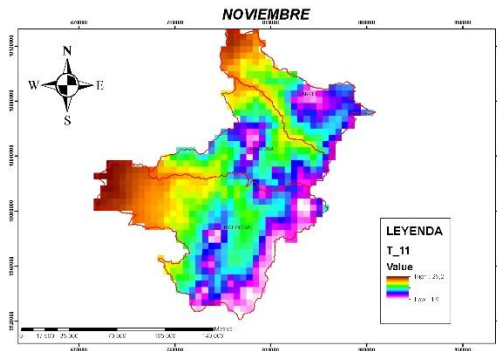
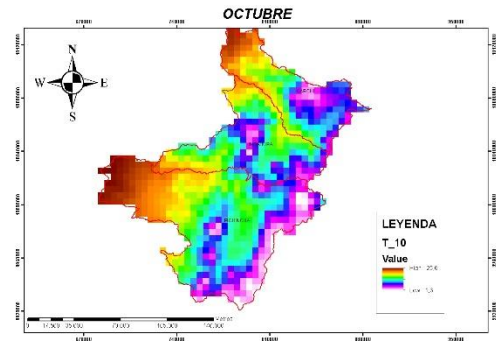
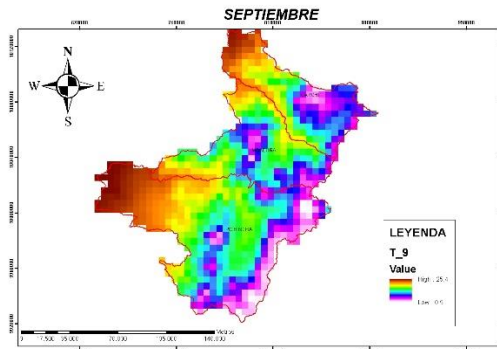
ANEXO D: EVPO REAL



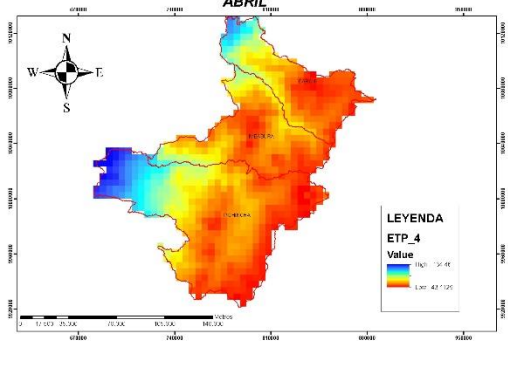
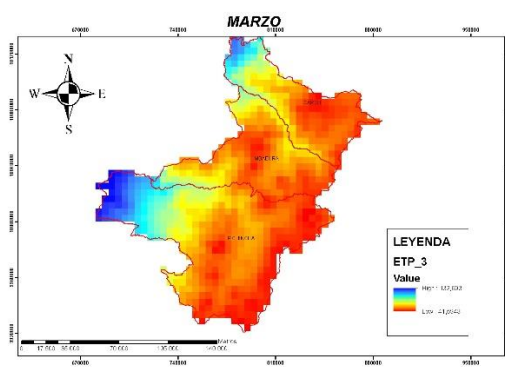
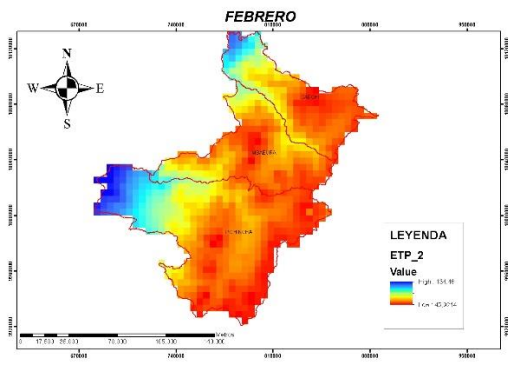
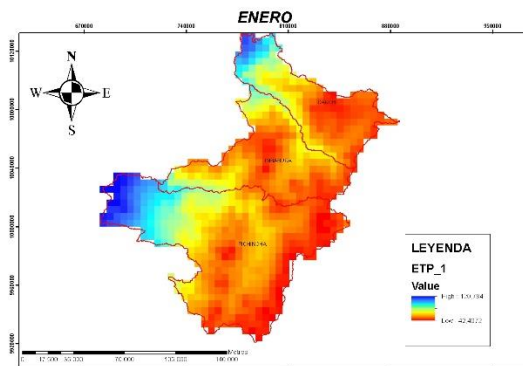


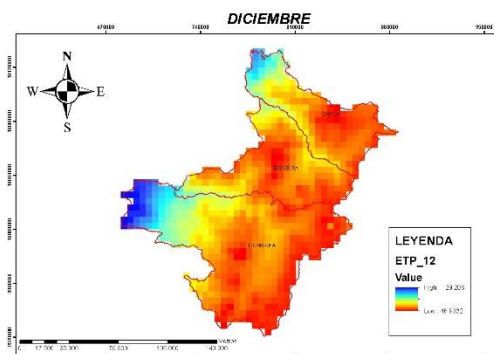
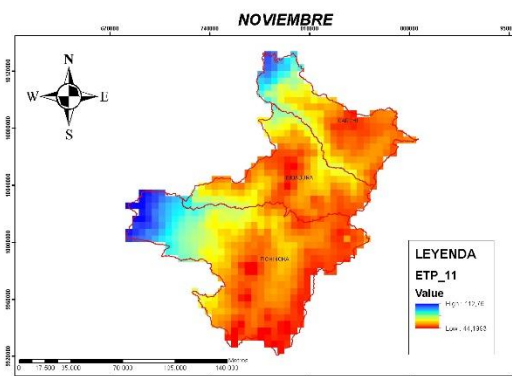
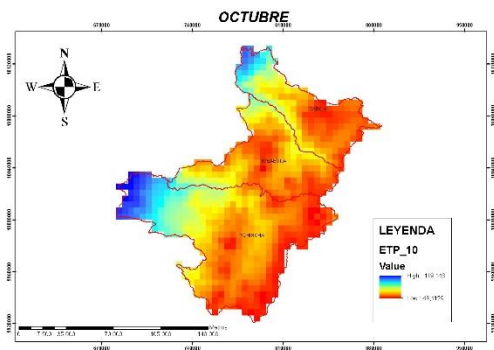
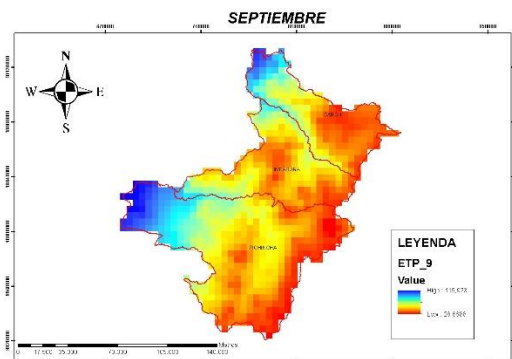
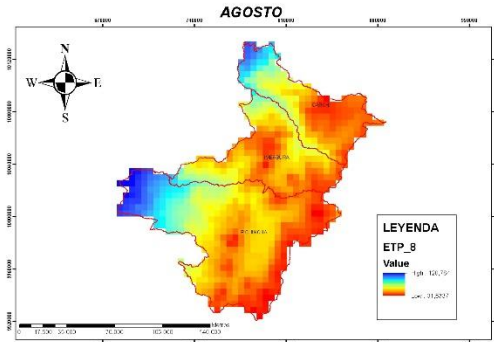
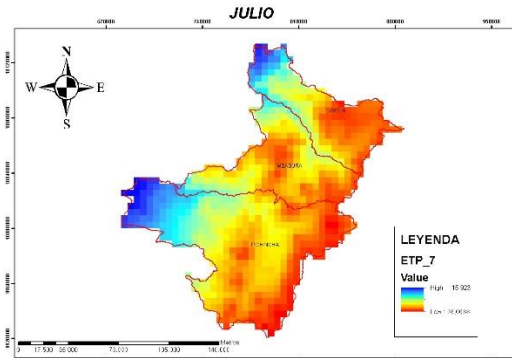
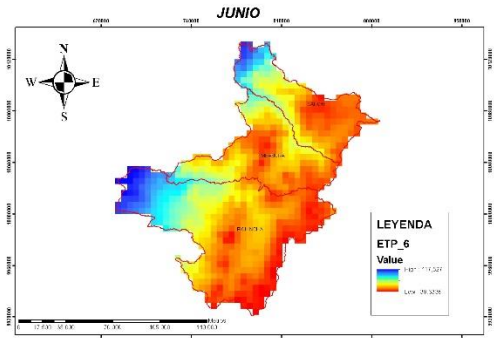
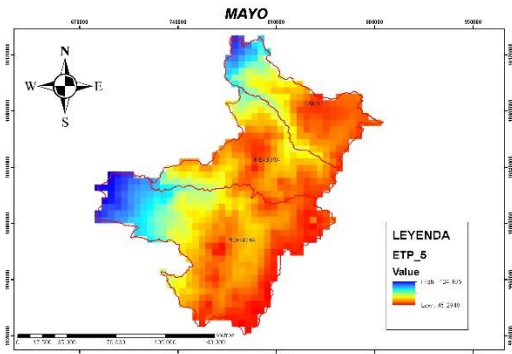
ANEXO E: TEMPERATURA 2021



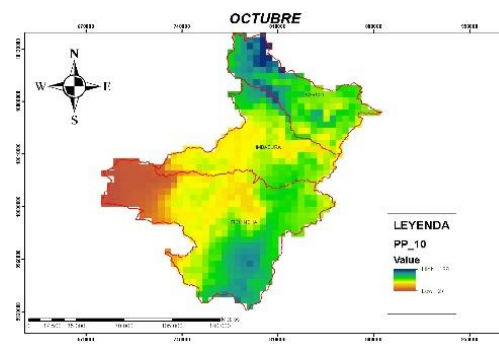
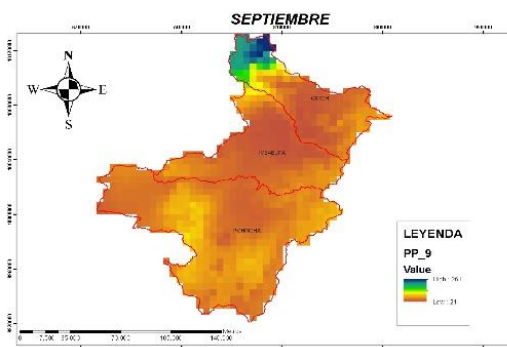
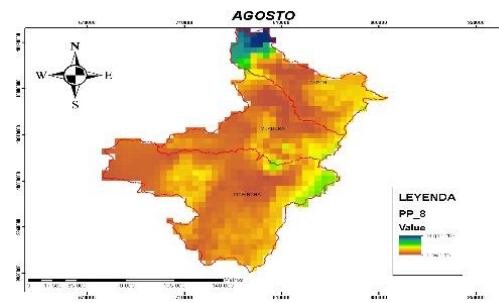
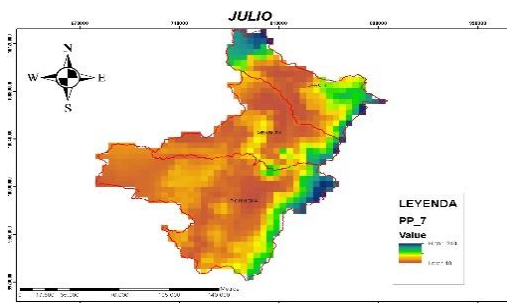
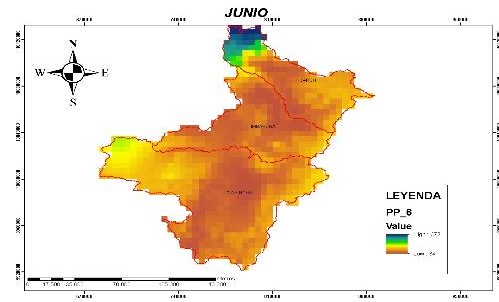
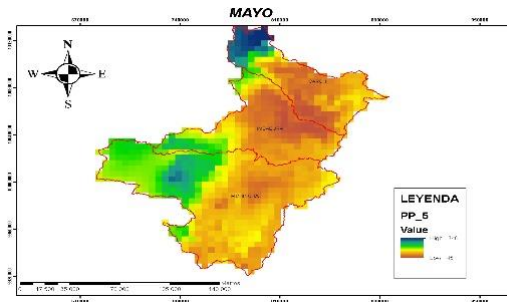
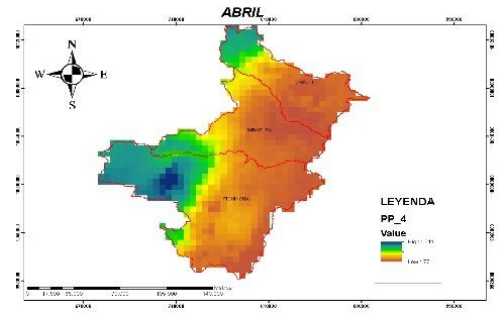
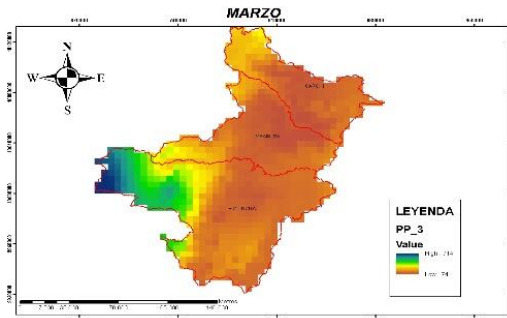
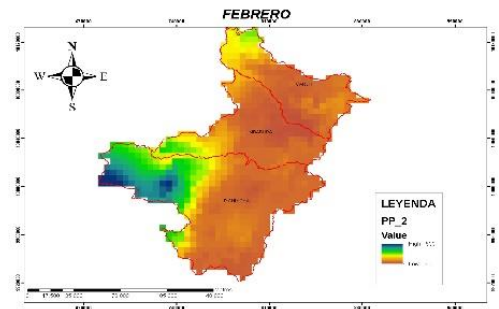
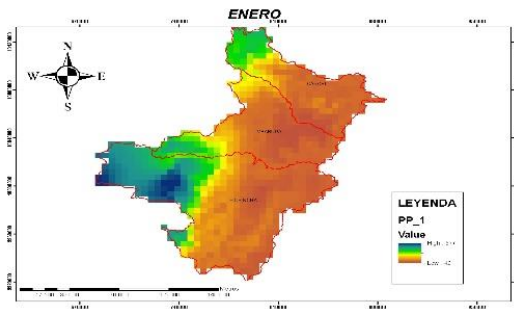


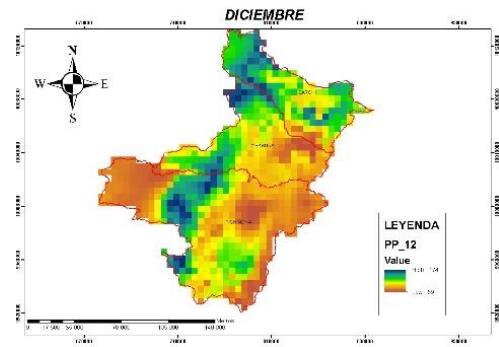
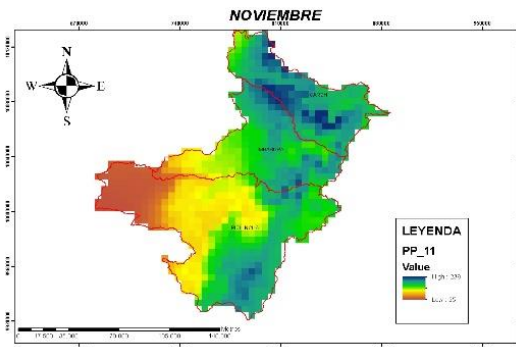
ANEXO F: EVAPOTRANSPIRACIÓN 2021



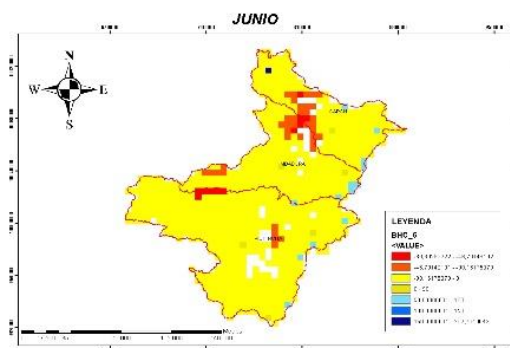
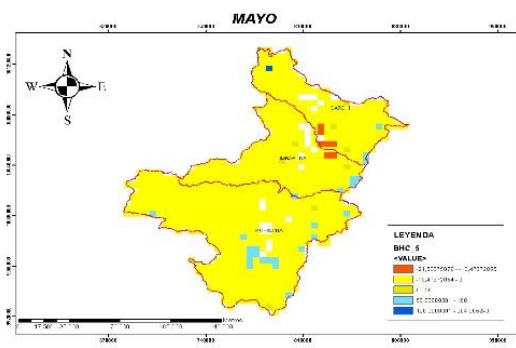
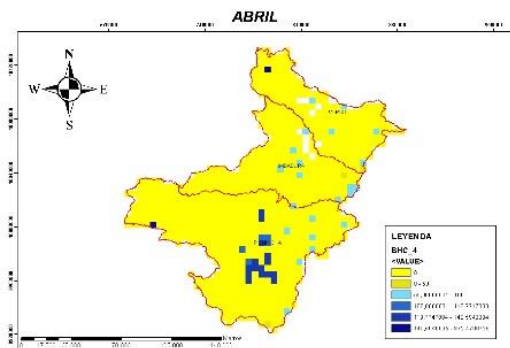
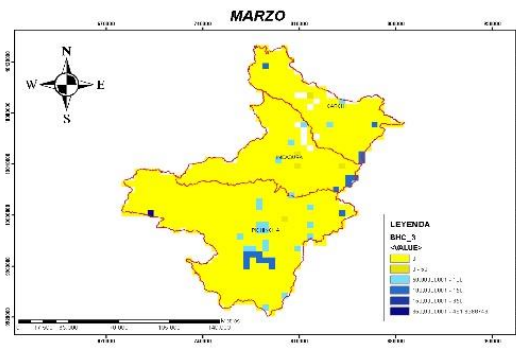
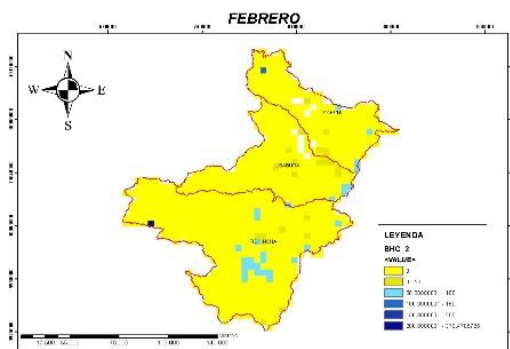
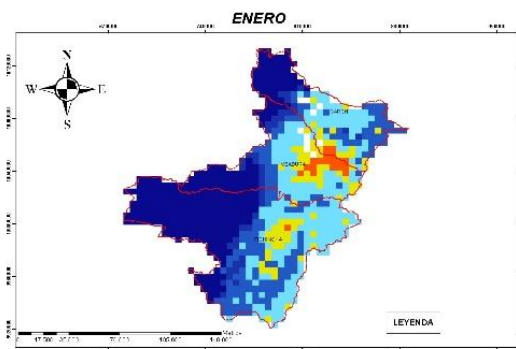


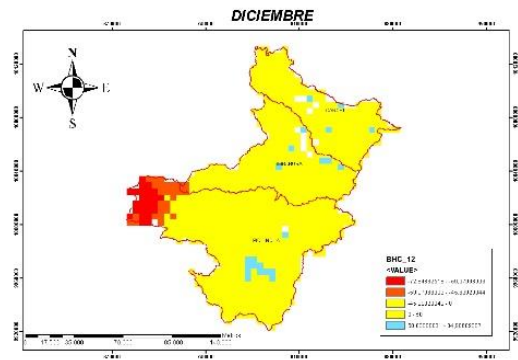
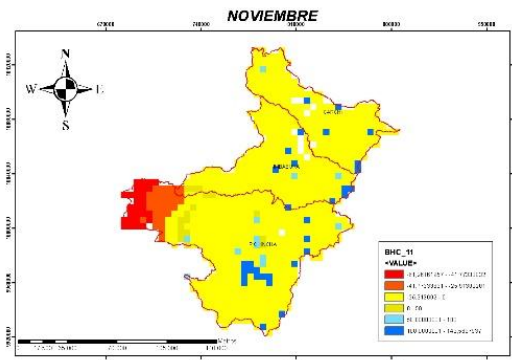
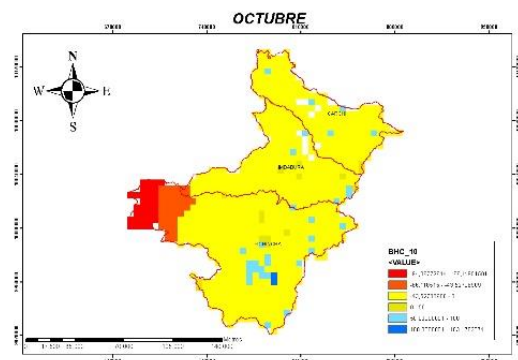
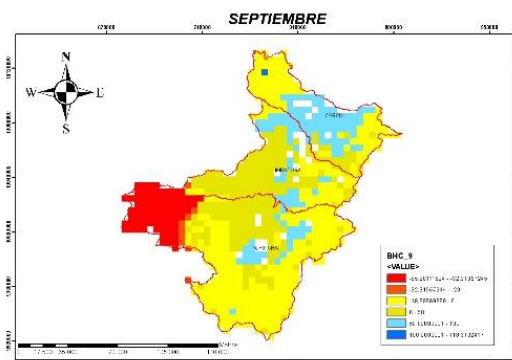
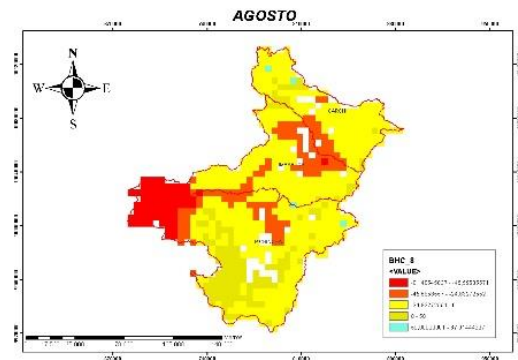
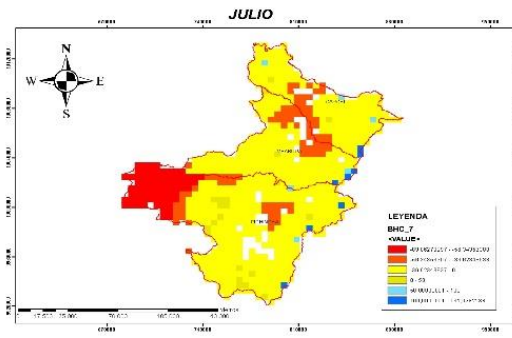
ANEXO G: PRECIPITACIÓN 2021



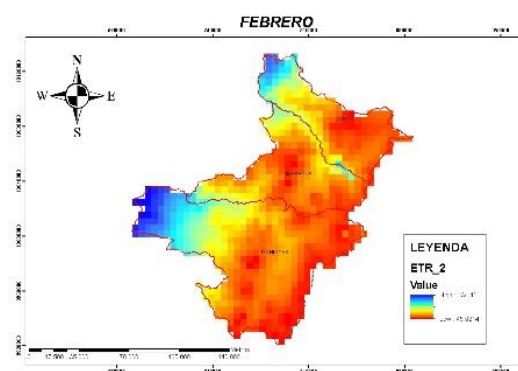
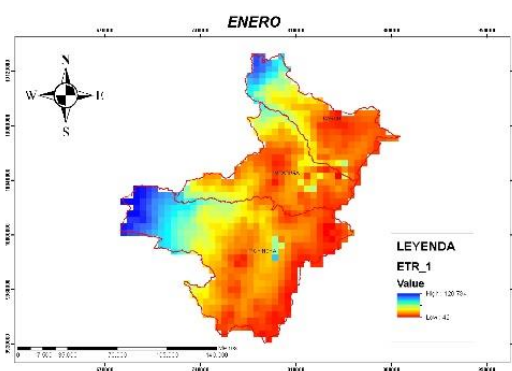


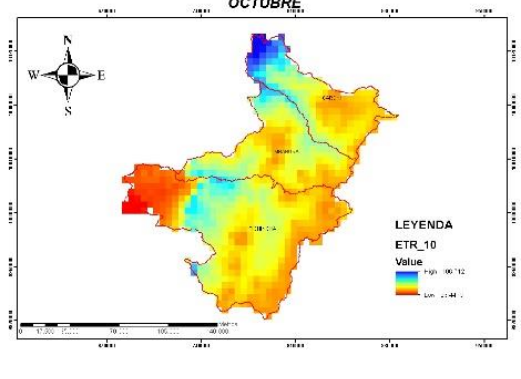
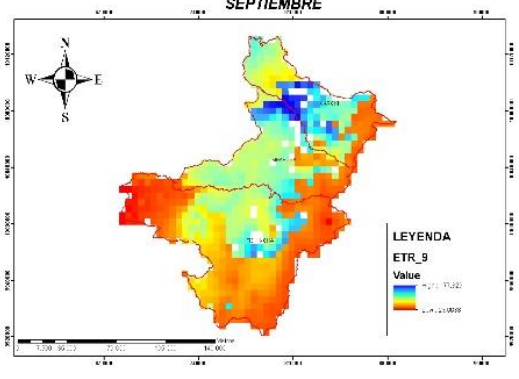
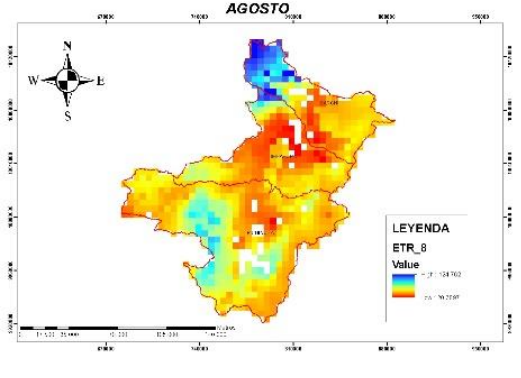
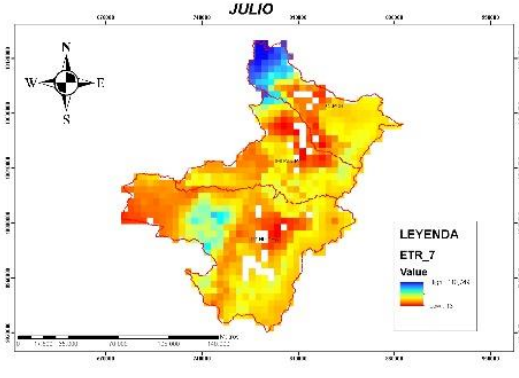
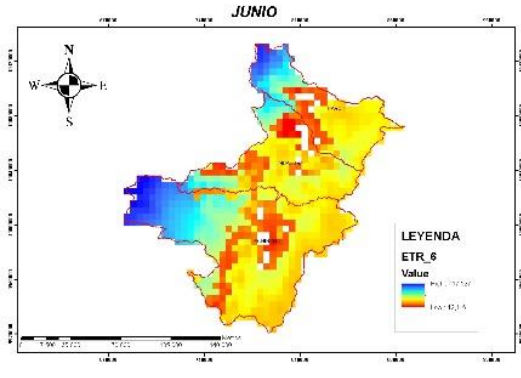
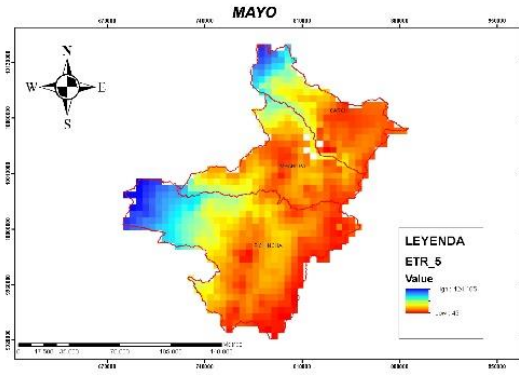
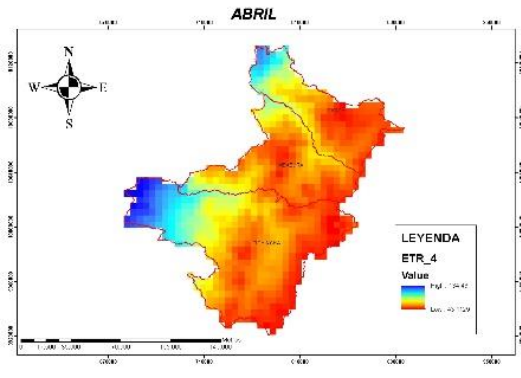
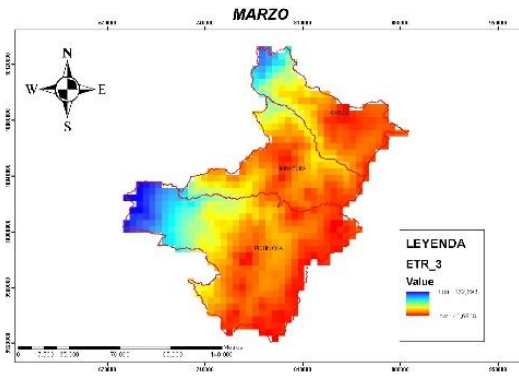
ANEXO H: BALANCE HÍDRICO 2021

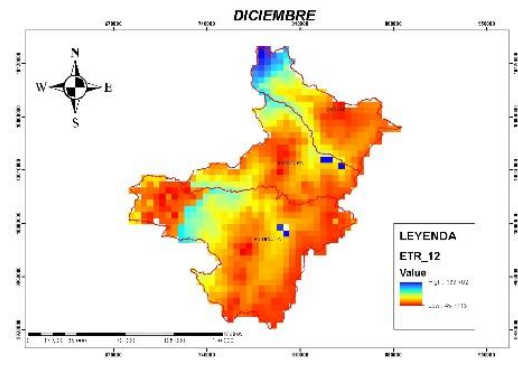
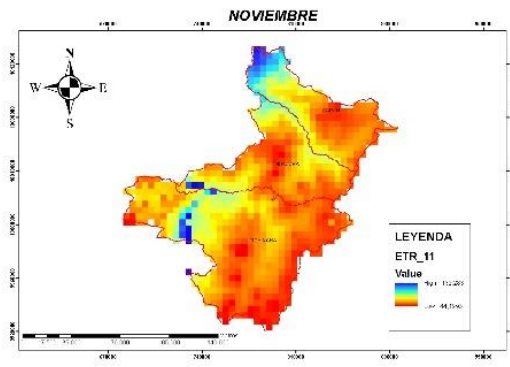




ANEXO I: EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL 2021




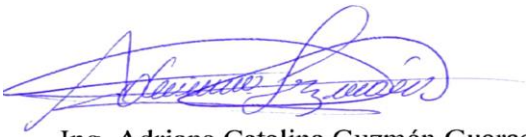






ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA
NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO

Fecha de entrega: 05/06/2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Segundo Benjamin Gualavisi Iguago
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Recursos Naturales
Carrera: Recursos Naturales Renovables
Título a optar: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables
 Ing. Jorge Daniel Córdova Lliquín, MSc. Director del Trabajo de Integración Curricular
 Ing. Adriana Catalina Guzmán Guaraca, MSc. Asesora del Trabajo de Integración Curricular