

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Cálculo del balance hídrico en la cuenca hidrogeológica del  
acuífero de Tumbaco para estimar la recarga usando el modelo  
InVEST, estimando la evapotranspiración usando imágenes  
satelitales de MODIS**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL**

**STEFANY KAWON OBANDO DE LIRA**

**DIRECTORA: CARLA PAOLA MANCIATI JARAMILLO**

**DMQ, febrero 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Stefany Kawon Obando De Lira declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



---

**Stefany Kawon Obando De Lira**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Stefany Kawon Obando De Lira, bajo mi supervisión.

---

**Carla Paola Manciatí Jaramillo**

**DIRECTORA**

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

---

**NOMBRE\_REVISOR1**  
**REVISOR1 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

---

**NOMBRE\_REVISOR2**  
**REVISOR2 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**



## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

STEFANY KAWON OBANDO DE LIRA

CARLA PAOLA MANCIATI JARAMILLO

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a todos mis compañeras y compañeros, que han dado una oportunidad a esta carrera. A pesar de todas las desmotivaciones, desilusiones y lo difícil que parece seguir adelante, muchos de nosotros seguimos hasta el final, buscando las mejores experiencias y aprendizajes. Para todos aquellos futuros ingenieros ambientales que llevarán a su vida profesional más allá de lo esperado, logrando comunidades sostenibles, armoniosas y de paz.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco primeramente a Los Padres Celestiales y Padres Verdaderos, quienes han estado conmigo desde siempre. A mi familia por su apoyo y la educación que me han brindado tanto académica como en el hogar, gracias a ellos soy quien soy. A mis compañeros de vida que han sido un gran soporte no solo dentro del aula, pero también en mi diario vivir. A tutora Carla por ser una gran guía y aportar con todos sus conocimientos a este proyecto. A todas las instituciones que brindaron información valiosa al proyecto de manera libre y gratuita y aportaron al conocimiento académico.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	III
DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico .....	3
1.4.1 Ciclo y balance Hidrológico.....	3
1.4.2 Recarga de un acuífero.....	3
1.4.3 Modelo InVEST.....	4
1.4.4 Seasonal Water Yield (Modelo estacional).....	4
1.4.5 Evapotranspiración .....	5
1.4.6 Obtención de evapotranspiración con imágenes MODIS .....	5
1.4.7 Estudios previos en el uso del modelo Water Yield de InVEST .....	6
2 METODOLOGÍA.....	7
2.1 Zona de estudio .....	7
2.2 Modelo Seasonal Water Yield .....	9
2.2.1 Flujo Rápido.....	9
2.2.2 Recarga Local.....	11
2.2.3 Flujo Base .....	13
2.2.4 Procedimiento simplificado del modelo .....	14
2.2.5 Limitaciones .....	15
2.3 Recopilación y tratamiento de datos .....	15
2.3.1 Precipitación .....	16
2.3.2 Evapotranspiración .....	19
2.3.3 Atributos del suelo .....	20

2.4	Procedimiento .....	21
2.4.1	Generación de capa raster de precipitación mensual.....	21
2.4.2	Generación de capa raster de evapotranspiración mensual.....	21
2.4.3	Generación de capa raster de uso y cobertura del suelo .....	22
2.4.4	Generación de capa raster de grupos hidrológicos del suelo .....	22
2.4.5	Generación de cuadro biofísico con valores de CN y Kc .....	23
2.4.6	Generación de cuadro de evento de lluvias por cada mes .....	24
2.4.7	Determinación de la acumulación de caudal umbral (TFA) .....	25
2.4.8	Determinación de los parámetros ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) .....	25
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	26
3.1	Resultados y discusión .....	26
3.1.1	Áreas de recarga .....	27
3.1.2	Análisis de sensibilidad .....	29
3.1.2	Limitaciones .....	30
3.2	Conclusiones .....	31
3.3	Recomendaciones .....	31
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
5	ANEXOS .....	35
	ANEXO I .....	35
	ANEXO II .....	37
	ANEXO III .....	40



## RESUMEN

El acuífero de Tumbaco pertenece a un sistema complejo y poco estudiado. La estimación de la recarga, que es un flujo importante en el sistema subterráneo, brinda información esencial para el manejo adecuado del recurso en la zona. Aplicando el método conceptual del balance hídrico, se eligió al modelo Seasonal Water Yield de InVEST para el modelamiento de la estimación. Además, se utilizó imágenes satelitales MODIS para la estimación de la evapotranspiración. Se obtuvo como resultado un rango de recarga de 0 a 351,96 mm/año. La interpretación espacial mostro 3 áreas con valores máximos de recarga: norte del acuífero, sur oeste del acuífero y en las faldas del volcán Ilaló. La estimación de la evapotranspiración resultó en valores en un rango de 44,46 a 3275,2 mm/año. El análisis de sensibilidad identifico al coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) como el parámetro más decisivo en el modelamiento. Al comparar los resultados con estudios previos en la zona se concluye que los resultados obtenidos en el presente proyecto deben ser sometidos a validación in situ en la zona de estudio.

**PALABRAS CLAVE:** Recarga, Acuífero, InVEST, MODIS.

## **ABSTRACT**

Tumbaco aquifer belongs to a complex and poorly studied system. The recharge estimation, which is an important parameter of the groundwater system, provides essential information for the proper management of water resources in the area. For the modeling of the water balance, the InVEST Seasonal Water Yield model was chosen. In addition, MODIS satellite images were obtained to estimate evapotranspiration. As a result, a recharge range of 0 to 351.96 mm/year was obtained. The spatial interpretation showed 3 areas with maximum recharge values: the northern part of the aquifer, the south west área of the aquifer and in the piedmont of the Ilaló volcano. The estimation of evapotranspiration resulted in values within a range of 44.46 to 3275.2 mm/year. The sensitivity analysis identifies the crop coefficient ( $K_c$ ) as the most decisive parameter in the modeling. When comparing the results with previous studies in the area, we concluded that the results obtained in this project have to be evaluated and compared with in situ data for validation.

**KEYWORDS:** Recharge, Aquifer, InVEST, MODIS.

# 1 INTRODUCCIÓN

En el planeta, se puede encontrar mayor cantidad de aguas subterráneas en comparación con las aguas superficiales. Aproximadamente representa más del 60% de agua dulce y en muchos lugares es el único medio accesible para obtener este recurso [1]. Además de todos los usos que proporciona (consumo humano, riego, recreación, etc.) permite entender a los ecosistemas subterráneos ya que incide en varios procesos geológicos y en las cuencas hidrográficas [1]. Analizar los diferentes procesos que conlleva y, en este caso, la recarga es fundamental para la gestión adecuada de los recursos de aguas subterráneas.

Existen muchos métodos de estimación de recarga, estos deben tomar en cuenta los desafíos presentes ante la falta de información, variaciones climáticas, cambios de suelo, influencia geomorfológica, etc. [2]. No existe un estándar con el cual comparar las tasas de recarga, debido a todas las incertidumbres presentes en la estimación [3]. Sin embargo, la aplicación apropiada del modelo conceptual es de mucha importancia ya que aportará con resultados confiables y brindarán una base de información útil para estudios futuros.

Al ser el agua subterránea parte esencial del ciclo hidrológico, se selecciona la aplicación de un balance hídrico como modelo conceptual. Pues este método es universal y adaptable porque al basarse en la conservación de la masa permite que sea aplicable en cualquier escala de tiempo y espacio [3]. La ecuación de balance hídrico es versátil y permite la adaptación de diferentes modelos hidrológicos. Ante la necesidad de utilizar herramientas espacialmente explícitas que puedan proporcionar información en áreas con escasos datos y que muchas veces son inconsistentes, como es el caso del acuífero de Tumbaco, surge la aplicación del modelo InVEST para la estimación de la recarga y el uso de información satelital MODIS para la estimación de evapotranspiración.

La estimación de la recarga, así como el aporte a la gestión de aguas subterráneas es importante ya que a pesar de que en el 2006 se cerraron pozos que suministraban agua para consumo humano en la parroquia de Tumbaco, debido a la contaminación de arsénico y la incapacidad de su tratamiento [4], este sigue siendo una fuente importante de agua. El fuerte y desigual aumento de la población, la mala gestión de suelos cultivados y el desarrollo del sector industrial sin un fuerte control han llevado a una degradación de la calidad del agua de los ríos [5]. Es importante considerar todas las reservas de agua con posibilidad de explotación.

En el acuífero Tumbaco-Cumbayá-Los Chillos se han realizado pocos estudios, representando una limitación en el conocimiento de las conexiones hidráulicas, capacidad

de almacenamiento y calidad del agua subterránea [6]. Es un sistema complejo por lo que el presente proyecto se enfoca en aportar al entendimiento de la recarga del acuífero, utilizando métodos y modelos apropiados a la información disponible.

Los resultados del proyecto permitirán la interpretación espacial de la recarga en el acuífero de Tumbaco. Aportará al entendimiento del sistema subterráneo de la zona. Además, se espera que el proyecto de investigación brinde información para el manejo adecuado del recurso hídrico en la cuenca, así como conocimiento científico para proyectos futuros.

## **1.1 Objetivo general**

Estimar la recarga del acuífero de Tumbaco mediante un balance hídrico con la estimación de la evapotranspiración usando imágenes satelitales de MODIS y empleando el modelo InVEST, para genera información relevante que podría ser usada para el adecuado manejo de las aguas subterráneas.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Determinar el balance hídrico en el acuífero de Tumbaco con los criterios del modelo InVEST, para conocer la dinámica del agua en la cuenca
- Estimar la evapotranspiración usando imágenes satelitales de MODIS, para considerar la mayor cantidad de parámetros que intervienen en el balance hídrico.
- Estimar la recarga del acuífero en base al balance hídrico, para obtener información que ayude a mejorar la gestión de las aguas subterráneas.

## **1.3 Alcance**

Se calculará por medio de un balance hídrico, bajo los criterios del modelo Seasonal Water Yield de InVEST, la recarga del acuífero de Tumbaco. Para la aplicación del balance hídrico, se estimará la evapotranspiración por medio de imágenes MODIS. La precipitación, uso y cobertura vegetal, grupos hidrológicos del suelo, serán estimados de información disponible y estudios realizados anteriormente. Los resultados serán discutidos y comparados con diferentes vertientes inventariadas en el acuífero en estudios previos.

## 1.4 Marco teórico

### 1.4.1 Ciclo y Balance Hidrológico

Se denomina ciclo hidrológico al movimiento de agua desde el océano hacia la atmósfera y de regreso a la tierra de manera continua y perdurable [1]. El ciclo hidrológico es un proceso complejo en donde el flujo del agua siempre esta interconectado. Conocer y entender los procesos del ciclo hidrológico es de gran importancia ya que el agua es un recurso vital en la Tierra.

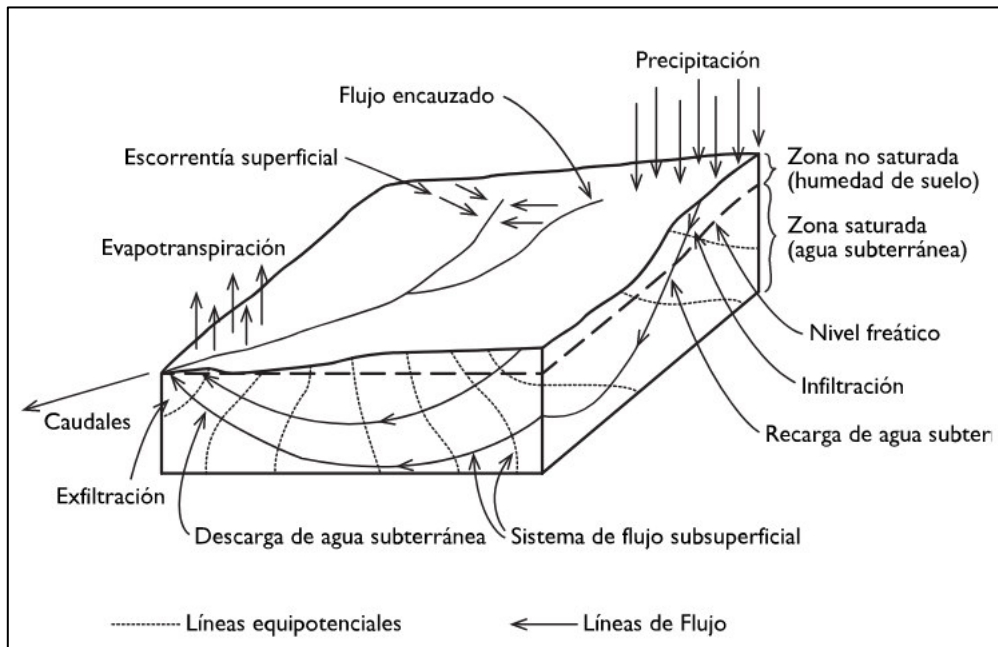


Figura 1: Representación esquemática del ciclo hidrológico.

El balance hidrológico es un método de contabilidad de agua. Las entradas, salidas y almacenamiento son las variables principales. Se basa en la conservación de la masa lo que le otorga propiedades universales y adaptables. Una gran ventaja es la versatilidad que presenta en la ecuación de conservación de masa porque se puede adaptar a la información disponible del sistema hidrológico [3] Como se aprecia en la Figura 1 el ciclo hidrológico se compone de diversos flujos y cada uno de ellos es importante, la recarga que es el objeto de estudio no es la excepción.

### 1.4.2 Recarga de un acuífero

La recarga puede ser definida como la cantidad de agua que se introduce a través de la superficie del suelo. Esta llega al nivel freático incorporándose a un almacenamiento

subterráneo (zona saturada) [1]. La recarga es expresada en términos de volumen por unidad de tiempo ( $L^3t^{-1}$ ) [3]

Es importante diferenciar a la recarga con el concepto de infiltración. Mientras que la infiltración se da a nivel de la subsuperficie, la recarga alcanza niveles profundos del suelo. La infiltración puede retornar a la atmósfera por la evapotranspiración, pero la recarga se almacena y solo puede ser descargada por un flujo base [3].

La estimación de la recarga es compleja porque es necesario el reconocimiento de la distribución espacial y temporal de los diferentes flujos de agua que intervienen en el proceso. La recarga puede ocurrir por medio de mecanismos difusos (locales o directos) que se dan por la percolación de la precipitación y mecanismos enfocados (indirectos) que son causados por el movimiento de agua superficial [3]. En general, la recarga depende de los siguientes factores: características del suelo, componentes climatológicas, precipitación y su régimen de intensidad, tipo de roca, topografía del terreno y cobertura vegetal [7].

### **1.4.3 Modelo InVEST**

El Modelo Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, llamado InVEST por sus siglas en inglés, desarrollado en el 2007 por la Universidad de Stanford, el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) y The Nature Conservancy (TNC). Es un conjunto de modelos que se utilizan para mapear y valorar los bienes y servicios de la naturaleza que sustentan y satisfacen la vida humana [8].

InVEST cuenta con una estructura libre de acceso y amigable con el usuario. No exige un nivel de experticia avanzado como el caso de Soil and Water Assessment Tool (SWAT) o Stanford Watershed Model (SWM) [9]. El conjunto de herramientas InVEST incluye modelos para cuantificar, mapear y valorar los beneficios que brindan los sistemas terrestres, de agua dulce y marinos. El modelo Water Yield, seleccionado para el proyecto, es espacialmente explícito. Se basa en el principio de balance hídrico que es el método conceptual de estudio y el requisito de datos es considerablemente asequible, lo cual conviene a la información disponible [8].

### **1.4.4 Seasonal Water Yield (Modelo estacional)**

El modelo Water Yield que corresponde a la categoría de servicios finales, consta de dos tipos: el Annual (anual) y Seasonal (estacional). Si bien el modelo de rendimiento anual proporciona una estimación del rendimiento total de agua para una cuenca, muchas aplicaciones requieren conocimiento de los flujos estacionales, siendo una de las mayores ventajas del modelo estacional [8].

El marco conceptual de Seasonal Water Yield se basa en un modelo de balance hídrico, que presenta dos características clave: sensibilidad a la vegetación y representación explícita de enrutamiento [10]. Calcula índices espaciales que cuantifican la contribución relativa de una parcela de tierra a la generación de flujo base, flujo rápido y recarga local [8].

La recarga local conceptualmente es el posible flujo base. Este índice toma en cuenta en el balance hídrico valores positivos y negativos que dependen de la capacidad del volumen de agua para satisfacer los requerimientos de la vegetación en el píxel. El flujo base es una función de la contribución de la recarga local en la parcela (píxel) y solo toma valores positivos. Es decir que el flujo base es el posible volumen de agua que se almacena y descarga a cuerpos de agua en la estación seca [8].

#### **1.4.5 Evapotranspiración**

La evapotranspiración puede ser definida como la combinación de evaporación y transpiración. Estos procesos permiten que el agua se pierda a través de la superficie del suelo. Se expresa normalmente en altura de agua por unidad de tiempo (mm / (día, mes, año)). Otras unidades empleadas son volumen por unidad de área (m<sup>3</sup>/ha día o l/s ha) y energía por unidad de área (MJ/m día) [11].

Los principales factores que afectan a la evapotranspiración son: el clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo, porque son factores que afectan la evaporación y la transpiración [11].

#### **1.4.6 Obtención de evapotranspiración con imágenes MODIS**

El producto de evapotranspiración global MOD16 es parte del proyecto NASA/EOS. Estas imágenes satelitales son producto de la combinación de sensores de control remoto y datos meteorológicos globales adaptados al algoritmo de Cleugh, basado en el método de Penman-Monteith. Este algoritmo permite el cálculo de la conductancia del dosel y la evapotranspiración [12].

El algoritmo MOD16 de evapotranspiración se ejecuta diaria y mensualmente. Hay dos conjuntos principales de datos MOD16 y MOD16A2 compuestos de 8 días y el compuesto anual MOD16A3. Tanto MOD16A2 como MOD16A3 se almacenan en formato de archivo de datos científicos HDFEOS2 [12].

#### **1.4.7 Estudios previos en el uso del modelo Water Yield de InVEST**

El modelo estacional Seasonal Water Yield ha sido usado ampliamente en el mundo y ha tenido buenos resultados. La mayoría de las aplicaciones son en la evaluación de rendimiento hídrico y la toma de decisiones en el manejo adecuado de recursos de agua. Un ejemplo claro es la evaluación espacial en la cuenca Sokoro-Rima en Nigeria [13] cuyos resultados son esenciales para el manejo adecuado de los pastizales y sabanas que rodean la cuenca, así como la correcta planificación del uso del agua [13]. Otro caso es la evaluación de la contribución de la Reserva de la Biósfera de la Sierra del Rincón al abastecimiento de agua de la Comunidad de Madrid [14]. Se determinó que esta reserva aporta con el 4.6% del agua que se consume en el territorio. En este trabajo se enfatiza la gestión sostenible de la reserva [14]. Un estudio realizado en dos grandes cuencas en Perú y Myanmar [10] compara los resultados del modelo con datos observados y modelos hidrológicos alternativos. En la cuenca de Cañete en Perú presentó una alta correlación a escala de parcela (píxel) [10]. En la cuenca de Chindwin en Myanmar tuvo un desempeño satisfactorio para representar la variación mes a mes [10]. El estudio concluye que el modelo es útil para evaluaciones de flujo base a nivel de cuenca y para balances hídricos. A pesar de las limitaciones en la validación del modelo, se prevé investigaciones prometedoras para el modelo Seasonal Water Yield [10].

Al ser el modelo relativamente nuevo en el país no se han encontrado estudios aplicando el modelo estacional en específico, pero se ha usado la versión antigua o más conocido como Anual Water Yield. Este modelo se utilizó en el análisis de cambio del rendimiento hídrico en la región sur del Ecuador [9]. Se desarrolló en nueve cuencas hidrográficas, localizadas en las provincias de El Oro, Loja y Zamora Chinchipe. A pesar de las dificultades de la calibración por falta de datos se pudo obtener proyecciones aceptables de la zona [9]. Un caso similar se dio en la evaluación del servicio ecosistémico en la cuenca alta del río Guayllabamba donde se enfatiza la utilidad del modelo en la toma de decisiones para el manejo de recursos naturales [15]. Finalmente cabe mencionar el trabajo de la recarga potencial del acuífero de la sub-cuenca del río Chambo [16]. Este último de gran importancia para el presente proyecto ya que describe un objeto de estudio similar y además incluye comparaciones con otros métodos.



## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Zona de estudio

Tumbaco es una parroquia suburbana, ubicada en el valle interandino del Ecuador, en la provincia de Pichincha dentro del Distrito Metropolitano de Quito [5]. El sistema acuífero Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos se extiende sobre un área de 645 km<sup>2</sup>. La población de algunas parroquias como Tumbaco, Cumbayá, San Rafael, entre otras, han hecho uso de aguas subterráneas provenientes de este sistema [3].

La zona de estudio del proyecto se centra en el acuífero de Tumbaco, mismo que tienen una superficie de 92 km<sup>2</sup>. Esta limitada de la siguiente manera, al sur se encuentra el volcán Ilaó (Figura 2), al norte, sus límites hidráulicos son los ríos Chiche y San Pedro [3].

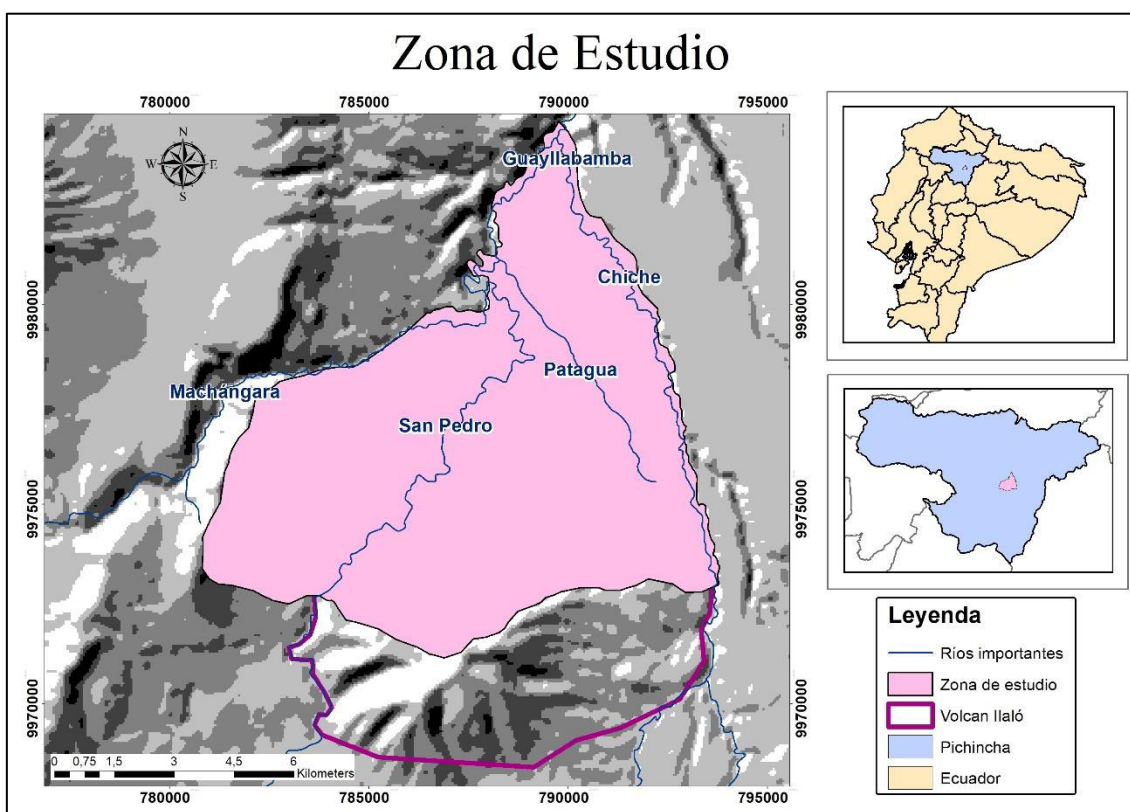


Figura 2: Zona de estudio

El relieve se caracteriza por ser montañoso y escarpado, correspondiente a la región de los Andes [5]. La geología se caracteriza por la presencia de 4 capas principales. La formación volcánica Ilaó (Pleistoceno bajo), presenta aguas hidrotermales explotadas para consumo y recreación. La formación Guayllabamba (bajo-medio pleistoceno), es considerada como un acuífero, pero no existen vertientes explotadas en la zona de estudio. La formación Chiche (medio – alto pleistoceno), su agua fue explotada para consumo

humano hasta el 2006. La formación cangahua (alto pleistoceno al holoceno), es una capa superficial por encima de la formación Chiche

Esta zona tiene un clima ecuatorial mesotérmico semihúmedo. Este tipo de clima se encuentra en la franja altitudinal entre 2.200 y 3.050 msnm. Entre las características de este piso climático que destacan se puede mencionar que la temperatura media anual varía entre 12°C y 18°C. Además, cuenta con una precipitación media anual entre 500 y 1.000 mm. Las precipitaciones presentan un patrón de tipo equinoccial caracterizado por una estación seca entre julio y septiembre [2].

En la Figura 3 se muestra el uso y cobertura del suelo. Está principalmente ocupado por actividades antrópicas en un 49%. Bosque nativo (plantaciones con propósito de conservación y protección) con un 20%. Las actividades agropecuarias ocupan un 16%, plantaciones forestales con propósitos de conservación, protección o producción un 13%. Finalmente, las tierras agrícolas y agua emplean 1% del área, cada cobertura.

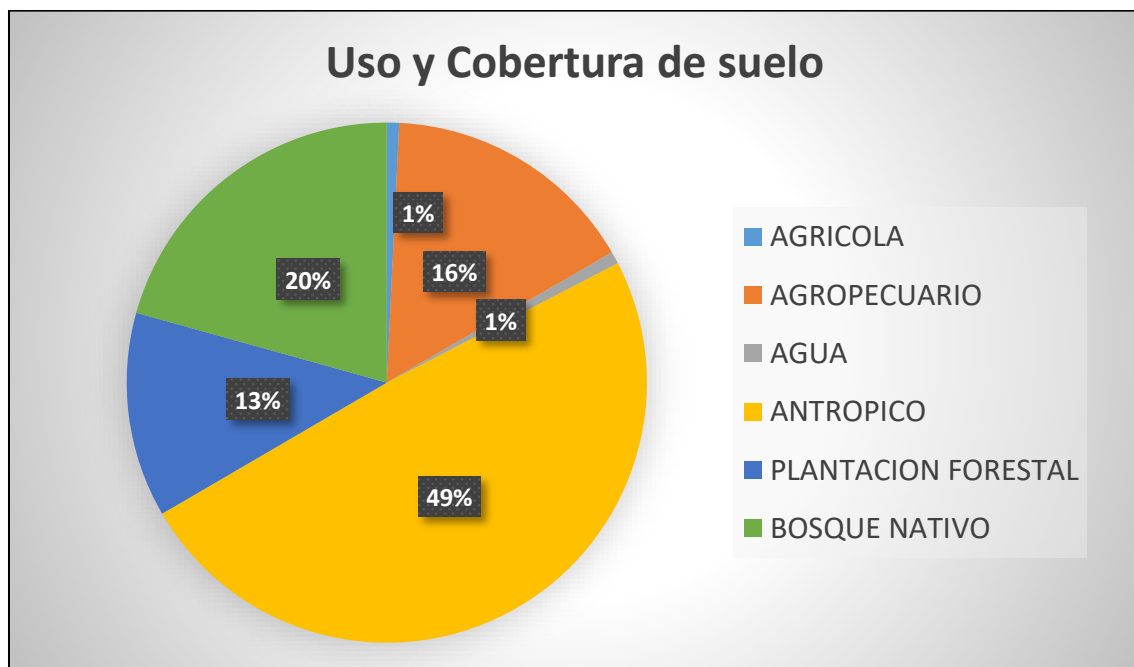


Figura 3: Uso y Cobertura de suelo

Las actividades agropecuarias se realizan en parcelas medianas y grandes. La presencia de áreas dedicadas a la agricultura se desarrolla en áreas mucho más pequeñas, que difícilmente son cartografiables por eso su bajo porcentaje. El crecimiento del área urbana está desplazando las actividades agrícolas, las cuales han disminuido considerablemente [2].

En cuanto a las propiedades químicas, el sistema acuífero Tumbaco – Cumbayá – Los Chillos presenta altas concentraciones de arsénico (contenido medio entre 50 y 60  $\mu\text{g/l}$ ). El agua subterránea del sistema acuífero ya no es explotada desde 2006 [4]. La contaminación presente puede explicarse debido a que los acuíferos muestran señales geoquímicas en relación con la composición de las rocas y los procesos generados a altas temperaturas. Algunos oligoelementos pueden disolverse más fácilmente en el agua y presentan un riesgo para la salud pública [3].

Las actividades antrópicas aumentan conforma la población crece. Este crecimiento implica contaminación a los cuerpos de agua superficiales, haciendo de estos cada vez menos adecuados para el consumo humano. Es necesario gestionar y considerar cuerpos de agua subterránea.

## **2.2 Modelo Seasonal Water Yield**

El modelo se basa en que la contribución de agua en un terreno determinado depende de una serie de factores ambientales: el suelo, la vegetación, el clima, la pendiente y la posición del terreno a lo largo de la trayectoria del flujo. De la misma forma la extracción de agua depende de la evaporación del suelo, transpiración por vegetación, extracción directa en pozos o descarga como flujo de agua subterránea profunda o corriente [8]. Se considera al terreno como un conjunto de parcelas (píxeles). Al considerar el balance hídrico en una parcela individual se tiene dos enfoques:

1. La cantidad neta de agua en la parcela es igual a las entradas menos las salidas de manera estática. No considera si el agua en la parcela puede contribuir a un flujo.
2. El agua es un flujo de corriente. Así el agua en una parcela puede evaporarse, acumularse o descargarse.

El modelo usa estos dos conceptos para desarrollar un conjunto de tres índices: flujo rápido (QF), la recarga local (L) y el flujo base real (B) [4].

### **2.2.1 Flujo rápido**

Se calcula con un enfoque basado en el número de curva (CN). Los eventos de lluvia mensuales describen a la precipitación en el terreno. Las propiedades del suelo y la cobertura terrestre determinan la cantidad de precipitación que se escurre rápidamente de la superficie (produciendo un flujo rápido) en comparación con la infiltración en el suelo [4].

Tabla 1: Cálculo de flujo rápido

<p>Para calcular el flujo rápido, se usa el volumen medio de precipitación por evento <math>\left(\frac{P_{i,m}}{n_{i,m}}\right)</math>, y se supone una distribución exponencial <math>(f(p))</math> de volúmenes de precipitación diaria en días con lluvia.</p>			
1	$f(p) = \frac{1}{a_{i,m}} \exp\left(-\frac{p}{a_{i,m}}\right)$ <p>Ecuación 1.</p> $a_{i,m} = \frac{P_{i,m}}{n_{i,m}} / 25.4$ <p>Ecuación 2.</p>	$f(p)$	Función de distribución exponencial de volúmenes de precipitación diaria (p).
		$a_{i,m}$	Profundidad media de precipitación en un día lluvioso en la parcela i en el mes m (in).
		$\frac{P_{i,m}}{n_{i,m}}$	Profundidad media de precipitación por evento (mm).
		$P_{i,m}$	Precipitación mensual para en la parcela i en el mes m (mm).
		$n_{i,m}$	Número de eventos de precipitación en la parcela i en el mes m.
<p>El flujo rápido para píxeles ubicados en cuerpos de agua (<math>QF_{stream,m}</math>) es igual a la precipitación (<math>P_{stream,m}</math>) en ese píxel, lo que supone que no hay infiltración, solo escorrentía.</p>			
2	$QF_{stream,m} = P_{stream,m}$ <p>Ecuación 3.</p>		
<p>Si no es un cuerpo de agua, se puede demostrar a partir de la distribución exponencial que la escorrentía mensual es:</p>			
3	$QF_{i,m} = n_{i,m} * \left( (a_{i,m} - S_i) \exp\left(-\frac{0.2S_i}{a_{i,m}}\right) + \frac{S_i^2}{a_{i,m}} \exp\left(\frac{0.8S_i}{a_{i,m}}\right) E_1\left(\frac{S_i}{a_{i,m}}\right) * (25.4) \right)$ <p>Ecuación 4.</p> $S_i = \frac{1000}{CN_i} - 10$ <p>Ecuación 5.</p> $E_1(x) = \int_1^\infty \frac{e^{-xt}}{t} dt$ <p>Ecuación 6.</p>	$QF_{i,m}$	Flujo rápido mensual de la parcela i en el mes m (mm).
		$S_i$	Retención máxima potencial de humedad del suelo después de la escorrentía (in).
		$E_1$	Función integral exponencial
		$CN_i$	Número de curva por parcela i.
<p>El flujo rápido anual (<math>QF_i</math>), se puede calcular a partir de la suma de valores mensuales.</p>			
$QF_i = \sum_{m=1}^{12} QF_{i,m}$ <p>Ecuación 7.</p>			

### 2.2.2 Recarga local

La recarga local(L) es el agua que se mueve desde la superficie hacia el interior del suelo, para recargar el agua subterránea, que a su vez puede contribuir al flujo base [5].

La precipitación que no se escurre como flujo rápido (QF) y que se evapora desde el suelo o transpira por la vegetación en una parcela (AET), puede infiltrarse en el suelo para convertirse en una recarga local como se explica en la Figura 4. El flujo base acumulativo (Bsum), es el cual llega a un cuerpo de agua exterior como flujo base. El índice de recarga local se calcula en una escala de tiempo anual, pero utiliza valores derivados de los balances de agua mensuales [8].

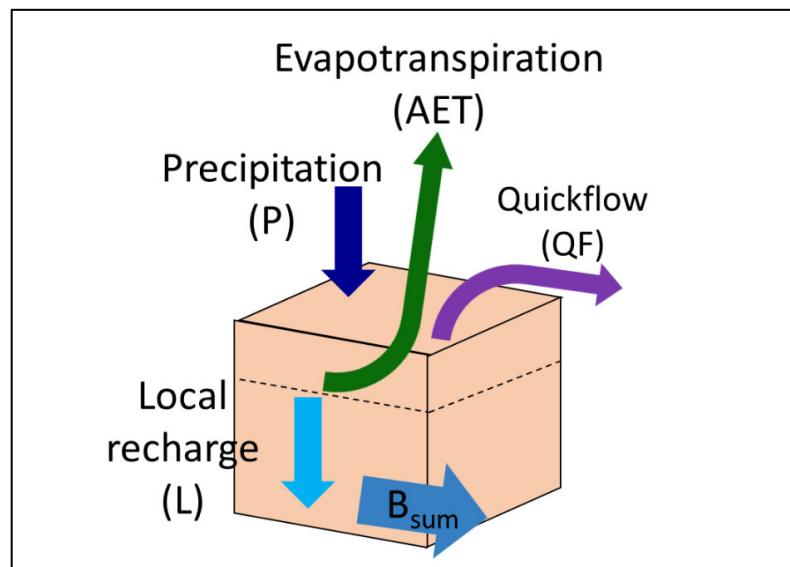


Figura 4: Balance de agua a nivel de píxel según el modelo Seasonal Water Yield [8].

Tabla 2: Cálculo de recarga local

Para una parcela i, la recarga local derivada del balance anual de agua es:			
1	$L_i = P_i - QF_i - AET_i$ Ecuación 8.	$L_i$	Recarga local anual de la parcela i (mm).
		$P_i$	Precipitación anual de la parcela i (mm).
		$QF_i$	Flujo rápido anual de la parcela i (mm).
		$AET_i$	Evapotranspiración real de la parcela i (mm).
Donde la evapotranspiración real anual AET es la suma de la AET mensual:			
2	$AET_i = \sum_{months} AET_{i,m}$ Ecuación 9.		
Para cada mes, la AET está limitada por la demanda (evapotranspiración potencial - PET) o por el agua disponible.			

3	$AET_{i,m} = \min(PET_{i,m}; P_{i,m} - QF_{i,m} + \alpha_m \beta_i L_{sum.avail, i})$ <p style="text-align: center;">Ecuación 10.</p> $PET_{i,m} = K_{c,m,i} \times ET_{0,i,m}$ <p style="text-align: center;">Ecuación 11.</p> $L_{sum.avail,i} = \sum_j P_{ij} * (L_{avail,j} + L_{sum.avail,j})$ <p style="text-align: center;">Ecuación 12.</p> $L_{avail,i} = \max(\gamma L_i, 0)$ <p style="text-align: center;">Ecuación 13.</p>	$AET_{i,m}$	Evapotranspiración real de la parcela i en el mes m (mm).
		$PET_{i,m}$	Evapotranspiración potencial de la parcela i en el mes m (mm).
		$\alpha_m$	Fracción de recarga aguas arriba anual disponible en el mes m.
		$\beta_i$	Fracción del volumen aguas arriba disponible para evapotranspiración aguas abajo en la parcela i.
		$L_{sum.avail, (i,j)}$	Contribución aguas arriba en la parcela i o j (mm).
		$ET_{0,i,m}$	Evapotranspiración de referencia de la parcela i en el mes m (mm).
		$K_{c,m,i}$	Coeficiente de cultivo en la parcela i en el mes m.
		$\sum_j P_{ij}$	Proporción de flujo de la celda i a j.
		$L_{avail,(i,j)}$	Recarga disponible en la parcela i o j (mm).
		$\gamma$	Fracción de parcela disponible para recarga aguas abajo

Al tener pendientes se calcula la evapotranspiración real (en función de las variables climáticas de cada parcela y la contribución aguas arriba)

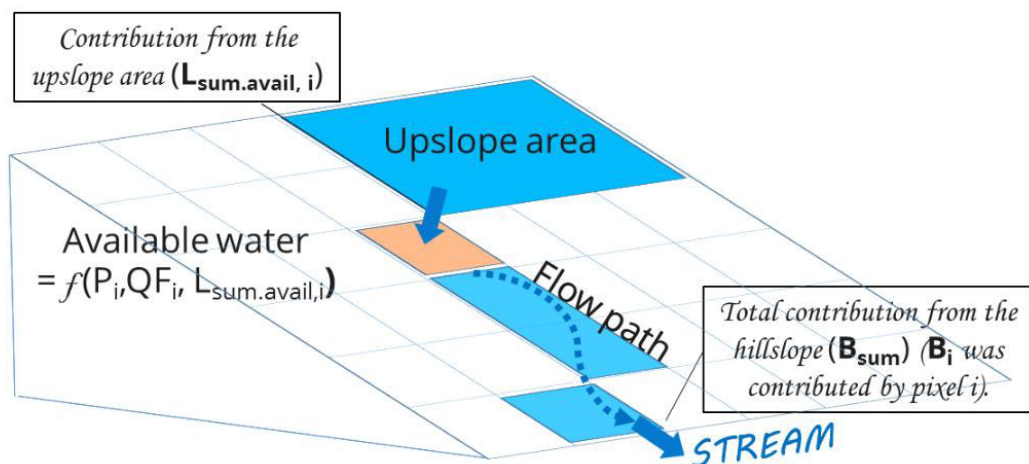


Figura 5: Esquema con pendiente para calcular la evapotranspiración real [8].

### 2.2.3 Flujo base

El flujo base es la cantidad de agua que logra salir del almacenamiento de agua subterránea en la estación seca [18].

Tabla 3: Cálculo de flujo base

<p><math>j =</math> parcela donde se descarga la parcela <math>i</math>.          Cuando <math>j</math> no es una parcela que corresponde a un cuerpo de agua (ecuación 14). Es proporcional al flujo base acumulativo que deja los píxeles aguas abajo menos el flujo base acumulativo que se generó aguas arriba.          Cuando <math>j</math> es una parcela correspondiente a un cuerpo de agua (ecuación 15)</p>			
1	$B_{sum,i} = L_{sum,i} \sum_j P_{ij} \left( 1 - \frac{L_{avail,j}}{L_{sum,j}} \right) \frac{B_{sum,j}}{L_{sum,j} - L_j}$ <p>Ecuación 14.</p>	$B_{sum,(i,j)}$	Flujo base acumulativo en la parcela $i$ o $j$ (mm).
	$B_{sum,i} = L_{sum,i} \sum_j P_{ij}$ <p>Ecuación 15.</p> $L_{sum,i} = L_i + \sum_{j,i} L_{sum,j} \cdot P_{ij}$ <p>Ecuación 16.</p>	$L_{sum,(i,j)}$	Recarga acumulada en la parcela $i$ o $j$ (mm).
<p>En la salida de la cuenca (o en cualquier parcela adyacente a un cuerpo de agua), la suma de la generación de flujo base sobre todas las parcelas aguas arriba (<math>B_{sum,outlet}</math>) es igual a la suma de la generación local sobre las mismas parcelas (<math>L_{sum,outlet}</math>).</p>			
2	$B_{sum,outlet} = L_{sum,outlet}$ <p>Ecuación 17.</p>		
<p>El caudal base, puede derivarse directamente de la proporción del caudal base acumulativo que sale de la celda <math>i</math>, con respecto a la recarga disponible a la recarga acumulativa aguas arriba:</p>			
3	$B_i = \max \left( B_{sum,i} \cdot \frac{L_i}{L_{sum,i}}, 0 \right)$ <p>Ecuación 18.</p>	$B_i$	Flujo base en la parcela $i$ (mm).

## 2.2.4 Procedimiento simplificado del modelo

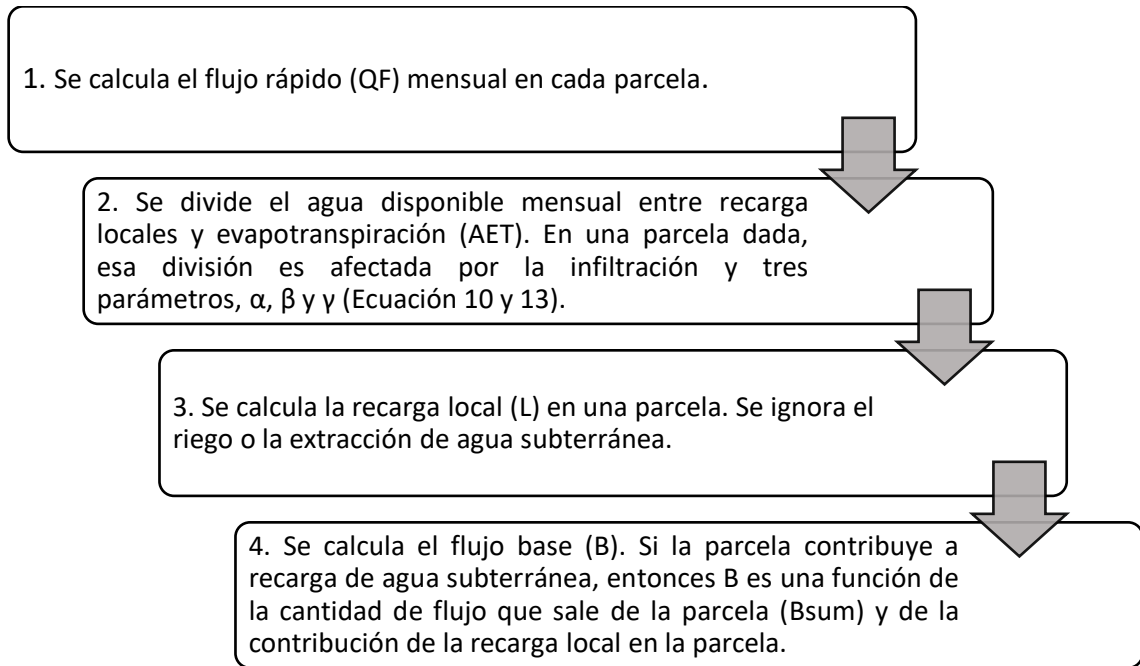


Figura 6: Procedimiento simplificado del modelo [10]

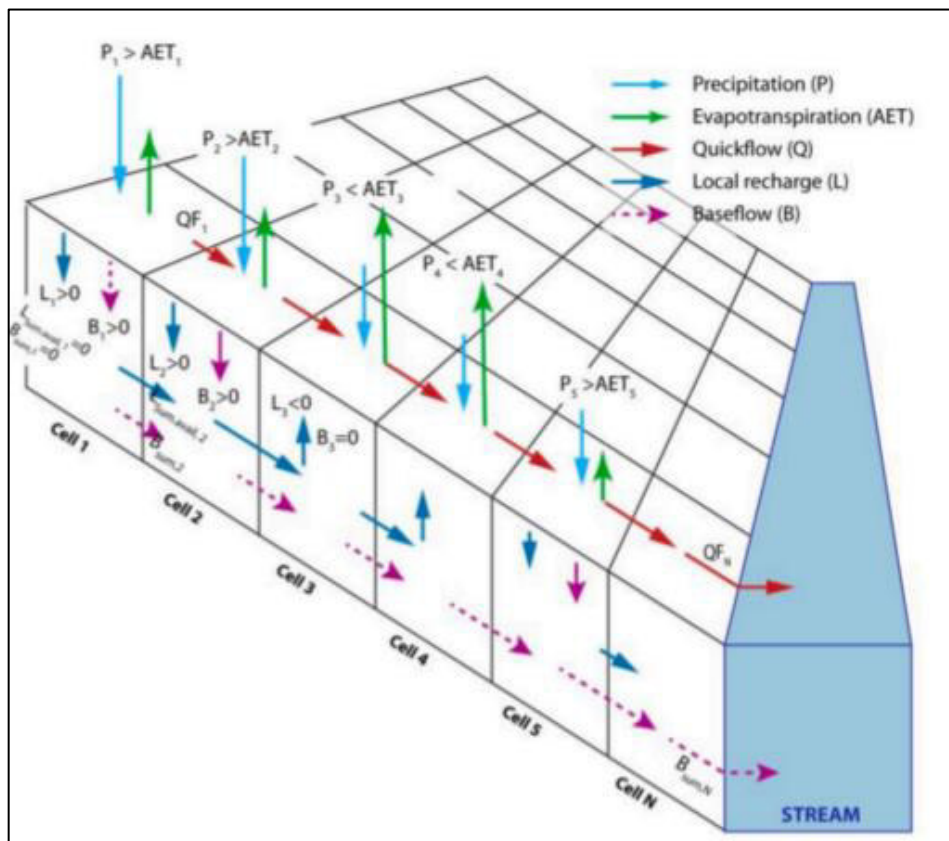


Figura 7: Esquema utilizado en el modelo Seasonal Water Yield de InVEST. Balance de agua simplificado calculado para cada parcela [10].



### 2.2.5 Limitaciones

El modelo Seasonal Water Yield, posee un enfoque simplificado para estimar sus índices (QF, L, B), y no incluye muchas de las complejidades que ocurren cuando el agua se mueve en un terreno determinada [8].

- La topografía es un factor importante, pero no tiene una sensibilidad significativa en el cálculo del flujo rápido, que solo se basa en el CN [8].
- Las ecuaciones para el cálculo del flujo base, a pesar de tener un enfoque físico, presenta simplificaciones a escala temporal y espacial. Esto aumenta la incertidumbre en los resultados [4].
- El mapa de recarga local da como resultado valores relativos que no deben ser tomados como absolutos [4].

## 2.3 Recopilación y tratamiento de datos

Los parámetros necesarios para desarrollar un balance hídrico, considerando los criterios del modelo InVEST, son mostrados en la tabla 4.

Tabla 4: Requerimientos del modelo Seasonal Water Yield

Inputs	Fuente
Capa ráster de precipitación mensual	INAMHI - REMMAQ
Capa ráster de referencia mensual evapotranspiración	Información satelital MODIS 16 A2
Modelo de elevación digital	MAG
Capa ráster de uso del suelo/cobertura del suelo	MAG
Capa ráster de grupos hidrológicos del suelo	(ORNL) (DAAC).
Capa vectorial del límite del acuífero	EPMAPS
Cuadro biofísico con número CN y valor de Kc mensual	USDA y FAO
Eventos de lluvia en cada mes	INAMHI - REMMAQ
Acumulación de caudal umbral (TFA)	Calculado
Parámetros ( $\alpha, \beta, \gamma$ )	Calculado

La capa vectorial del acuífero fue proporcionada por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS). Las fuentes de los demás parámetros serán detalladas a continuación.

### 2.3.1 Precipitación

Los datos de precipitación fueron obtenidos de la base de datos proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ). Las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio presentaron inconvenientes como discontinuidad en los datos, así como la inactividad de algunas de ellas por periodos largos de tiempo como se observa en la Figura 8, limitando la base de datos e información. Como resultado se dividió a las estaciones en dos grupos (Figura 8 y Tabla 5).

Todas las estaciones presentan porcentajes altos de datos faltantes en los últimos 70 años, presentados en la Tabla 5. A pesar de esta discontinuidad, el modelo InVEST requiere de un mínimo de 10 años continuos en la información de precipitación. Por esta razón se ubicó a las estaciones más cercanas y se eligió el periodo más actual y continuo.

El grupo 1 conformado por 7 estaciones fue determinado por un periodo de 15 años (2004-2019), ya que en ese periodo se presenta continuidad en los datos, como se observa en el cuadro azul en la Figura 8. El grupo 2 conformado por 3 estaciones fue determinado también por un periodo de 15 años (1965-1980), de igual manera no presenta discontinuidad en el periodo como se presenta en el cuadro verde en la Figura 8. A pesar de no contar con datos actuales en el grupo 2, su ubicación, como se observa en la Figura 9, es de importancia para ampliar la base de datos del proyecto.

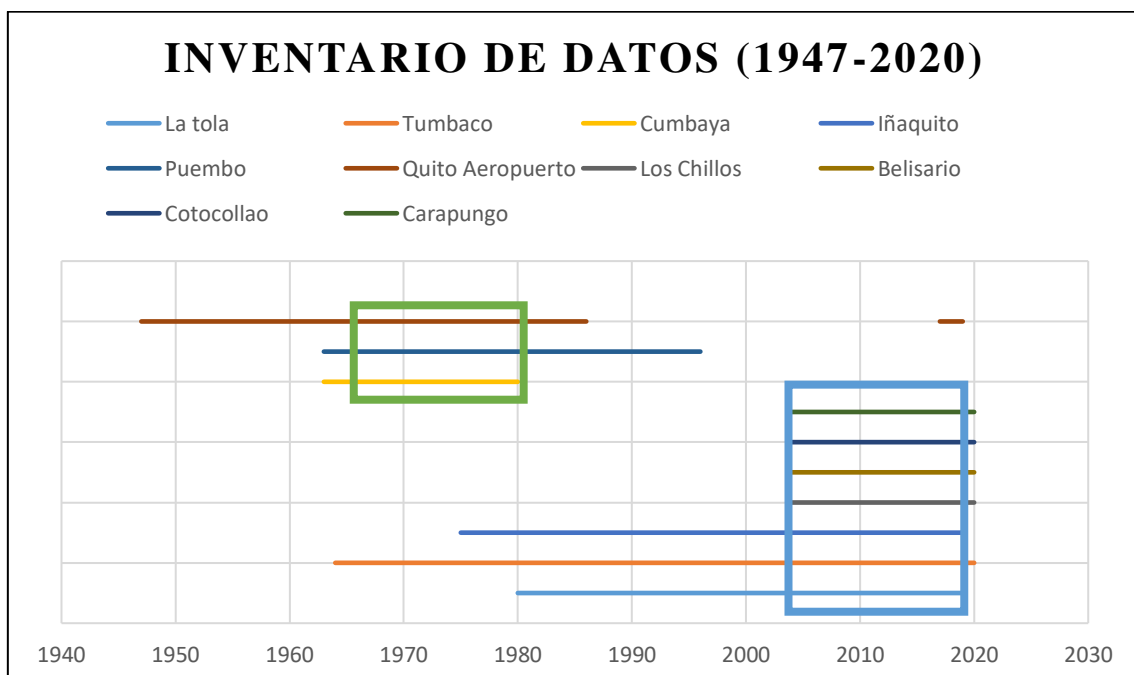


Figura 8: Inventario de datos.

Tabla 5: Estaciones meteorológicas.

Grupo	Estaciones	Nombre	Periodo	X	Y	Propietario	Porcentaje de datos faltantes (1950-2020)
Grupo 1	M0002	La Tola	2004 - 2019	792709,7	9974351,9	INAMHI	43
	M0024	Iñaquito	2004 - 2019	779722,9	9980273,4	INAMHI	36
	M5040	Tumbaco	2004 - 2019	789413,1	9977229,3	REMMAQ	19
	M5041	Los Chillos	2004 - 2019	783195,6	9966808	REMMAQ	76
	M5037	Belisario	2004 - 2019	779700,7	9980704,9	REMMAQ	76
	M5035	Cotocollao	2004 - 2019	779200,3	9988449,5	REMMAQ	76
	M5036	Carapungo	2004 - 2019	781060,5	9989799,2	REMMAQ	76
Grupo 2	M0055	Quito Aeropuerto-Parque	1965 -1980	779946,2	9984510,8	INAMHI	41
	M0347	Puambo	1965 -1980	794533,4	9980513,5	INAMHI	51
	M0572	Cumbayá	1965 -1980	786412	9978732,1	INAMHI	74

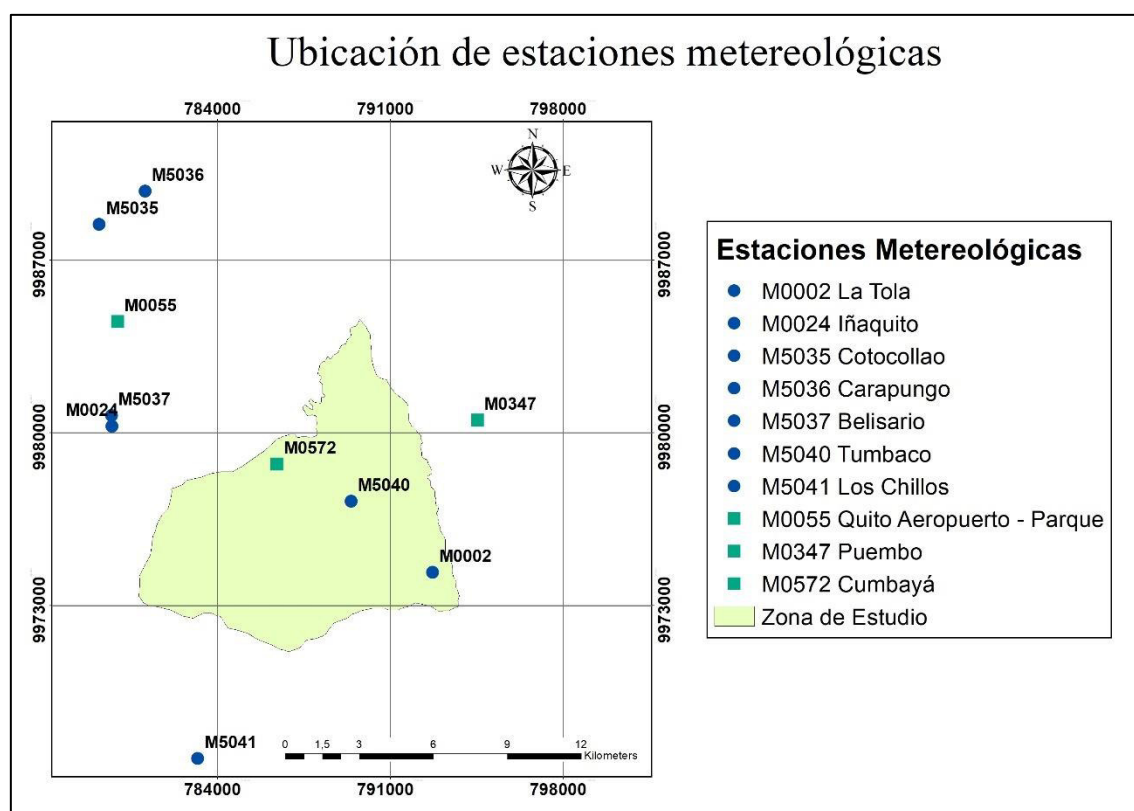


Figura 9: Ubicación de estaciones meteorológicas.

Previo a la utilización de los datos para su debido procesamiento y validación en el modelo, fue necesario realizar un análisis de homogeneidad y relleno de datos faltantes. Con la finalidad de obtener una base de datos homogénea, completa y de calidad. Para esto se usó el software RStudio mediante su paquete Climatol el cual contiene funciones para hacer estos análisis en cualquier variable [22].

Para la precipitación los parámetros analizados fueron a nivel mensual. Se hizo dos análisis por separado para el grupo 1 y 2, debido a la diferencia temporal en los periodos. Además, se obtuvo los datos promedio anuales de cada mes. Los cuales son el resultado principal para el procesamiento en ArcGIS, representados en la Figura 11 y 12. El script desarrollado en RStudio utilizando el paquete CLIMATOL se encuentra detallado en Anexo I.

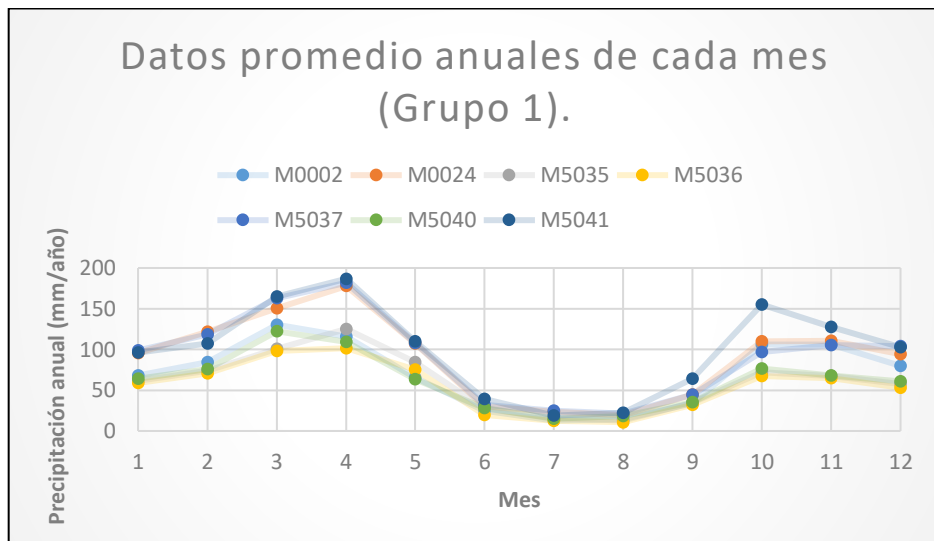


Figura 11: Datos promedio anuales de cada mes (Grupo 1).

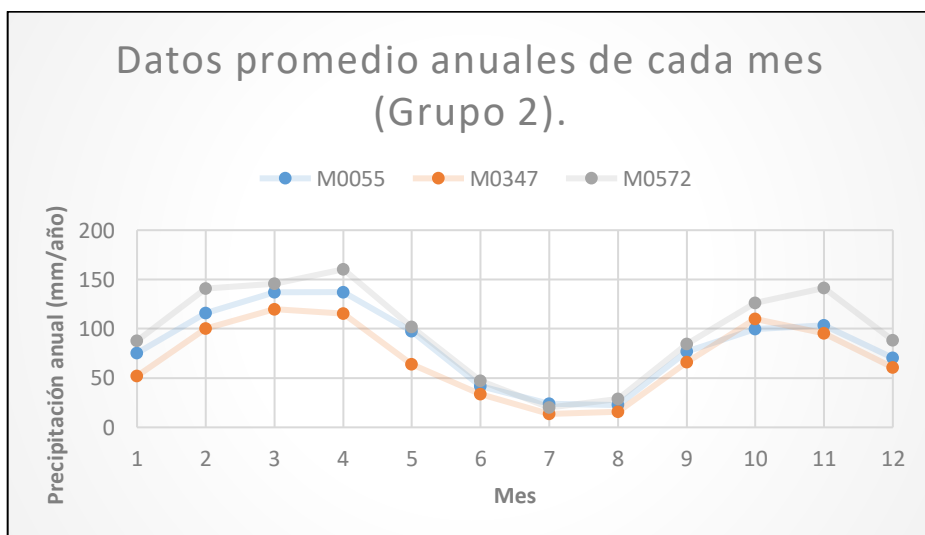


Figura 12: Datos promedio anuales de cada mes (Grupo 2).

El resultado corresponde al patrón de distribución de lluvias cenital, la duración de la estación seca corresponde a los meses de Julio y Agosto [1].

### 2.3.2 Evapotranspiración

Los datos de evapotranspiración fueron obtenidos de imágenes MODISA2 con una resolución temporal mensual y espacial de 500 m.

Tabla 6: Fuente de obtención de imágenes MODIS.

Periodo	Fuente
2004-2014	Universidad de Montana a través del siguiente enlace: ( <a href="http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG_Products/MOD16/">http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG_Products/MOD16/</a> ).
2015-2020	The Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System (LAADS) a través del siguiente enlace: ( <a href="https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/2/MOD16A2--6">https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/2/MOD16A2--6</a> )

El periodo es similar al de las estaciones meteorológicas (2004-2020). El conjunto de datos MOD16, son datos regulares de evapotranspiración de superficie terrestre de 1 km<sup>2</sup> [12]. La información se encuentra dividida de acuerdo con la grilla del satélite representado en la Figura 10. Cada cuadro llamado tile, se localiza por un número de columna (h) y línea (v) [19]. Para el área de estudio se utilizó el recuadro h=10 v=9.

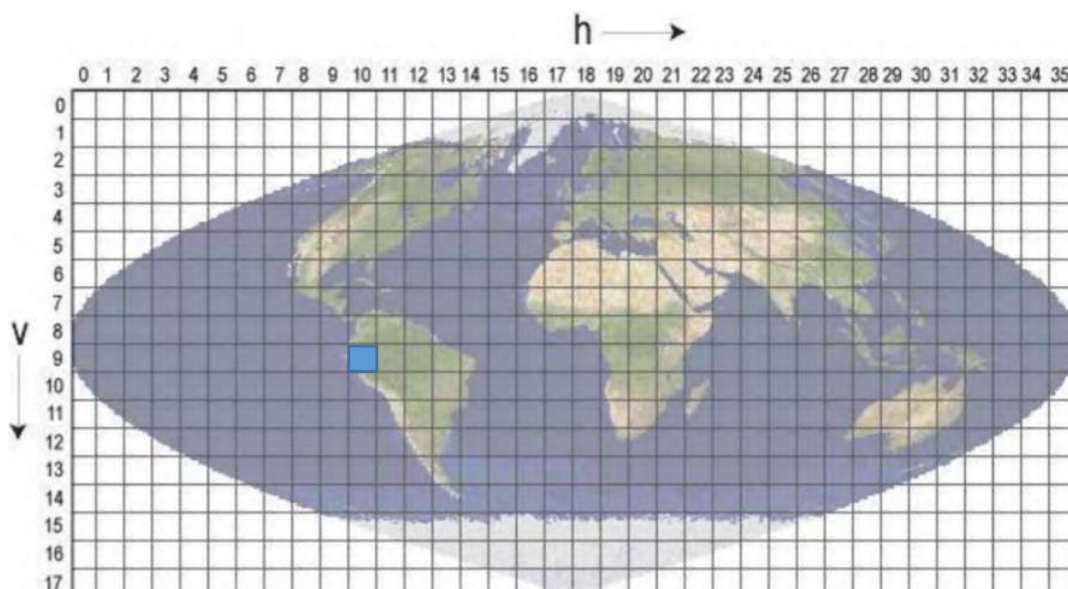


Figura 10: Organización de los productos MODIS en tiles [19].

### 2.3.3 Atributos del suelo

La información obtenida para los atributos de suelo se presenta en la Tabla 7, con sus respectivas fuentes.

Tabla 7: Fuente de obtención de atributos geofísicos del suelo

Atributo	Fuente
Modelo digital del terreno.	Geo portal del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG): <a href="http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/MDT_SIGTIERRAS_16092016">http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/MDT_SIGTIERRAS_16092016</a>
Uso y cobertura del suelo	Geo portal del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG): <a href="http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/4f7e118f-0439-42bf-ab62-f0e7c842a379">http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/4f7e118f-0439-42bf-ab62-f0e7c842a379</a>
Grupo hidrológico del suelo	Página de Oak Ridge National Laboratory (ORNL) Distributed Active Archive Center (DAAC): <a href="https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/Global_Hydrologic_Soil_Group.html">https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/Global_Hydrologic_Soil_Group.html</a>
CN (número de curva)	Capítulo 9 del libro “National Engineering Handbook” del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA): <a href="https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17758.wba">https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17758.wba</a>
Kc (coeficiente de cultivo)	FAO (La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura): <a href="https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf">https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf</a>

#### Grupo Hidrológico de suelo

Son un conjunto de datos cuadrículados globalmente consistentes de grupos de suelos hidrológicos (HSG) con una resolución geográfica de 250 m. Estos datos se desarrollaron para respaldar el modelo de escorrentía de número de curva basado en USDA a escala regional y continental. La clasificación de los HSG se derivó de las clases de textura del suelo y la profundidad hasta el lecho rocoso proporcionado por el sistema soilGrids250m de la Organización para la Agricultura y la Alimentación de Estados Unidos [20].

#### Número de Curva (CN)

Este número de curva indica el potencial de escorrentía de un complejo, el cual es la combinación de la cobertura de suelo y el tipo de suelo hidrológico, durante los períodos en que el suelo no está congelado. Un CN más alto indica un potencial de escorrentía más alto [21].

### Coeficiente de cultivo (Kc)

Este coeficiente combina los efectos de la transpiración de la vegetación y evaporación del suelo. Integra las diferencias entre el cultivo y la superficie de referencia. Es una expresión de los efectos promedio en el tiempo, debido a que la evaporación puede fluctuar como resultado de la lluvia o el riego [11].

## **2.4 Procedimiento**

### **2.4.1 Generación de Capa ráster de precipitación mensual**

Una vez obtenido los datos de precipitación anual por cada mes se interpola con la herramienta ArcGis.

El tipo de interpolación elegida fue Kriging, un método basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación. Esta técnica de estadística geográfica no solo tiene la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporciona medida de certeza o precisión [9].

Sin embargo, cuando el distanciamiento es grande y la base de datos es pequeña, no es posible tener una predicción confiable con Kriging en todos los casos.

El método IDW (Distancia inversa ponderada), se basa directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas especificadas. Este método permite determinar la suavidad de la superficie resultante [9], por lo que resulta una mejor opción y se aplicó en los meses junio y septiembre.

Los mapas de precipitación generados se encuentran en el Anexo II.

### **2.4.2 Generación de Capa ráster de evapotranspiración mensual**

Una vez obtenidos los mapas de evapotranspiración anual por mes del periodo 2004-2020 usando las imágenes MODIS16A2, se procede a redimensionar las celdas debido al gran tamaño que presentan (500x500 m). Se utilizó un redimensionamiento bilineal, que determina el nuevo valor de una celda basándose en el promedio de distancia ponderada de los cuatro centros de celdas de entrada más cercanos. Esta herramienta es útil para los datos continuos y los suaviza un poco [23]. Se obtuvo celdas de 100x100 m. Finalmente se multiplica a la capa ráster por 0,1 para obtener unidades de (mm/año).

Los mapas de precipitación generados se encuentran en el Anexo III.

### 2.4.3 Generación de Capa ráster de uso y cobertura del suelo

Se obtuvo el mapa nacional de suelo y cobertura del suelo del geo portal del Ministerio de Agricultura y Ganadería. Se hizo reclasificación en 6 tipos: AGRÍCOLA, AGUA, ANTRÓPICO, AGROPECUARIO, BOSQUE NATIVO y PLANTACIÓN FORESTAL representadas en la Figura 13. Estas son las coberturas predominantes en el área de estudio. De esta forma se facilita la visualización de la ocupación del suelo y además la interpolación cuando se relaciona con otras variables.

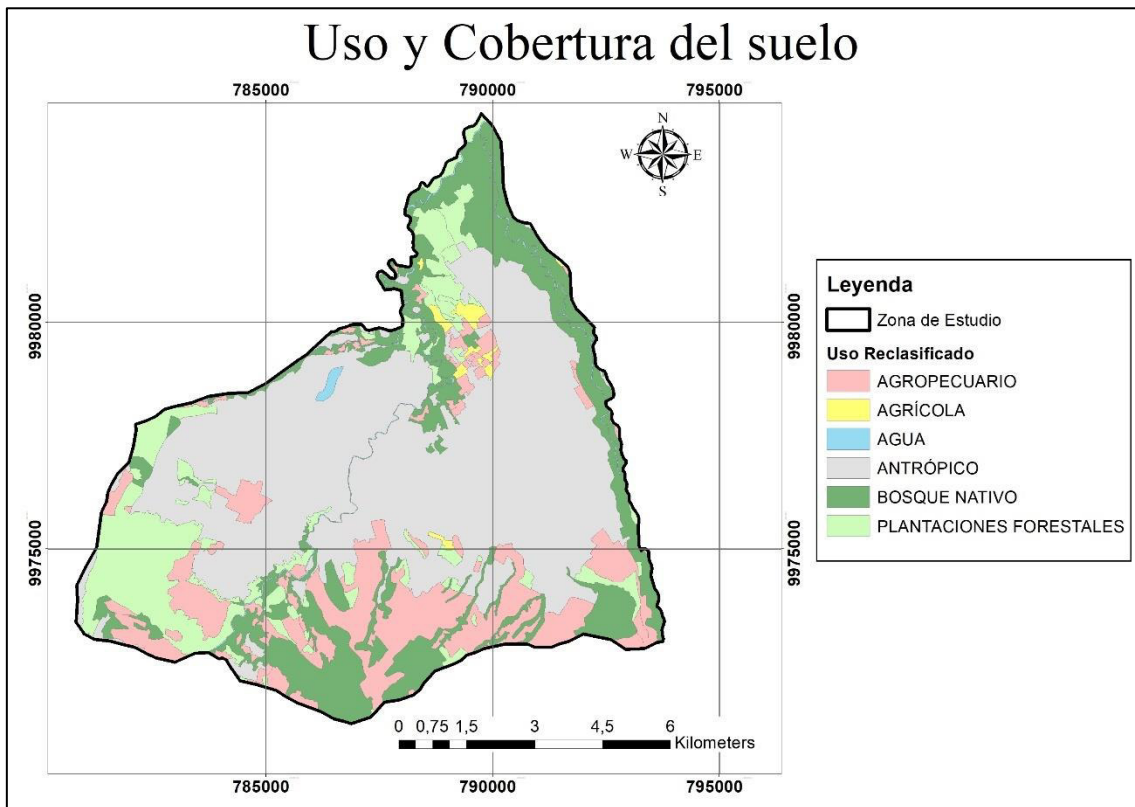


Figura 13: Uso y Cobertura de suelo de la zona de estudio.

### 2.4.4 Generación de Capa ráster de grupos hidrológicos del suelo

Se obtuvo el mapa mundial de grupos hidrológicos del suelo, y al igual que con los mapas de evapotranspiración, se realizó un redimensionamiento para obtener celdas de 100x100 m. Se realizó una reclasificación acorde a la tabla 8 obteniendo el mapa de la Figura 14.



Tabla 8: Reclasificación de grupos hidrológicos de suelo

Valor del píxel	Descripción	Reclasificación
1	HSG-A: Bajo potencial de escurrimiento	1
2	HSG-B: Moderadamente bajo potencial de escurrimiento	2
3	HSG-C: Moderadamente alto potencial de escurrimiento	3
4	HSG-D: Alto potencial de escurrimiento	4
11	HSG-A/D: Alto potencial de escurrimiento a menos que se drene	4
12	HSG-B/D: Alto potencial de escurrimiento a menos que se drene	4
13	HSG-C/D: Alto potencial de escurrimiento a menos que se drene	4
14	HSG-D/D: Alto potencial de escurrimiento a menos que se drene	4

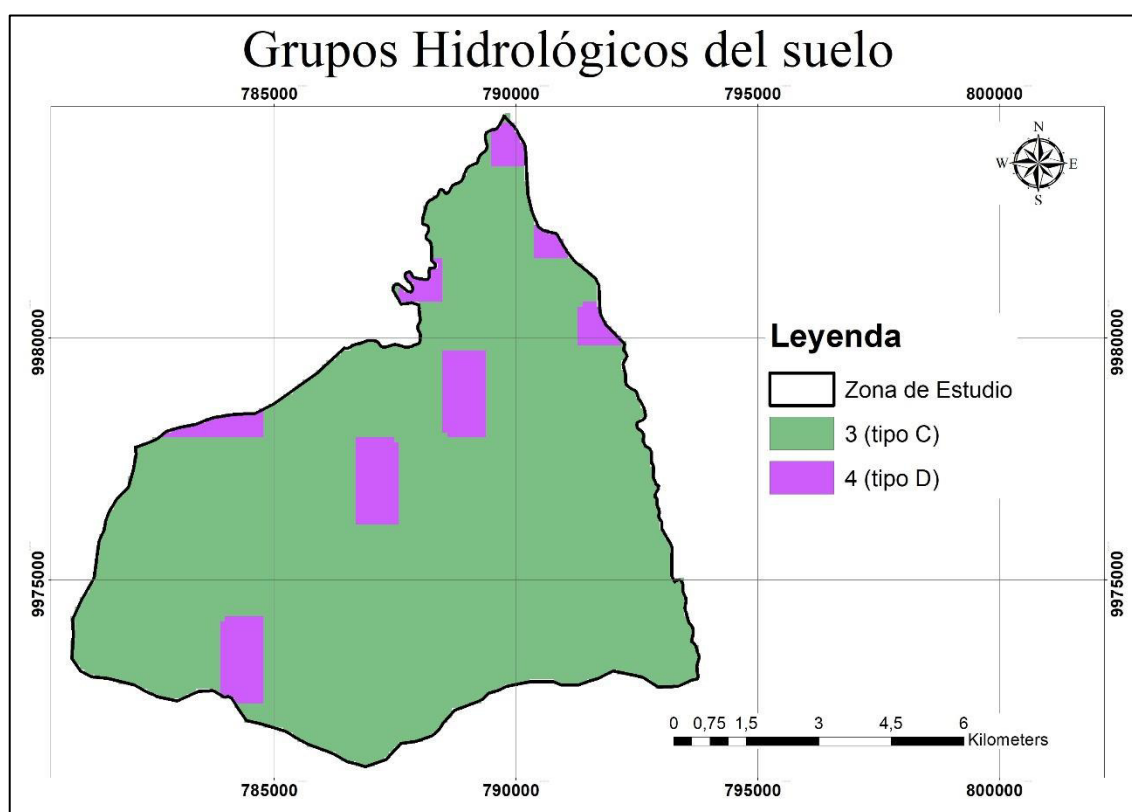


Figura 14: Grupos hidrológicos del suelo de la zona de estudio.

#### 2.4.5 Generación de Cuadro biofísico con valores de CN y Kc.

De acuerdo con el uso de suelo y revisión bibliográfica se determinaron los números de curva por cada grupo de suelo hidrológico y coeficiente de cultivo por cada mes.

El valor de Kc y CN para el uso de suelo agrícola se basó en el cultivo de maíz, acorde con el mapa de uso y cobertura de suelo, es el más extenso en la zona. El valor se determinó acorde a la revisión bibliográfica de Boada y Espinoza (2016), donde se describe desde un

punto de vista agronómico, a la producción de maíz en la sierra ecuatoriana [24]. Para los otros usos de suelo se determinó el Kc en la guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos [11]. Para el CN se utilizó el Manual Nacional de Ingeniería en Hidrología de USDA [21].

Tabla 9: Valores de Kc por cada mes

Descripción	Kc1	Kc2	Kc3	Kc4	Kc5	Kc6	Kc7	Kc8	Kc9	Kc10	Kc11	Kc12
AGRÍCOLA	0.6	0.6	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
AGUA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ANTRÓPICO	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
AGROPECUARIO	0.65	0.65	0.65	0.65	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	0.65	0.65	0.65
BOSQUE NATIVO	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5
PLANTACIÓN FORESTAL	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5

Tabla 10: Valores de CN por cada grupo de suelo hidrológico.

Descripción	CNA	CNB	CNC	CND
AGRÍCOLA	67	78	85	89
AGUA	99	99	99	99
ANTRÓPICO	76	85	89	91
AGROPECUARIO	49	69	79	84
BOSQUE NATIVO	36	60	73	79
PLANTACIÓN FORESTAL	43	65	76	82

#### 2.4.6 Generación de cuadro de Eventos de lluvia en cada mes

Con datos diarios de 3 estaciones circundantes a la zona de estudio (Tumbaco M5040, Belisario M5037 y La Tola M0002), se determinó los eventos de lluvia por cada mes en un período de 10 años y con un promedio se obtuvo la tabla 11.

Tabla 11: Eventos de lluvia por cada mes

Mes	Número de eventos de lluvia	Mes	Número de eventos de lluvia
1	11	7	5
2	12	8	4
3	16	9	8
4	17	10	13
5	13	11	12
6	8	12	11

### 2.4.7 Determinación de Acumulación de caudal umbral (TFA)

La acumulación de caudal umbral (TFA), es un parámetro de algoritmo de delineación de flujo que especifica la cantidad de píxeles ascendentes que deben fluir en un píxel antes de que se clasifique como un flujo. El valor correcto para su aplicación es el valor que hace que el modelo cree una capa de cuerpos de agua que se parezca en lo más posible a la red real en la cuenca [8]. El valor óptimo para el proyecto que se acerca a la realidad es de 500. La figura 16 presenta al flujo rápido y los ríos más importantes en la zona, se aprecia una similitud significativa.

### 2.4.8 Determinación de Parámetros ( $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ )

$\alpha$  es una función de la estacionalidad de la precipitación: la recarga de un mes dado puede ser utilizada por áreas aguas abajo durante meses posteriores, dependiendo de la dinámica del subsuelo. Para obtener una parametrización real se dividen los valores mensuales de precipitación al valor anual [8] y se obtienen fracciones por cada mes. El resultado se presenta en la tabla 12.

Tabla 12: Valor de  $\alpha$  por cada mes

Mes	Valor alfa	Mes	Valor alfa
1	0,08	7	0,02
2	0,11	8	0,02
3	0,14	9	0,06
4	0,15	10	0,11
5	0,09	11	0,11
6	0,03	12	0,08

$\beta$  es una función de la topografía y los suelos locales: para una cantidad dada de recarga cuesta arriba, la cantidad de agua utilizada por un píxel es una función de la capacidad de almacenamiento. También depende de las características del área de contribución pendiente arriba. Para obtener una parametrización real se calculó el índice de humedad topográfico (TWI) con la herramienta ArcGis, donde  $TWI = \ln\left(\frac{A}{\tan\beta}\right)$ . Se obtuvo un valor máximo de 0,86 para  $\beta$  este fue elegido ya que representa de mejor manera la topografía del área de estudio.

$\gamma$  representa la fracción de recarga que está disponible para los píxeles de pendiente descendente. Es una función de las propiedades del suelo y posiblemente de la topografía. En la parametrización por defecto, el valor de  $\gamma$  es 1 [8].

### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Resultados y Discusión

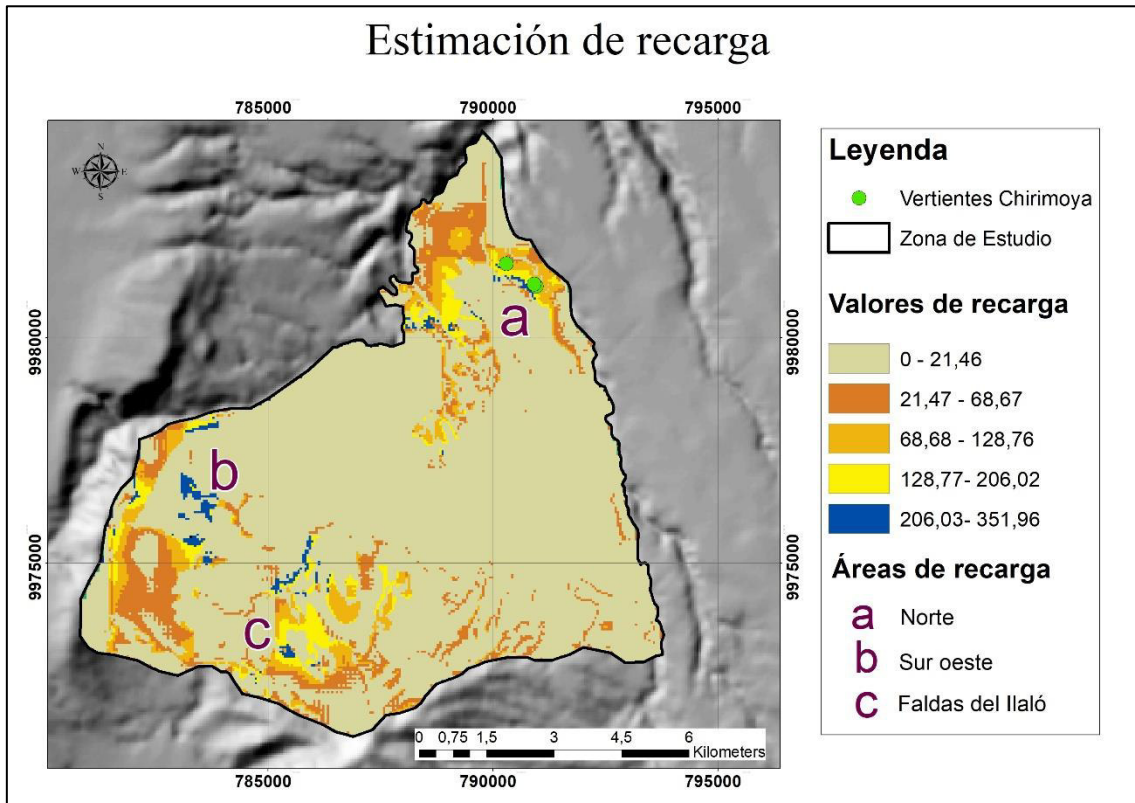


Figura 15: Estimación de la recarga en la zona de estudio con el modelo InVEST

El modelo InVEST estimó un rango de recarga de (0 - 351,96 mm/año). En el estudio de Manciatì et al [6], donde se analiza el sistema acuífero Tumbaco - Cumbayá – Los Chillos, también se realizó una estimación de la recarga. En este estudio se utilizó un balance hídrico simple basado en la ecuación de Darcy para un flujo de descarga teórico. Se consideró la conductividad hidráulica, gradiente hidráulico, sección transversal del acuífero, espesor saturado y la porosidad, parámetros que caracterizan el flujo subterráneo. Al considerar una infiltración difusa se estimó la recarga en un rango de (70 – 600 mm/año) [6]. De esta manera la estimación de la recarga utilizando el modelo InVEST, al entrar en el rango calculado por Manciatì et al [6], se puede decir que son comparables los balances superficiales y subterráneos. El rango de recarga se encuentra distribuido en diferentes áreas en todo el acuífero.

### 3.1.1 Áreas de recarga

Las áreas de recarga coinciden con las siguientes coberturas de suelo: bosque nativo, plantaciones forestales y agropecuario. A pesar de tener diferentes usos del suelo en la zona de estudio, la capa de cangahua cubre una gran parte de la superficie del suelo. Entender la dinámica de esta capa y los principales usos de suelo donde se presenta la recarga es importante.

La cangahua es una capa dura presente en los suelos volcánicos. Estos suelos se encuentran en la parte septentrional del callejón interandino [25]. Puede ser fracturada para producir un suelo en el cual se puede cultivar. En el estudio de Podwojewski et al [26], se analiza los efectos de la agricultura en la hidrodinámica de la cangahua. Se determinó que inmediatamente después de la remoción de cangahua, la escorrentía era despreciable y se observa un aumento constante de la infiltración. Sin embargo, después de eventos de lluvia el suelo se degrada y forma costras. Al aplicar el tratamiento agronómico, se detectó que permite una estabilidad en la infiltración y escorrentía, pero solo por 3 ciclos de cultivo. Entonces, se concluye que este tipo de suelo tiende a formar costras aumentando la escorrentía. De esta manera los cultivos pueden reducir el tiempo de erosión, pero no detenerlo [26].

En las zonas donde existe vegetación es posible obtener una mayor infiltración a pesar de tener una capa impermeable como es la cangahua. La vegetación puede estimular una mayor infiltración, pero no por largos periodos de tiempo como indica Podwojewski et al [26]. Las áreas de recarga que coinciden con cobertura de suelo donde existe vegetación pueden funcionar bajo esta lógica. Es necesario un estudio más profundo sobre la cangahua y el comportamiento de esta con la vegetación.

La topografía es un parámetro importante en la estimación de zonas de recarga. Una rápida infiltración puede llevar a la acumulación de agua en las capas de la cangahua lo cual puede dar como resultado zonas de deslizamiento naturales [27] especialmente en pendientes altas. El enrutamiento de los parámetros de pendiente y suelo no es muy sensible en el modelo [10]. A pesar de que el parámetro  $\beta$  toma en cuenta el aporte aguas arriba, su valor en la calibración del modelo no es muy decisiva y por eso en la figura 15 se aprecia valores significativos en pendientes altas (zona b y c).

Se encontraron 3 áreas que presentan mayores valores de recarga, a saber:

#### a.- Norte del acuífero

La presencia de valores altos de recarga en esta zona se relaciona con el análisis presentado en el Estudio De La Interacción Superficie - Subterránea Del Sistema Acuífero Tumbaco – Cumbayá desarrollado por Manciatì [17]. En el estudio al analizar las edades del agua en el sistema se determinó que al norte del acuífero se encuentran vertientes jóvenes llamadas Chirimoyas representadas en la figura 15. Se deduce que estas vertientes están relacionadas con la presencia de fracturas y fallas que permiten la recarga directa en la zona [17]. Es decir que, a pesar de ser una zona alejada y separada por el área urbana, la topografía y la geología del lugar, así como el uso y cobertura de suelo ha permitido que se presente una posible recarga directa.

#### b.- Sur Oeste del acuífero

Esta zona es resultado directo del balance hídrico del modelo InVEST. Al generar los mapas de precipitación (Anexo II), se encontró que en esta zona es donde se da los mayores niveles de precipitación en todo el año. Los mapas de evapotranspiración (Anexo III) presentan valores bajos en la misma zona. El flujo rápido representado en la figura 16, también presenta valores bajos en la zona. Al considerar la ecuación de balance hídrico para la recarga (ecuación 8) estos 3 parámetros dan como resultado valores altos de recarga. Sin embargo, al considerar las pendientes altas en la zona, hace contradictorio tener valores de recarga altos. Esto puede deberse a que el único parámetro que toma en cuenta la topografía es  $\beta$  y este no tiene una sensibilidad significativa en el modelo.

#### c.- Faldas del Ilaló

Al comparar los resultados con el estudio de Manciatì et al [6], presenta similitud en la estimación del área de recarga en las faldas del Ilaló. En este estudio se deduce que las zonas de recarga pueden darse en las quebradas ubicadas en la parte oeste del volcán Ilaló debido a la menor presencia de cangahua [1]. Este resultado coincide con la zona c presentada en la figura 15. Sin embargo, cabe recalcar que los valores presentes en las pendientes altas del Ilaló se deben a la poca sensibilidad de la topografía en el modelo.

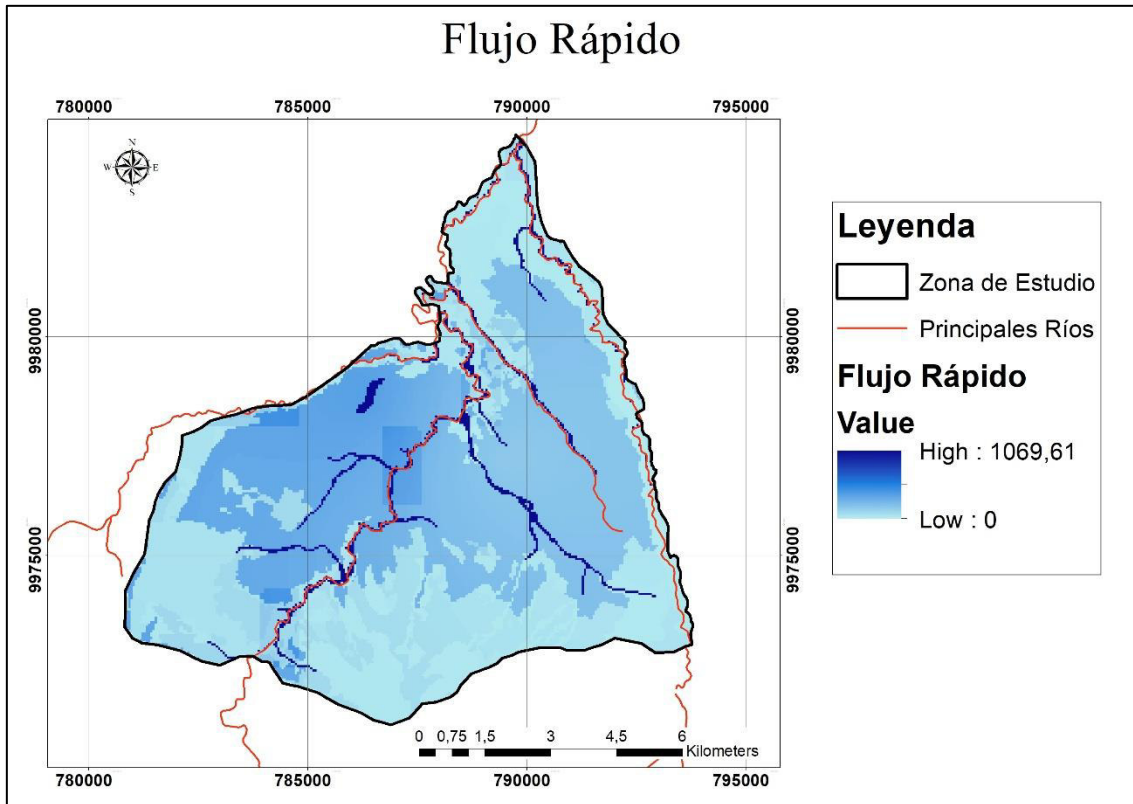


Figura 16: Flujo rápido.

### 3.1.2 Análisis de sensibilidad

En el proceso, se realizaron diferentes corridas del modelo, con el objetivo de analizar la sensibilidad de algunos parámetros. Se excluyó la precipitación, evapotranspiración y grupos hidrológicos del suelo, debido a la escasa información disponible en la zona de estudio de estas capas.

Se observó la influencia de los parámetros en el mapa final de flujo base y recarga local. Los parámetros: acumulación de caudal umbral, alfa ( $\alpha$ ), gamma ( $\gamma$ ), beta ( $\beta$ ), y número de curva (CN) no presentaron variaciones mayores al 10% en el resultado final. Este resultado coincide con el análisis de sensibilidad realizado por Hamel et al [10], donde se observó que los parámetros alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) y número de curva (CN) tenían afectaciones del 7%, 14% y 10% en los resultados del modelamiento respectivamente [10]. A pesar de no ser porcentajes grandes son parámetros importantes en la calibración del modelo que brindan mayor confiabilidad y acercan los resultados a la realidad.

El modelo InVEST permite un estudio con cambio de escenarios en una misma zona, permitiendo el análisis de sensibilidad de varios parámetros. Este análisis se lo puede apreciar en la evaluación de la incertidumbre del mapeo de los servicios ecosistémicos

realizada por Wang et al [18]. Se utilizó el índice RVC (Regional Value Change) para cuantificar la diferencia de los cambios de escenario en los resultados. Se encontró que el Kc en el flujo base presentó mayores diferencias al compararlo con otros escenarios [18]. Corroborando el resultado del presente proyecto donde cambios de Kc por usos de suelo urbano y con vegetación presentan diferencias mayores al 100% en la mayoría de los casos. El coeficiente de cultivo es entonces un parámetro decisivo en la estimación de la recarga.

### **3.1.3 Limitaciones**

En el desarrollo del modelamiento se encontraron limitaciones. Debido a la disponibilidad de la información en la zona de estudio, así como del alcance del proyecto en términos de tiempo y recursos.

- Los mapas de evapotranspiración, y grupos hidrológicos del suelo presentaron resoluciones grandes (250 – 500 m). Para suavizar los resultados se modificó la escala a 100 m. A pesar de utilizar una herramienta bilineal, los resultados se pueden ver afectados.
- El mapa de cobertura de suelo fue simplificado a solo 6 categorías. Como se presentó en el análisis de sensibilidad el coeficiente de cultivo, Kc, junto con cada cobertura y uso de suelo tiene una influencia significativa en la estimación de la recarga. La simplificación de este mapa repercute en resultados menos exactos.
- No se consideró el riego como una entrada y el bombeo de pozos como una salida en el balance hídrico aplicado. Si embargo estos dos flujos influyen en el balance de agua real en la zona.



## 3.2 Conclusiones

- Mediante un balance hídrico con los criterios del modelo InVEST – Seasonal Water Yield, se estimó la recarga del acuífero de Tumbaco en un rango de 0 a 351,96 mm/año. Se encontraron 3 áreas con mayores valores de recarga: a.-norte del acuífero, b.- sur oeste del acuífero y c.- faldas del Ilaló. Se identificó que el coeficiente de cultivo (Kc) es el parámetro con mayor sensibilidad en el modelo que influye en la estimación de la recarga.
- Se estimó la evapotranspiración usando imágenes satelitales de MODIS. Los valores de este parámetro, en la zona de estudio, varían en un rango de 44,46 – 3275,2 mm/año.
- Se compararon los resultados con estudios previos en la zona, llegando a convalidar la recarga en la zona a y la zona c. Sin embargo, en este caso no se tomaron en cuenta las pendientes topográficas altas que pueden influir en la infiltración. Por este mismo motivo, la zona b requiere validación in situ.

## 3.3 Recomendaciones

- Se debe hacer una validación in situ de los valores de recarga, así como de un estudio más profundo que tenga en cuenta el flujo subterráneo.
- También ayudaría validar los mapas de evapotranspiración y grupos de suelo hidrológico. Al obtenerlos de mapas mundiales, la resolución es muy grande lo cual influye en los resultados disminuyendo la precisión.
- Se recomienda hacer un estudio detallado de los valores de coeficiente de cultivo (Kc) en la zona, en condiciones con presencia de cangahua y vegetación.
- Un análisis de sensibilidad de los parámetros ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $g$  y  $tfa$ ) es necesario porque intervienen en la calibración del modelo.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Freeze and J. Cherry, *Groundwater*. New Jersey – United States of America: Prentice - Hall, 1979. pp 1-624.
- [2] T. Issam, “Estimación Del Balance Hídrico Y De La Recarga En El Acuífero Ventós-Castellar (Se España). Efectos Del Cambio Climático,” [Tesis doctoral]. Universidad de Alicante. Alicante - España, 2014. pp 1-238
- [3] R. W. Healy and B. R. Scanlon, *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge – United Kingdom: Cambridge University Press, 2010. doi: 10.1017/CBO9780511780745. pp 1-238
- [4] A. Vaca, “Arsénico en Aguas y suelos de Tumbaco: un estudio de las fuentes y procedimientos tecnológicos para mitigar su impacto ambiental.,” Quito - Ecuador, 2016. doi: 10.13140/RG.2.1.4815.4645. pp 1-48
- [5] C. Valdospinos, F. Barragán, M. Martínez, J. Barragán, and V. Lucas, “Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial Gobierno Autónomo Descentralizado De Tumbaco.” Quito – Ecuador, 2020. pp 1-326
- [6] C. Manciatì, J. Taupin, N. Patris, C. Leduc, and C. Casiot, “Diverging Water Ages Inferred From Hydrodynamics, Hydrochemical and Isotopic Tracers in a Tropical Andean Volcano-Sedimentary Confined Aquifer System,” *Frontiers in Water*, vol. 3, pp. 1–21, 2021, doi: 10.3389/frwa.2021.597641i.
- [7] A. Valle and H. Zaragoza, “La Recarga De Acuíferos. Análisis De Su Estimación De Acuerdo Con La Información Disponible, El Caso Del Acuífero Del Valle De San Juan Del Río, Querétaro,” [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma Del Estado De México. Toluca-México, 2019. pp 1-112
- [8] R. Sharp *et al.*, “InVEST User guide,”. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. 2020.
- [9] S. Minga, “Análisis De Cambio Del Rendimiento Hídrico Actual Y Bajo Escenarios Climáticos Futuros En La Región Sur Del Ecuador,” [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma del estado de México. Toluca.México. 2018. pp 1-126
- [10] P. Hamel *et al.*, “Modeling seasonal water yield for landscape management: Applications in Peru and Myanmar,” *Journal of Environmental Management*, vol. 270, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2020.110792. pp 1-13
- [11] R. Allen, *Evapotranspiración del cultivo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma-Italia, 2006. pp 1-322
- [12] S. W. Running, Q. Mu, M. Zhao, and A. Moreno, “User’s Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6.1),” Mar. 2021. pp 1-34
- [13] R. Saheed, O. Shakirudeen, and F. Mayowa, “Spatial Appraisal of Seasonal Water Yield of the Sokoto-Rima Basin,” *Sakarya University Journal of Science*, vol. 25, no. 4, pp. 1–20, Jun. 2021, doi: 10.16984/taufbilder.800302.

- [14] P. Zorrilla-Miras, M. Suárez, A. González-García, C. Sancho Gómez, and M. Bea, "Contribución de la Reserva de la Biosfera de la Sierra del Rincón al abastecimiento de agua de la Comunidad de Madrid: Una aproximación desde los servicios de los ecosistemas," *Ecosistemas*, vol. 29, no. 1, pp. 1–12, Apr. 2020, doi: 10.7818/ECOS.1938.
- [15] S. Torres, "Evaluación Del Servicio Ecosistémico Correspondiente A La Producción De Agua En La Cuenca Alta Del Río Guayllabamba Utilizando El Modelo Computacional Invest," [Tesis Ingeniera Ambiental]. Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador, 2018.
- [16] A. Andrade, "Recarga Potencial Del Acuífero De La Sub-Cuenca Del Río Chambo Bajo Una Perspectiva De La Hidrología Física," [Tesis de maestría]. Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador, 2019.
- [17] C. Manciatì, "Etude de l'interaction surface-souterrain du système aquifère Tumbaco-Cumbaya en Equateur, avec une approche hydrodynamique et géochimique," [Tesis doctoral]. Université Montpellier. 2014. pp 1-385
- [18] Z. Wang, A. M. Lechner, and T. Baumgartl, "Ecosystem services mapping uncertainty assessment: A case study in the Fitzroy basin mining region," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 1, pp. 1–25, Jan. 2018, doi: 10.3390/w10010088.
- [19] T. García-Mora and J. Mas, "Modland: los productos de superficie terrestre modis," in *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*, México, 2011, pp. 25–70.
- [20] C. Ross, L. Prihodko, J. Anchang, S. Kumar, W. Ji, and N. Hanan, "Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling," Tennessee-United States of America. , Apr. 2018. doi: 10.3334/ORNLDAAAC/1566.
- [21] D. Woodward *et al.*, "Hydrologic Soil-Cover Complexes," in *National Engineering Handbook*, Maryland-United States of America, 2004, pp. 1–20.
- [22] J. A. Guijarro, "Homogeneización de series climáticas con Climatol Versión 3.1.1," Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), D.T. Islas Baleares-España, 2019. 1-22
- [23] ESRI (Environmental Systems Research Institute), "Resources for ArcMap | ArcGIS for Desktop." <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/resources> (accessed Jan. 18, 2022).
- [24] R. Boada and J. Espinosa, "Factores que limitan el potencial de rendimiento del maíz de polinización abierta en campos de pequeños productores de la Sierra de Ecuador," *Siembra*, vol. 3, no. 1, pp. 67–82, Oct. 2016, doi: 10.29166/siembra.v3i1.262.
- [25] C. Zebrowski, "Los suelos con cangahua en el Ecuador," in *Suelos volcánicos endurecidos: memorias del III Simposio internacional sobre suelos volcánicos endurecidos*, ORSTOM, Ed. Quito-Ecuador, 1996, pp. 128–137.
- [26] P. Podwojewski, J. L. Janeau, and Y. Leroux, "Effects of agricultural practices on the hydrodynamics of a deep tilled hardened volcanic ash–soil (Cangahua) in Ecuador," *CATENA*, vol. 72, no. 1, pp. 179–190, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.catena.2007.05.003.

- [27] J.-L. Perrin, B. Fourcade, J. Poulénard, D. Richard, and A. Sierra, "Quito face à un risque d'origine naturelle : les laves torrentielles," *Revue de géographie alpine*, vol. 88, no. 2, pp. 43–57, 2000, doi: 10.3406/rga.2000.2990.

## **5 ANEXOS**

### **ANEXO I**

**Código Utilizado para la homogenización de los datos de precipitación con el software RStudio.**

### **Librería de Climatol**

```
library(climatol)
```

### **Directorio de trabajo**

```
setwd("C:/Users/OBANDO/Desktop/climatol/prueba 1")
```

### **Input y escritura de datos**

```
datos<-as.matrix(read.table("datos_pro_2004-2019.csv",sep=";"))
```

```
write(datos,'pro_2004-2019.dat')
```

```
write.table(est,'pro_2004-2019.est', row.names = FALSE, col.names = FALSE)
```

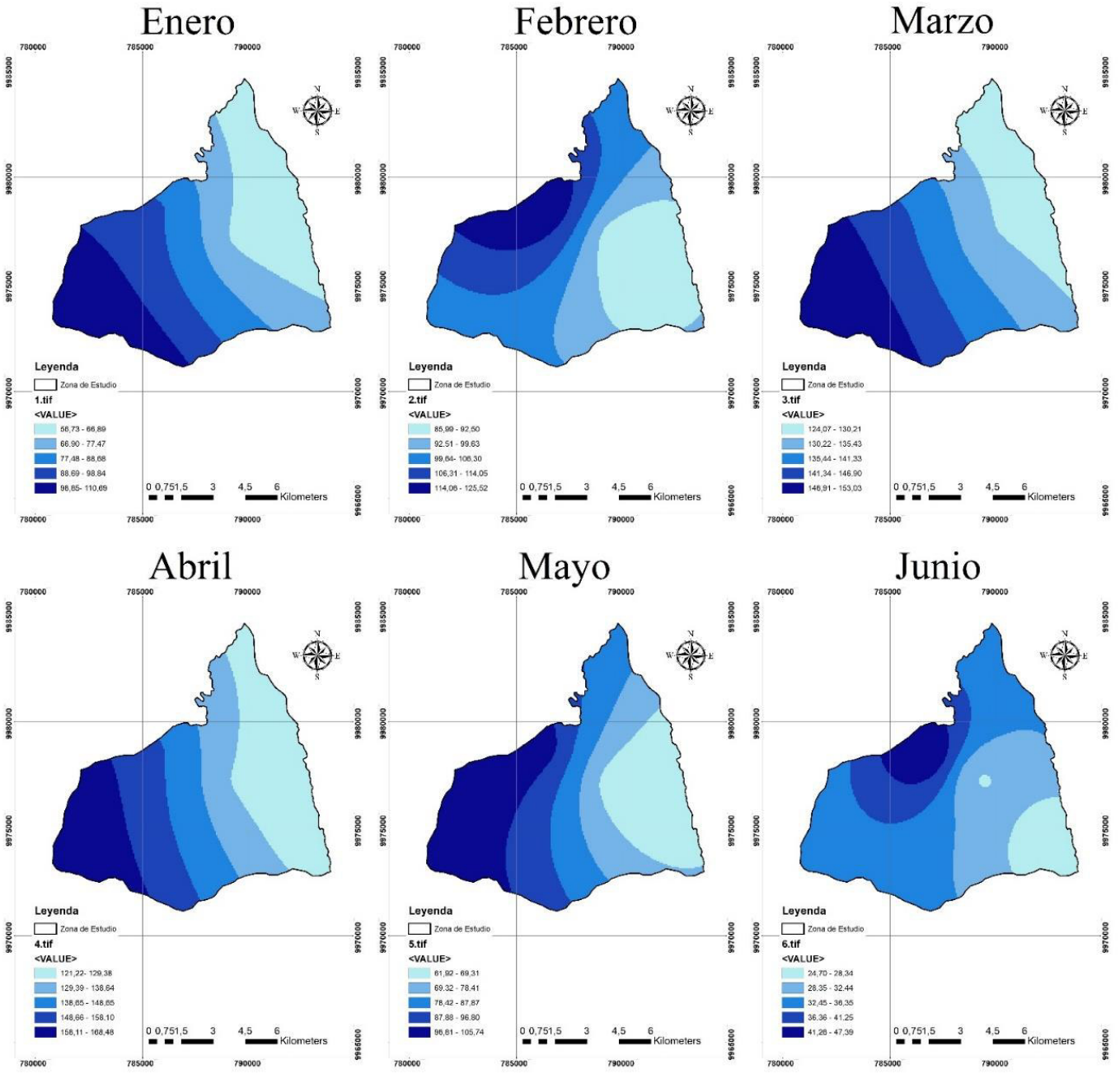
### **Relleno de datos y genera gráficos exploratorios**

```
homogen('pro', 2004, 2019, expl = TRUE)
```

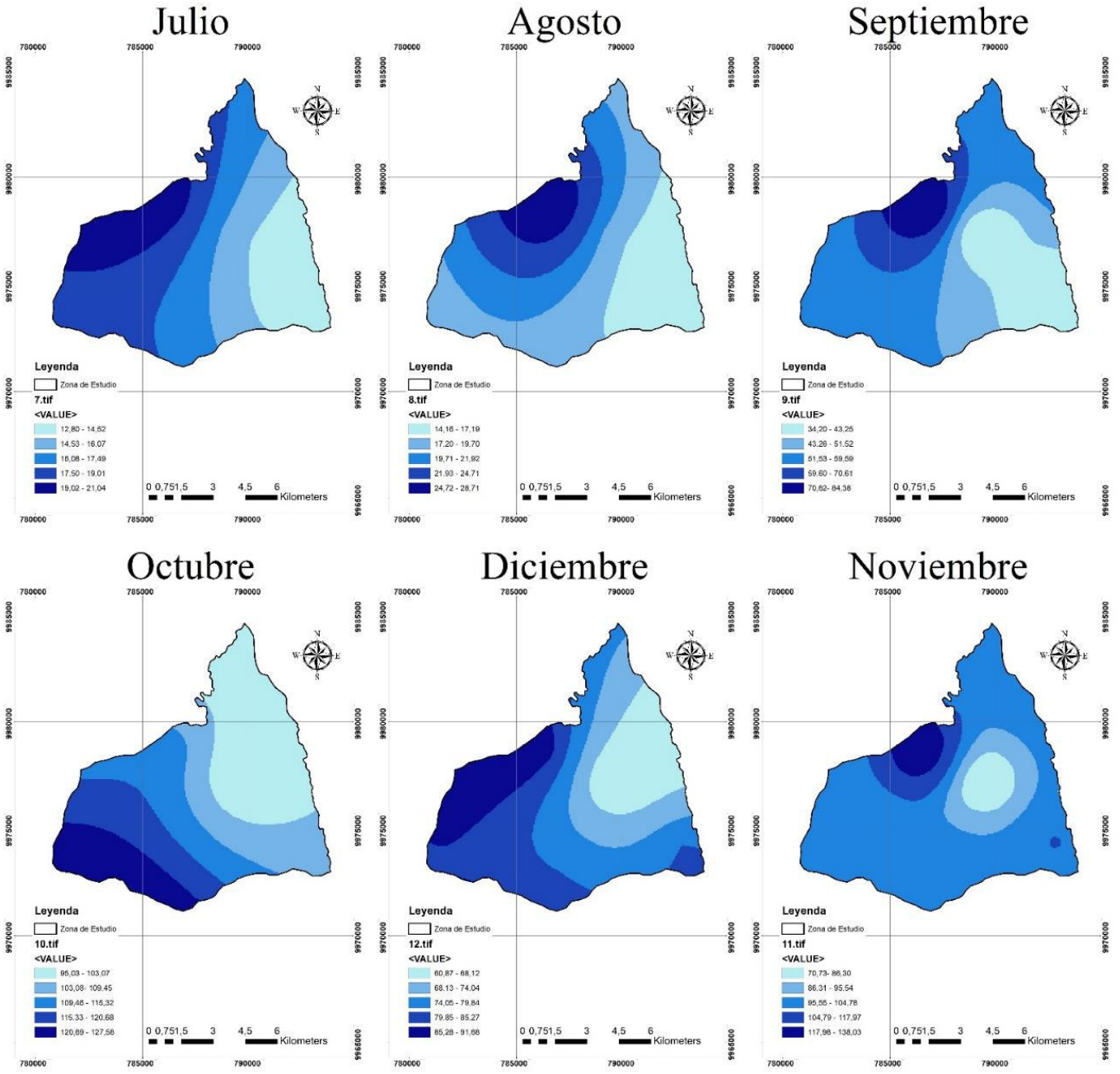
### **Obtención de datos promedio mensuales multianuales**

```
dahstat('pro', 2004,2019)
```

**ANEXO II**  
**Mapas de precipitación mensual.**



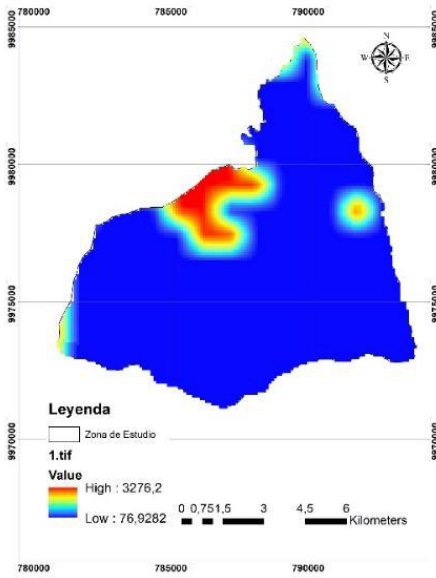




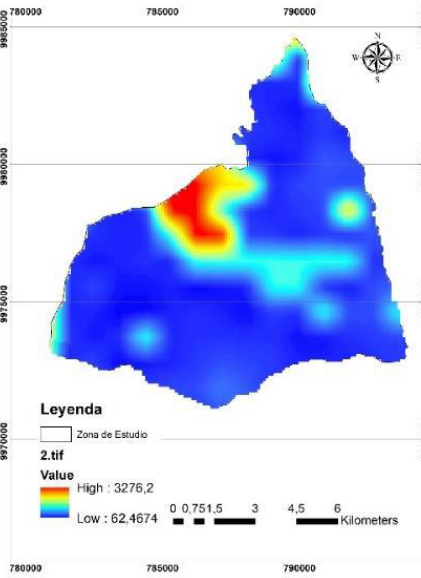
### **ANEXO III**

#### **Mapas de evapotranspiración mensual.**

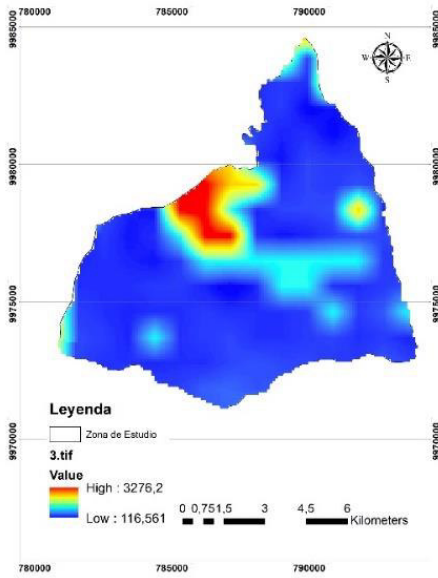
### Enero



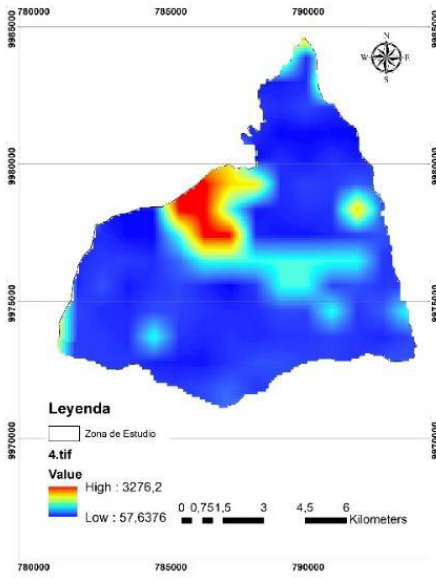
### Febrero



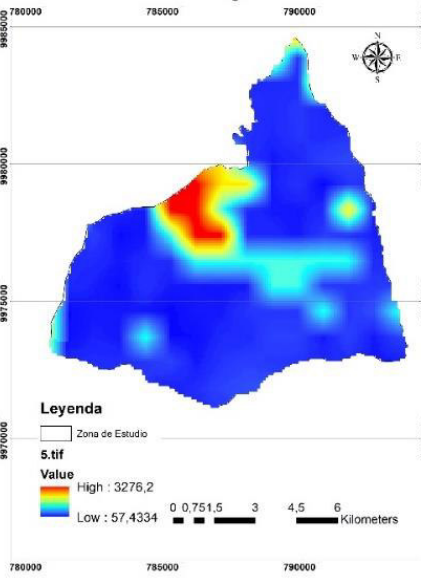
### Marzo



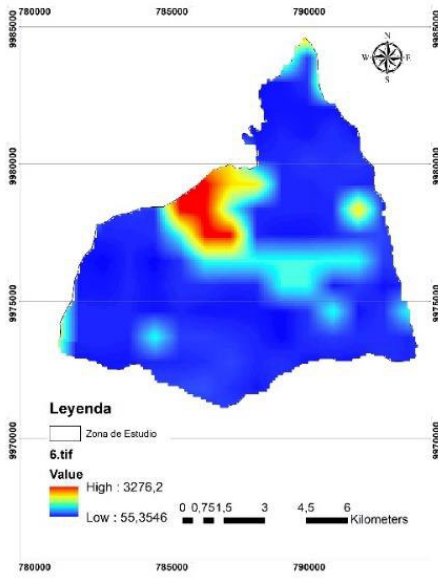
### Abril



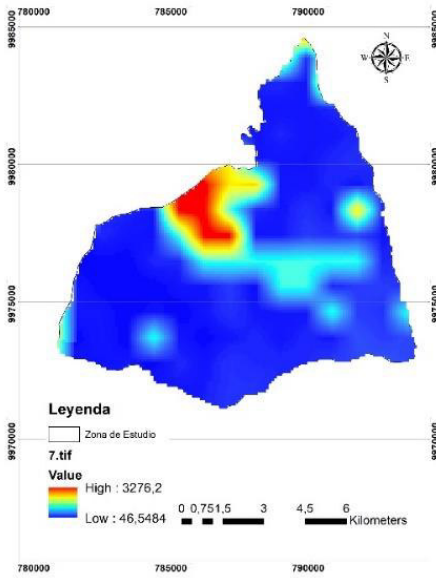
### Mayo



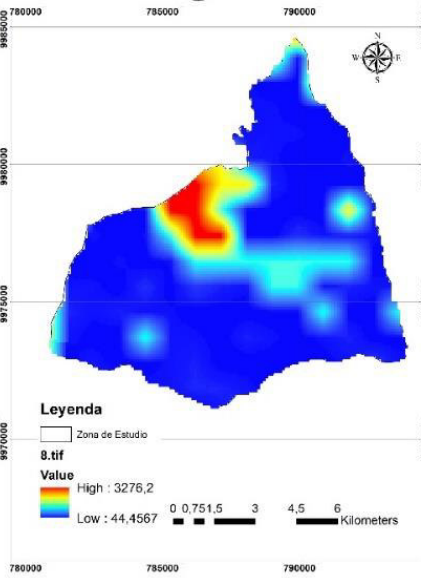
### Junio



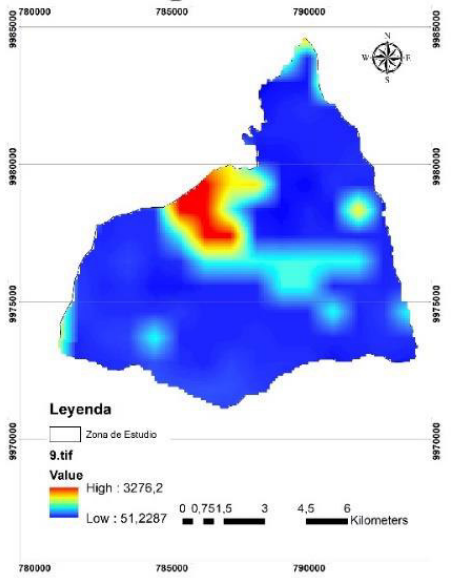
# Julio



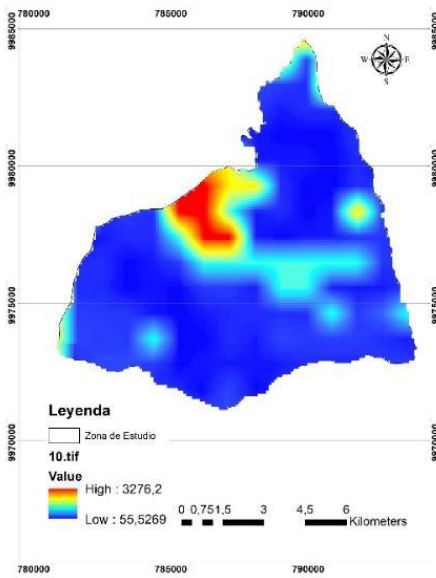
# Agosto



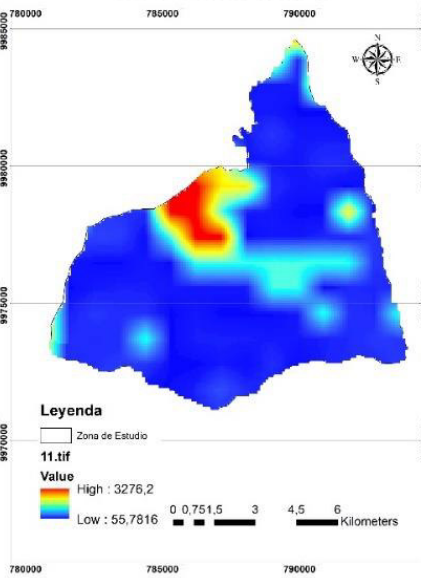
# Septiembre



# Octubre



# Noviembre



# Diciembre

