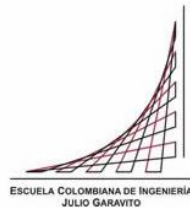


## **Maestría en Ingeniería Civil**

**Análisis del cambio en la recarga de acuíferos de la cuenca alta del río Ariporo mediante el modelo de dos tanques de WEAP.**

**Gonzalo Alberto Forero Buitrago**

**Bogotá, D.C., 27 de Mayo de 2022**



**Análisis del cambio en la recarga de acuíferos de la cuenca alta del río Ariporo mediante el modelo de dos tanques de WEAP.**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

**PhD. Germán Ricardo Santos Granados**

**Director**

**PhD. Gerald Augusto Corzo Pérez**

**Codirector**

**Bogotá, D.C., 27 de Mayo de 2022**



La tesis de maestría titulada “Análisis del cambio en la recarga de acuíferos de la cuenca alta del río Ariporo mediante el modelo de dos tanques de WEAP”, presentada por Gonzalo Alberto Forero Buitrago, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

**Director de la tesis**

---

**German Ricardo Santos Granados**

**Codirector**

---

**Gerald Augusto Corzo Pérez**

**Jurado**

---

**German Eduardo Acero Riveros**

**Bogotá, D.C., 27 de Mayo de 2022**

## **DEDICATORIA**

A Clara Helena Buitrago Parra, Diego Armando Forero Buitrago, Jaime Alberto Romero y Paula Andrea Escorcía Medrano que fueron un soporte indispensable para el correcto desarrollo de la maestría. Así mismo a dos grandes personas y profesionales que fueron claves para mi desarrollo profesional, Dr. Gerald Corzo y el Dr. German Santos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito que es un espacio de aprendizaje práctico para el trabajo. Un agradecimiento muy especial a German Ricardo Santos Granados, Gerald Corzo y German Acero por permitirme aprender de su experiencia en distintos escenarios. Son profesores que no solo aportaron herramientas útiles para el desenvolvimiento laboral, sino que son un ejemplo a seguir como personas y como profesionales.

## RESUMEN

La cuenca del río Ariporo se encuentra localizada al oriente colombiano, en el departamento de Casanare. Esta región en particular, ha tenido desastres ecológicos ocasionados por el clima, ejemplo de ello, uno sucedido en el año 2014 cuando ocurrió una fuerte sequía ampliamente divulgada por los medios de comunicación. Para poder plantear una solución a la problemática de la sequía, es necesario entender el funcionamiento del sistema hidrológico completo de la cuenca alta del río Ariporo. Sin embargo, aunque es posible plantear un balance de entradas y salidas con los datos existentes de la base de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia con sus siglas IDEAM, el modelo tendría una gran incertidumbre debido a que hay una ausencia de 13 años de datos de caudal, no se tiene información de evapotranspiración y los datos de estaciones de lluvia del IDEAM se encuentran ubicados por fuera de la cuenca. Esta ausencia de datos y la ubicación de las estaciones de lluvia fuera de los límites de la cuenca a estudiar, hace que sea necesario construir un modelo que permita utilizar datos de precipitación y evapotranspiración utilizando datos de reanálisis como los de ERA5, donde los parámetros de salida del modelo permitan analizar el comportamiento de la recarga de acuíferos relacionado a los datos históricos de flujo base. De acuerdo con lo anterior, se ha elaborado un diseño metodológico en tres fases relacionadas a continuación:

- Obtener información hidrometeorológica de entrada para la herramienta WEAP y de sensores remotos para el análisis preliminar de la cuenca alta del río Ariporo.
- Construir un modelo hidrológico calibrado utilizando WEAP para la cuenca del río Ariporo delimitada hasta el punto de medición de caudal del IDEAM.
- Analizar el cambio en la recarga de acuíferos de la cuenca alta del río Ariporo mediante el modelo de dos tanques de WEAP

Al realizar un análisis de los resultados del modelo se pudo comprobar que las sequías extremas, como la registrada en el año 2014, fue ocasionada por una disminución en la lluvia. Según los datos arrojados por el modelo de dos tanques de WEAP, el tiempo del pico

del hidrograma del flujo base se desplaza en tres meses con respecto al pico del hidrograma de lluvia. Este desplazamiento puede deberse al tiempo de recorrido o desplazamiento en el acuífero y en salir a la superficie. Se concluye, que después de un periodo de dos meses de ausencia de precipitación, se minimiza el aporte de flujo base al río Ariporo. Al no existir aporte del flujo base ni lluvia para abastecer los sitios de abastecimiento de agua superficial, la sequía se vuelve extrema, situación que debe analizarse para planear estrategias de prevención de vulnerabilidad a la sequía. Si se logra planear usos del suelo en la cuenca, estableciendo proyectos productivos agropecuarios que maximicen la recarga de los acuíferos en la temporada de lluvia en sitios donde el tipo de suelo sea de granulometría media y gruesa para maximizar la infiltración según los mapas de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Se sugiere en fases posteriores al presente estudio mejorar el modelo incluyéndole los procesos físicos, esto se logra dividiéndolo en subcuencas, estudiar el flujo subsuperficial con isotopos y tener las capas geológicas del subsuelo. Al incluir esta información y características dentro de la herramienta WEAP es posible realizar un enlace para el flujo en medios porosos con Modflow que si tendrá en cuenta los procesos físicos.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
RESUMEN.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
1. CAPITULO I.....	15
INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Pregunta de investigación.....	16
1.1.1 Pregunta.....	16
1.1.2 Hipótesis.....	16
1.2 Situación problema.....	16
1.3 Justificación.....	19
1.4 OBJETIVOS.....	20
1.4.1 Objetivo general.....	20
1.4.2 Objetivos específicos.....	20
2.CAPÍTULO II.....	21
MARCO TEORICO.....	21
2.1. Influencia de la cobertura del suelo sobre la recarga de acuíferos.....	21
2.2. Influencia de los datos de lluvia y cobertura sobre la recarga de acuíferos.....	23
2.3. Teoría sobre la recarga de acuíferos.....	24
2.4. Datos a utilizar como entrada para el modelo hidrológico calibrado.....	28
2.5. Criterios de selección para herramientas de modelación.....	31
2.6. Calibración del Modelo hidrológico en WEAP.....	32



2.6.1. Modelo denominado “humedad de suelo” de WEAP: .....	35
3.CAPÍTULO III .....	41
ESTADO DEL ARTE.....	41
3.1. Descripción de los estudios de caso .....	41
3.1.1. Inteligencia geoespacial-temporal para la Agricultura Inteligente y Sistemas Eco-Física Ambiental Cibernética, (Babak Majidi, Omid Hemmati, Faezeh Baniardalan, Hamid Farahmand, Alireza Hajitabar, Shahab Sharafi, Khadije Aghajani, Amir Esmaeili, and Mohammad Taghi Manzuri, 2021). .....	41
3.1.2. Evaluación de las presas de recarga artificial y la mejora de la capacidad de recarga de las aguas subterráneas (Mohammadzadeh-Habili & Khalili, 2020).....	42
3.1.3. Multiobjective Optimization for Water Resource Management in Low-Flow Areas Based on a Coupled Surface Water–Groundwater Model (Zeinali et al., 2020). .....	44
3.1.4. Preliminary research and application of MIKE SHE model in Jialingjiang (Zhang et al., 2019) River Basin. ....	44
3.1.5. Jiboa River, adaptación del concepto semi distribuido del modelo HBV (Farrag M, Pérez G, Solomatine D, 2019). ....	45
3.1.6. Effects of land use on groundwater recharge of a loess terrace under long-term irrigation (Xu et al., 2021). ....	47
3.1.7. A sustainable agricultural landscape model for tropical drylands (Araujo et al., 2021). ....	48
3.1.8. Spatio temporal visualization of soil critical sources areas to assess the dynamics of source pollution in agricultural management practices. (Natalia Uribe and Gerald, A Corzo P, 2020).....	49
3.1.9. Impact of conservation tillage on nitrogen and phosphorus runoff losses in a potato crop system in Fuquene watershed, Colombia (Uribe et al., 2018). ....	49
4. CAPÍTULO IV .....	51
4.METODOLOGÍA.....	51
5. CAPÍTULO V.....	57
5.ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	57
5.1. Fase 1. Recopilar información hidrometeorológica de entrada para la herramienta WEAP y de sensores remotos para el análisis preliminar de la cuenca alta del río Ariporo.....	57
5.1.1. Análisis de la cobertura del suelo .....	58
5.1.2. Análisis de datos de lluvia:.....	62
5.1.3. Análisis de datos de caudal. ....	74

5.1.4. Análisis de datos de temperatura .....	75
5.1.5. Análisis de datos de evaporación potencial .....	77
5.1.6. Perfil de elevaciones del cauce principal del río Ariporo:.....	80
5.2. Construcción y calibración del modelo hidrológico en WEAP .....	81
5.2.1 Resultados del modelo hidrológico de humedad de suelo en WEAP con las variables de decisión o parámetros sin calibrar.....	81
5.2.2. Calibración del modelo hidrológico de humedad de suelo con los datos de caudal IDEAM del río Ariporo .....	85
6. CAPITULO VI .....	108
6.CONCLUSIONES .....	108
6.2 RECOMENDACIONES .....	109
7. CAPITULO VIII .....	111
7.BIBLIOGRAFÍA.....	111
8. CAPITULO IX .....	113
8. Anexos .....	113
8.1. Antecedentes de la exploración petrolera en la cuenca.....	113
8.2. Antecedentes y teorías sobre los sistemas de producción agropecuaria.....	113
8.3 Descripción detallada de los VAC systems .....	116
8.4. Métodos de estimación en campo de la recarga de acuíferos.....	118
8.5 Tipos de modelos.....	119
8.6 Mapa de coberturas año 2001 .....	121
8.7 Mapa de coberturas año 2019.....	122
8.8 Máximos diarios estaciones de lluvia .....	123
8.9 Pantallazo del modelo en WEAP .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de uso del suelo Qswat plus y MCD12Q1.006 MODIS Land Cover Type Yearly Global 500m para los años 2001 y 2019.....	60
Tabla 2. Magnitudes para precipitación, flujo base y caudal .....	97
Tabla 3. Análisis de datos de precipitación, caudal y flujo base .....	98

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Costos de bombeo en pesos colombianos. Fuente: (Maldonado, 2021) .....	18
Figura 2 Diagrama de Causas y Efectos. Fuente: Adaptado de Coats 1996.....	24
Figura 3 Agua subterránea, zona saturada y zona no saturada. Fuente: (Dassargues, 2019). .....	26
Figura 4 Modelo de 2 tanques WEAP. Fuente: (Stockholm Environment Institute, 2021). 39	
Figura 5 Metodología. Fuente: Autor.....	53
Figura 6 Interfaz WEAP, cuenca y ubicación estaciones IDEAM .....	54
Figura 7 Entradas para la herramienta WEAP. ....	55
Figura 8 Georreferenciación de la cuenca del Rio Ariporo. Fuente: Propia. ....	57
Figura 9 Uso de suelo en el Municipio de Hato Corozal DANE 3cer Censo Nacional Agropecuario 2014. Fuente:(DANE, 2020).....	59
Figura 10 Grupos texturales de suelos cuenca alta del rio Ariporo: Fuente: IGAC .....	62
Figura 11 Comportamiento de la lluvia anual en las estaciones 36010030 y 36015010 de IDEAM en milímetros anuales desde el año 1996 hasta el año 2019. Fuente: IDEAM.....	63
Figura 12 Gráfico de datos existentes de precipitación diaria estaciones IDEAM. Fuente: IDEAM .....	65
Figura 13 Gráfico de datos existentes de lluvia diaria. Estaciones IDEAM. Fuente: Propia .....	66
Figura 14 Gráfico de datos existentes de caudal medio diario en metros cúbicos por segundo. Estación Paz de Ariporo IDEAM. Fuente: Propia.....	66
Figura 15 Precipitación anual en las estaciones de lluvia. Fuente: propia.....	67
Figura 16 Precipitación multianual promedio diaria de las estaciones de lluvia. Fuente: propia. ....	68
Figura 17 Correlación Pearson entre estaciones. Fuente: propia.....	69
Figura 18 Precipitación ERA5 Valor medio diario en metros 1996-2021 Fuente: ERA5... 70	
Figura 19 Precipitación diaria en milímetros 1996-2021 Fuente: ERA5 .....	71
Figura 20 Precipitación promedio diaria en milímetros al mes 1996-2021 Fuente: ERA5 72	
Figura 21 Precipitación en milímetros diarios promedio anual 1996-2021 Fuente: ERA5 73	
Figura 22 Datos disponibles caudal medio mensual Estación IDEAM 36017010 Paz de Ariporo (Latitud 5.906555556, longitud -71.90238889). ....	74
Figura 23 Temperatura media diaria en grados Celsius 1996-2021 Fuente: ERA5.....	75

Figura 24 Temperatura media diaria mensual 1996-2021 Fuente: ERA5.....	76
Figura 25 Temperatura media diaria anual 1996-2021 Fuente: ERA5 .....	77
Figura 26 Evaporación potencial diaria mensual en milímetros Fuente: ERA5.....	78
Figura 27 Evaporación potencial promedio diaria mensual en milímetros 1996-2021 Fuente:ERA5 .....	79
Figura 28 Evaporación potencial en milímetros promedio anual diario 1996-2021 Fuente:ERA5 .....	80
Figura 29 Perfil del rio. Fuente: propia .....	81
Figura 30 Caudal IDEAM y Caudal modelado en WEAP sin calibrar en m3/s. Fuente: propia. ....	84
Figura 31 Volumen de precipitación mensual multianual Cuenca Alta Rio Ariporo en litros .....	88
Figura 32 Caudal medido IDEAM y caudal simulado en WEAP en metros cúbicos por segundo.....	91
Figura 33 Entradas y salidas herramienta WEAP m3/s mensual multianual Calibrado. Fuente: propia.....	93
Figura 34 Entradas y salidas herramienta WEAP milímetros anuales periodo Calibrado. Fuente: propia.....	94
Figura 35 Flujo base calibrado en m3/s mensual multianual, cuenca alta del rio Ariporo. Fuente: propia.....	95
Figura 36 Flujo base anual cuenca Alta Rio Ariporo .....	96
Figura 37 Análisis de precipitación, flujo base y caudal de los datos organizados de menor a mayor desde 1 hasta 12 mensuales multianuales.....	99
Figura 38 Precipitación mensual en mm Cuenca Alta Rio Ariporo .....	101
Figura 39 Caudal total anual en m3/s Ariporo .....	102
Figura 40 Caudal mensual multianual Ariporo m3/s.....	103
Figura 41 Flujo base Cuenca Alta Rio Ariporo .....	104
Figura 42 Estadística de los datos de salida de Caudal resultado de la herramienta WEAP .....	105
Figura 43 Porcentaje en relación a la precipitación de los resultados del modelo hidrológico WEAP.....	107
Figura 44 VAC System con especies de Casanare Colombia. Fuente: (Forero G.A. 2013). ....	117

Figura 45 Mapa de Cobertura Cuenca Alta rio Ariporo año 2001 .....	121
Figura 46 Mapa de Cobertura Cuenca Alta rio Ariporo año 2019.....	122
Figura 47 Máximos diarios estaciones de lluvia cuenca alta Rio Ariporo.....	123
Figura 48 Pantallazo de la herramienta WEAP .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

# 1. CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

Colombia es un país con una variabilidad climática importante en la medida que está influenciado por los movimientos del vapor de agua procedentes del océano atlántico, el océano pacífico y el Amazonas. La lluvia anual en el país puede variar desde los 8000 milímetros en Chocó hasta los 400 milímetros en Santa Marta, razón por la que se hace necesario hacer análisis con datos históricos del área de trabajo para poder plantear soluciones a la medida del área de estudio.

La cuenca alta del río Ariporo está dedicada a la producción agropecuaria, donde existen limitantes en la producción de biomasa en un lapso largo de tiempo de aproximadamente 5 meses al año. Los excesos de lluvia generan condiciones de inundación y la ausencia prolongada de lluvia genera sequía disminuyendo la producción que a su vez ocasiona pérdidas para los productores.

Además de las pérdidas generadas por el clima, otro factor externo que ocasiona un aumento de los costos de producción de alimentos es el uso de pozos subterráneos utilizando sistemas de bombeo alimentados con combustible fósil. Desde el año 2012 se hizo necesario construir estos pozos para evitar la muerte de animales o cultivos por extrema sequía. Consecuentemente, en el presente trabajo se analiza la historia hidrológica de la región para establecer las causas y planear soluciones partiendo de los datos de un modelo calibrado de dos tanques de WEAP.

Se elaboró entonces para tal fin, un modelo de dos tanques en la herramienta computacional WEAP, cuyos datos de entrada fueron descargados de ERA5, los datos son mensuales promedio. Los datos de ERA 5 están distribuidos en espacio y tiempo, razón por la que representan una ventaja frente a los datos IDEAM. Las variables descargadas de ERA5, datos usados como entrada para el modelo fueron los de precipitación, velocidad del viento, evapotranspiración y humedad relativa desde el año 1996 hasta el año 2020. Este modelo permite tener una aproximación a la interconexión entre los datos de lluvia, evaporación, Inter flujo, flujo base y caudal sin tener en cuenta procesos físicos.

## **1.1 Pregunta de investigación**

### **1.1.1 Pregunta**

¿Cómo es el desempeño de un modelo de tanques en WEAP, utilizando datos ERA5 para analizar el cambio histórico en la recarga de acuíferos en la cuenca alta del río Ariporo?

### **1.1.2 Hipótesis.**

El aumento de las sequías en la cuenca alta del río Ariporo, provocó desde el año 2012 un incremento en la perforación de pozos subterráneos para el abastecimiento de las actividades agropecuarias. El aumento en número de pozos requiere cuantiosas inversiones para el bombeo de agua subterránea en la temporada de estiaje.

El aumento de las sequías puede deberse a una disminución en la lluvia, que causa una baja disponibilidad de agua superficial, principal causante de utilizar agua subterránea para el abastecimiento, de manera que hay que corroborar con el análisis de datos y los resultados de un modelo hidrológico.

## **1.2 Situación problema**

En la cuenca del río Ariporo, se identificó que durante la temporada de estiaje el abastecimiento de sistemas agropecuarios se da en un 100% con pozos de agua subterránea con un alto consumo energético, según lo recopilado en el relato de Olegario Maldonado, habitante de la región por más de 50 años. (Maldonado, 2021)

Para el diagnóstico de lo que puede estar sucediendo se requiere de un modelo que muestre el cambio en la recarga de acuíferos y el balance hidrológico general a lo largo del tiempo. Sin embargo, en la actualidad no existe un modelo para la región de estudio con datos recopilados en campo, de reanálisis o con datos históricos climáticos de entrada del modelo como son los datos de (lluvia, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura), donde el modelo arroja como salidas, variables hidrológicas que permiten el

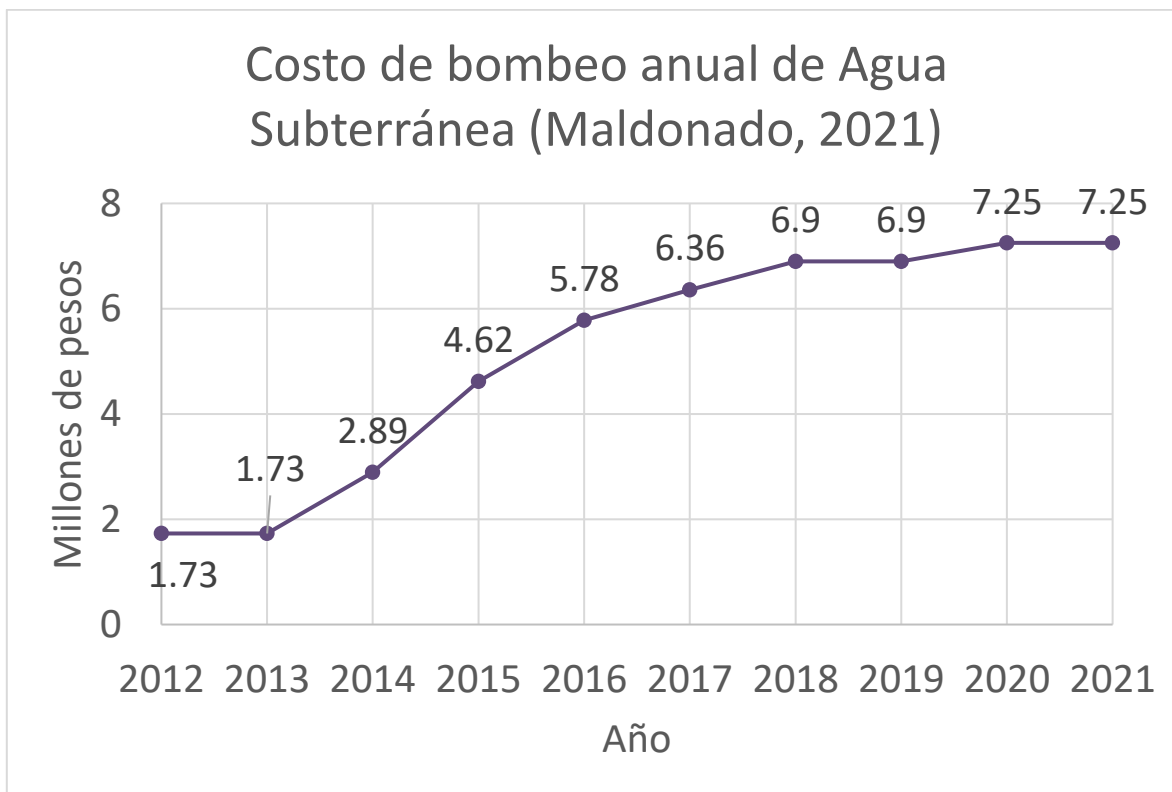


análisis hidrológico de la región como son (Caudal, Inter Flujo, Flujo base y evapotranspiración) dentro de un balance hídrico, con el fin de entender y analizar el cambio en la recarga del acuífero en una ventana temporal de 23 años para la cuenca alta del río Ariporo.

Se requiere entender la variación de la recarga para definir los siguientes posibles escenarios que se pueden estar presentando en la cuenca:

- Si la recarga ha variado muy poco a lo largo del tiempo, lo que se evidencia en el aporte del flujo base al río, significa que, si existen problemas de sequía, estos se deben a que la cantidad de agua que se está extrayendo es mayor a la tasa de recarga del acuífero.
- Si, por el contrario, la cantidad de agua que se extrae es la misma históricamente y la recarga es la misma, es decir el flujo base es estable históricamente, debido a que existen variables externas que interfieren.

Se realizó una gráfica de los costos históricos de bombeo en un predio de la región, teniendo en cuenta el precio del combustible y la cantidad de pozos subterráneos construidos desde el año 2012. En el predio, en el año 2012 no existían pozos subterráneos mientras en el 2021 termina con 9 pozos subterráneos de agua, aumentando significativamente los costos de operación anuales, situación representada en la Figura 1.



*Figura 1 Costos de bombeo en pesos colombianos. Fuente: (Maldonado, 2021)*

*“La región es ganadera y allí los animales se abastecen de agua subterránea desde el mes de noviembre hasta finales de marzo, siendo esta la principal causa del aumento en el uso de agua subterránea en los últimos 10 años” (Maldonado, 2021)*

La cuenca del río Ariporo, al tener zonas de planicies o llanuras, facilitan la ganadería extensiva, por lo que se ha sustituido el bosque por pasturas, generando una creciente demanda de agua para dichas actividades productivas.

En la región en los últimos 10 años, las sequías e inundaciones son cada vez más prolongadas y frecuentes, según lo relatado por Olegario Maldonado. Para corroborar este relato, se analizaron los datos de ERA5 de temperatura, lluvia y evapotranspiración para analizar históricamente los datos en el capítulo de análisis de resultados. Como se ha mencionado, se hace necesario tener un modelo que permita observar cambios, brindar tendencias e indicar si es sostenible o no el uso del agua actual en la cuenca alta del río Ariporo.

### 1.3 Justificación

La sequía en la cuenca alta del río Ariporo es cada año más extrema, tanto así que provocó desde el año 2012 un aumento en la perforación de pozos subterráneos para el abastecimiento de las actividades agropecuarias. Se requiere, por tal razón construir un modelo calibrado que permita entender el comportamiento hidrológico de la zona de estudio para analizar la situación.

Hay una ausencia de datos de recarga y descarga de acuíferos y se busca entender mejor el balance hídrico en la cuenca alta del río Ariporo para saber cómo ha cambiado la recarga del acuífero a lo largo del tiempo.

No se cuenta con datos de (consumo de agua, evapotranspiración, aumento y disminución de humedad del suelo, recarga y descarga de acuíferos, flujo base, inter flujo, caudal, cambio en la cobertura del suelo, cambios en la precipitación, perfiles geológicos, efectos de la exploración sísmica) por lo tanto no se saben las causas de la sequía o si el consumo de agua actual es sostenible en el tiempo.

Como un análisis inicial se plantearon las siguientes premisas que pueden ser posibles causas de esta creciente demanda de agua subterránea:

- La disminución en la lluvia causa una disminución en el agua superficial y por esta razón hay que utilizar agua subterránea.
- La impermeabilización de la superficie del suelo no permite una adecuada recarga de acuíferos subterráneos que son los que alimentan a los reservorios superficiales en la temporada de estiaje.
- Los cambios históricos en la cobertura causan una disminución en la recarga de acuíferos subterráneos y por tanto no existe agua superficial en la temporada de sequia
- Los procesos llevados a cabo en la exploración sísmica en el año 2012 ocasionaron la fractura de los acuíferos subterráneos profundizando el agua subterránea quedando no accesible para raíces y animales en la temporada de sequía. (**Esta**

**opción no es posible de analizar por la ausencia de datos de los acuíferos antes y después de la exploración para poder hacer un contraste)**

Para poder analizar la situación, se debe construir un modelo calibrado del sistema hidrológico que describa con un mayor detalle el comportamiento histórico de los parámetros hidrológicos de la cuenca alta del río Ariporo en una ventana de tiempo de más de 20 años.

Una de las principales recomendaciones al terminar el presente trabajo de grado, con la finalidad de incluir dentro del modelo hidrológico los procesos físicos, es realizar un diagnóstico hidrológico de la cuenca alta del río Ariporo utilizando isotopos. Este diagnóstico puede ser utilizado para tener una trazabilidad del tiempo de recorrido del agua subterránea hasta salir al río, de manera que sea posible conocer los tiempos de salida acorde a la geología, litología, pendiente y demás variables que influyen en el recorrido del agua subsuperficial. Con este diagnóstico, es posible tener una mayor certeza en los procesos hidrogeológicos. En el presente trabajo se utilizó la herramienta WEAP configurada de una manera que no permite tener en cuenta variables físicas como la pendiente del terreno y su influencia en las velocidades de respuesta del agua lluvia en la cuenca, la geología de la parte subterránea de la región (datos no existen o no están disponibles). El modelo de dos tanques utilizado en el presente trabajo con la herramienta WEAP, solo permite realizar una aproximación inicial a los procesos de interconexión entre los datos de lluvia, caudal y evapotranspiración. Si se requiere de un mayor detalle en el modelado, cuando se tenga acceso a la información geológica, la herramienta WEAP permite realizar una conexión la herramienta Modflow, herramienta que permite realizar la simulación de procesos de transporte de agua subterránea en medios porosos utilizando un modelo matemático basado en diferencias finitas.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo general.**

Analizar la recarga de acuíferos de la cuenca alta del río Ariporo mediante un modelo de dos tanques en WEAP sin tener en cuenta los procesos físicos.

### **1.4.2 Objetivos específicos.**

- Recopilar información hidrometeorológica de entrada para la herramienta WEAP y de sensores remotos para el análisis preliminar de la cuenca alta del río Ariporo.
- Construir un modelo hidrológico calibrado utilizando WEAP para la cuenca alta del río Ariporo a la altura del punto de medición de caudal del IDEAM.
- Analizar la recarga de acuíferos de la cuenca alta del río Ariporo mediante los resultados del modelo de dos tanques de WEAP sin tener en cuenta los procesos físicos.

## 2.CAPÍTULO II

### MARCO TEORICO

#### 2.1. Influencia de la cobertura del suelo sobre la recarga de acuíferos

Al revisar un estudio respecto al cambio de cobertura en el suelo en relación a la recarga de agua subterránea, se hace mención que *“las especies de árboles maderables presentan una mayor tasa de evapotranspiración frente a otras especies”*. (Coats, 1996). La relación entre la evapotranspiración y la recarga de acuíferos, se da en la medida que durante el proceso de evapotranspiración la raíz se enfría, ocasionando que *“el árbol actúe como un sistema de refrigeración para el subsuelo cercano a las raíces”*. (Coats, 1996). *“Cuando el suelo cercano a las raíces está más frío que la temperatura del agua lluvia, aumenta la infiltración y por ende la recarga del acuífero subterráneo”* (Coats, 1996).

A mayor cobertura de árboles mayor recarga de acuíferos. Al revisar los datos de deforestación de Colombia, en promedio 162.571 Hectáreas al año son taladas (Ideam, 2020).

Según esta teoría, si se requiere aumentar la recarga de agua subterránea es pertinente planificar la recarga de acuíferos estableciendo zonas protegidas con la siembra de especies maderables nativas para aumentar la infiltración de agua lluvia en zonas estratégicas de las cuencas, teniendo en cuenta la geología y granulometría. (Coats, 1996)

Al plantear 4 efectos del cambio de cobertura desde arboles a pasturas o cultivos con sus posibles causas según la literatura quedan planteados los siguientes:

- **Prolongación de la época de sequía:** Es ocasionada por la disminución de vapor de agua disponible para generar agua lluvia en la atmósfera. La cantidad de vapor disminuye por la pérdida de agua efecto de la transpiración de los árboles. *“Al quitar un árbol tropical, se pierden 600 litros de agua transpirada en un día por cada árbol, que supone una pérdida de lluvia en la misma medida”.* (Coats, 1996).
- **Pérdida de agua líquida en la zona de lluvia vía escurrimiento superficial:** En un suelo sin vegetación hay un incremento en la velocidad de flujo del agua, por lo tanto, un mayor caudal de escurrimiento, quedando el agua líquida disponible para evaporarse de nuevo, pero en zonas alejadas de su sitio de precipitación. (Coats, 1996).
- **Disminución de la disponibilidad de agua superficial en los ríos en temporada de estiaje:** Esta disminución es causada por la baja eficiencia en el proceso de recarga de agua subterránea. Si no existe agua subterránea suficiente, el flujo base disminuye llegando en una menor cantidad a los sitios de descarga hacia ríos o humedales generando sequias más prolongadas. Si no hay agua subterránea, no se pueden alimentar ríos, humedales y plantas en la temporada de estiaje. (Coats, 1996).
- **Crecientes súbitas en la temporada de lluvia:** La principal causa es el transporte superficial de grandes cantidades a una velocidad alta en el área aferente de la cuenca. El aumento de la cantidad de agua superficial es ocasionado por la disminución del porcentaje de agua lluvia que se infiltra hacia el subsuelo. Al cambiar la cobertura desde árboles a pastura o cultivos disminuye la infiltración de agua en el suelo generando crecientes súbitas. (Coats, 1996).

El presente trabajo de grado pretende realizar una aproximación a la conexión entre los datos de cambio en la cobertura del suelo con los valores extremos cada año más visibles en el área de estudio como son la inundación y sequía, basado en un modelo de dos tanques, datos hidrometeorológicos y sensores remotos.

## **2.2. Influencia de los datos de lluvia y cobertura sobre la recarga de acuíferos**

El agua lluvia, alguna vez fue agua en forma de vapor, cuya fuente es la transpiración de las plantas o la evaporación directa del agua en la superficie. Al hacer un ejercicio teórico de realizar la sustitución una cantidad de 100 árboles tropicales dentro de 1 Hectárea de terreno, suponiendo "*para cada árbol tropical un aporte de 600 litros de agua transpirada por día por árbol*" (Coats, 1996), los árboles aportarían alrededor de 21'900.000 litros de agua al año para esa misma Hectárea.

Estos 21'900.000 de litros disponibles en la atmósfera estarían disponibles para poder caer como agua lluvia nuevamente. Al talar los arboles de la cuenca, esta cantidad de vapor de agua que puede volverse lluvia deja de estar disponible.

Basado en lo anteriormente descrito, se puede concluir que el cambio en la cobertura de árboles a cultivos o pasturas, ocasiona la pérdida de agua lluvia, razón por la que la inclusión de la siembra de árboles maderables nativos en la cuenca es indispensable para aumentar la transpiración de agua para la generación de lluvia y potencializar el proceso de infiltración y recarga a los acuíferos por el efecto del enfriamiento del suelo por parte de las raíces como se vio con anterioridad.

A continuación, se presenta en la figura 2, se muestra un diagrama de causas y efectos, donde las causas se encuentran dentro de los recuadros azules y los efectos dentro del círculo central.



Figura 2 Diagrama de Causas y Efectos. Fuente: Adaptado de Coats 1996.

### 2.3. Teoría sobre la recarga de acuíferos

El agua subsuperficial o subterránea, es el agua presente en poros, espacios y fracturas del medio geológico. La porción de la litosfera, donde poros, espacios y fracturas están totalmente llenos de agua, se le llama zona saturada. Por encima de la zona saturada, existe una zona que todavía tiene aire en esos poros, espacios y fracturas, es la zona de la humedad del suelo, zona de raíces. Esta zona para el modelo de WEAP se denomina Inter flujo. Una franja capilar también está presente dentro de los estratos anteriormente mencionados, donde las fuerzas capilares superan el valor de la gravedad, esta fuerza capilar es mayor en la medida que los poros se hacen más pequeños y uniformes.

Zona no Saturada: La humedad llega hasta cierto punto, aún hay aire en los poros del suelo, por lo general es donde está la vegetación, en el modelo de humedad del suelo de WEAP se denomina Inter flujo a la salida de agua desde la zona de las raíces ubicada en el primer tanque hacia la escorrentía superficial.

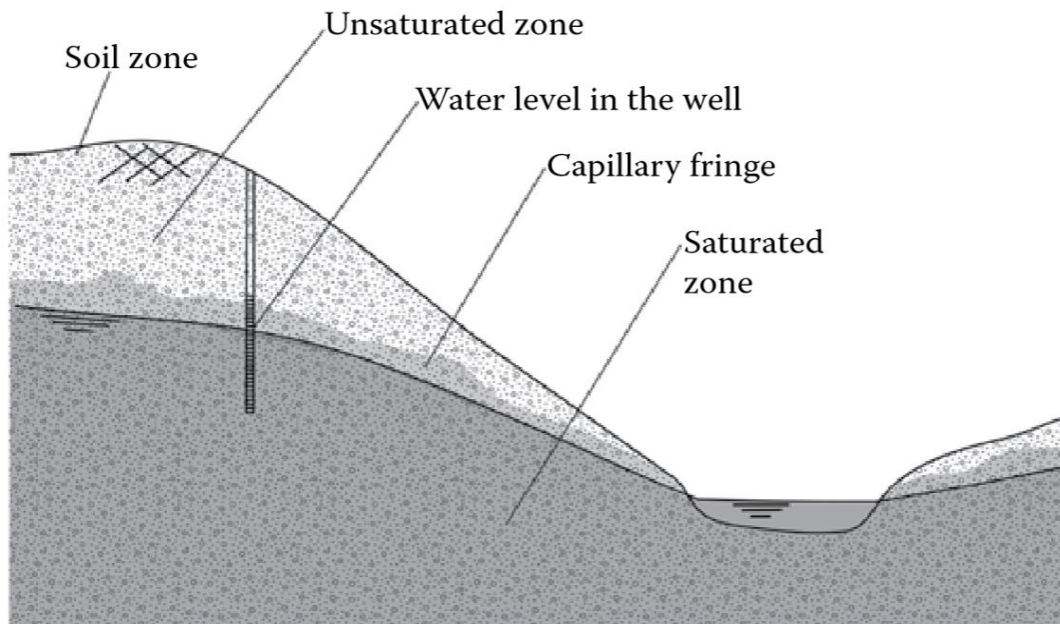


Zona saturada: Los poros del suelo están llenos de agua, es el sitio de almacenamiento en las profundidades, no hay aire ni vegetación, todo está lleno de agua, allí se da un almacenamiento de agua y el flujo de salida de agua desde esta parte subterránea a la superficie se denomina flujo base en la herramienta WEAP.

La recarga del acuífero es parte del agua lluvia que se infiltra. La recarga continua a través del suelo a llegar a la parte saturada donde se recarga el agua subterránea, después de esto se dan fenómenos de transporte que llegan a la descarga del agua a una fuente superficial, ríos, humedales, entre otros, estas descargas dependiendo de la profundidad donde se da, puede ser Inter flujo si es en la zona de las raíces o flujo base si es en la zona más profunda.

La recarga de acuíferos se puede dar en distintos puntos y varía de acuerdo con las capas por donde debe fluir. El nivel freático recibe filtración de precipitaciones reponiendo su nivel que varía con las descargas a fuentes superficiales o usos humanos. La dinámica de recarga y descarga depende de factores geológicos, topográficos y humanos que dan la extensión y velocidad de recarga del acuífero. (Betsy Romero (Gidahatari), 2020)

Las rocas tienen porosidad y permeabilidad, estos factores varían en áreas locales dependiendo de las condiciones del sistema variando las condiciones de flujo del agua en el mismo, variables representadas en la conductividad de los tanques en la herramienta WEAP.



*Figura 3 Agua subterránea, zona saturada y zona no saturada. Fuente: (Dassargues, 2019).*

Si se realizara un balance de materia con el agua en el planeta, la cantidad del líquido existente en la tierra es de 1.3 millones de  $[km]^3$ . De este porcentaje, más del 95% es agua de mar, otros tipos de agua salada en lagos o en profundidades representan otro 0.96%. Esto nos indica que únicamente un 2.54% es agua dulce. Si se sustrae de allí, el 1.75% de agua dulce contenida en glaciares y hielos, vapor en la atmosfera y humedad del suelo de 0.02%, el remanente es de 0.77% de agua dulce en la tierra "Utilizable fácilmente". De este 0.77%, tan solo 0.01% proviene de ríos y lagos, en otras palabras, la relación entre agua subterránea y agua superficial es de 77 a 1 respectivamente (Dassargues, 2019).

Esta proporción de 77 veces agua subterránea a 1 vez el agua superficial, nos indica que el agua potable está cada vez más escasa y se hace necesario tener modelos locales para entender lo que sucede para establecer unas reglas de uso sostenible del agua superficial y subterránea de manera que el recurso perdure en el tiempo.

Globalmente, la evaporación es mayor que la precipitación en la superficie o el océano (Mays, 2019). Por esta razón, la atmosfera transporta el vapor de agua desde el océano a los continentes. El agua que cae en la superficie como agua, debería devolverse a la atmosfera a través de los procesos de evaporación y transpiración. El agua que penetra en el suelo fluye en las profundidades del suelo generando la recarga de agua subterránea, que no es consumida por plantas o animales. (Mays, 2019)

Esta recarga de agua puede obtenerse por ríos, canales, excesos de irrigación, y reservorios hechos para recarga artificial de agua subterránea. El agua, dentro del subsuelo puede fluir por grandes distancias antes de salir nuevamente a la superficie del suelo, en forma de nacimientos, humedales, ríos, lagos o directamente al mar. Las formaciones geológicas, pueden comportarse de variadas maneras, siendo relativas a la transmisividad o almacenamiento de agua, de esta forma, el agua subterránea es de suma importancia para el abastecimiento de ríos, humedales, lagos, nacimientos de agua, entre otros, en la temporada de estiaje. (Mays, 2019):

El presente estudio, pretende entonces mediante la herramienta de modelación WEAP realizar un modelo que contiene un balance de masa entre el agua que se precipita, relacionado con las variables climatológicas para dar como resultado un caudal y un flujo base, estos datos se analizarán para dar un concepto de lo que ha sucedido en el tiempo con la cuenca alta del río Ariporo, para saber si el uso actual del agua es sostenible en el tiempo, es decir, si la tasa de recarga es menor a la tasa de extracción de agua.

Existen métodos de medición en campo de la recarga de agua subterránea descritos en el anexo 9.5, estos permiten obtener los datos necesarios para calibrar un modelo numérico subterráneo. La cuenca del río Ariporo, al ser un área rural poco especializada en dichas técnicas no tienen los datos de campo ni la experiencia en realizar estas mediciones, por lo cual es necesario buscar la manera de obtener datos para poder hacer un análisis de las interacciones del agua lluvia con el agua subterránea mediante los resultados para lo que se utilizó el modelo de dos tanques de WEAP calibrado con los datos de medición de caudal IDEAM, este modelo no tiene en cuenta los procesos físicos como se mencionó con anterioridad.

#### **2.4. Datos a utilizar como entrada para el modelo hidrológico calibrado**

Si se cuenta con un modelo hidrológico calibrado, se puede utilizar en el futuro dicha información para establecer reglas de operación que optimicen el uso de agua. El primer paso, consiste en obtener datos y entender la hidrología de la cuenca, que es lo que pretende el presente estudio. (Amaranto et al., 2018)

Para la construcción del modelo hidrológico de una cuenca, los datos son de suma importancia. En Colombia, los datos de las estaciones hidrometeorológicas de las corporaciones autónomas regionales o del IDEAM se encuentran en una ubicación puntual. Para el caso de la cuenca de estudio, las estaciones de medición IDEAM se encuentran por fuera de la cuenca, esto representa un problema cuando se requiere estimar los datos del clima dentro del área de la cuenca, ya que las ubicaciones geográficas fuera de la cuenca no representan la realidad de los datos de precipitación dentro de la cuenca, obligando al modelador a realizar interpolaciones de datos y otros métodos para estimar los datos de lluvia generando una gran incertidumbre en los datos de entrada del modelo y por tanto en sus resultados. Para la cuenca alta del río Ariporo, se hace necesario conocer cómo cambian los datos de (precipitación, evapotranspiración, velocidad del viento, humedad relativa) en diferentes puntos de la cuenca distribuidos en espacio y tiempo. Para poder tener en cuenta esta variabilidad, se utilizaron los datos de ERA5 como entrada de datos climatológicos, no solo por tener la variabilidad de espacio y tiempo si no porque las series se encuentran completas para más de 20 años en toda el área de estudio, mientras que los datos IDEAM no se encuentran completos en el histórico o no se encuentran, y la poca información existente se encuentra por fuera de los límites de la cuenca.

ERA5, hace parte de un set de datos del (ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) o Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo. ECMWF, es un instituto de investigación con un servicio operativo 24 horas al día, 7 días a la semana, y produce predicciones meteorológicas numéricas globales y otros datos para Estados Miembros, Estados Cooperantes y la comunidad en general. El Centro tiene una de las instalaciones de supercomputadoras y archivos de datos meteorológicos más grandes del mundo. (ECMWF, 2021)

ERA5, son datos corregidos y validados con las estaciones de tierra y distribuidos en el espacio y tiempo, de manera que es posible tener más información que la aportada por del IDEAM o las corporaciones nacionales de manera gratuita, con la ventaja que tienen una validación con los datos en tierra, aportando información valiosa para cualquier proyecto de ingeniería.

La información importante para la herramienta computacional WEAP, es la de (evapotranspiración, precipitación, temperatura y velocidad del viento), información que se puede leer directamente en WEAP dentro de un archivo comprimido de tipo NetCDF. Esta es la información de entrada para el modelo de humedad del suelo de la herramienta computacional WEAP, lo cual se explicará en detalle en capítulos posteriores.

La herramienta utilizada WEAP, permite la lectura directa de los datos climáticos descargados de ERA5, que son datos de tipo malla, los cuales cuentan con geo referenciación y fecha. Esta una ventaja importante del software WEAP sobre otras herramientas hidrológicas computacionales. Para el presente estudio, se descargaron los datos desde ECMWF de ERA5 de la cuenca alta del río Ariporo ingresando las coordenadas, descargando los datos mensuales promedio de (evapotranspiración, precipitación, temperatura y velocidad del viento), esta descarga se realiza desde el portal de COPERNICUS, donde se ingresa el tipo de datos que se quieren descargar, las variables requeridas y el área en la que se requiere descargar dicha información. Estos datos se descargan en una extensión de tipo NetCDF, que WEAP los lee directamente. Al leerlos WEAP, es posible realizarles una conversión en las unidades debido a que originalmente están en grados Kelvin y en metros por lo que hay que convertir a milímetros y grados Celsius de manera manual, debido a que en estas unidades la herramienta WEAP los solicita.

ECMWF, tiene dos servicios del programa de observación de la Tierra Copernicus de la Unión Europea, uno es el Servicio de Monitoreo de la Atmósfera de Copernicus (CAMS) y el otro es el Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S). También contribuye al Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus (CEMS). (ECMWF, 2021)

ERA5 es el reanálisis del ECMWF de quinta generación para el clima y el tiempo global durante las últimas 4 a 7 décadas. Actualmente, los datos están disponibles desde 1950, divididos en entradas de Climate Data Store para 1950-1978 (extensión posterior

preliminar) y desde 1979 en adelante (versión final más actualizaciones oportunas). (ECMWF, 2021)

El reanálisis combina datos de modelos con observaciones de todo el mundo en un conjunto de datos globalmente completo y consistente que utiliza las leyes de la física. Este principio, llamado asimilación de datos, se basa en el método utilizado por los centros de predicción numérica del tiempo, en el que cada hora 12 horas en el ECMWF se combina un pronóstico anterior con observaciones recientemente disponibles de una manera óptima para producir una nueva mejor estimación del estado de la atmósfera, denominado análisis, a partir del cual se emite un pronóstico mejorado y actualizado. El reanálisis funciona de la misma manera, pero a una resolución reducida para permitir la provisión de un conjunto de datos que se remonta a varias décadas atrás. El reanálisis no tiene la restricción de emitir pronósticos oportunos, por lo que hay más tiempo para recopilar observaciones cuando se retrocede en el tiempo. (ECMWF, 2021)

Calibrar el modelo hidrológico, partiendo de datos distribuidos en el espacio y tiempo de ERA5 de ECMWF, permite conocer cómo funciona la respuesta de caudal frente a la lluvia.

El paso posterior a la elaboración del modelo con los datos climáticos descargados de ERA5, es la calibración, que es el proceso donde se ajustan las variables de decisión para que coincidan al máximo posible con los datos de caudal proporcionados por el IDEAM, obteniendo como resultado un modelo que representa numéricamente datos de evapotranspiración, escorrentía, Inter flujo, flujo base cuya interacción dentro de un balance de masa es la más parecida posible a los valores de caudal reales medidos por el IDEAM, lo cual se revisara a detalle en el capítulo de resultados.

Al tener datos para las variables antes mencionadas, se puede obtener información de cómo planear el territorio de acuerdo los resultados obtenidos, de manera que se podrán proyectar estrategias de aprovechamiento de agua en futuros estudios, así como entender lo que ha sucedido con la cuenca en el histórico a partir de los resultados del modelo calibrado como una primera aproximación.

## 2.5. Criterios de selección para herramientas de modelación.

De manera general, se establecieron criterios de selección para el uso de herramientas computacionales para cuantificar o acercarse a un modelo que simule los procesos para el presente trabajo, los criterios fueron los siguientes:

- Software de dominio público o la posibilidad de trabajar con una licencia educativa.
- Experticia en el manejo de la herramienta.
- Fácil acceso o instalación.
- Software que permitiera leer datos de lluvia distribuidos en el espacio y en el tiempo y que además permitiera la representación de la parte subterránea.

Para tales fines, se seleccionaron las siguientes herramientas de acuerdo con los criterios anteriormente señalados:

- Google Colaboratory: Es de fácil acceso y se puede utilizar Python para el análisis de datos de precipitación del IDEAM o de Copernicus a fin de poder analizar información a partir de datos históricos de manera eficiente. Esta herramienta permite realizar análisis rápidos de datos, sacar estadísticas, hacer gráficos, correlaciones, y agrupar la información por día, mes y año permitiendo analizar las series históricas de caudal y de lluvia. Con esta herramienta se realizaron los gráficos del capítulo de análisis de resultados de lluvia anual, mensual y la correlación de Pearson
- QSwat plus: Permite mediante Sistemas de Información Geográfica, hacer modelos hidrológicos utilizando Swat con información de sensores remotos para poder estimar datos y resultados de modelos lluvia evapotranspiración y topografía. En el presente estudio solo se utilizó para realizar análisis de cobertura para la comparación en el tiempo, dentro de una tabla que se encuentra en el análisis de resultados con la comparación entre la cobertura del suelo entre el año 2001 y 2019.
- WEAP: Es de fácil manejo, permite la lectura de datos ERA5 distribuidos en el espacio y en el tiempo, tiene un módulo de calibración con optimización multiobjetivo llamado PEST que permite acercarse a los datos de caudal de la estación IDEAM, la licencia es gratuita para estudiantes en países en desarrollo como Colombia por

un año. La calibración en el módulo PEST, se realiza ingresando la variable que se requiere calibrar y los datos con los que se desea calibrar. Para este caso se calibra el modelo con los datos de caudal observado de IDEAM y la variable de decisión con la que se calibra es el tamaño del almacenamiento del tanque inferior, al calibrar esta variable de decisión se calibran las demás, lo cual se describe a detalle en el análisis de resultados en el capítulo de calibración.

## **2.6. Calibración del Modelo hidrológico en WEAP**

Un modelo hidrológico es un volumen en el espacio, rodeado por límites definidos. El modelo, acepta entradas, entre ellas el agua (lluvia). Estas entradas son procesadas, dando como resultado, salidas (Caudal). (Mays, 2019)

La estructura superficial, subsuperficial o volumen espacial para el flujo de agua en cualquiera de sus estados, es la totalidad de vías de flujo por donde el agua pasa como caudal a través del sistema desde que entra hasta que sale. El límite de esa estructura está definido como una superficie continua de tres dimensiones que encierran un volumen o estructura. (Mays, 2019)

El medio de trabajo actúa en el sistema como una entrada, interactúa con la estructura y otros medios, quedando como una salida después de su procesamiento. Las condiciones físicas, químicas y biológicas operan en ese medio de trabajo dentro del sistema. En la ingeniería hidrológica, los medios de trabajo más comunes son agua, aire, calor y energía, dividiéndose en tres subsistemas que son (Mays, 2019):

- Subsistema atmosférico de agua, que consiste en la evapotranspiración, humedad y velocidad del viento.
- Subsistema de agua superficial que comprende la escorrentía superficial.
- Subsistema de agua subsuperficial que comprende el flujo base, el Inter flujo y el almacenamiento si existen tanques de almacenamiento como es el caso de WEAP.



Para realizar el modelo, es necesario seleccionar correctamente los datos de entrada, la herramienta a utilizar acorde a lo requerido en la salida.

El proceso de calibración, consiste en encontrar los parámetros o variables de decisión del modelo, de manera que la diferencia entre los datos reales observados (estación IDEAM y los datos simulados sea mínima.

Existen distintas métricas para medir el error como son, error medio cuadrático, error absoluto, NSE Coeficiente de eficiencia de Nash Sutcliffe, que se describen a continuación:

- Coeficiente de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE) Rango óptimo > 0.5, entre más se acerca a 1 más se acerca a los valores reales.

Numerador: Cada valor observado se resta al simulado para cada mes y se suman todos estos resultados. Este resultado se eleva al cuadrado.

Denominador: Cada valor observado se resta al valor medio y se suman todos estos resultados. Este resultado se eleva al cuadrado.

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{mean})^2} \right] \quad (1)$$

Este fue el método utilizado para la medición de las desviaciones en los resultados del modelo contrastando los datos de caudal arrojados por WEAP como salida con los datos de caudal de la estación IDEAM.

- Porcentaje Bias (BIAS): El valor óptimo está en + o - 25% entre más se acerque a 0 más se acerca a la realidad.

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (2)$$

- División entre el error cuadrático medio y la desviación estándar (RSR), el valor óptimo de este valor es <= a 0.7.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEC_{obs}} = \frac{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right]} \quad (3)$$

- Error Absoluto: Consiste en hacer la diferencia en valor absoluto de cada valor y realizar una sumatoria de dichas diferencias para todos los valores. Este fue el método utilizado para la medición de las desviaciones en los resultados del modelo contrastando los datos de caudal arrojados por WEAP como salida con los datos de caudal de la estación IDEAM.

$$EA = \left[ \sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \right] \quad (4)$$

Existe también una incertidumbre en los resultados, cuya fuente puede provenir de un error en los datos de entrada, error por el método, error humano, errores en parámetros, errores en la estructura del modelo o errores propios del modelo.

Métodos de calibración:

- Prueba y error: Ajuste manual a criterio del modelador cambiando el valor de los parámetros del modelo
- Automática: Optimiza los valores utilizando técnicas numéricas, es rápido, pero puede tener inconvenientes. Puede presentar problemas en la captura de mínimos locales.

Medida del error: Medida del error dependiendo del cambio de los parámetros y corriendo el modelo hasta que se parezca lo que más se pueda a los datos reales.

Medida de la Incertidumbre: Es la medida de la dispersión de los resultados posiblemente reales del modelo.

Análisis de Sensibilidad: Cálculo del efecto de los cambios de las salidas con respecto a los cambios de un valor de entrada o parámetro.

### **2.6.1. Modelo denominado “humedad de suelo” de WEAP:**

El modelo hidrológico de WEAP, es un modelo semi distribuido, es decir, una unidad hidrológica es una cuenca o subcuencas. La suma del área de las subcuencas da la suma del área de la cuenca completa. Este modelo permite obtener evapotranspiración, escorrentía, Inter flujo, flujo base, y caudal mediante un modelo de humedad del suelo que utiliza dos tanques. WEAP, es el software principal utilizado para el presente estudio a fin de poder entender el funcionamiento del sistema hidrológico de la cuenca alta del río Ariporo en un histórico de tiempo de más de 20 años, la idea es entonces realizar el modelo y calibrarlo para poder comprender lo que ha sucedido en el transcurso de esa ventana temporal en la interacción entre el agua superficial y subterránea, el modelo se describe al detalle en la siguiente sección.

La herramienta WEAP tiene dos métodos de cálculo. Para el presente estudio, se utilizó el más completo, denominado método de humedad del suelo. Este método, es una técnica unidimensional de 2 tanques. Este modelo cuenta con dos subsistemas de tanques donde cada uno tiene entradas y salidas. La salida de un tanque puede ser la entrada del siguiente. Los datos obtenidos incluyen evapotranspiración, escorrentía, Inter flujo, flujo base, y caudal. (Stockholm Environment Institute, 2021)

Las entradas y salidas de los dos tanques permiten establecer las relaciones entre las variables hidrológicas del sistema.

Las variables de decisión que influyen dentro de las ecuaciones de los tanques y que son objeto de la calibración con el módulo Pest son las siguientes (Stockholm Environment Institute, 2021):

z1= Contenido de humedad del suelo en la zona donde hay presencia de raíces (Valor inicial al inicio de la simulación)

$z_2$ = Contenido de humedad del suelo en la zona profunda del suelo (Valor inicial al inicio de la simulación)

$K_s$ = Conductividad hidráulica en la zona de raíces, Conductividad saturada en la zona de las raíces, es decir cuando está lleno de agua (Unidades de mm/tiempo)

$f$ = Dirección de flujo, indica la dirección predominante de flujo, si es horizontal o vertical.

RRF= Factor de resistencia a la escorrentía, resistencia a la escorrentía, mayor resistencia menor escorrentía. Si el caudal simulado es mayor al observado, se puede disminuir este parámetro para acercarse más al valor real. Alto RRF da menor escorrentía superficial, Control de la respuesta a la escorrentía superficial, se relaciona con un índice foliar y la pendiente del suelo

$K_{s2}$ = Conductividad hidráulica en la zona profunda, Conductividad saturada en la zona profunda, es decir que tan conductivo puede ser el medio poroso hasta la zona profunda, (unidades de mm/tiempo)

Ya definidas las variables de decisión, se plantean las ecuaciones matemáticas que representan el balance de masa de cada uno de los dos tanques, relacionando las variables de decisión que influyen en la salida de caudal como respuesta del modelo cuya entrada principal de datos es la lluvia, el área, la evapotranspiración y las variables de decisión antes mencionadas (Stockholm Environment Institute, 2021):

Ecuación tanque superior o tanque 1:

$$Rd_j \frac{dz_{1j}}{dt} = Pe(t) - PET(T)K_{c,j}(t) \left( \frac{5z_{1j} - 2z_{1j}^2}{3} \right) - Pe(t)z_{1j}^{RRFj} - f_j K_{s,j} z_{1j}^2 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

$Rd_j \frac{dz_{1j}}{dt}$  (Ecuación 10) ( $z_{1j}$  Es el almacenamiento relativo de agua dado como una fracción del total del almacenamiento efectivo para la zona de raíces en mm por fracción de uso del suelo, tiene en cuenta la precipitación, la evapotranspiración y el Inter flujo).

$Rd_j$  Es el almacenamiento efectivo de agua lluvia en mm por cada fracción de las distintas coberturas de suelo  $j$ .

$dz_1$  es el cambio en el almacenamiento de agua en el tanque,  $j$  se refiere a un instante de tiempo, y dentro de un intervalo de tiempos  $dt$ .

$Pe(t)$  = Precipitación efectiva incluyendo riego y derretimiento de nieve.

$$PET(T)K_{c,j}(t) \left( \frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) \text{ (Evapotranspiración) (Ecuación 6)}$$

PET = Potential Evapotranspiration: Cálculo del cultivo de referencia Handbook of hydrology 1993 sección 4.15, ecuación 4.2.31 Penman-Monteith Modificada para un cultivo de césped de 0.12 metros de altura.

$K_c$  (Coeficiente de cultivo en relación al cultivo de referencia) Varía según el periodo vegetativo.

$$Pe(t)z_{1,j}^{RRFj} \text{ (Escorrentía superficial) (Ecuación 7)}$$

$RRFj$  Es el factor de resistencia a la escorrentía ocasionado por la cobertura del suelo, valores altos de RRF implican menores valores de caudal como resultado en el tiempo  $j$ .

$$f_j K_{s,j} z_{1,j}^2 \text{ (Flujo Intermedio Interflujo) (Ecuación 8)}$$

$f_j$  Es un coeficiente que divide el flujo superficial en vertical u horizontal, dependiendo del tipo de suelo y la cobertura del suelo en el tiempo  $j$ .

$K_{s,j}$  Es un valor estimado de la conductividad del suelo en la zona de las raíces cuando está saturado de agua (mm/tiempo), en el tiempo  $j$ .

$$(1-f_j)k_{z,j}z_{1,j}^2 \text{ (Percolación) (Ecuación 9)}$$

Ecuación tanque inferior o tanque 2 (Stockholm Environment Institute, 2021):

$$S \max \frac{dz_2}{dt} = \left( \sum_{j=1}^N (1-f_j)K_{s,j} z_{1,j}^2 \right) - K_{s2} z_2^2 \quad \text{(Ecuación 10)}$$

Donde:

**$Smax \frac{dz_2}{dt}$  (Es el almacenamiento del tanque inferior, puede ser positivo o negativo)**

$$\left( \sum_{j=1}^N (1 - f_j) K_{s2,j} z_{2,j}^2 \right) (\text{Percolación}) \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$K_{s2} z_2^2 (\text{Flujo base o agua subterránea que sale al río}) \quad (\text{Ecuación 12})$$

Para entender mejor el sistema se resumen las entradas y salidas de la siguiente manera:

Entradas del tanque 1= Precipitación, nieve derretida

Salidas tanque 1: Evapotranspiración, escorrentía superficial, escorrentía directa, percolación.

Entradas tanque 2: Percolación.

Salidas tanque 2: Flujo base.

El modelo completo con entradas y salidas se puede ver en la Figura 4.

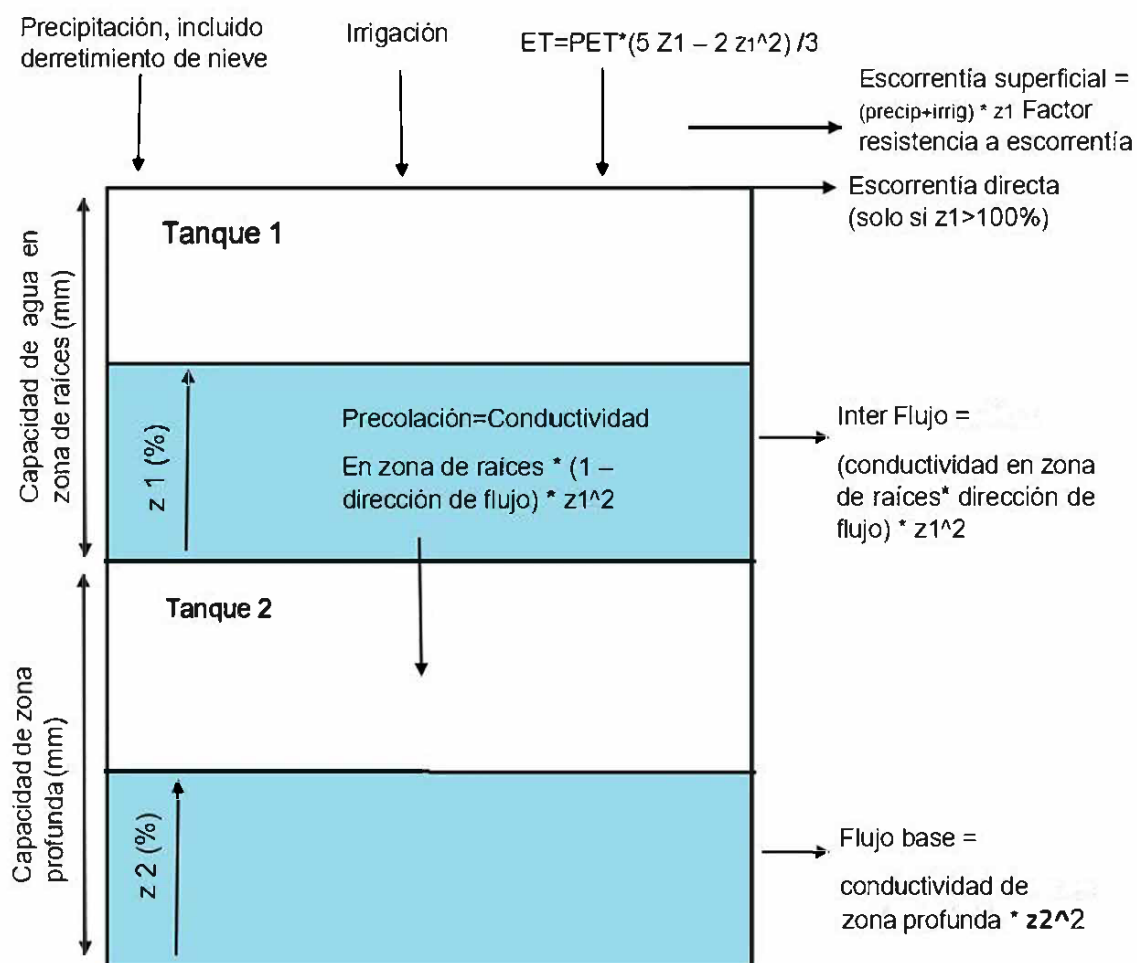


Figura 4 Modelo de 2 tanques WEAP. Fuente: (Stockholm Environment Institute, 2021).

Dos de las grandes ventajas que tiene WEAP sobre las demás herramientas computacionales, son las siguientes:

- El modelo de dos tanques permite obtener datos de la relación entre la precipitación, el caudal y lo que sucede en la parte subterránea.
- La herramienta WEAP permite leer datos de precipitación distribuidas en el espacio y el tiempo, así como insertar para la calibración del modelo, las series de caudal de IDEAM.

La primera ventaja ya se describió en los párrafos anteriores donde se describen las ecuaciones y se presenta la gráfica de los dos tanques con sus respectivas entradas y salidas. Ver Figura 4.

Resumiendo, la herramienta WEAP, es un modelo de dos tanques, uno sobre el otro, funcionando de la siguiente forma:

El primer tanque simula el balance de masa del agua lluvia como entrada desde la superficie hasta la zona donde se encuentran las raíces de las plantas, así como el almacenamiento y flujo horizontal a esa misma profundidad. En el tanque 1 se dan las pérdidas por evapotranspiración y escurrimiento superficial, condicionadas por las variables de decisión RRF o factor de resistencia a la escorrentía, los porcentajes iniciales de almacenamiento en el tanque o Z1 y la conductividad o capacidad de fluir en los poros del suelo denominada Kc descritos anteriormente al detalle. Estos parámetros varían de manera que, en la calibración, el valor de salida de caudal quede lo más cercano posible a los valores reales medidos por el IDEAM.

Para el segundo tanque, se simula el balance de masa, donde la entrada es el agua infiltrada o percolada, condicionada por el porcentaje de almacenamiento inicial en este tanque o Z2 donde como salida se da el flujo base, condicionado por la conductividad profunda Ks2. Los valores de flujo base es la cantidad de agua de la zona profunda que abastece al río en la temporada de sequía, este valor indica indirectamente cual ha sido la recarga del acuífero debido a que entre más cantidad de agua se infiltre y se recargue en el acuífero, mayor capacidad de abastecimiento del río en temporada como flujo base se debe ver reflejada en los resultados del modelo.



### 3.CAPÍTULO III

#### ESTADO DEL ARTE

##### 3.1. Descripción de los estudios de caso

En las bases de datos especializadas, se encuentran estudios realizados en todo el mundo que pretenden entender las variables hidrológicas mediante modelos utilizando distintas herramientas computacionales de modelación. Se realizó la lectura de estos casos de estudio para tener un amplio panorama de en qué se está trabajando en la actualidad y cuál es el enfoque que se le quiere dar a la hidrología respecto al buen uso del recurso hídrico en el caso de la recarga de agua subterránea, seleccionando casos de estudio que se consideran interesantes a tener en cuenta para el presente documento, los cuales se relacionan a continuación:

##### **3.1.1. Inteligencia geoespacial-temporal para la Agricultura Inteligente y Sistemas Eco-Física Ambiental Cibernética, (Babak Majidi, Omid Hemmati, Faezeh Baniardalan, Hamid Farahmand, Alireza Hajitabar, Shahab Sharafi, Khadije Aghajani, Amir Esmaeili, and Mohammad Taghi Manzuri, 2021).**

Este estudio, se centra en la sequía en los centros agrícolas de las provincias del sur de Irán, el secado de los principales lagos del centro de Irán y la contaminación del aire resultantes de las partículas de polvo que están aumentando en escala por año.

Los cambios en el medio ambiente requieren soluciones inteligentes para la gestión de la energía y del agua mediante el despliegue de sistemas automatizados en la agricultura. El objetivo del ecosistema es utilizar el poder de la inteligencia artificial combinada con robótica y redes de sensores con el fin de proporcionar soluciones para los ecosistemas naturales. Los principales módulos del ecosistema propuesto son el Geolyzer y el Internet Modular de Despliegue Rápido de Cosas Robóticas (MORAD IoRT). La plataforma Geolyzer es el foco de este trabajo. La plataforma Geolyzer automáticamente indexa y procesa los datos de los satélites y los aviones no tripulados con el fin de proporcionar una

descripción, soluciones prescriptivas y predictivas para las comunidades rurales. Hasta hace poco, el procesamiento de la información visual recogida por los drones se realiza después de la transmisión de datos visuales a una estación terrestre ya sea por una computadora o manualmente por un experto. Los avances en los sistemas de procesamiento a bordo en los últimos años les dan a los drones la capacidad de procesar los datos visuales a bordo y tomar decisiones inteligentes en el vuelo. En este trabajo, se utiliza una red neural profunda de luz computacional para una interpretación rápida y precisa del medio ambiente rural para su uso en la gestión de decisiones autónomo. Se investigan escenarios de entrenamiento y aplicaciones de dicho sistema en la agricultura, silvicultura y gestión del cambio climático. Los resultados experimentales muestran que el sistema propuesto tiene de alta precisión para diversas aplicaciones agrícolas y forestales. Estos drones pueden actuar como una colección de vehículos inteligentes no tripulados que pueden vigilar el entorno que les rodea utilizando una serie de sensores que incluye sensores visuales. Estos robots utilizan inteligencia local y distribuida para modelar el entorno, tomar decisiones basadas en objetivos, comunicarse entre sí a través de Internet y una red inalámbrica. Esta red de sensores móviles se utiliza para la generación de modelos localizados y validación de los modelos del Geolyzer y evalúa las opciones de automatización de las labores mediante el monitoreo en tiempo real para optimizar la irrigación evitando el desperdicio de agua. (Babak Majidi, Omid Hemmati, Faezeh Baniardalan, Hamid Farahmand, Alireza Hajitabar, Shahab Sharafi, Khadije Aghajani, Amir Esmaeili, and Mohammad Taghi Manzuri, 2021)

Este estudio es bastante interesante ya que lleva al tiempo real las mediciones y operaciones de irrigación. Se seleccionó por considerarse una solución a aspectos reales en la ruralidad y que seguramente a futuro será un camino por recorrer en la investigación de este tipo de soluciones al buen uso del agua para irrigación.

### **3.1.2. Evaluación de las presas de recarga artificial y la mejora de la capacidad de recarga de las aguas subterráneas (Mohammadzadeh-Habili & Khalili, 2020).**

Este artículo evalúa la recarga artificial de agua subterránea a partir de escorrentías de superficie fangosa en las presas de recarga de Meymand y Tangeriz situadas en el sur de

Irán, presas construidas para la recarga de agua subterránea, control de inundación y erosión.

Este estudio propone un nuevo concepto teórico para la simulación de recarga vertical en una capa de limo formado en el depósito de las presas de recarga. La teoría propuesta fue validada usando pruebas de laboratorio y el modelo HYDRUS-1D. Los resultados teóricos, apoyados por simulación numérica y observaciones de campo, indicaron que la recarga de agua subterráneas desde el lecho de la reserva de recarga está principalmente controlada y limitada por un limo de baja permeabilidad, incluso con pequeños espesores. Los resultados de este estudio revelaron que con la excavación de pozos verticales en las paredes laterales dentro de la presa de recarga se propone como un método novedoso para mejorar la recarga artificial de las aguas subterráneas. Una alta tasa de recarga lateral a través de los pozos aumentó significativamente la tasa de recarga en el acuífero debido a la sedimentación mínima en las paredes verticales. El aumento de la capacidad de almacenamiento de agua de las presas de recarga y el uso de suelo excavado para la construcción de caminos de tierra y la producción de arena y grava son beneficios secundarios de este método. Además, las paredes laterales verticales de la propuesta se encontraron que los depósitos eran menos sensibles a la propagación de los limos. El método propuesto también puede utilizarse para diseñar nuevos proyectos de recarga y mejorar los proyectos de recarga existentes. (Mohammadzadeh-Habili & Khalili, 2020)

Es un estudio con resultados interesantes en cuanto al estudio de la dinámica de depósitos de limos dentro de un embalse construido para maximizar la infiltración de agua en el acuífero. El uso de estos pozos verticales en las paredes laterales sugiere el aumento en la infiltración de agua previniendo inundaciones a su vez que se tienen reservas de agua subterránea para su uso en el futuro, este tipo de estudios se ve comúnmente en sitios donde la precipitación es baja y se requiere almacenar la mayor cantidad de agua posible en el acuífero para uso futuro, desarrollos que seguramente serán tendencia en los próximos años en todo el mundo.

### **3.1.3. Multiobjective Optimization for Water Resource Management in Low-Flow Areas Based on a Coupled Surface Water–Groundwater Model (Zeinali et al., 2020).**

Non dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) con un sistema acoplado modelo de aguas superficiales y subterráneas. El acoplamiento dinámico entre los modelos de aguas superficiales y subterráneas da lugar a un potente medio para una mejor gestión de la presa y el acuífero de la zona de estudio, para reducir al mínimo el uso de aguas subterráneas y maximizar la cobertura de la demanda de agua vinculando el NSGA-II al modelo acoplado y extrayendo los valores óptimos de extracción de agua superficial y subterránea durante los períodos húmedos y secos. La extracción diaria y mensual de los recursos hídricos puede ser controlada en base a los valores óptimos sugeridos por el algoritmo de optimización mediante el monitoreo de cambios de nivel de agua en los pozos y la instalación de medidores de flujo inteligentes en los pozos operativos de toda la planicie. Además, las estaciones de bombeo inteligentes deberían controlar el flujo de agua del río hacia la llanura basándose en los valores óptimos de extracción de agua de la superficie. Recientemente, algunas de estas estaciones de bombeo inteligentes han sido ideadas en la provincia de Khuzestán de Irán. Este estudio permite ver como NSGA-II puede utilizarse para ar valores óptimos de extracción de aguas subterráneas. (Zeinali et al., 2020).

La población está en constante crecimiento y por tanto la demanda de agua superficial y subterránea para suplir esta demanda. La optimización y correcta distribución del agua a la medida se hace necesaria para negociar y priorizar el uso del agua. Estos algoritmos se vuelven indispensables a la hora de evitar conflictos de uso de agua. Estas técnicas permiten tomar la mejor decisión a la medida del problema, es algo ya cotidiano en la toma de decisiones en el uso del agua que debe empezar a implementarse con más regularidad en todas las cuencas de Colombia.

### **3.1.4. Preliminary research and application of MIKE SHE model in Jialingjiang (Zhang et al., 2019) River Basin.**

La investigación sobre el modelo hidrológico de la herramienta MIKE SHE realizada en China se ha profundizado gradualmente en comparación con las anteriores investigaciones,

debido a que MIKE SHE cuenta con un modelo hidrológico distribuido con una base fuerte en las ecuaciones físicas, con mucho potencial de investigación y aplicación. El modelo que tiene MIKE SHE se puede fortalecer desde la incertidumbre, debido a que, aunque hay investigación sobre la incertidumbre, todavía es limitada. La Investigación entonces sobre MIKE SHE, debe enfocarse en áreas con escaso acceso a datos y la forma de mejorar la precisión de la simulación del modelo en estas mismas áreas de difícil acceso a la información. (Zhang et al., 2019)

MIKE SHE, es una herramienta computacional desarrollada por el Danish Hydraulic Institute con sus siglas (DHI) para realizar una simulación tridimensional de flujos en régimen hidrológico variable que resuelve ecuaciones mediante diferencias finitas. El modelo de dicha herramienta permite tener la interacción entre la evapotranspiración potencial, el agua subterránea en la zona saturada y no saturada, además de la relación con la respuesta de caudal. Es considerado una herramienta que cuenta con un modelo hidrológico completo, con la limitante que requiere muchos datos de entrada. Por esta razón, esta investigación es pertinente al querer evaluar simulaciones hidrológicas en los casos en que los datos de entrada del modelo no están disponibles fácilmente, como es el caso del presente estudio.

### **3.1.5. Jiboa River, adaptación del concepto semi distribuido del modelo HBV (Farrag M, Pérez G, Solomatine D, 2019).**

El principal objetivo de este estudio fue explorar diferentes combinaciones de variables de sistema, discretización espacial y conceptualización de procesos, para tener en cuenta la variabilidad espacial de las precipitaciones y las propiedades del sistema para desarrollar la mejor representación espacial y temporal de la respuesta de la cuenca del río Jiboa en el Salvador. (Farrag M, Pérez G, Solomatine D, 2019).

Se exploraron un modelo semi distribuido, así como dos marcos para la construcción de modelos hidrológicos distribuidos conceptuales. Un marco simple que utiliza la conceptualización del HBV para generar la escorrentía y enrutarla directamente a la salida, y un marco recientemente desarrollado que utilizo la entrada de la dirección del flujo del SIG para enrutar la escorrentía de las celdas superiores a las celdas inferiores aguas abajo.

Los dos últimos marcos se utilizaron para investigar dos escenarios. Primero, considerando la lluvia distribuida espacialmente y las propiedades de las cuencas acumuladas, segundo considerando la lluvia distribuida espacialmente y las propiedades de las cuencas distribuidas. (Farrag M, Pérez G, Solomatine D, 2019).

Además, se exploró la conceptualización del proceso hidrológico utilizando la estructura del modelo HBV96 combinada con dos procedimientos diferentes de generación de escurrimiento. Por último, se utilizó un comité de modelos especializados construidos con optimización multiobjetivo combinada con una función de membresía difusa para mejorar la representación temporal del proceso hidrológico.

Los resultados son alentadores e indican que los marcos propuestos son prometedores para hacer una predicción mejorada y más realista del hidrograma de escurrimiento con una forma directa de calibración utilizando un algoritmo genético y búsqueda de armonía.

Además, los modelos en comité siempre conducen a una mejora significativa en la predicción del flujo y una combinación de la estructura del modelo HBV con la recarga artificial y una discretización espacial de 2\*2 km<sup>2</sup> es la mejor para simular la respuesta de la cuenca. También se demostró que, teniendo en cuenta la variabilidad espacial de las precipitaciones, se mejora sustancialmente el rendimiento del modelo, mientras que, si se consideran las propiedades distribuidas de la cuenca, se mejora ligeramente el rendimiento, pero se aumenta en gran medida la incertidumbre y la complejidad del modelo. (Farrag M, Pérez G, Solomatine D, 2019).

Este estudio tiene la ventaja que fue realizado en el Salvador, además de tener un concepto semi distribuido que permite ver los procesos a una escala espaciotemporal, al comienzo del estudio se quiso realizar el modelo con los códigos del investigador Mostafa Farrag, sin embargo, la herramienta aún se encuentra en fase de desarrollo y se requiere un servidor para poder correrlo, razón por la que no se optó por esta vía sin embargo es muy interesante y se intentara utilizar en futuros estudios.

### **3.1.6. Effects of land use on groundwater recharge of a loess terrace under long-term irrigation (Xu et al., 2021).**

La comprensión de la relación entre el uso de la tierra y la recarga de las aguas subterráneas es de interés directo en las áreas que son propensas a los geo-peligros. Este estudio se realizó para caracterizar los efectos del uso de la tierra en la capa freática (GWT) en la terraza del material sedimentario fino de Heifangtai (HFT) bajo riego por inundación a largo plazo, como intensidad de riego se regía por los tipos de cultivos. A la luz del índice regional de temperatura y sequedad de los vegetales (TVDI) y la óptica imágenes obtenidas en diferentes estaciones a lo largo de cuatro años, el conjunto de datos incorporó los ciclos de crecimiento de la que a su vez mejoró la carga de trabajo y la precisión de la detección del uso de la tierra. Las intensidades de riego para diferentes se registraron durante las investigaciones de campo. Un total de 26 perfiles de tomografía de resistividad eléctrica (ERT) fueron realizada para estimar la distribución de la GWT de la terraza de HFT, que se utilizó además para revelar la relación entre el uso de la tierra (es decir, el riego) y las fluctuaciones del GWT. Los resultados indicaron que la alta GWT local estaba asociada con campos de vegetales que tenían la mayor intensidad de riego, y, por el contrario, se atribuyó a la baja GWT local a los campos de árboles frutales perennes con la menor intensidad de riego. La descarga fue monitoreada intermitentemente durante más de tres años para analizar el efecto en la GWT local cerca del margen de HFT. El resultado mostró una fuerte correlación entre la descarga de primavera y las fluctuaciones de GWT a lo largo del margen de HFT, indicando que el agua subterránea la recarga se vio afectada tanto por la irrigación como por las descargas de primavera. Estos resultados sugirieron que la incorporación del crecimiento de los ciclos de cultivo puede facilitar eficazmente la interpretación de los datos de teleobservación para la detección del uso de la tierra, y los resultados pueden proporcionar una orientación útil para mejorar los programas de riego. (Xu et al., 2021).

Esta investigación es interesante en la medida que tiene en cuenta el ciclo del cultivo relacionado al uso del agua, permitiendo aprender sobre el cultivo a la medida y así optimizar el riego de acuerdo a las necesidades reales de irrigación.

### **3.1.7. A sustainable agricultural landscape model for tropical drylands (Araujo et al., 2021).**

Encontrar un equilibrio entre la conservación de los ecosistemas y la producción de bienes y servicios que las sociedades necesitan para prosperar es fundamental para el desarrollo sostenible a largo plazo de cualquier región, pero este equilibrio varía dentro de los paisajes de la región. Se prueba en el documento que la hipótesis de que los paisajes con una complejidad de estructura intermedia. Aquellos que combinan vegetación natural y ecosistemas transformados por el hombre) son los más eficientes para producir alimentos, agua y energía para las poblaciones locales de Caatinga, la mayor tierra seca de América del Sur. Se utilizó tecnología empírica datos y simulaciones informáticas para evaluar simultáneamente las compensaciones entre la producción de estos tres los servicios de los ecosistemas y la estructura del paisaje. Los resultados apoyaron la hipótesis. Además, se encontró que El aumento del porcentaje de tierras naturales en el paisaje incrementó la producción de energía de biomasa, agua y la comida. Sin embargo, la producción de agua se estabilizó cuando las tierras naturales ocuparon más del 80 % del paisaje, y la producción de alimentos disminuyó cuando las tierras naturales ocuparon más del 50% del paisaje. El aumento del porcentaje de tierras agrícolas en el paisaje aumentó la producción de los tres servicios de los ecosistemas, pero la producción de energía de biomasa y la producción de agua disminuyó cuando las tierras agrícolas alcanzaron el 20 % y el 35 % del paisaje, respectivamente. Por último, la producción de los tres servicios de los ecosistemas disminuyó cuando el porcentaje de tierras degradadas (es decir, tierras que perdieron la mayor parte de su productividad natural debido a procesos causados por el hombre) en el paisaje aumentó, pero la producción de alimentos disminuyó más rápidamente que la producción de energía y agua. Para lograr agua subterránea, alimentos y seguridad energética a largo plazo, los paisajes agrícolas de las tierras secas tropicales requieren más conservación (incluida la restauración de zonas degradadas), una mayor diversificación de las prácticas agrícolas y una mejor integración de las iniciativas individuales a una escala espacial mayor. (Araujo et al., 2021).

Esta investigación, relaciona el uso del suelo con bastantes variables, sin embargo, es de especial interés la relación hallada entre el uso del suelo y el agua, donde aumenta la cantidad de agua en la medida que hay más área conservada, tal y como se mencionaba



en la bibliografía revisada al comienzo del presente estudio, esta vez corroborada con datos de sensores remotos.

### **3.1.8. Spatio temporal visualization of soil critical sources areas to assess the dynamics of source pollution in agricultural management practices. (Natalia Uribe and Gerald, A Corzo P, 2020)**

El estudio en curso realiza una visualización espaciotemporal de las áreas de fuentes críticas del suelo para evaluar la dinámica de la fuente la contaminación en las prácticas de gestión agrícola usando una metodología espaciotemporal que permite una identificación georreferenciada de los cambios, donde se utilizó un diagrama radial para evaluar los cambios en las regiones de contaminación y hace una formulación de diagrama radial de intensidad, localización y frecuencia. Para ello la identificación de la ubicación y la intensidad, un proceso de agrupación, utilizando las zonas de sequía no contiguas y el método de la zona de sequía de Contriguous. Este agrupamiento se realiza por primera vez en un mapa dimensión el umbral que define un cambio y luego se agrupa por sus vecinos y las características del suelo. Para obtener datos distribuidos espacialmente, se estableció un modelo SWAT para dos tipos de cultivo, principalmente papa y tomate, además, se agregó también el pasto Kikuyu, de los más importantes de la región. El período de simulación fue en un área de 103 434 Ha, utilizando datos diarios desde 1995 hasta 2015. Los resultados muestran un cambio definitivo en ubicación, lo que implicará que podría haber un error significativo si la relación espaciotemporal no se ha analizado. (Natalia Uribe and Gerald, A Corzo P, 2020).

### **3.1.9. Impact of conservation tillage on nitrogen and phosphorus runoff losses in a potato crop system in Fuquene watershed, Colombia (Uribe et al., 2018).**

Se llevó a cabo un proceso de calibración combinando los datos relativos al impacto de las prácticas de gestión en el suelo y pérdida de nutrientes y escorrentía (medidas en el campo), y datos de flujo de caudal de las estaciones de medición, utilizando la herramienta SWAT. Se extrapolaron las prácticas de gestión del cultivo de la papa para poder evaluar

toda la cuenca. El Modelo hidrológico y de calidad del agua de la cuenca utilizado en este estudio fue la herramienta computacional (SWAT) desarrollado por el Departamento de Agricultura - Servicio de Investigación Agrícola (USDA-ARS). El modelo cuenta con un proceso continuo, semi distribuido y basado en el tiempo. El modelo a escala de cuenca fluvial, diseñado para simular los efectos a largo plazo de las decisiones de gestión del agua sobre la calidad y la respuesta hidrológica. El modelo se basa en un intervalo de tiempo diario en cuencas y subcuencas. El uso de subcuencas en una simulación es particularmente útil cuando se tienen en cuenta diferentes áreas de cuencas hidrográficas con un uso y tipo de suelo diferente que puede afectar la hidrología. Estos grupos de cobertura, topografía y tipo de suelo se subdividen en Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), que son áreas comunes dentro de la subcuenca que se componen de una cobertura, suelo, topografías similares. El sistema hidrológico simulado se basa en la ecuación de balance del agua, incluye precipitación diaria, escorrentía, evapotranspiración, percolación, y componentes del flujo de retorno. La Información espacial como el tipo, uso, características del suelo, clima y topografía es necesaria. Se realizó la medición de la contaminación por insumos agrícolas de la papa comparando con los datos de campo, arrojando resultados prometedores y aplicables para otros tipos de cultivos y cuencas en el país.

Al haber realizado la revisión de estudios de caso, podemos ver infinidad de herramientas utilizadas para realizar un diagnóstico del comportamiento de la región utilizando modelos numéricos calibrados, dándoles un tratamiento a los datos, para relacionar variables de mayor complejidad, notamos que se están utilizando bastante los modelos distribuidos, para este caso SWAT divide la cuenca en subgrupos con una similar respuesta hidrológica basado en los datos de topografía, uso de suelo y tipo de suelo, permitiendo llegar a un detalle interesante de análisis.

Por otra parte, todos los estudios ya analizados, se basan en distintas herramientas computacionales de modelación que usualmente combinan sus resultados con modelos basados en datos, como redes neuronales e inteligencia artificial para la toma de decisiones. La revisión permite ver lo que está realizando la ciencia en el mundo lo cual da una tendencia hacia donde se podría enfocar una investigación posterior a los resultados del presente estudio.

## **4. CAPÍTULO IV**

### **4.METODOLOGÍA**

La metodología propuesta consiste en una serie de tres fases ordenadas que permiten llegar al resultado esperado.

Las fases se establecen de manera organizada, empezando por la recopilación de información primaria de estaciones IDEAM, de caudal y de lluvia.

La descarga de información del IDEAM, se realizó desde el portal denominado DHIME, donde se ingresa la variable que se requiere la ubicación en este caso de caudal y lluvia, el portal pide la fecha en que se requiere la información, descargándose un archivo en formato csv. Esta información de caudal se utiliza para la calibración del modelo. También se analizaron los datos históricos de lluvia en Google colab para tener un diagnóstico de los datos IDEAM de la cuenca alta del río Ariporo, como se puede evidenciar en el capítulo de análisis de resultados.

Adicionalmente se obtienen datos desde ERA5 para la entrada de datos de la herramienta WEAP mensual, desde el año 1996, fecha en la que el IDEAM inician mediciones de caudal, debido a que se cuenca con la información histórica completa y dentro de los límites de la cuenca.

La descarga de las variables climatológicas se realiza desde la base de datos de COPERNICUS, con periodicidad mensual para los años y meses que se requieren para el área de estudio. El tipo de datos escogido es NetCFD.

Este archivo NetCFD lo lee directamente la herramienta computacional WEAP. Se delimita la cuenca, hasta el punto de medición de caudal y se ingresa la información climatológica de ERA5 a WEAP.

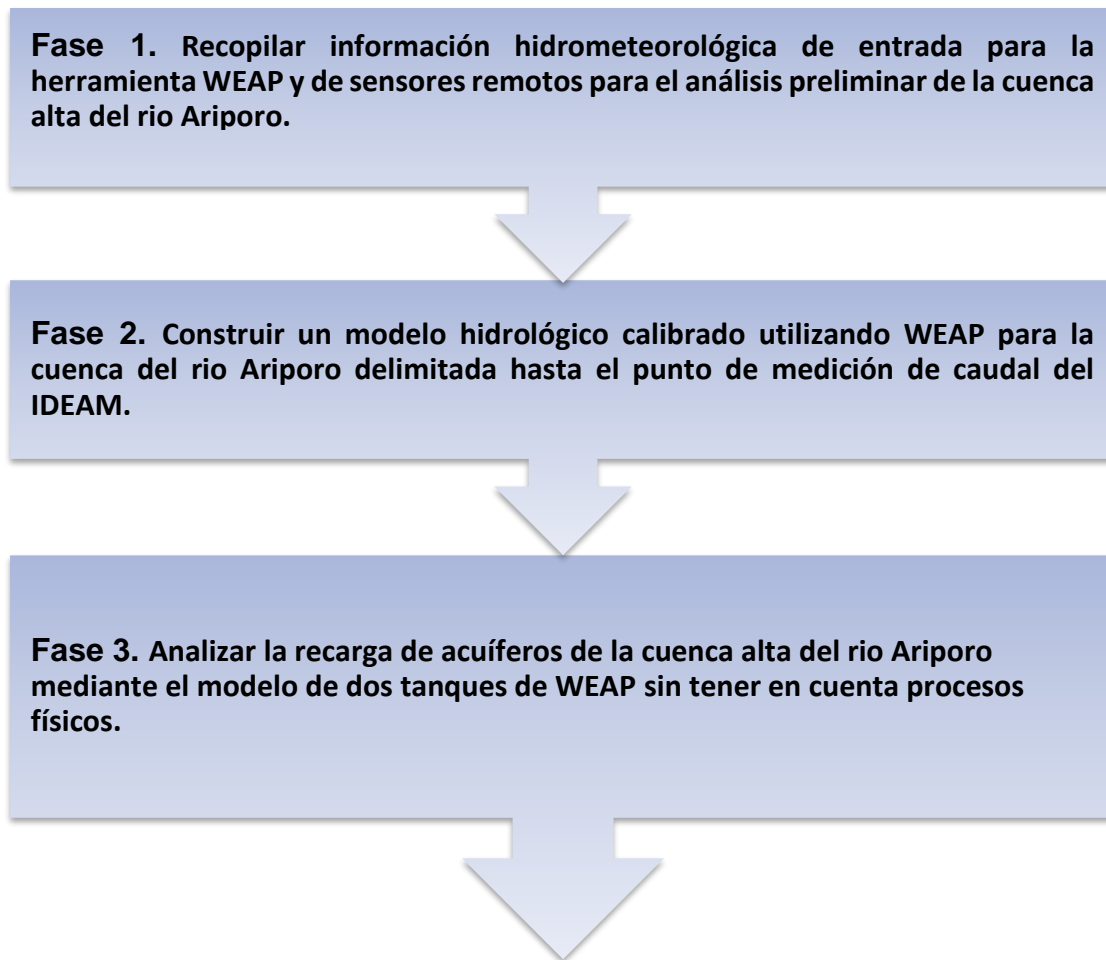
Después de construido el modelo, se ingresan los datos de medición de caudal para proceder a la calibración del modelo con la herramienta PEST, que es un algoritmo de optimización multiobjetivo, que permite de manera automática, acercar los datos de salida

de caudal del modelo a los datos observados de caudal de la estación IDEAM. En análisis de resultados hay un capítulo para la calibración donde se explica todo al detalle.

Adicional a la herramienta WEAP, se quiso realizar un análisis en el cambio en la cobertura del suelo con sensores remotos, para lo cual se utilizó la herramienta Qswat plus. Desde el portal de NASA se descargó MCD12Q1.006 MODIS *Land Cover Type Yearly* Global 500m para los años 2001 y 2019 y se procesa en Qswat plus para los años 2001 que es el año más antiguo existente para estos datos y se contrastan con datos del año 2019 que es el último año con datos de cobertura del suelo. Se compara las coberturas de estos dos años, para el análisis lo cual se puede evidenciar a detalle en el capítulo de análisis de resultados.

Para los datos de topografía, se descargan de la misión Alos Palsar, *high resolution beam* FBS que es la que tiene mayor resolución para hacer el mapa de topografía de la cuenca. Esta misión tiene 12.5 metros por pixel de resolución espacial. Se realiza un mapa en QGIS que se puede observar en el capítulo de análisis de resultados.

En la figura 5 se puede ver el orden de las fases de elaboración del presente trabajo dentro de tres fases organizadas acorde a los objetivos específicos a alcanzar, partiendo de la recopilación de información necesaria para el análisis hidrológico dentro del área de estudio, continuando con la construcción de un modelo en la herramienta WEAP y culminando con el análisis de la recarga de acuíferos en la cuenca alta del río Ariporo.



*Figura 5 Metodología. Fuente: Autor*

En la figura 6 podemos ver la interfaz de la herramienta WEAP. Dentro esta interfaz, se sube un archivo de tipo *shape*, con las ubicaciones de las estaciones de medición IDEAM representadas con cruces rojas. Esto se realiza únicamente con el fin de poder visualizar el punto donde se delimita la cuenca, a fin de que coincida con el punto de medición de caudal

IDEAM, desde la herramienta WEAP dentro del modo de delimitación de cuenca se selecciona delimitar la cuenca de interés.

Como podemos ver en la figura 6, las estaciones de medición de lluvia quedan fuera de los límites de la cuenca, por lo que los datos IDEAM de medición de lluvia, evapotranspiración y velocidad del viento como información de entrada para WEAP no son de IDEAM si no de ERA5.

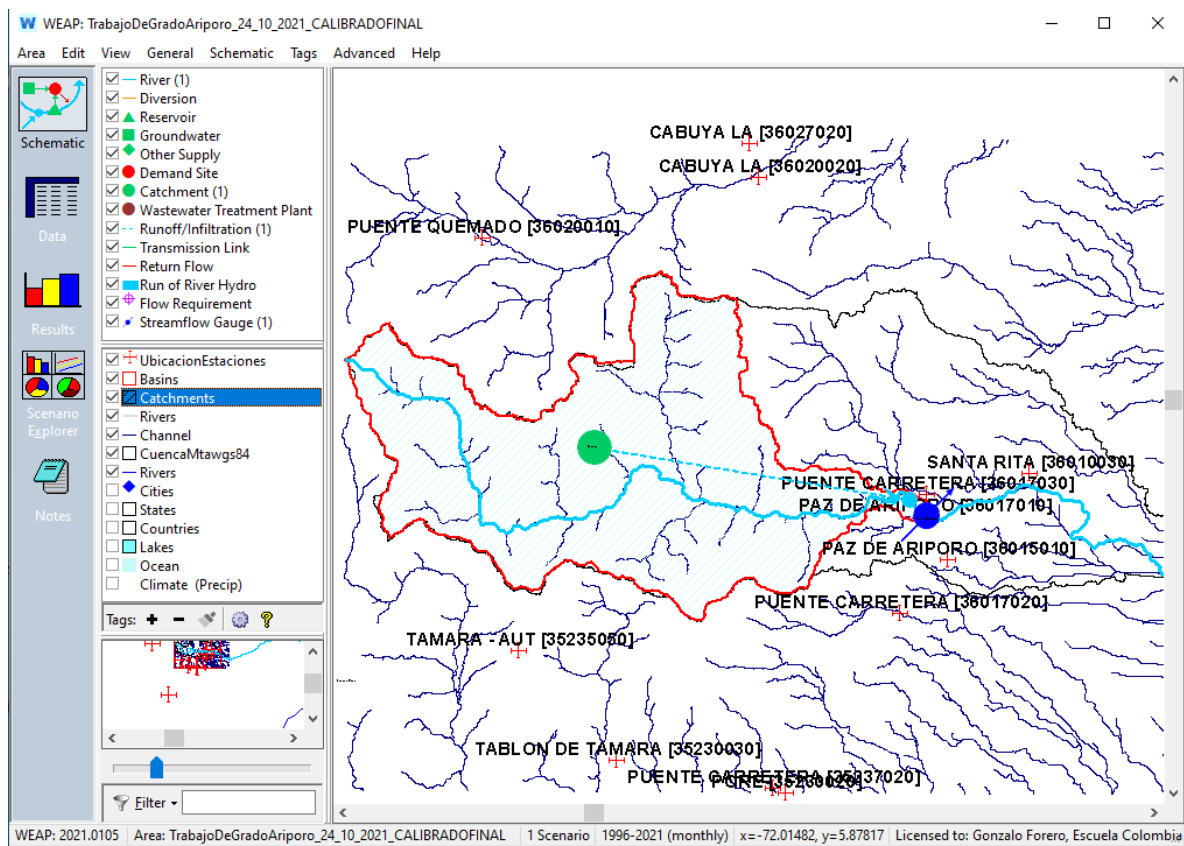


Figura 6 Interfaz WEAP, cuenca y ubicación estaciones IDEAM

El icono azul llamado *streamflow gauge* es el punto de medición de caudal IDEAM, llamado paz de Ariporo, donde se delimita la cuenca con la herramienta WEAP como se puede evidenciar en la figura 6. Este se añade como icono y dentro de este icono se edita para ingresar los datos de caudal IDEAM para la calibración que se explica a detalle en el capítulo de análisis de resultados.

En la figura 7 podemos visualizar los datos de entrada de la herramienta WEAP, dentro del clima ingresamos con los datos de ERA5 únicamente la precipitación, velocidad del viento y temperatura.

En land use, la herramienta WEAP implícitamente cuenta con información de cobertura de suelo desde sensores remotos donde ya indica las áreas y porcentajes con las distintas coberturas de suelo según corresponda a la información dentro de los límites de la cuenca, información que se muestra en el análisis de resultados, en el ítem de cobertura de suelo.

Únicamente se ingresa información a los ítems de *climate* y *land use* lo demás se deja por defecto.

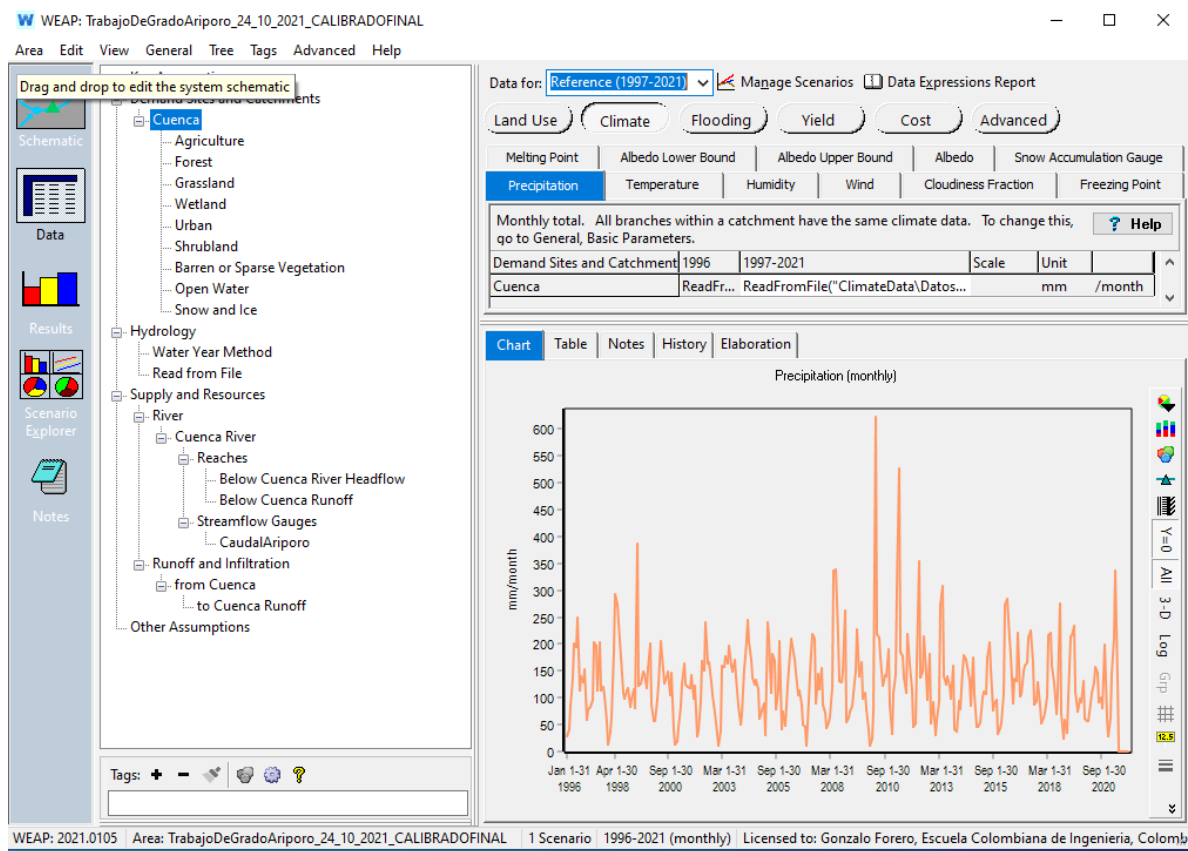


Figura 7 Entradas para la herramienta WEAP.

Las entradas de la herramienta WEAP se dan en datos mensuales, en unidades de milímetros, grados Celsius y velocidad del viento en metros por segundo, en análisis de

resultados se describe más a detalle los parámetros de entrada y el funcionamiento interno de la herramienta WEAP.



## 5. CAPÍTULO V

### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1. Fase 1. Recopilar información hidrometeorológica de entrada para la herramienta WEAP y de sensores remotos para el análisis preliminar de la cuenca alta del río Ariporo.

Para visualizar la información topográfica y las redes de drenaje de la cuenca, se utilizó un modelo de elevación digital de la misión *Alos pascars, beam FBS*, de 12.5 metros por píxel. Se delimita la cuenca en la estación de caudal IDEAM de Paz de Ariporo en la herramienta *Qswat plus* dando el siguiente resultado:

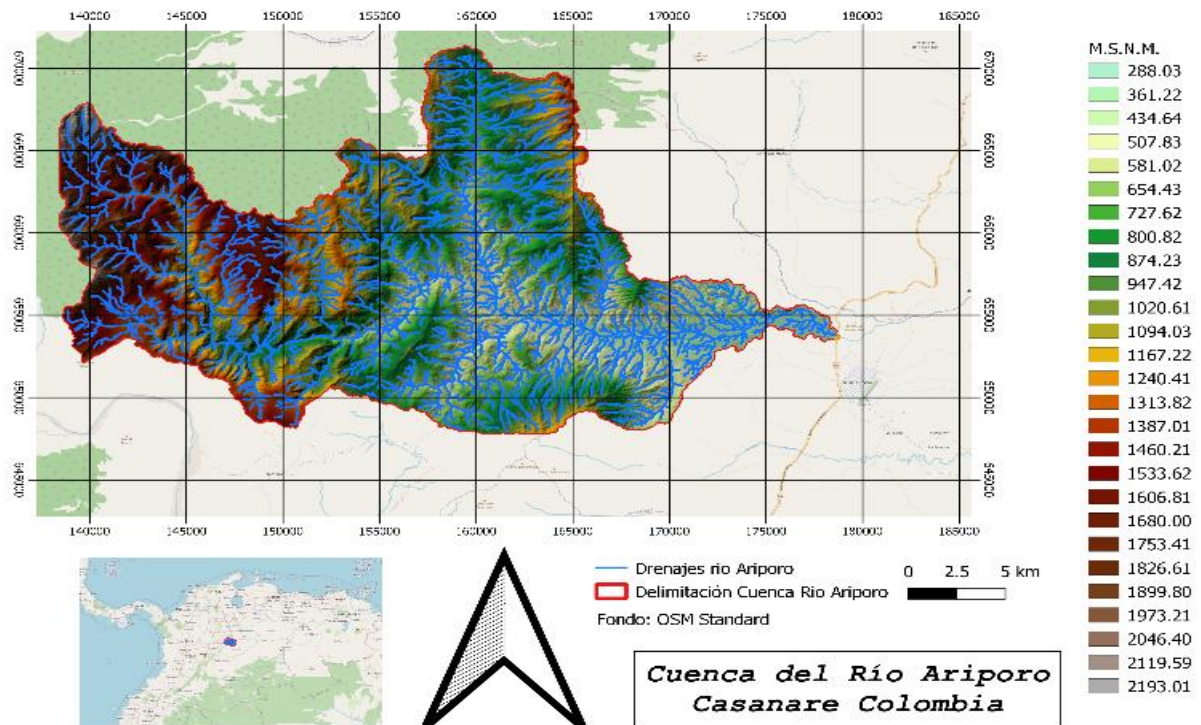


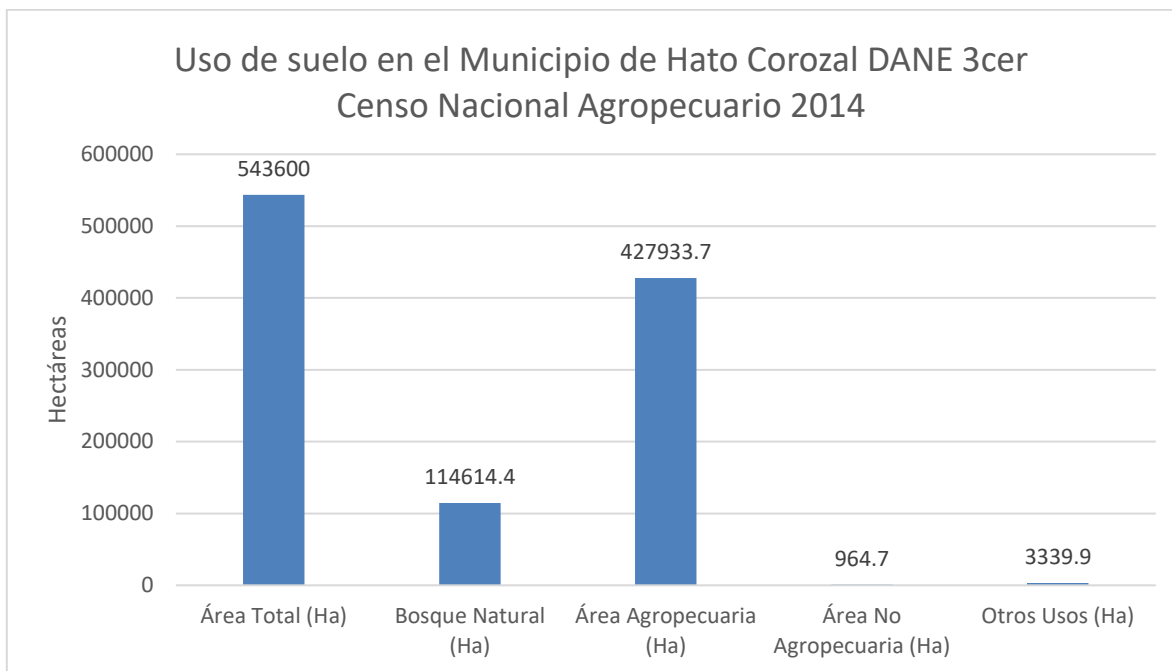
Figura 8 Georreferenciación de la cuenca del Río Ariporo. Fuente: Propia.

El río principal es el río Ariporo. La cuenca objeto de estudio queda ubicada en el municipio de Hato Corozal Casanare y tiene un área de 500.59 Kilómetros cuadrados. Las elevaciones en metros sobre el nivel del mar m.s.n.m. están entre los 288.3 m y 2193.01 m.

#### **5.1.1. Análisis de la cobertura del suelo**

Al hacer la búsqueda en los datos gubernamentales de uso de suelo para el área de estudio, se encuentran los datos de uso de suelo del municipio de Hato Corozal Casanare donde está ubicada la cuenca. Los datos encontrados en la página web para el uso de suelo, son del año 2014 tomados del tercer censo nacional agropecuario, datos que se graficaron en la Figura 12. (DANE, 2020)

En los datos del censo, se puede evidenciar que existe un área agropecuaria importante, sin una diferenciación entre pasturas y cultivos. Se considera de suma importancia realizar un análisis con sensores remotos a una escala temporal que permita hacer un análisis histórico del terreno para poder relacionar datos con el cambio en el uso del suelo en el área de estudio en relación con las variables hidrometeorológicas.



*Figura 9 Uso de suelo en el Municipio de Hato Corozal DANE 3cer Censo Nacional Agropecuario 2014. Fuente:(DANE, 2020).*

Como los datos no están actualizados, se decide utilizar información de cobertura del suelo de sensores remotos y la herramienta *Qswat plus* para poder ver la diferencia en las coberturas entre el año 2001 y el año 2019.

Para tal fin, se descargaron los archivos de *Land Cover Type Yearly Global 500m*, para estos dos años a fin de realizar la comparación entre el uso de suelo en la cuenca, debido a que 2001 es el año más antiguo que se puede conseguir y 2019 el más actualizado. Se utilizó la banda *Land Cover Type 3: Annual Leaf Area Index (LAI) classification*, que permite clasificar el uso de suelo en 10 clases diferentes, dando como resultado el siguiente cuadro comparativo entre los años 2001 y 2019:

Cobertura en Hectáreas	Año 2001 Hectárea	Año 2019 Hectárea	Análisis
FOEB: Bosques latifoliados perennes: dominados por latifoliadas perennes y palmeras (dosel >2m). Cobertura arbórea >60%.	17940.33	17765.53	En el año 2001 habían 174.8 Hectáreas más de Bosque en la cuenca alta del rio Ariporo.
SAVA: Sabanas: entre 10-60% de cobertura arbórea (>2m).	33333.28	33557.66	En el año 2001 habían 224.38 Hectáreas menos de sabana en la cuenca alta del rio Ariporo.
GRAS: Praderas: dominadas por herbáceas anuales (<2m), incluidas las tierras de cultivo de cereales.	107.52	57.94	En el año 2001 habían 49.58 Hectáreas más de praderas en la cuenca alta del rio Ariporo.

*Tabla 1. Análisis de uso del suelo Qswat plus y MCD12Q1.006 MODIS Land Cover Type Yearly Global 500m para los años 2001 y 2019.*

Durante el análisis realizado con sensores remotos, se puede evidenciar que el bosque gradualmente se ha venido disminuyendo desde el 2001 al 2019 en 174.8 Hectáreas, también se evidencia la disminución en las sabanas en 224.38 Hectárea y una disminución de 49.58 Hectáreas de praderas, debido a los usos rurales que le dan los pobladores al suelo.

Concluyendo que efectivamente ha existido un reemplazo gradual de árboles a cultivos y pasturas que puede incidir según la bibliografía en la recarga de acuíferos.

Los mapas de cobertura de los años 2001 y 2019 se pueden evidenciar en los anexos 9.7. y 9.8. respectivamente.

WEAP también permite saber cuál es la cobertura actual de la cuenca, dando como resultado que 2 945 Hectáreas del área de la cuenca objeto de estudio, son pasturas, 9 972 Hectáreas están dedicadas a la agricultura, el 37 083 Hectáreas son bosques, y 58 Hectáreas son arbustos (WEAP 2021). Los datos al ser de diferentes misiones no permiten la comparación con los datos de MODIS, ya que no diferencian la agricultura, estando ésta incluida dentro de praderas y sabanas.

El instituto geográfico Agustín Codazzi, tienen un levantamiento de información de suelos del país, donde una capa permite visualizar la granulometría del suelo, esta es importante en la medida que mientras el grano es más grueso o de mayor tamaño, el tamaño entre los poros permite una mayor infiltración de agua lluvia a los acuíferos subterráneos, por lo tanto si se quisieran identificar áreas de interés para maximizar la infiltración de agua para recarga de acuíferos, serán estas áreas en amarillo, que tienen textura gruesa donde se pueden planificar usos del suelo que permitan la máxima infiltración de agua lluvia en la cuenca.

Se midió el área con textura gruesa con QGIS dando que 104.064,504 Hectáreas , son de textura gruesa, con aproximadamente el 40% de contenido de arenas en su tamaño de partícula lo cual indica que son suelos adecuados para la infiltración y recarga de acuíferos, por lo tanto, se recomienda a los tomadores de decisiones que el uso del suelo en esta región se planee para maximizar la infiltración de agua en la temporada de lluvia, que corresponde al color amarillo en la figura 10.

Este suelo, puede ser apto para el incentivo y establecimiento de sistemas de almacenamiento de agua y producción de alimento de tipo VAC system (Ver Anexo 8.3), así como la siembra de árboles maderables nativos o el establecimiento de embalses para maximizar la recarga de los acuíferos que permitan proteger y abastecer en la temporada de sequía al río Ariporo.

## Grupos texturales cuenca alta del rio Ariporo

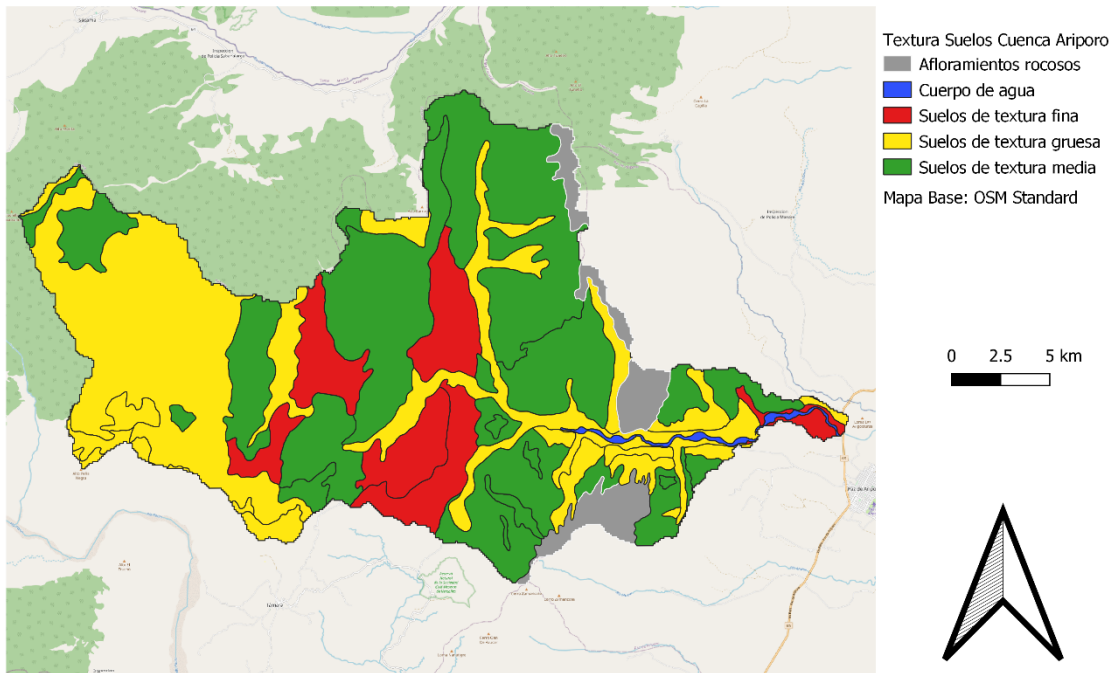


Figura 10 Grupos texturales de suelos cuenca alta del rio Ariporo: Fuente: IGAC

Teniendo ya los datos de uso del suelo y de granulometría, se procede a realizar un análisis de los datos hidrometeorológicos.

### 5.1.2. Análisis de datos de lluvia:

Al realizar un pequeño diagnóstico histórico de las lluvias a partir de los datos oficiales de precipitación de las estaciones 36010030 y 36015010 (DHIME, 2020), estaciones Santa Rita y Paz de Ariporo que son las más cercanas a la estación de caudal arrojaron los siguientes resultados (IDEAM, 2020).

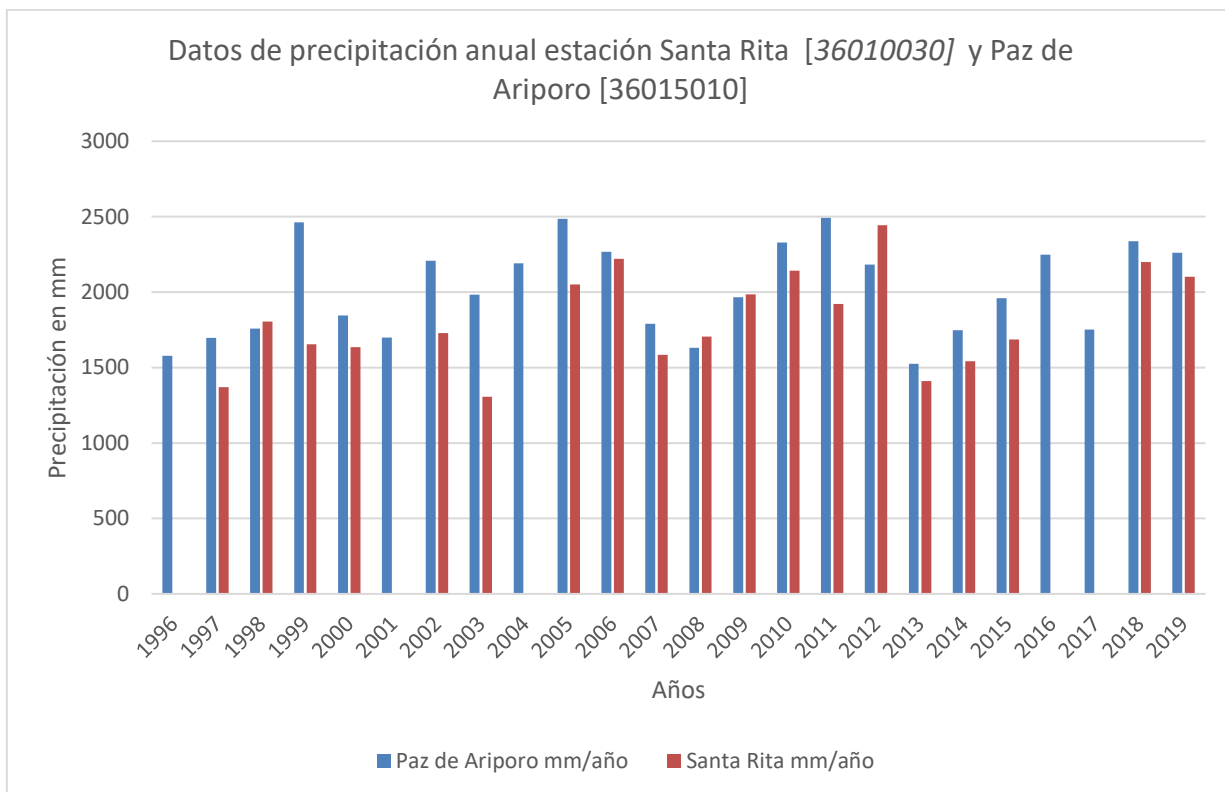


Figura 11 Comportamiento de la lluvia anual en las estaciones 36010030 y 36015010 de IDEAM en milímetros anuales desde el año 1996 hasta el año 2019. Fuente: IDEAM.

Al revisar el comportamiento de la lluvia anual, se pueden evidenciar picos marcados en cada año llegando entre 2000 y 2500 milímetros anuales en promedio desde 1996 hasta 2019.

La información existente, se encuentra desde el año 1996 para las estaciones de Paz de Ariporo y Santa Rita. Se pueden evidenciar unos picos como el del año 2011 ocasionado por el fenómeno de la niña.

Para elaborar la figura anterior, se descartaron los años cuando falta un 10% de los datos anuales, razón por la que en la estación de Santa Rita no se consideraron los años 1996, 2001, 2004, 2016 y 2017. La estación de Paz de Ariporo tiene las lecturas de datos completas para todos los años, de esta forma es posible tener una idea de lo sucedido para los años faltantes en la estación de Santa Rita, ya que como vemos en la Figura 14 estas dos estaciones tienen una buena correlación. Se hace el análisis de

estas dos estaciones en caso de existir la posibilidad de completar datos, aunque existen más estaciones como la de Cabuya y la Aguada que se analizaran también más adelante.

Los datos existentes sobre la cuenca están desde el año 1996 hasta el año 2019, tiempo en el cual se procesa la información hidrometeorológica de las cinco estaciones hidrometeorológicas, cuatro de lluvia y una de caudal.

En las figuras 12 y 13 se graficaron todos los datos disponibles para lluvia, donde se puede observar que existe un dato extremo en la estación de precipitación de la Aguada, representada con color rojo en las figuras 12 y 13, asociado a un error de medición, ya que sobrepasa a la media en más de 7 veces. Allí se observan aumentos en los datos de lluvia en los años durante los cuales se presentó el fenómeno de La Niña, como el 2011 y 2016.



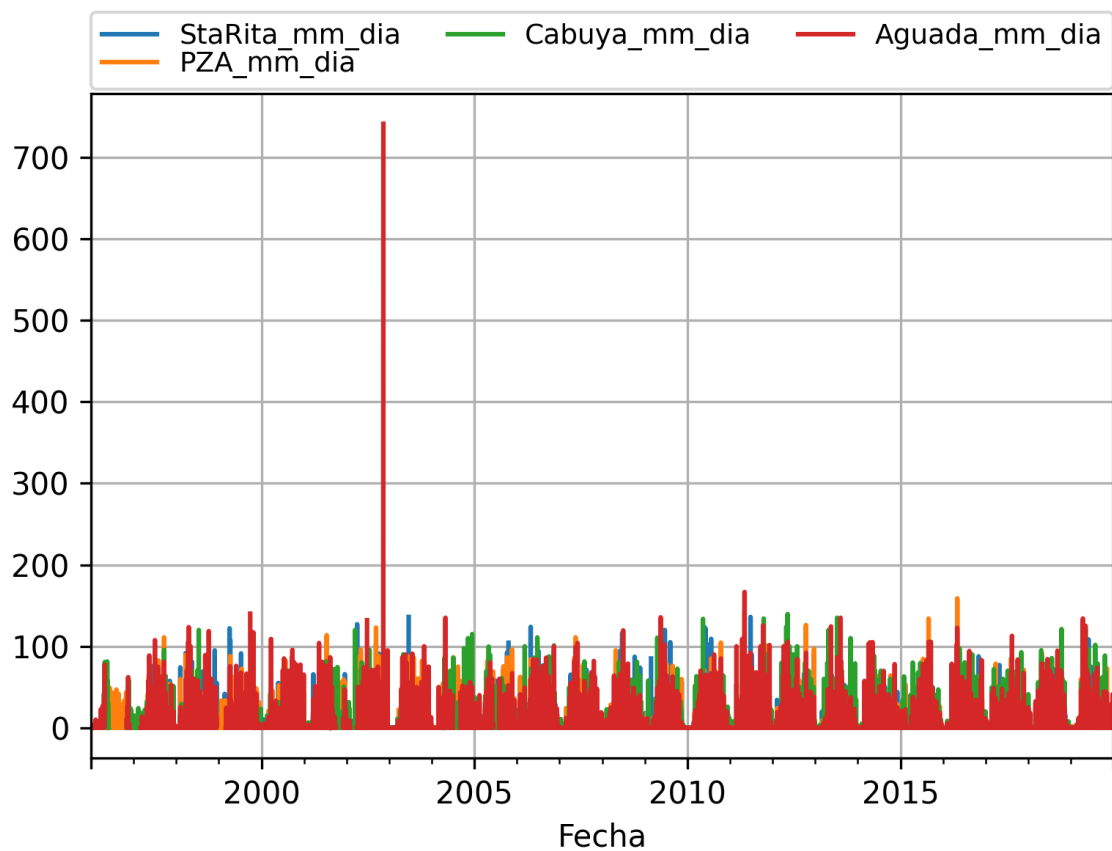


Figura 12 Gráfico de datos existentes de precipitación diaria estaciones IDEAM. Fuente: IDEAM

En la figura 13, se observa una disminución de las lluvias en todas las estaciones durante los años 2013 y 2014, los cuales representan una época de fuerte de sequía, registrada en las noticias de la época, que ocasionó una alta mortandad de fauna.

Se realiza un gráfico por estaciones a fin de verificar la existencia de todos los datos y los que hacen falta como se puede evidenciar en las figuras 13 y 14.

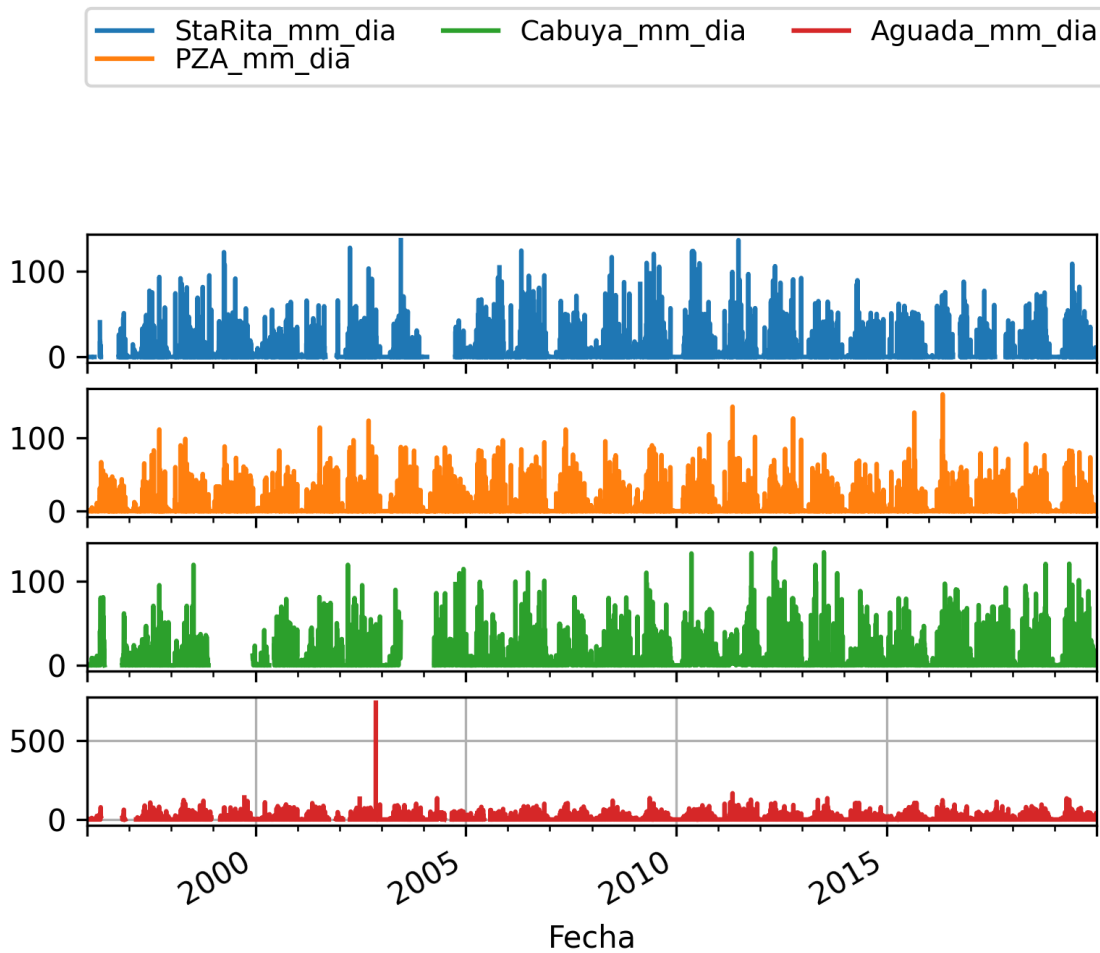


Figura 13 Gráfico de datos existentes de lluvia diaria. Estaciones IDEAM. Fuente: Propia

En la figura 14 se evidencian los 13 años en la estación de caudal de Paz de Ariporo.

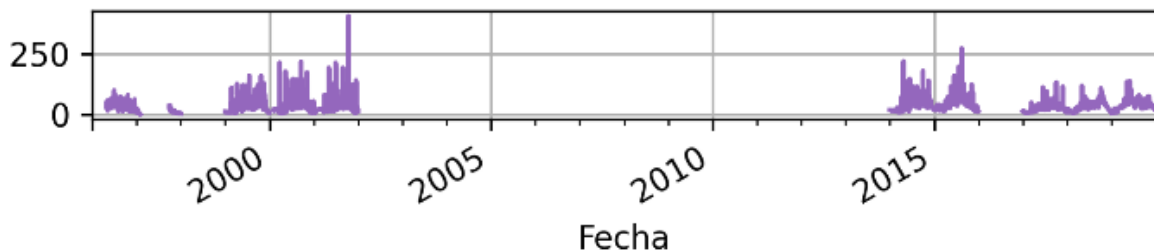


Figura 14 Gráfico de datos existentes de caudal medio diario en metros cúbicos por segundo. Estación Paz de Ariporo IDEAM. Fuente: Propia

Para el análisis de datos, se usó la biblioteca Pandas, donde mediante el comando groupby fue posible agrupar y analizar los datos a distintas escalas de tiempo. Esto permitió ver el comportamiento anual para los años comprendidos entre 1996 y 2019 para los datos de precipitación. En la figura 15 se puede apreciar el comportamiento anual de todas las estaciones de lluvia, entre las cuales, la estación de la Aguada (de color rojo en el gráfico) es la única estación que se acerca a los 3.000 milímetros al año. Así mismo, se puede evidenciar el pico del fenómeno de La Niña, mencionado anteriormente, en el año 2011.

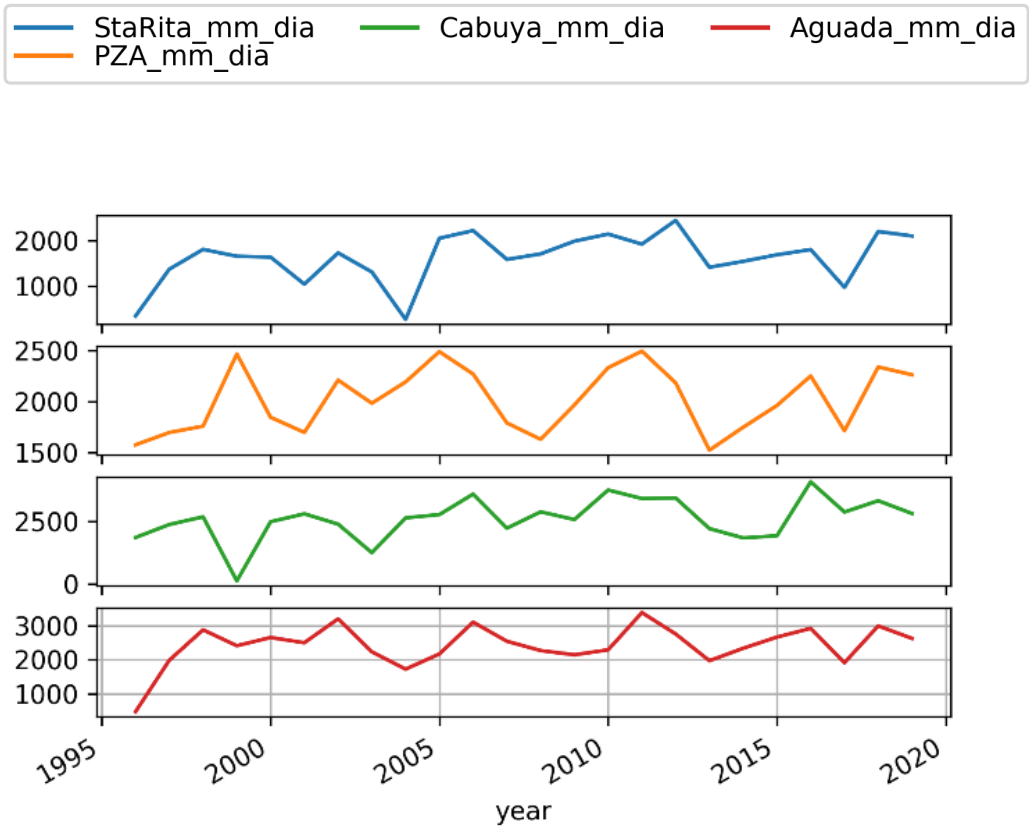


Figura 15 Precipitación anual en las estaciones de lluvia. Fuente: propia.

Se realizó un agrupado anual de los datos medios diarios por año y por estación a fin de visualizar los años húmedos y secos con sus valores extremos, para relacionarlo con las fechas de sequías extremas como la ocasionada en el 2014, donde corroboramos que fue un año de baja precipitación en la cuenca Ver Figura 16.

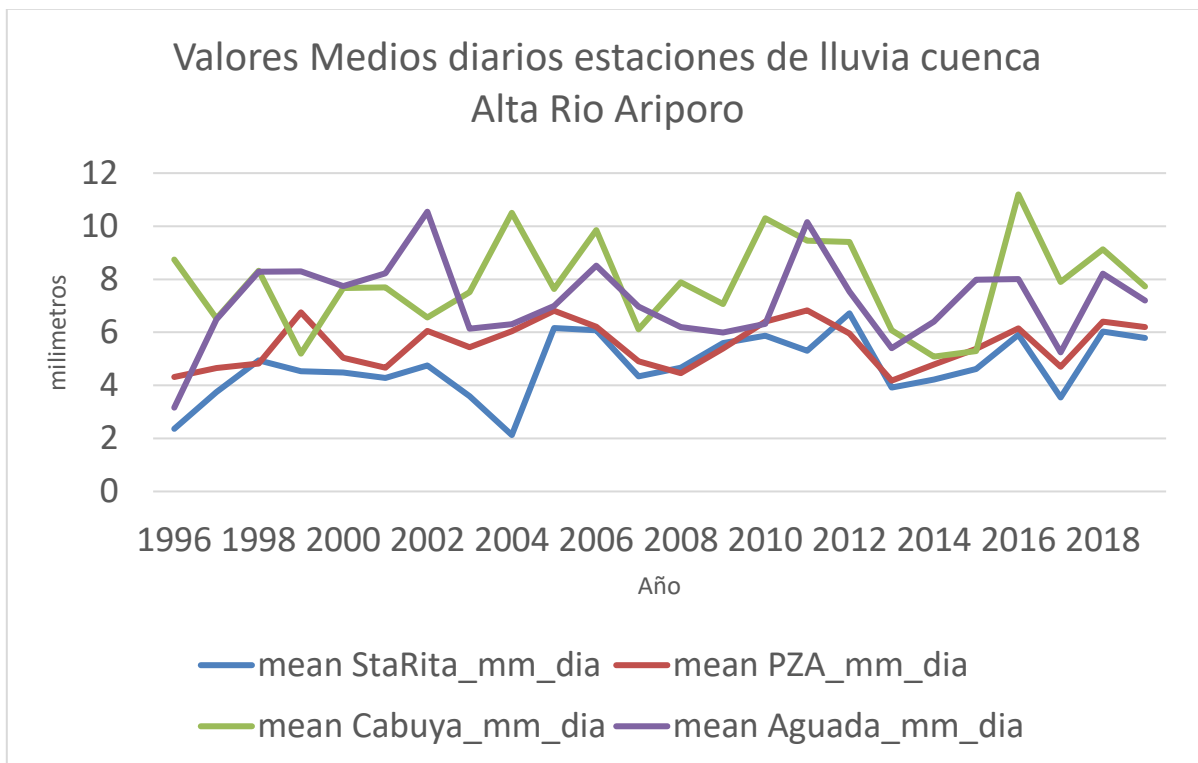


Figura 16 Precipitación multianual promedio diaria de las estaciones de lluvia. Fuente: propia.

En el anexo 8.9 se puede ver la misma grafica para los datos máximos donde se puede corroborar el dato extremo anteriormente mencionado para la estación de la aguada, el grafico de mínimos no se realizó ya que el valor mínimo para las lluvias es de 0.

En la figura 17, se puede observar la correlación entre estaciones, donde 1 es el valor perfecto de correlación entre dos estaciones y es de color rojo. Esta gráfica muestra, mediante el método de Pearson, que la mayor correlación se da entre las estaciones que tienen similar altitud o ubicación espacial como es el caso de Santa Rita y Paz de Ariporo y que la diferencia es mayor entre las estaciones que están más alejadas o entre aquellas

cuya altitud sobre el nivel del mar difiere. Numéricamente, un valor cercano a cero (representado en la gráfica en color azul), significa que no hay correlación; mientras que la similitud en los datos, es decir, que cuando llueve en una llueve en la otra (en el gráfico de correlación de Pearson es rojo). La correlación más elevada entre dos estaciones de lluvia se da entre la estación de Paz de Ariporo y la de Santa Rita, ya que presentan el valor más cercano a 1 de todos los resultados (de 0,6). Tal correlación se debe a que estas dos estaciones se encuentran en una altura en metros sobre el nivel del mar similar y una cerca de la otra espacialmente, de manera que los vientos cargados de lluvia inciden sobre ellas de manera similar, lo que a su vez produce una distribución similar de las lluvias en el espacio y el tiempo.

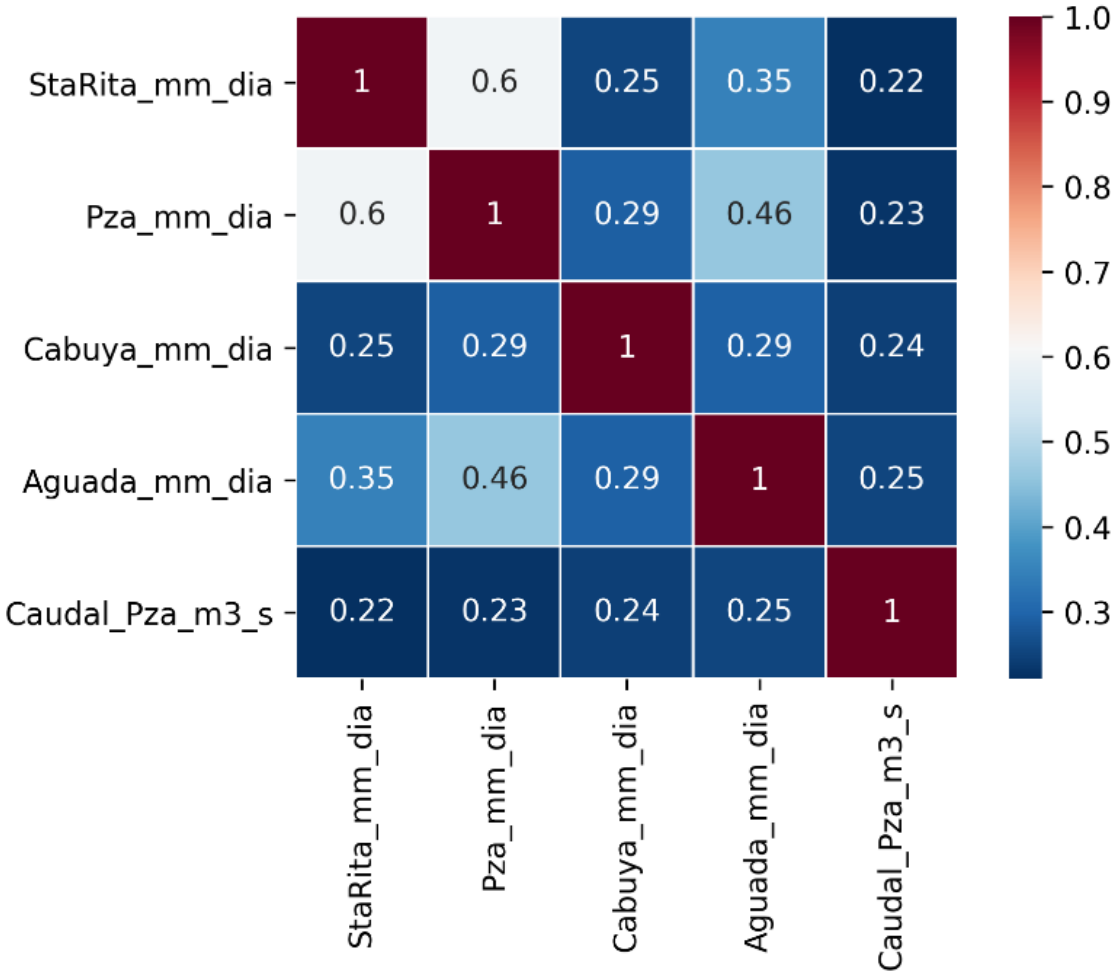


Figura 17 Correlación Pearson entre estaciones. Fuente: propia.

Después de realizar el análisis de los datos IDEAM, trabajo se empezará con el análisis de los datos descargados de ERA5 a partir de este punto del trabajo, debido a que como ya se mencionó con anterioridad, estos datos de ERA5 fueron los datos climatológicos utilizados como entrada en la herramienta WEAP. Los datos que se descargaron en formato NetCDF y se analizaron y graficaron con Python, a excepción de la figura 18 que fue procesada con Google earth engine.

Para realizar el mapa con la información, se utilizó la herramienta Google earth engine, que permite tomar toda la información existente del área de interés y a esta información sacarle el valor medio. El mapa se realizó con la finalidad de mostrar cual es la ventaja de utilizar los datos de ERA5. Estos datos se encuentran distribuidos en espacio y tiempo, como podemos visualizar en la figura 18, donde los valores de precipitación son más altos en la cuenca alta, datos de color azul y valores de precipitación más bajos en rojo en la cuenca baja, estos valores se dan en metros de agua al día, como valor medio de todos los datos.

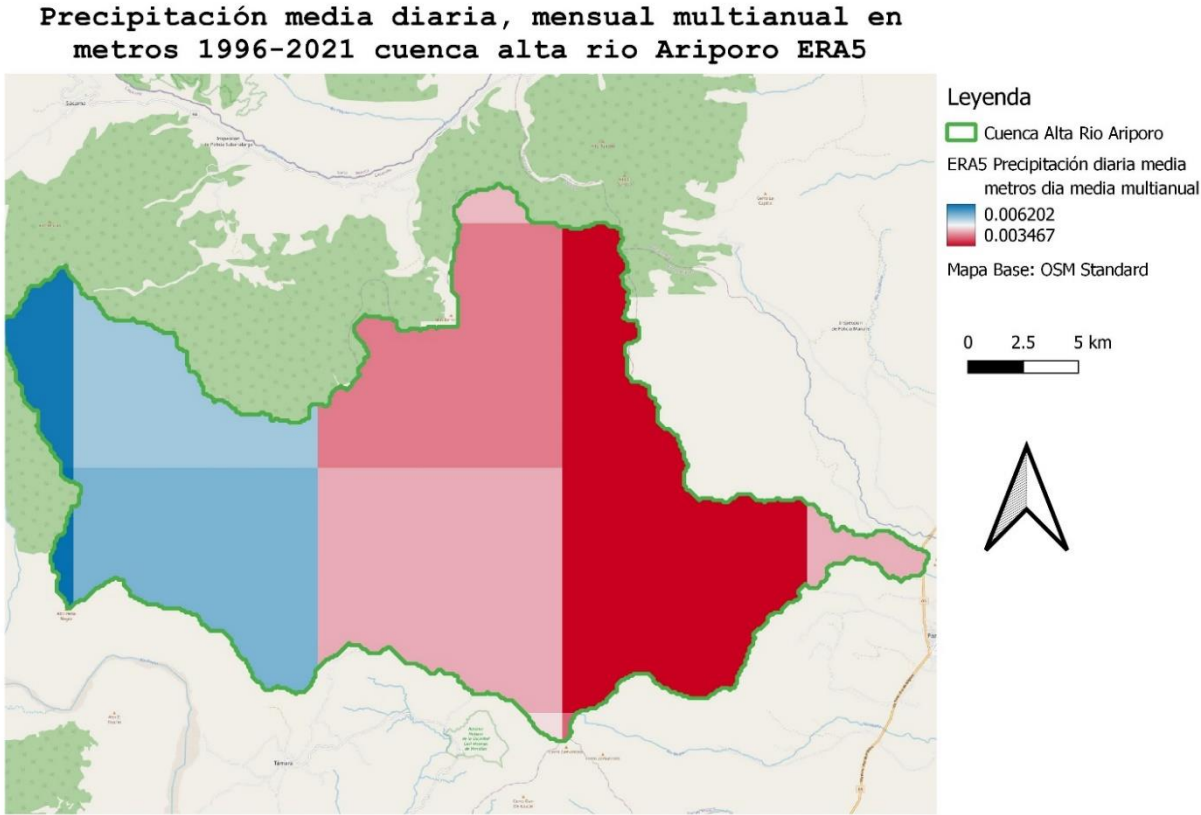


Figura 18 Precipitación ERA5 Valor medio diario en metros 1996-2021 Fuente: ERA5.

En la figura 18, podemos observar como varia la precipitación media diaria, donde la cuenca alta el valor medio diario puede llegar a 6 milímetros mientras que en la cuenca baja este valor esta alrededor de los 3 milímetros al día.

En la figura 19, se presentan en una sola grafica todos los datos existentes desde el año 1999 hasta el año 2021, tp es el nombre corto que utiliza ERA5 para la lluvia por esta razón aparece tan sigla en la leyenda del gráfico.

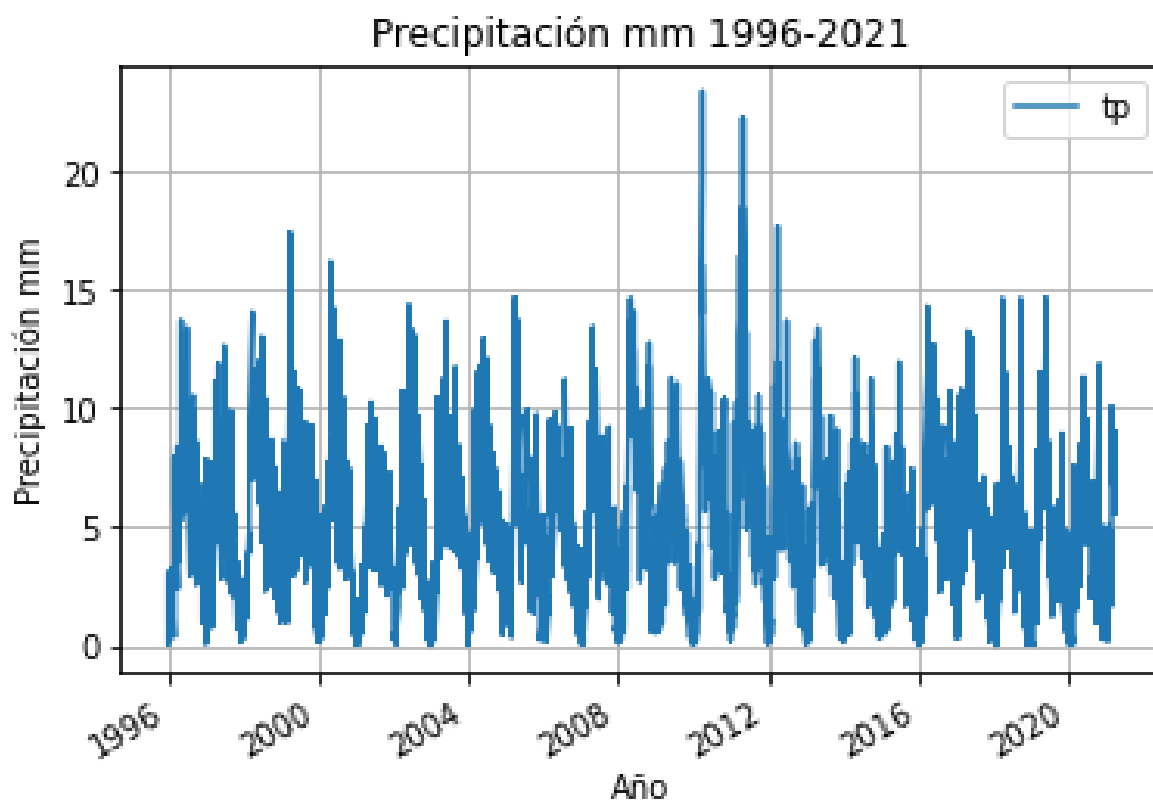


Figura 19 Precipitación diaria en milímetros 1996-2021 Fuente: ERA5

Mediante la librería pandas de Python y el comando groupby, es posible agrupar los datos en meses y años, que son las figuras 20 y 21 respectivamente para poder realizar un pequeño análisis de los datos existentes agrupados en estas escalas de tiempo extrayendo de estos lapsos temporales un valor medio para los datos.

En la figura 20, podemos ver que en los meses de abril, mayo y junio es donde se da la máxima precipitación, así como los meses de diciembre enero y febrero se dan los valores mínimos, siendo precisamente el mes de marzo, al estar antecedido por tres meses de sequía el mes más crítico en términos de sequía por ausencia de lluvia.

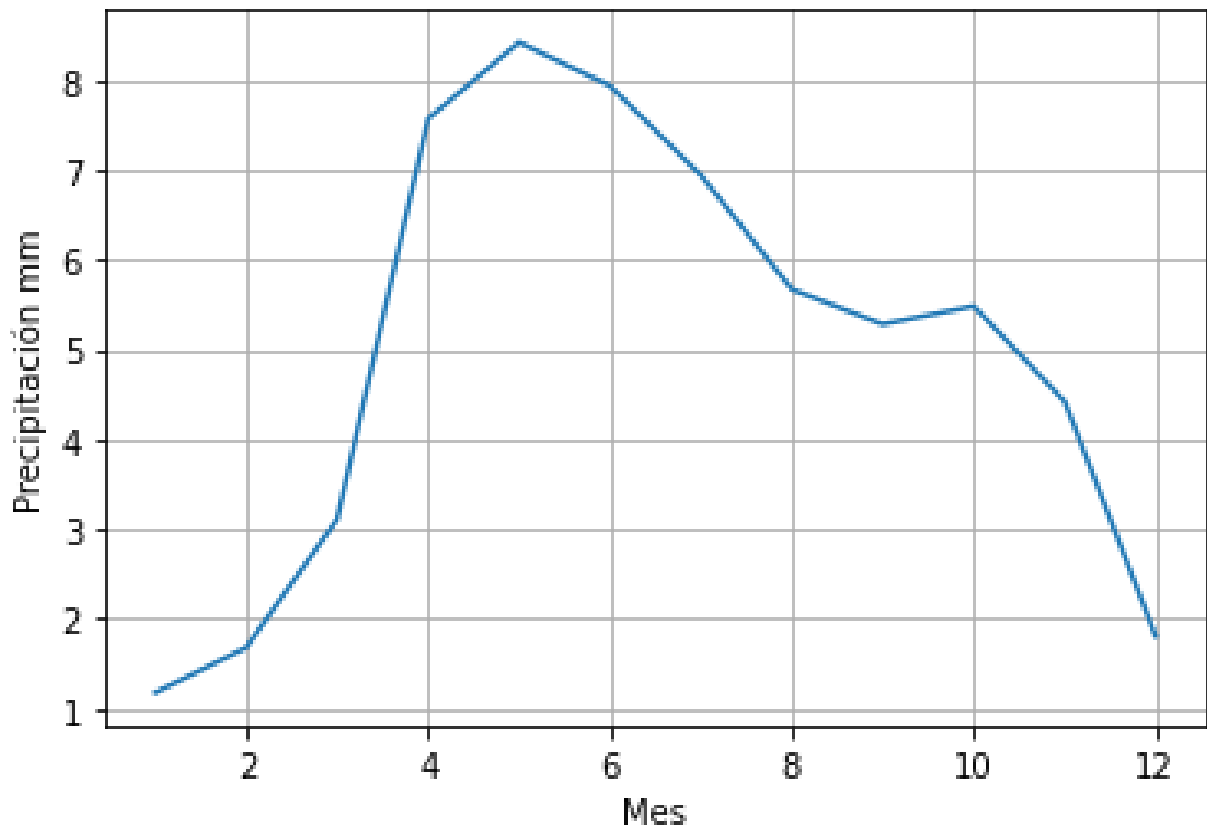


Figura 20 Precipitación promedio diaria en milímetros al mes 1996-2021 Fuente: ERA5

Como se mencionó con anterioridad, la Figura 21 corresponde a un agrupamiento de los datos de manera anual, arrojando un valor medio diario anual, donde fácilmente es posible visualizar años de lluvia extremadamente alta como fue el 2011 así como años donde la lluvia fue extremadamente baja como lo es el año 2015.



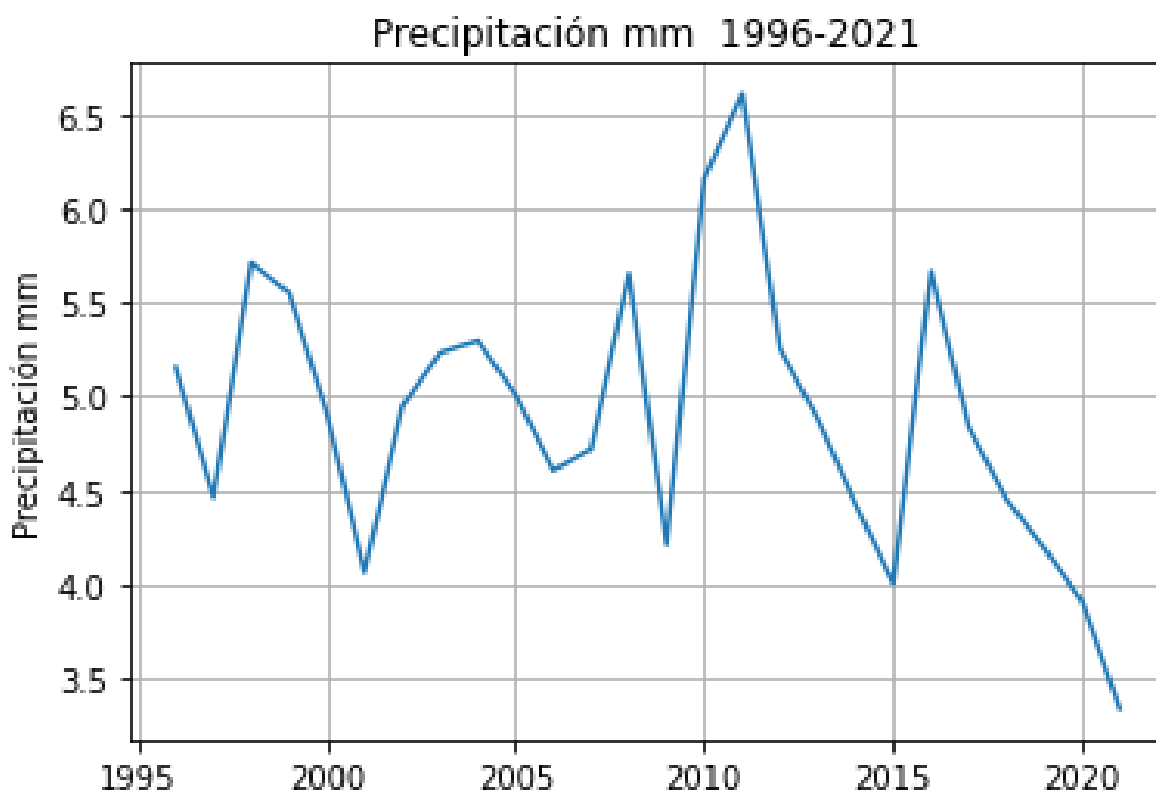


Figura 21 Precipitación en milímetros diarios promedio anual 1996-2021 Fuente: ERA5

De la figura 21, se puede corroborar como en la cuenca alta del río Ariporo, donde ocurrieron tragedias ambientales por la mortandad elevada de animales en el año 2014 y 2015, podemos evidenciar en esta grafica como estos dos años coinciden con valores bajos de precipitación, razón por la que se hace necesario realizar un llamado a la planificación de usos del suelo en la cuenca de manera que permita maximizar la infiltración de agua lluvia, de manera que cuando exista un año extremadamente seco, se pueda contar con reservas de agua subterránea, sin embargo estas estructuras deben realizarse con un excelente diseño previniendo así mismo, un año extremadamente lluvioso como lo fue el año 2011.

### 5.1.3. Análisis de datos de caudal.

Al realizar la descarga de datos del portal oficial de IDEAM, denominado DHIME, para la cuenca alta del río Ariporo existe una sola estación con datos de caudal. Se trata de la estación con código 36017010 que tiene datos desde el año 1996. Sin embargo, los datos no están completos. Como podemos ver en la Figura 14 hacen falta datos de caudal para los años 1998, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013 para un total de 13 años de datos faltantes como se pudo evidenciar en la figura 14.

Al no tener esta información de caudal se hace necesario utilizar una herramienta que permita calibrar los datos de lluvia a los datos de caudal existentes, con el fin de completar la serie de datos faltantes para estos 13 años de caudal.

En la figura 22 podemos evidenciar el agrupado de los datos existentes por mes y por año, de manera que se pueden ver los años secos y húmedos para la cuenca alta del río Ariporo.

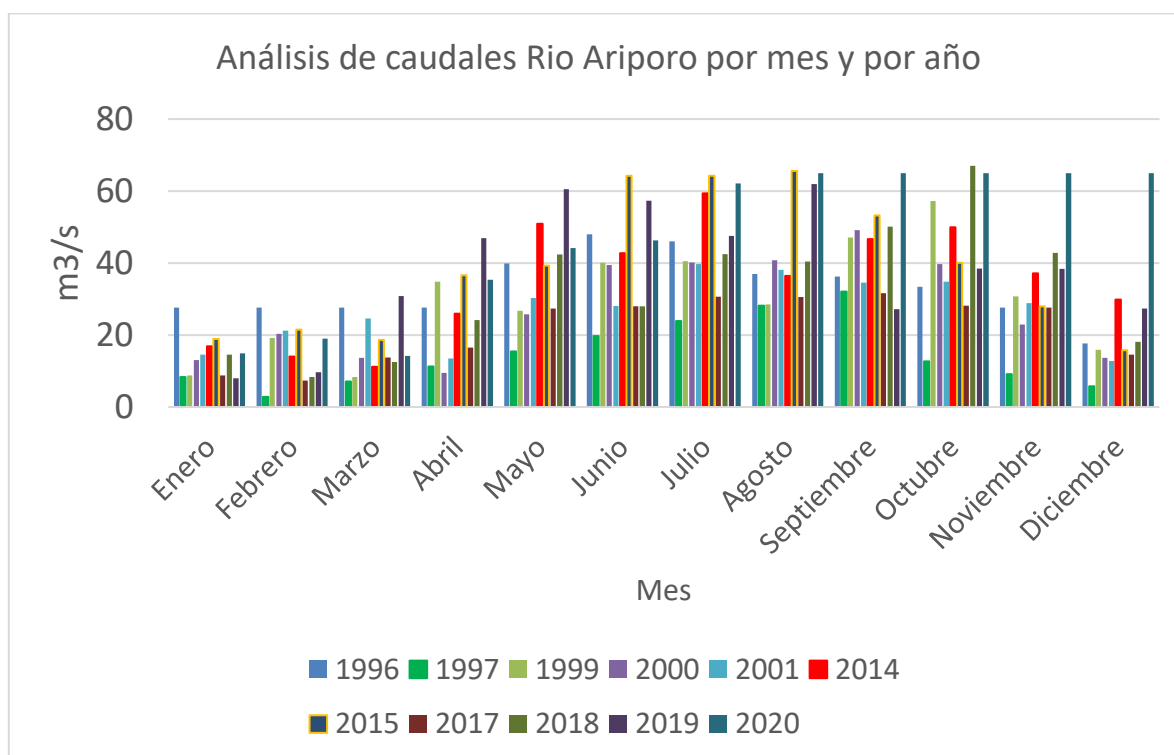


Figura 22 Datos disponibles caudal medio mensual Estación IDEAM 36017010 Paz de Ariporo (Latitud 5.90655556, longitud -71.90238889).

En la figura 22 se pueden apreciar los datos mínimos del año 1997. Se resalta el año 2014 en rojo debido a que fue el año de la sequía extrema y vemos que los datos de caudal no son en extremo bajos, debido a que en 2011 fue un año de lluvia extremadamente alta como se puede ver en la figura 21, desde esta año empieza a disminuir en la cantidad de lluvia hasta alcanzar el mínimo en el año 2015, como el análisis varia mes a mes, podemos ver como los datos de caudal para este año critico fueron bajos precisamente en los meses de baja precipitación, noviembre, diciembre enero febrero y marzo, ocasionando una temporada seca prolongada.

Con los datos de precipitación y el clima en general descargados de ERA5, se realiza un modelo calibrado para extraer información que permita comprender mejor la hidrología de la cuenca desde el año 1996, completando los datos de caudal y aportando información sobre el flujo base que es de especial interés para el análisis de la recarga de agua subterránea como se verá en capítulos posteriores.

#### 5.1.4. Análisis de datos de temperatura.

En la figura 23 se puede evidenciar el histórico de la temperatura a 2 metros del suelo desde 1996.

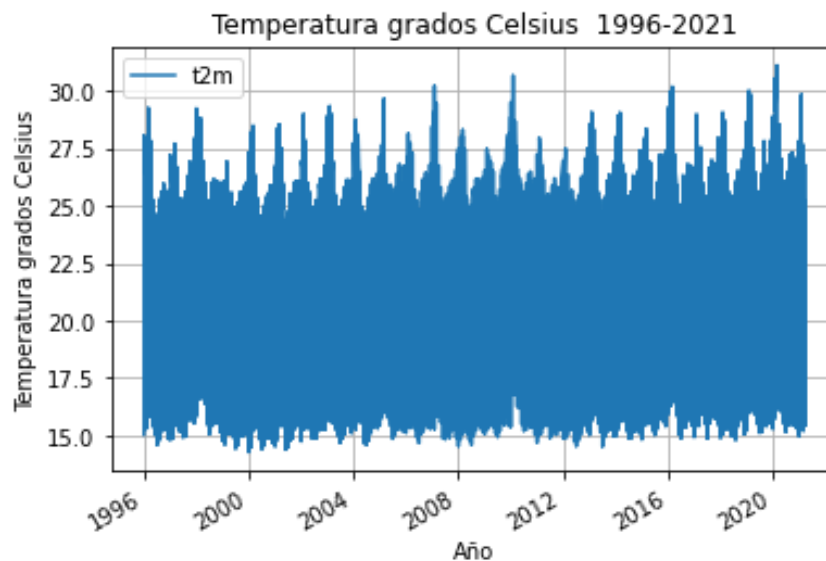


Figura 23 Temperatura media diaria en grados Celsius 1996-2021 Fuente: ERA5.

En la figura 23 podemos evidenciar que los datos de temperatura en el histórico no han tenido cambios significativos en el tiempo que puedan indicar alguna anomalía que cambie el comportamiento del clima en general.

De la figura 24, se puede evidenciar el comportamiento de la temperatura agrupado de manera mensual en sus valores medios, donde se pueden identificar que los meses de máxima temperatura son febrero y marzo que los son meses de sequía extrema, mientras que los meses de junio y julio, son los meses de menor temperatura y máxima precipitación.

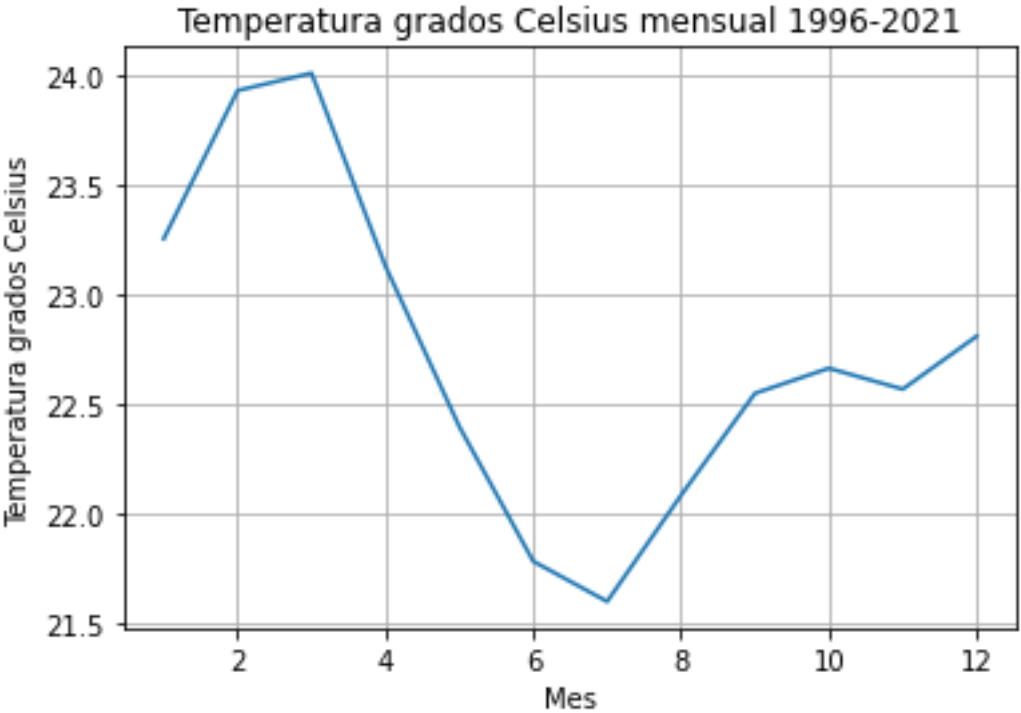


Figura 24 Temperatura media diaria mensual 1996-2021 Fuente: ERA5.

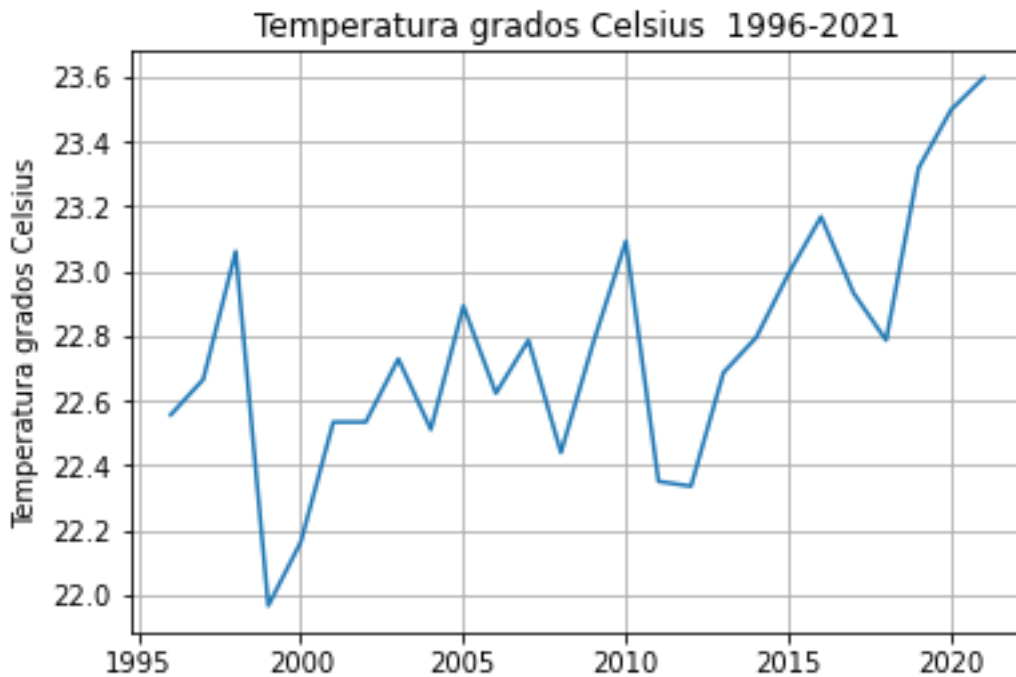


Figura 25 Temperatura media diaria anual 1996-2021 Fuente: ERA5

Al realizar el análisis agrupado anual de la temperatura, podemos ver en la figura 25 que, en el año 2011, que fue en extremo lluvioso la temperatura tuvo un valor mínimo en la media anual, mientras que en los años secos como 2014 y 2015, existió un año con máximos locales en los datos, lo cual nos indica que la lluvia en la región obedece a datos de temperatura bajos en la media anual.

### 5.1.5. Análisis de datos de evaporación potencial

Este parámetro es una medida de las condiciones atmosféricas cercanas a la superficie conducen al proceso de evaporación. Se considera que es la cantidad de evaporación, en las condiciones atmosféricas existentes, de una superficie de agua pura que tiene la temperatura de la capa más baja de la atmósfera y da una indicación de la evaporación máxima posible.

La evaporación potencial en el actual Sistema Integrado de Pronóstico del ECMWF se basa en cálculos de balance de energía superficial con los parámetros de vegetación establecidos en 'cultivos/agricultura mixta' y asumiendo que 'no hay estrés por la humedad del suelo'. En otras palabras, la evaporación se calcula para la tierra agrícola como si estuviera bien regada y suponiendo que la atmósfera no se ve afectada por esta condición de superficie artificial.

En la figura 26 se pueden observar todos los datos existentes desde el año 1996 para la cuenca alta del río Ariporo.

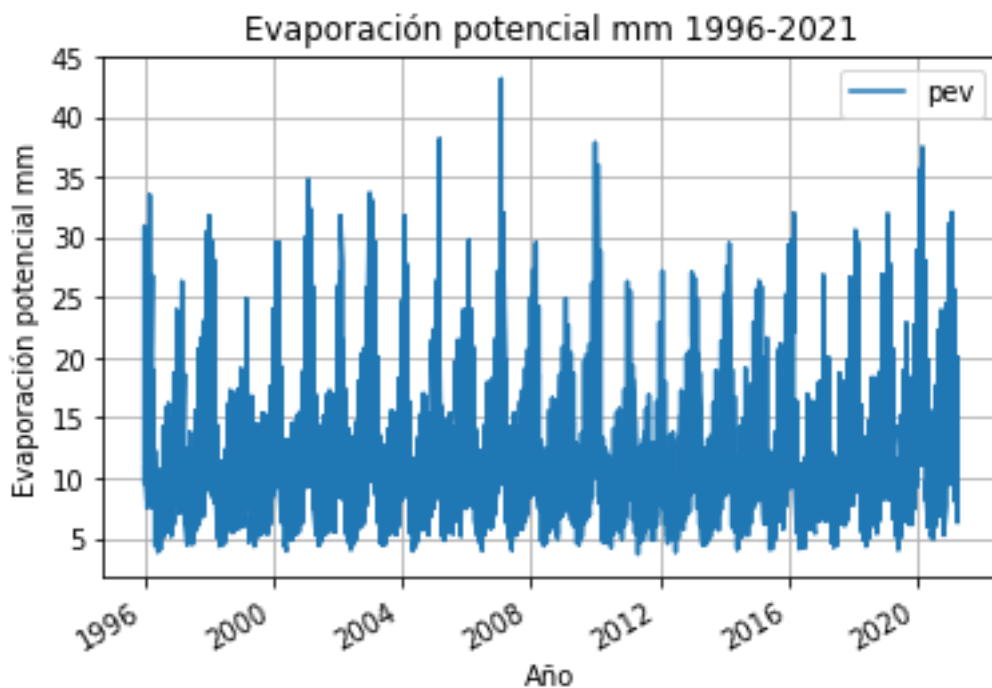


Figura 26 Evaporación potencial diaria mensual en milímetros Fuente: ERA5

En la figura 26 no se pueden ver claramente los años para identificar máximos y mínimos y poderlos relacionar con los máximos y mínimos de lluvia, sin embargo, esto se puede realizar al hacer el agrupado de datos a escala anual que corresponde a la figura 28 en la que se realizara este análisis.

En la figura 27 podemos ver los datos agrupados por mes, sacando el valor medio, en el mes de febrero que coincide con la fecha de alta temperatura y baja precipitación se da el mayor valor de la evaporación potencial para la cuenca alta del río Ariporo.

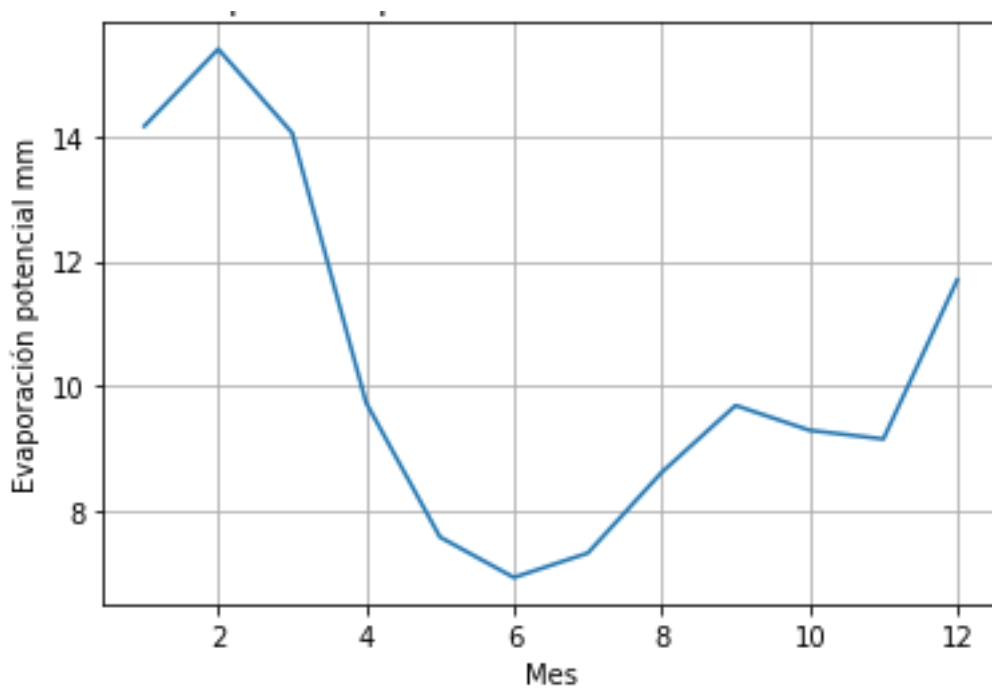
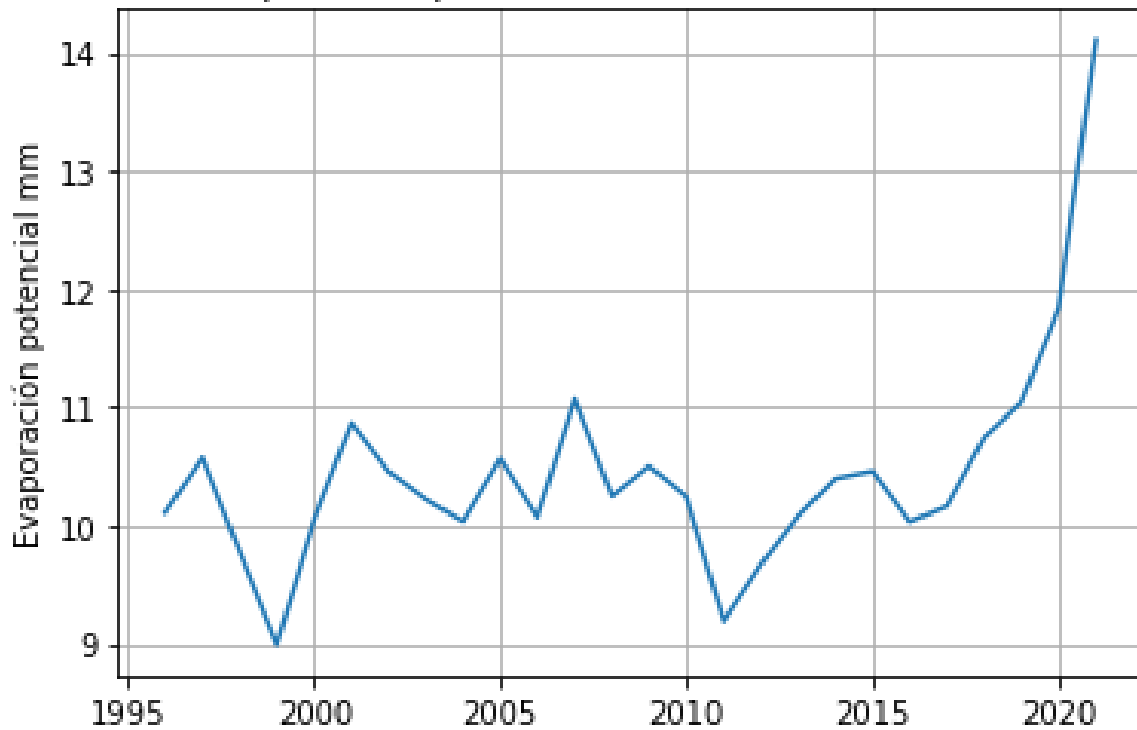


Figura 27 Evaporación potencial promedio diaria mensual en milímetros 1996-2021  
Fuente:ERA5

El valor mínimo de la evaporación, se da en los meses de máxima precipitación que son junio y julio.

En la figura 28 se pueden ver los datos medios agrupados por año para la evaporación potencial, mientras en los años 1999 y 2011 tenemos mínimos locales en la evaporación potencial, así mismo tenemos para los mismos años máximos locales de precipitación ver figura 21. Por el contrario, para los años 2001 y 2007 se tienen máximos locales en evaporación potencial y se tiene en los mismos años mínimos locales en la precipitación ver figura 21.



*Figura 28 Evaporación potencial en milímetros promedio anual diario 1996-2021 Fuente:ERA5*

El análisis de datos agrupados por fechas, nos permite tener una idea del comportamiento del clima en el área de estudio y la relación existente entre los datos de lluvia, temperatura y evaporación potencial en el histórico de tiempo desde el año 1996, con la finalidad de poder tener un panorama de lo que ha sucedido con los datos del clima y su influencia dentro de la cuenca alta del río Ariporo.

**5.1.6. Perfil de elevaciones del cauce principal del río Ariporo:**

Utilizando QGIS, se tomaron los drenajes de Qswat plus, se dejó únicamente el drenaje principal y de allí se extrajeron las elevaciones desde el archivo ráster para esa línea más



larga además de las distancias, de manera que fue posible con estos datos en crear un perfil para el río que quedo de la siguiente manera Ver Figura 29.

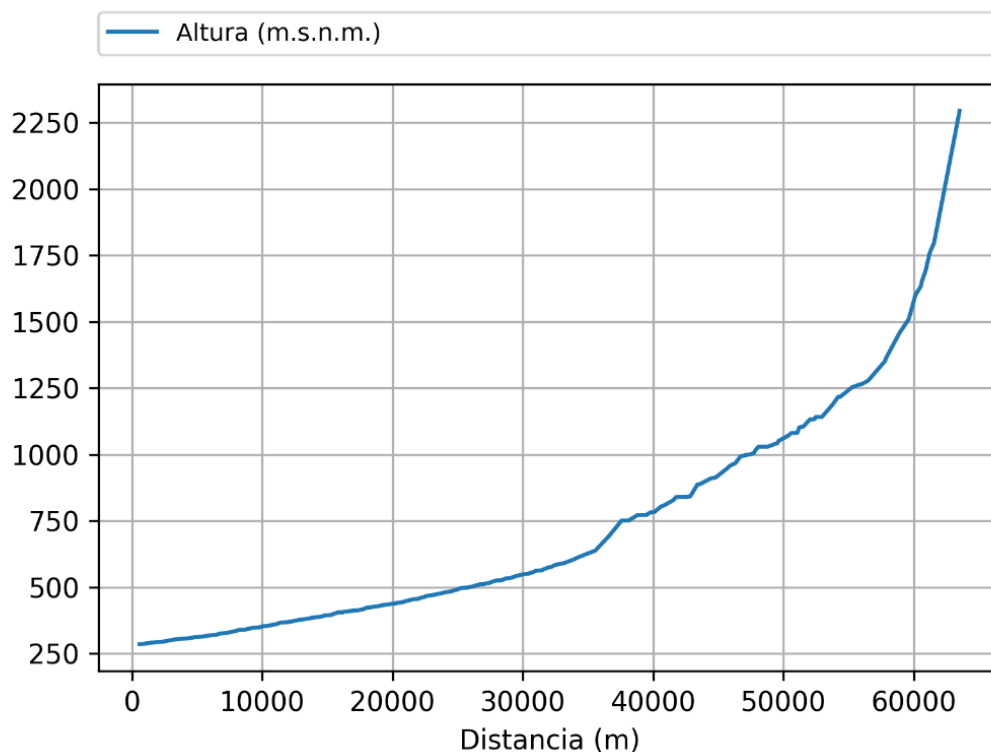


Figura 29 Perfil del río. Fuente: propia

Se puede apreciar en el perfil como el río pasa de una pendiente muy alta a una planicie, lo cual condiciona la rápida respuesta entre la lluvia y el caudal.

## 5.2. Construcción y calibración del modelo hidrológico en WEAP

### 5.2.1 Resultados del modelo hidrológico de humedad de suelo en WEAP con las variables de decisión o parámetros sin calibrar

WEAP, permite utilizar información climatológica distribuida en el espacio y el tiempo, de manera que, para el presente estudio, se realizó la descarga de las variables climatológicas de la cuenca alta del río desde la base de datos de Copernicus, incluyendo toda el área de

la cuenca desde el nacimiento hasta llegar al punto de medición de caudal IDEAM. Los parámetros climatológicos descargados fueron temperatura, precipitación, evaporación potencial, humedad relativa y velocidad del viento de manera mensual desde el año 1996 hasta el año 2020, datos de reanálisis de ERA5. Reanálisis, quiere decir que son datos corroborados con estaciones en tierra, por esta razón se seleccionó este tipo de datos.

Se realizó la descarga de estos datos desde la plataforma de Copernicus en formato de compresión NetCDF ya que WEAP permite leer este tipo de datos, siendo estos datos las entradas de la herramienta.

El modelo de la herramienta WEAP utiliza nueve variables de decisión, se realiza la descripción de cada una de ellas, además de indicar cual es el valor al inicio de la simulación es decir sin calibrar (Stockholm Environment Institute, 2021):

Variable de decisión: Es una variable implícita dentro de un modelo matemático que influye sobre el resultado de la operación matemática. El modelo de humedad del suelo de WEAP tiene dos ecuaciones matemáticas, una para el tanque superior y otra para el tanque inferior. Dichas ecuaciones, cuentan con nueve variables de decisión, donde cada una de ellas influye sobre el resultado final o caudal simulado.

A continuación, se describe cada una de las nueve variables de decisión, además de esto, se pone después del signo = el valor inicial por defecto que tiene la herramienta WEAP con la finalidad de verificar el cambio en este valor después de la calibración del modelo.

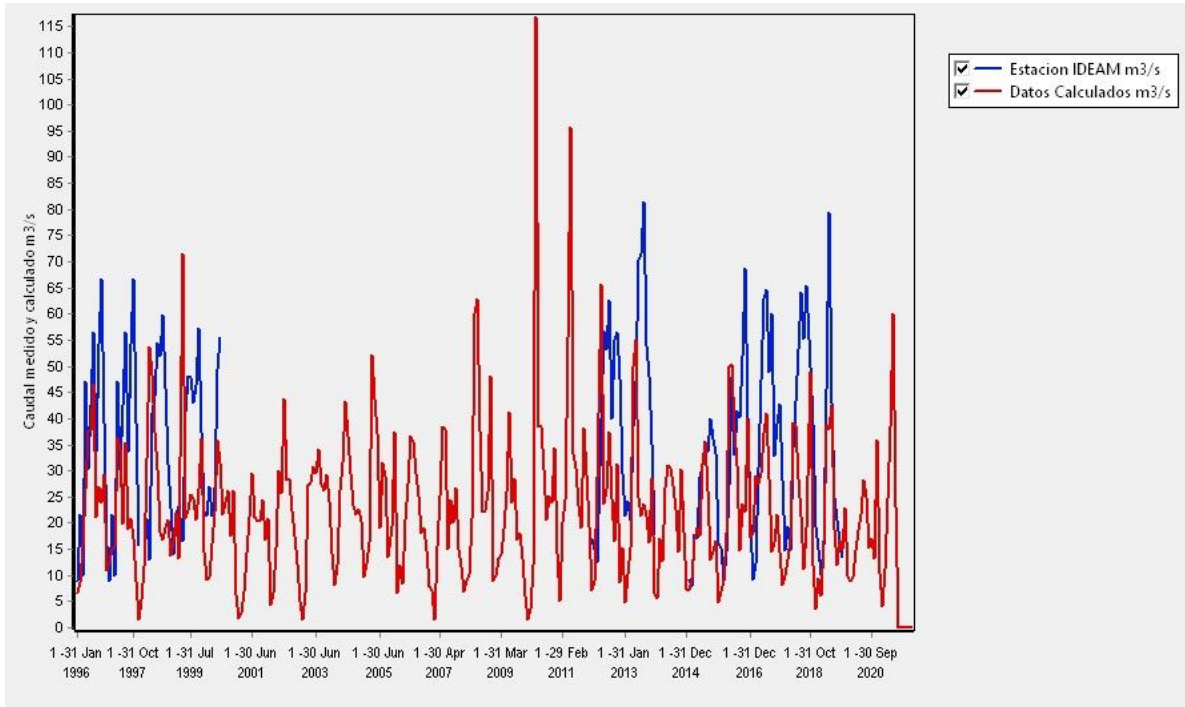
- Kc (Coeficiente de cultivo en relación al cultivo de referencia) Varía según el periodo vegetativo = 0.1, este parámetro controla los valores de la evapotranspiración.
- Soil Water Capacity (Capacidad efectiva de retención del agua en el suelo en el tanque superior, controla que tan rápido el agua se mueve sobre la superficie del terreno) = 5
- Deep Water Capacity (Capacidad de almacenamiento del tanque inferior) este valor es ignorado si se tiene un escurrimiento /infiltración en conexión a un módulo de agua subterránea, controla que tan rápido el agua se mueve sobre la superficie del terreno = 10

- Deep Conductivity (Conductividad profunda, se refiere a la velocidad de flujo en estratos profundos, este parámetro controla que tan rápido el agua se mueve sobre la superficie del terreno) = 100
- Run off Resistance factor RRF (Controla la respuesta a la escorrentía superficial, que tanta resistencia hay a moverse la lluvia como escorrentía superficial, puede aumentar o disminuir el valor de la percolación, se relaciona con un índice foliar, la pendiente del terreno y el tipo de suelo, se modifica si se quiere aumentar los picos en el caudal) = 0
- Root Zone Conductivity (Tasa de conductividad hidráulica a saturación plena en la zona radicular del tanque superior cuando el almacenamiento relativo  $z1=1$ , controla que tan rápido el agua se mueve en la zona de profundidad desde la superficie hasta la zona radicular, que a su vez influye en cómo se mueve el agua sobre la superficie del terreno, se modifica si se quiere aumentar los picos en el caudal) = 300
- Preferred Flow Direction (1=100% flujo horizontal; 0=100% flujo vertical) Divide el caudal que sale de la zona de las raíces del tanque superior entre el Inter flujo e infiltración al tanque inferior, controla que tan rápido el agua se mueve sobre la superficie del terreno = 1.
- Initial Z1 (Valor inicial al inicio de la simulación) = 80, rango de 0 a 100, indica un porcentaje de almacenamiento inicial del tanque superior de 0 a 100.
- Initial Z2 (Valor inicial al inicio de la simulación) = 80, rango de 0 a 100, indica un porcentaje de almacenamiento inicial del tanque inferior de 0 a 100.

El modelo de WEAP funciona si se cuenta con la información climatológica completa y en las unidades requeridas por la herramienta que son grados Celsius para temperatura, milímetros para lluvia, metros por segundo para la velocidad del viento y la humedad en porcentaje. Al ingresar estos datos en las unidades anteriormente descritas se selecciona donde dice resultados en el menú principal, y allí se crea el modelo como se puede observar en el anexo 8.10.

Al realizar la simulación del modelo de humedad del suelo de WEAP con estos valores iniciales por defecto de cada una de las variables de decisión, se llega a un resultado de

caudal simulado de color rojo, valores que se comparan gráficamente con los valores del caudal observado para todos los años desde 1996, que se pueden apreciar en la figura 30.



*Figura 30 Caudal IDEAM y Caudal modelado en WEAP sin calibrar en m3/s. Fuente: propia.*

Al realizar una métrica que permita ver el error entre los valores, se utilizaron dos de ellas, la métrica de la resta del valor absoluto y la del coeficiente NSE para los valores medidos y calculados dando los siguientes resultados:

Valor absoluto: 2448.625046

NSE: - 0.69

Para interpretar fácilmente estos resultados, en la medida que el resultado del valor absoluto es mayor, se tiene más error ya que se trata de una sumatoria de cada uno de los errores.

Así mismo, el coeficiente de Nash negativo indica que utilizar un valor promedio es mejor predictor.

Al tener una métrica del error, se procede a la calibración del modelo con la herramienta PEST, para verificar con las mismas métricas que el error entre los datos medidos y simulados en WEAP disminuya después de la calibración.

### **5.2.2. Calibración del modelo hidrológico de humedad de suelo con los datos de caudal IDEAM del río Ariporo**

**Calibración Pest:** WEAP incluye un enlace a una herramienta de estimación de parámetros (PEST) que permite al usuario automatizar el proceso de comparar los resultados de WEAP con las observaciones históricas y modificar los parámetros del modelo para mejorar su precisión mediante un algoritmo de optimización multiobjetivo. Es posible utilizar PEST para ayudar a calibrar una o más variables en un herramienta WEAP, que puede ser particularmente útil cuando se utiliza el método de humedad del suelo de la hidrología de la cuenca como es este caso. PEST (Parameter ESTimation) es un paquete de software gratuito para la Estimación de Parámetros Independientes del Modelo y el Análisis de Incertidumbre. (Stockholm Environment Institute, 2021)

En cada iteración de calibración, la variable recibe un único valor para todos los años y pasos de tiempo. Las soluciones de PEST pueden ser sensibles al valor inicial de un parámetro, por lo que es posible que quiera experimentar con diferentes valores iniciales. (Stockholm Environment Institute, 2021)

Hay tres tipos diferentes de observaciones con las que se puede calibrar: Caudal de agua, Almacenamiento en embalses y Manto de nieve. (Stockholm Environment Institute, 2021)

Para el flujo de agua, PEST comparará los datos del medidor de flujo de agua introducidos en la vista de datos, con los resultados del flujo de agua para el nodo inmediatamente aguas arriba del medidor. Para el almacenamiento del embalse, PEST comparará los datos de almacenamiento del embalse introducidos en la variable de Volumen Observado para el embalse en la Vista de Datos, con los resultados de almacenamiento del embalse. Para el manto de nieve de la cuenca, PEST comparará los datos del manto de nieve introducidos

en la variable del Medidor de Acumulación de Nieve para la cuenca en la Vista de Datos. (Stockholm Environment Institute, 2021)

Puede elegir calibrar todos los Años y Meses, o un subconjunto de cualquiera de ellos.

Si elige Normalizar los datos de observación, PEST utilizará el recíproco de cada valor de observación como su peso. Esta ponderación garantizará que los valores más grandes, como los caudales de crecida en el río, no superen a los valores más pequeños, como los caudales bajos.

Los métodos utilizados por PEST para la inversión y el análisis de incertidumbre con restricciones de calibración se engloban bajo el término general de "métodos de gradiente".

Se trata de métodos potentes, ya que el número de parámetros que pueden acomodar puede ser muy grande, incluso de cientos de miles. Sin embargo, su uso requiere que las derivadas de los resultados del modelo utilizados en el proceso de inversión con respecto a los parámetros ajustados a través de ese proceso sean calculables. PEST calcula estas derivadas mediante diferencias finitas; varía un parámetro de forma incremental y, a continuación, divide el cambio incremental en las salidas del modelo pertinentes por el cambio incremental en el parámetro. (Stockholm Environment Institute, 2021)

Si los números calculados por un modelo no son funciones continuas de los parámetros del modelo, este proceso fallará. La falta de continuidad de los resultados del modelo con respecto a los parámetros puede ser el resultado de un mal diseño del modelo, o puede ser el resultado involuntario de las dificultades numéricas que un modelo puede experimentar - particularmente si emplea un esquema iterativo para resolver las ecuaciones que describen los procesos que simula. (Stockholm Environment Institute, 2021)

PEST puede resolver la continuidad problemática de los resultados del modelo con respecto a los parámetros de varias maneras. Puede basar el cálculo de las derivadas de diferencia finita en el uso de tres, o incluso cinco, valores de los parámetros en lugar de sólo dos; esto, por supuesto, tiene un coste en términos de ejecuciones del modelo. También puede detectar y rechazar las derivadas problemáticas. (Stockholm Environment Institute, 2021)

En general estas son las bondades del método Pest de calibración implícito en WEAP:

- Función de optimización basado en mínimos cuadrados.
- Utiliza el algoritmo Gauss-Marguardt\_Levenberg para la estimación de parámetros.
- Utiliza procesos iterativos para modelos no lineales.
- Ajusta los parámetros basado en las derivadas de las observaciones respecto a los parámetros, matrices jacobianas.

Al realizar el proceso de calibración con Pest, los valores de los parámetros cambian de acuerdo a los límites que el usuario define, de manera que para calibrar cada variable de decisión es necesario definir los límites inferior y superior. Al definirlos, se pone a correr el módulo que mediante matrices jacobianas ajusta todas las variables de decisión para acercarse lo que más sea posible a los valores observados, en este caso en particular, los valores observados son los caudales mensuales de la estación IDEAM del río Ariporo.

Las tres variables de decisión que son posibles de definir los límites inferior y superior para el proceso de calibración en la herramienta Pest son:

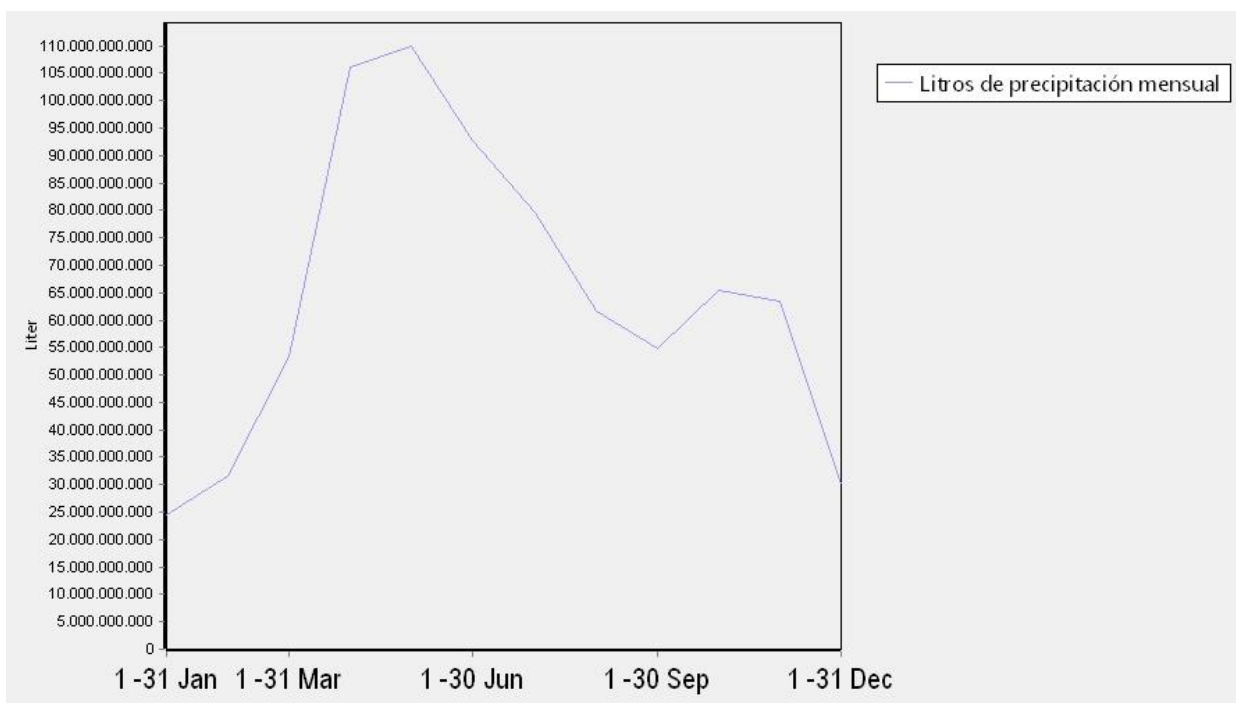
- Deep Water Capacity
- Deep Conductivity
- Initial Z2.

A continuación, se explica cómo se abordó la calibración de estas tres variables revisando dos métricas de error para los resultados obtenidos, la métrica de la sumatoria del error absoluto y la del coeficiente NSE, con la finalidad de seleccionar los valores con menor error.

- **Deep Water Capacity** (Capacidad de capa inferior del tanque): El modelo de WEAP tiene dos tanques, un tanque superior de dimensiones más pequeñas que el tanque inferior, ya que el tanque superior va hasta la profundidad de las raíces, mientras el tanque inferior representa el acuífero subterráneo con una profundidad desconocida.

**Deep Water Capacity** tiene el valor antes de la calibración es de 605 milímetros y al final de la calibración queda con un valor de 70 mm.

Para la definición de los límites de este parámetro se realizó un pequeño análisis de los datos de precipitación. Para el mes de abril, según los datos de la Figura 31, en abril se precipitó un Volumen de 105 000 000 000 litros. Es en este mes, es donde empieza a inundarse la parte baja de la cuenca según el testimonio de los habitantes de la zona. Este es un indicador de que se han empezado a llenar los acuíferos subterráneos y los más superficiales representados en el modelo como Tanque inferior y Tanque superior. Un milímetro quiere decir que se precipitó un volumen de un litro por cada metro cuadrado. Al convertir a milímetro el valor de abril hay que dividir el Volumen precipitado por el área de la cuenca (500 000 000 metros cuadrados). El resultado obtenido de esta operación es de 200 mm. Este valor, es un valor de referencia como límite superior, sin tener en cuenta lo acumulado inicialmente, ver Figura 31.



*Figura 31 Volumen de precipitación mensual multianual Cuenca Alta Rio Ariporo en litros*

Al correr el algoritmo de PEST para calibrar este parámetro con los límites de 0 a 100, se generan los siguientes resultados:

- Límite inferior: 0
- Límite superior: 100
- Resultado NSE -0.64601534



- Resultado Valor Absoluto: 2410.29625

De esta primera calibración, se puede corroborar que el error para el valor absoluto disminuye respecto al modelo no calibrado, ya que el valor anterior para el valor absoluto era de 2448.625046 y en esta ocasión el valor queda de 2410.29625, dando así una diferencia mejorando el error de 38.3287.

Tal y como se sugiere en el manual, se corre cambiando los límites ya que los valores iniciales influyen en el resultado, se corre nuevamente el algoritmo de calibración PEST para este mismo parámetro cambiando así los límites iniciales y generando los siguientes resultados, para esta calibración se tuvo en cuenta el análisis de la lluvia para el mes de abril anteriormente mencionado:

- Límite inferior: 0
- Límite superior: 700
- NSE -0.64320611
- Valor Absoluto: 2408.959836

De esta segunda calibración, se puede corroborar que el error para el valor absoluto disminuye respecto al primer intento de calibración, ya que el valor anterior para el valor absoluto era de 2410.29625 y en esta ocasión el valor queda de 2408.959836, dando así una diferencia mejorando el error de 1.33641 respecto a la calibración del primer intento.

Al Observar que aumentando el límite superior de 100 a 700 el error para el valor absoluto disminuye en 1.33 se aumenta el límite superior a 2000 en este tercer intento para revisar que sucede con los valores de error, obteniendo los siguientes resultados:

- Límite inferior: 0
- Límite superior: 2000
- NSE -0.64562095
- Valor Absoluto: 2410.084576

Debido a que el error aumento de nuevo al poner como límite superior 2000, se deja el modelo con los resultados de la calibración con el límite anterior de 700 mm, quedando como resultado final de la variable de decisión **Deep Water Capacity** de 70 mm con un error para la métrica de valor absoluto de 2408.959836.

- **Initial Z2** (Valor inicial en mm para el tanque inferior) = Valor en el modelo sin calibrar =0.5, valor al final de la calibración 0.5.

Este parámetro tiene que ver con el valor inicial del tanque inferior. Los límites inferior y superior para la herramienta Pest están por defecto, no se pueden cambiar y tienen valores de 0 para el límite inferior y 100 para el límite superior. Al revisar los resultados del error podemos observar que son iguales a los valores obtenidos con la calibración inmediatamente anterior, debido a que se trata de una optimización multiobjetivo donde se modifican todas las variables de decisión incluida Z2, es decir ya está calibrada y por tal razón se deja este valor obtenido como el valor del modelo calibrado con la variable de decisión anterior cuyo valor es de 0.5 generando los siguientes resultados:

- Límite inferior: 0
- Límite superior: 100
- NSE -0.64320611
- Valor Absoluto: 2408.959836

Quedando ya el modelo calibrado, los valores de las variables de decisión del modelo que más se acercaron a la realidad quedaron de la siguiente manera:

- Deep Conductivity (Conductividad profunda calibrada) = 600mm
- Kc (Coeficiente de cultivo en relación al cultivo de referencia) Varía según el periodo vegetativo = 0.505 (Valor calibrado)
- Soil Water Capacity (Capacidad efectiva de retención del agua en el suelo en el tanque superior) = 605 (Valor calibrado)
- Run off Resistance factor RRF (Control de la respuesta a la escorrentía superficial, se relaciona con un índice foliar y la pendiente del suelo) = 250.005 (Valor calibrado)

- Root Zone Conductivity (Tasa de conductividad hidráulica a saturación plena en la zona radicular del tanque superior cuando el almacenamiento relativo  $z_1=1$ ) = 400.5 (Valor calibrado)
- Preferred Flow Direction (1=100% flujo horizontal; 0=100% flujo vertical) Divide el caudal que sale de la zona de las raíces del tanque superior entre el Inter flujo y caudal de la capa más baja del suelo que va para el tanque inferior = 0.5 (Valor calibrado)
- Initial Z1 (Valor calibrado) = 0.5

La figura 32 representa los valores medidos por la estación IDEAM en metros cúbicos por segundo, graficados junto a los valores calibrados obtenidos dentro de la herramienta WEAP. Aunque los picos de caudales no se representan perfectamente, es una buena aproximación, sobre todo para estos casos donde son 13 los años que faltan datos para la estación de caudal en el IDEAM.

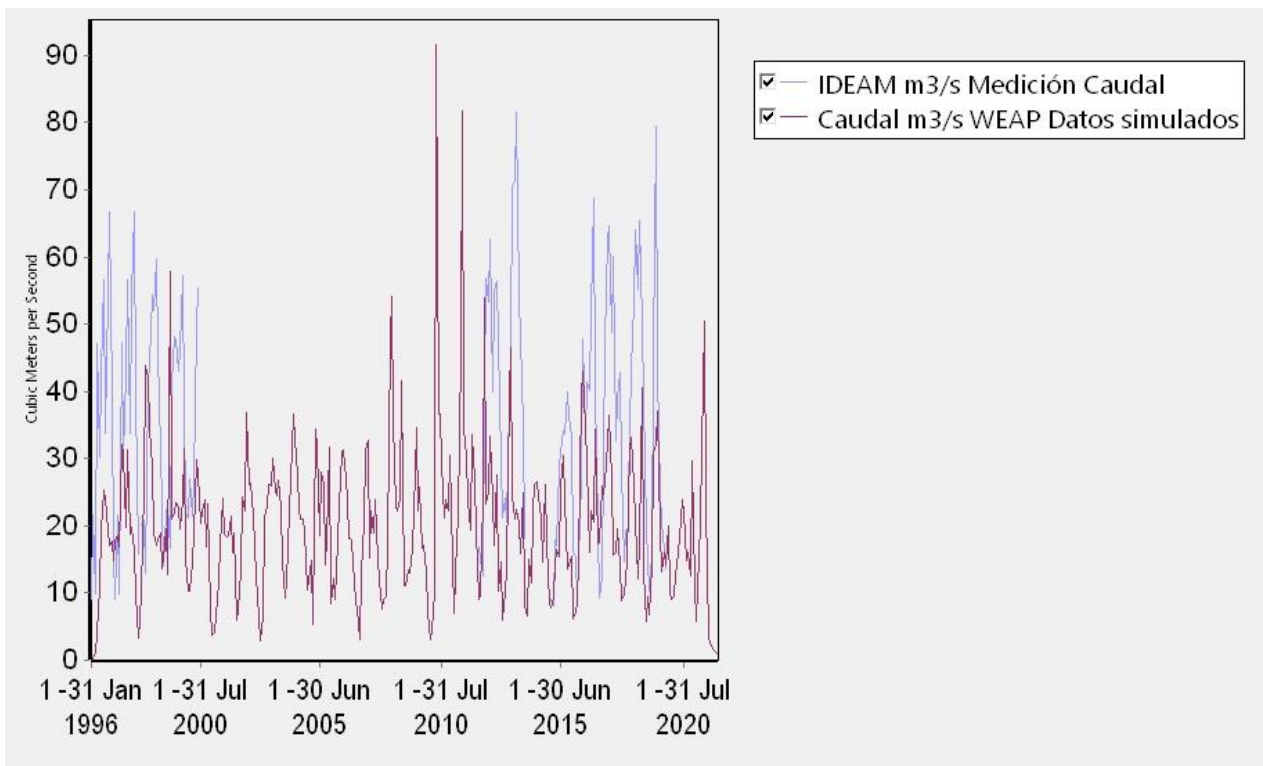


Figura 32 Caudal medido IDEAM y caudal simulado en WEAP en metros cúbicos por segundo

La diferencia en el error antes y después de la calibración del modelo es de 39.6652 metros cúbicos por segundo, para 24 años de datos, ya que pasa de un valor del error sin calibrar de 2448.625046 a un valor de 2408.959836 calibrado, para la métrica basada en la diferencia en valor absoluto de todas las mediciones. Aunque 2408 m<sup>3</sup>/s es un valor elevado, es una buena aproximación considerando nuevamente la ausencia en 13 años de datos.

Con el modelo calibrado, se realizará la interpretación de las gráficas de los parámetros hidrológicos obtenidos explicando cada una de ellas a ver que pueden indicar estos resultados respecto a las intervenciones en la cuenca o a los fenómenos climáticos extremos.

WEAP permite agrupar datos de manera multianual o mensual. Al decirle al programa que agrupe todos los resultados hidrológicos de manera mensual multianual en metros cúbicos por segundo, pudiendo así observar el comportamiento de la región en cuanto al flujo base, humedad del suelo, evapotranspiración, Inter flujo, precipitación y escorrentía superficial, según la lógica del modelo de dos tanques utilizada en el método de humedad del suelo de WEAP. Ver Figura 33.

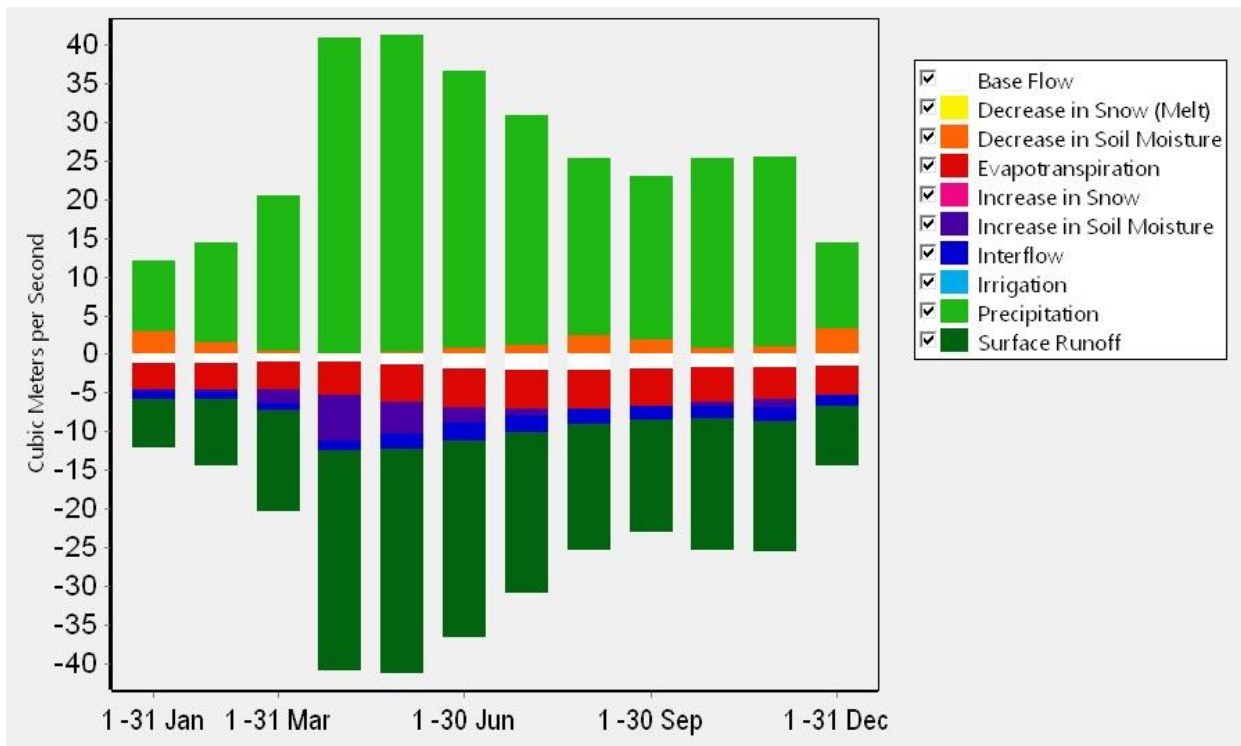


Figura 33 Entradas y salidas herramienta WEAP m3/s mensual multianual Calibrado.  
Fuente: propia.

En la figura 33 se puede observar de manera gráfica, la relación entre las variables hidrológicas, por ejemplo, la relación directa del modelo entre la precipitación y el caudal y algunas indirectas como la de humedad del suelo, evapotranspiración, inter flujo y flujo base. Las variables que tienen que ver con nieve no se tienen en cuenta debido a los rangos de temperatura de la zona de estudio que no presenta temperaturas de congelación del agua, tampoco la variable de irrigación.

La figura 33 permite una representación típica de la hidrología en un año dentro de la cuenca alta del río Ariporo, detectando entonces los meses de inundaciones y sequías para poder planificar infraestructuras para el control de sequía o de inundación dentro de la región.

En la figura 34 podemos ver el resultado de los datos anuales en milímetros, donde se pueden evidenciar los años secos como 2014 y 2015 y húmedos como 2010 y 2011 que fue un fenómeno de la niña intenso en el país.

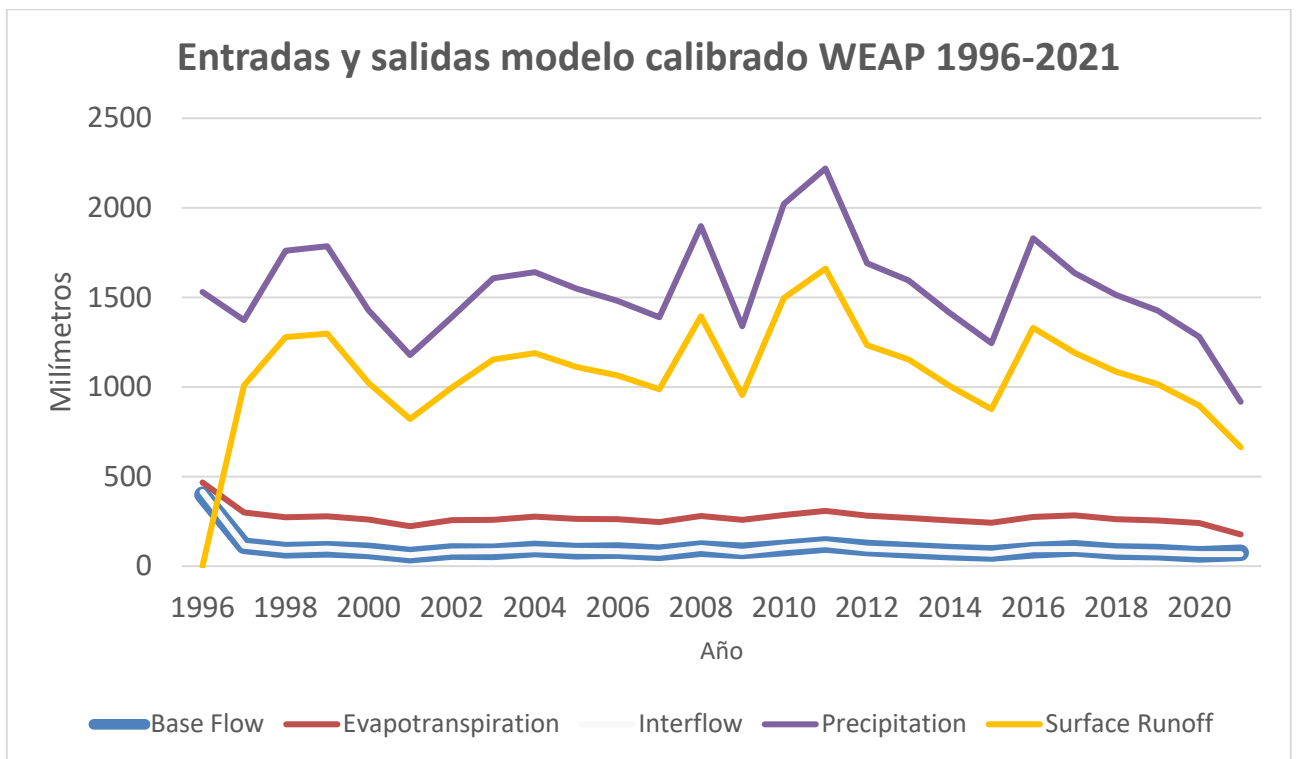


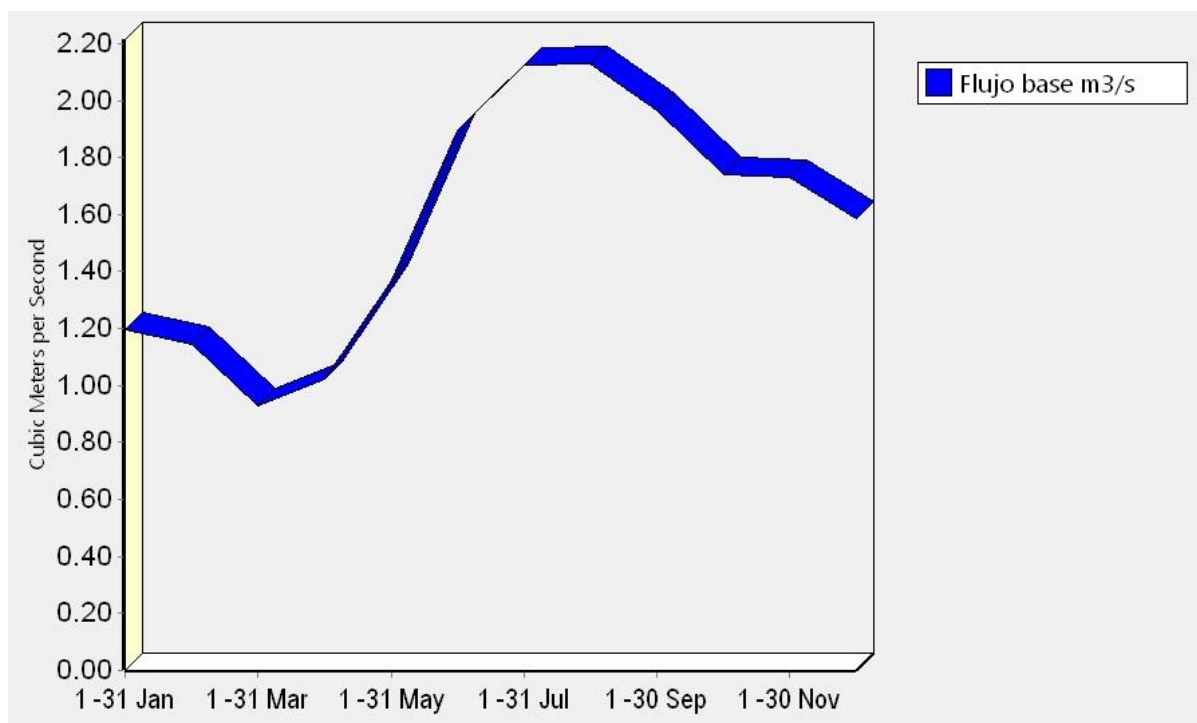
Figura 34 Entradas y salidas herramienta WEAP milímetros anuales periodo Calibrado. Fuente: propia.

La figura 34 permite observar la relación directa entre precipitación y el caudal, es decir cuando la precipitación es alta el caudal también, para WEAP el caudal se denomina *Surface Runoff*. Para el flujo base y el inter flujo dentro del modelo las relaciones no son tan directas y como veremos más adelante, existe un desplazamiento de los valores pico entre la lluvia y el flujo base en el análisis mensual de los datos.

Uno de los parámetros resultado del modelo, es el flujo base, que representa la cantidad de agua subterránea de la parte profunda que es aportada al río. Hidrológicamente es de suma importancia al conocer el comportamiento de la fuente de abastecimiento de los ríos en la temporada de estiaje, razón por la que la investigación en el campo de la hidrología durante el tiempo siempre ha querido entender esta compleja relación con el agua

subterránea a fin de poder planificar y tomar decisiones basadas en datos, los resultados del modelo de manera mensual se pueden ver en la Figura 35.

En la Figura 35, se puede observar, según el agrupado de datos mensuales, que en Abril empieza el incremento del flujo base, sin embargo es interesante señalar que el incremento de las lluvias se da en Marzo, lo cual puede representar una respuesta del flujo base un poco después de la lluvia, haciendo que la descarga del flujo base en el río sea un poco después, como se puede evidenciar más adelante en la Figura 36.



*Figura 35 Flujo base calibrado en m<sup>3</sup>/s mensual multianual, cuenca alta del río Aripuro.  
Fuente: propia.*

En la figura 36 se puede observar que, de manera anual, se evidencian los máximos y mínimos, que al relacionados con los datos de lluvia, si se analiza a escala anual la respuesta entre la precipitación y el flujo base se da, por ejemplo, cuando vemos los datos del año de alta precipitación que fue 2011 vemos en la figura 36 un flujo base máximo.

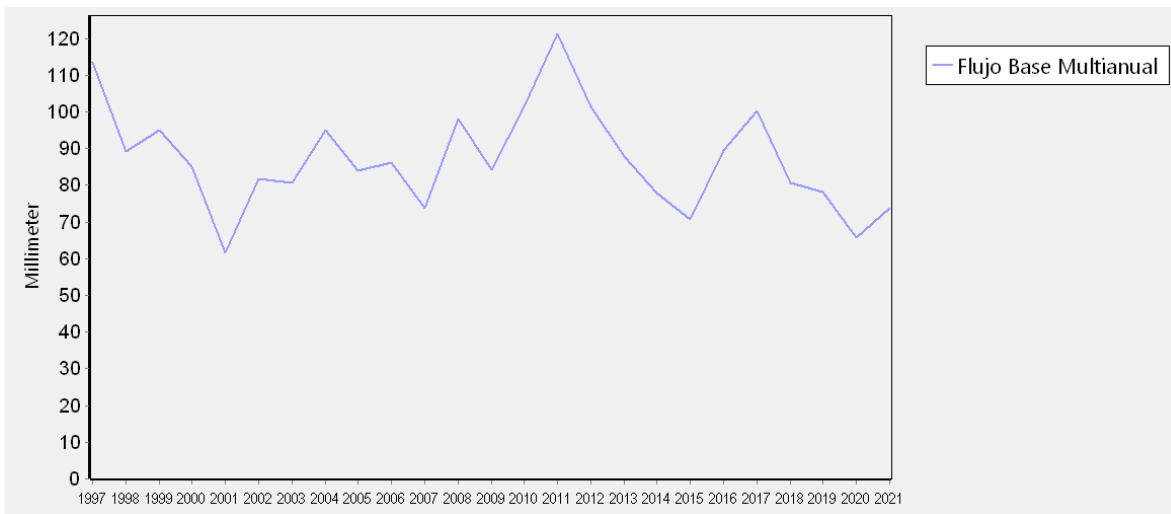


Figura 36 Flujo base anual cuenca Alta Rio Ariporo

Para realizar un análisis gráfico de magnitudes mensuales para los datos de precipitación y flujo base, se tienen dificultades al graficar los datos, debido a que los datos en metros cúbicos por segundo para las dos variables varían desde 0.92 hasta 2.12 para el flujo base, mientras que los valores de precipitación varían desde 9.13 hasta 40.99. Si se realiza un gráfico de los datos de esta manera no se podría visualizar por la diferencia entre magnitudes de los dos grupos de datos. Por esta razón se organizaron las magnitudes de menor a mayor para todos los meses para cada parámetro, es decir, el máximo valor es 12 al tener 12 meses el año y el mínimo es de 1. El resultado es una tabla con los valores ordenados de menor a mayor de 1 a 12 para precipitación, caudal y flujo base como se puede observar en la tabla 2 solo para poder visualizar cuando se dan los máximos y mínimos valores de cada parámetro en una sola gráfica, ver Figura 36.

Podemos observar en la tabla 2 que el máximo porcentaje de lluvia que se transforma en flujo base se da en diciembre. Esto se debe a que en diciembre la lluvia es escasa, sin embargo, el flujo base el pico tiene un tiempo de 3 meses después del pico de lluvias donde se presenta el máximo, por el flujo subsuperficial entre los poros del suelo. Por esta razón el porcentaje es algo ya que no es una relación directa mes a mes si no que el máximo de lluvia tarda en salir a la superficie coincidiendo con los meses de sequía.



Mes	Flujo base	Precipitación	% de Precipitación que se convierte en Flujo base	Flujo base, orden de menor a mayor	Precipitación, orden de menor a mayor	% de precipitación transformada en Flujo base de menor a mayor	Caudal, orden de menor a mayor
Enero	1.19373	9.1332	13.0702	4	1	11	1
Febrero	1.14587	12.901	8.88182	3	3	8	2
Marzo	0.92927	19.916	4.66591	1	4	3	4
Abril	1.02396	40.929	2.50179	2	11	1	11
Mayo	1.37079	40.997	3.34364	5	12	2	12
Junio	1.89247	35.787	5.28819	9	10	4	10
Julio	2.12342	29.68	7.15436	11	9	7	9
Agosto	2.12837	23.008	9.25061	12	6	9	8
Septiembre	1.96587	21.104	9.31537	10	5	10	5
Octubre	1.74136	24.462	7.11855	8	8	6	7
Noviembre	1.73045	24.427	7.08408	7	7	5	6
Diciembre	1.58367	11.22	14.1151	6	2	12	3

*Tabla 2. Normalización de Magnitudes para precipitación, flujo base y caudal*

Esta tabla permite realizar una revisión de cómo es la variación y relación entre las variables de precipitación, caudal y flujo base, de manera que podemos verificar basado en los resultados la siguiente tabla de resultados de análisis:

Criterio	Flujo base	Precipitación	Caudal	% de precipitación transformada en Flujo base	Análisis
Mínimo	Marzo	Enero	Enero	Abril	Cuando el mínimo de precipitación se presenta en enero, dos meses después en marzo se presenta el mínimo en el flujo base, coincide con el mes más crítico para la región donde toda el agua superficial se seca y es más usada el agua subterránea. Para los dos meses mínimos de precipitación (diciembre y enero), se da el mayor porcentaje de transformación de lluvia a flujo base, lo que

					indica que se maximiza el aporte subterráneo para estos meses. Los mínimos para precipitación y caudal son los mismos.
Máximo	Agosto	Mayo	Mayo	Diciembre	Cuando el máximo de precipitación se presenta en mayo, tres meses después en agosto se presenta el máximo en el flujo base. Para los dos meses máximos de precipitación (abril y mayo), se da el menor porcentaje de transformación de lluvia a flujo base, lo que indica que se minimiza el aporte subterráneo para estos meses, quedando como recarga o fluyendo como escorrentía superficial. Los máximos para precipitación y caudal son los mismos.

*Tabla 3. Análisis de datos de precipitación, caudal y flujo base*

Para poder entender mejor el comportamiento de las variables unidas, pondremos en una sola grafica los valores anuales multianuales, dando como resultado la Figura 37.

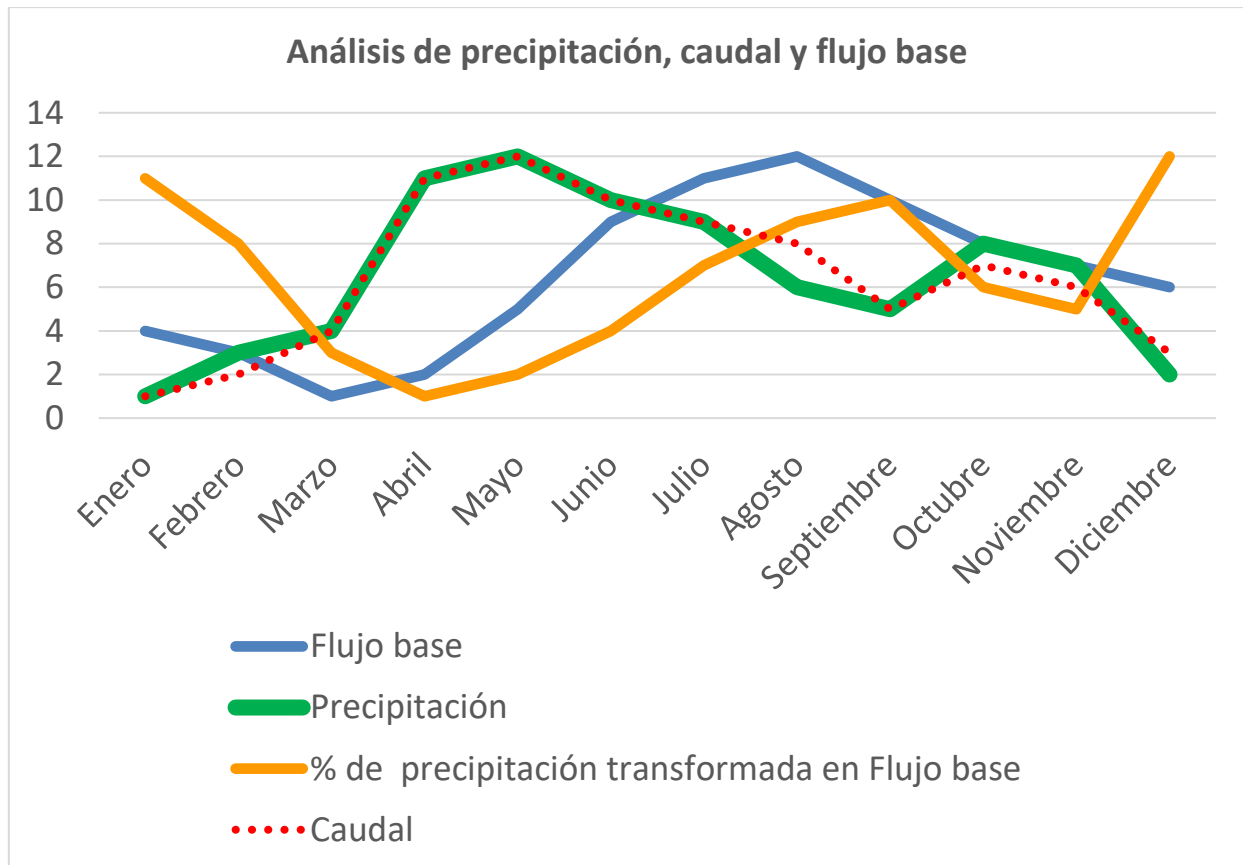
Como podemos observar en la Figura 37, al realizar una normalización de los datos y organizar las magnitudes en meses en la misma escala de magnitud, se puede evidenciar cual es el comportamiento mensual multianual de la cuenca, pudiendo observar a un mejor detalle lo que posiblemente sucede entre la precipitación y el flujo base.

Lo que se puede apreciar en la figura, es que para la herramienta WEAP la respuesta entre la precipitación y el caudal se da en la misma escala de tiempo, es decir un mes, o menos de un mes.

Mientras que la respuesta entre la lluvia y el flujo base se da tres meses después coincidiendo con la temporada de estiaje.

Esto nos permite saber que el río depende bastante del flujo base, lo que hace a la región vulnerable a sequías extremas en caso de existir un año con bajas precipitaciones. Por tal razón, se recomienda realizar acciones planificadas en la cuenca enfocadas a la

productividad rural que integre estructuras que maximicen la infiltración de agua en los acuíferos en la temporada de lluvia.



*Figura 37 Análisis de precipitación, flujo base y caudal de los datos organizados de menor a mayor desde 1 hasta 12 mensuales multianuales*

Al revisar el pico de lluvia o máximo para el mes de mayo, el máximo para el flujo base procedente de la lluvia se da para agosto, es decir, 3 meses después, este dato puede coincidir con el tiempo que la lluvia tarda en penetrar en el subsuelo y empezar a llenar los acuíferos, además de superar el medio poroso para poder salir hacia el flujo subsuperficial profundo como flujo base.

Al realizar el mismo análisis en las mismas condiciones, para el mínimo de lluvia en el mes de enero, se da un mínimo de flujo base en el mes de marzo, lo que indica que la duración en secarse o disminuir el flujo base en la región es de tres meses de baja precipitación, siendo estos meses Diciembre, enero y febrero.

Esto es interesante en la medida que se puede empezar a investigar sobre las causas, en investigaciones futuras, para poder justificar y verificar en campo la respuesta entre lluvia y flujo base o recarga de acuíferos. Para tal fin, pueden ser de interés estudios que aporten datos sobre la causa de la rápida respuesta entre la lluvia y el caudal, tal vez por la compactación de arcillas en la temporada invernal que endurece el suelo impermeabilizándolo, además del estudio de capas del subsuelo para mejorar la cantidad de información que permitan saber que sucede con el flujo subsuperficial, a continuación, se detallan tres posibles temáticas de estudio:

- Un estudio de compactación del suelo debido a la ganadería.
- Un estudio de granulometría del suelo en campo.
- Un estudio de geología para saber cómo puede ser el flujo subsuperficial.

Además del tránsito lento entre la lluvia y la salida como flujo base, hay que decir que WEAP es tan solo un modelo que pretende explicar lo que sucede en la realidad, sin embargo, podemos evidenciar como los resultados pueden ser de gran interés para entender la dinámica de flujos en la cuenca lo cual solo puede corroborarse con más investigación en campo.

En la figura 38, se realizó una gráfica de la precipitación mensual multianual para la cuenca del río Ariporo, utilizando los datos distribuidos en el espacio tiempo desde la herramienta WEAP, que arroja un valor medio de lo que puede darse como precipitación en la cuenca.

Es de interés verificar lo que ha sucedido en el histórico de tiempo, enfatizando en los fenómenos extremos cuando llueve en exceso o cuando hubo un déficit en la lluvia, de manera que se pueda relacionar con los desastres ecológicos que han venido afectando la zona de estudio según se vio en capítulos anteriores.

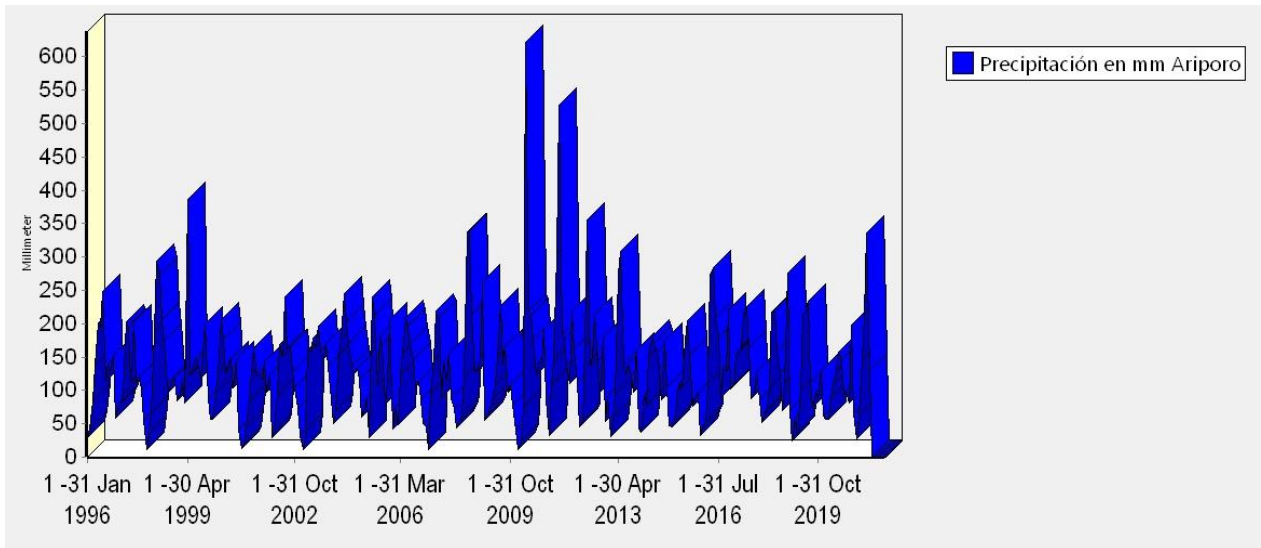


Figura 38 Precipitación mensual en mm Cuenca Alta Rio Ariporo

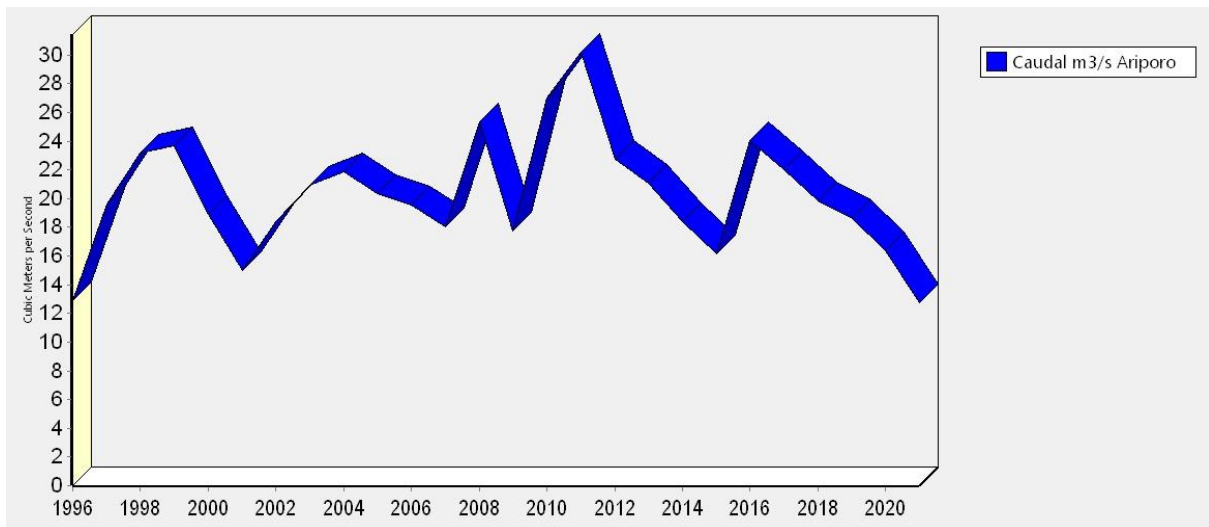
Si se verifican los datos de lluvia de la figura 38, se aprecia la magnitud de los datos de lluvia en este año extremo del fenómeno de la niña de 2011 y como esto influyo en los datos de caudal de la cuenca de la figura 39, así mismo podemos observar una tendencia a la baja en las precipitaciones después de este fenómeno extremo, sin embargo, se evidencia que el caudal continúa descendiendo, lo cual podemos evidenciarlo en la Figura 39.

En la figura 39, podemos observar los datos de caudal anual, donde se puede apreciar una ligera tendencia a la disminución. Después del fenómeno de la niña del año 2011, se evidenció una fuerte tendencia a la disminución del caudal, con un ligero pico en el año 2016, sin embargo, continuo el descenso hasta el año 2020.

Debido a esto, se verificaron las concesiones existentes para el rio en el sistema de información de recurso hídrico, para la cuenca del rio Ariporo, donde se encontró el expediente número 500.29.09.034 con la resolución de aprobación de caudal 500.41.15.0672 con fecha de inicio el 02/06/2015 cuya finalización es el 02/06/2035. El caudal concesionado es de 0.68 litros por segundo, concedido por Corporinoquia sobre el tramo del rio Ariporo.

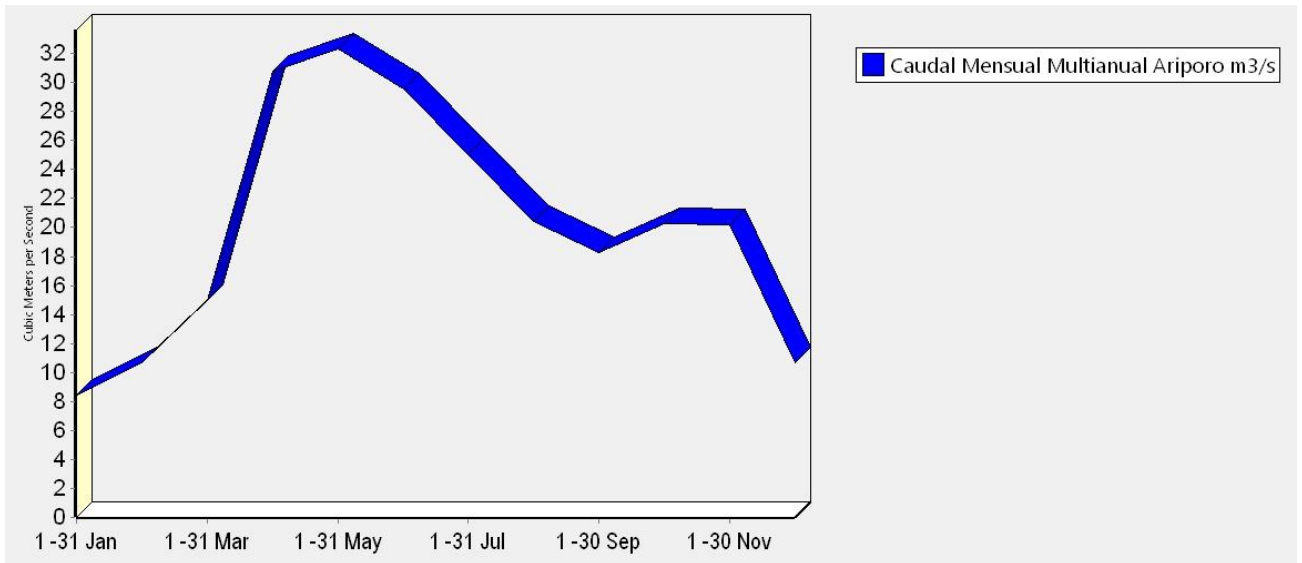
Se sugiere continuar la profundización en el caso de estudio de lo que le puede suceder y si se tiene un control sobre esta extracción de agua al rio, o si existen otras extracciones no

documentadas. Además de estas extracciones, la cuenca desde el año 2010 ha tenido una fuerte influencia en la exploración sísmica para la búsqueda de hidrocarburos y proyectos para inundación de áreas para arroz con agua del río, razón por la que se sugiere realizar un levantamiento de información de dichas captaciones en la cuenca en campo.



*Figura 39 Caudal total anual en m3/s Ariporo*

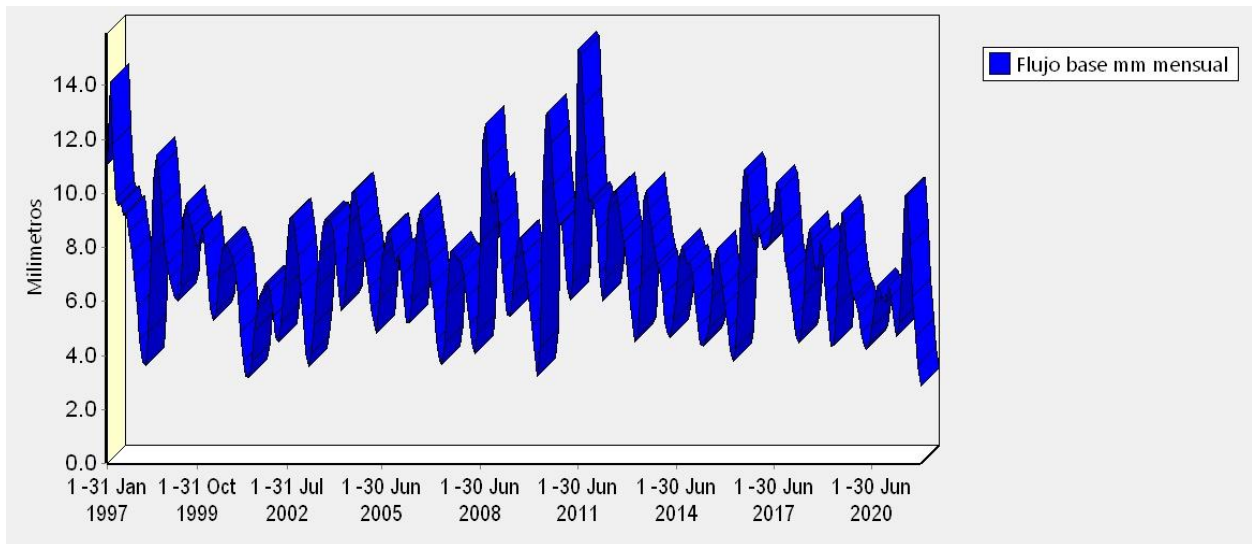
En la figura 40 podemos observar el comportamiento del caudal de manera mensual multianual evidenciando los picos y las recesiones y los meses en los que sucede para el caudal del río tal y como se explicó en la Tabla 3.



*Figura 40 Caudal mensual multianual Aripuro m³/s*

En la figura 41, podemos observar el comportamiento de todos los datos de flujo base arrojados por WEAP, donde se elimina el primer año de 1996 por ser el periodo de calentamiento del modelo, estos valores no obedecen a la realidad al no tener datos para el año anterior 1995 por esta razón se eliminaron de la figura 42.

Desde el año 1997 se mejora la calidad de los datos de flujo base mostrando el comportamiento durante todos los años con datos, pudiendo analizar que los valores son estables durante el tiempo con picos en el año 2011 influenciados por el fenómeno de la niña, tal y como se explicó en la tabla 3, el pico entre el mes de lluvia y el flujo base se desplaza 3 meses en el tiempo, así mismo en 2014 podemos apreciar un fuerte descenso en el flujo base, que ocasiono la sequía histórica registrada en medios de comunicación.



*Figura 41 Flujo base Cuenca Alta Rio Ariporo*

En la Figura 42, se puede apreciar un análisis estadístico de los datos simulados en WEAP, que permite saber en qué años el valor del caudal fue superior o inferior a la media, así mismo como los cuartiles de 0.25, 0.5 y 0.75 de manera que se pueden identificar fácilmente los valores extremos y los años en los cuales sucedieron estos extremos, como los de la tragedia mencionada entre los años 2012 a 2014 vemos una disminución significativa del caudal del río así mismo de la lluvia, de manera que la cuenca al tener una respuesta rápida entre la lluvia y el caudal, si no se tienen reservas de agua subterránea para poder salir como flujo base, genera condiciones de extrema sequía desastrosas para la cuenca, de forma que se sugiere la implementación de acciones en el ordenamiento del territorio que maximicen la recarga de acuíferos subterráneos unidas a programas de aprovechamiento agropecuario sostenible para asegurar que se tenga acceso al recurso en los años secos evitando desastres como el ya ocurrido en el año 2014.



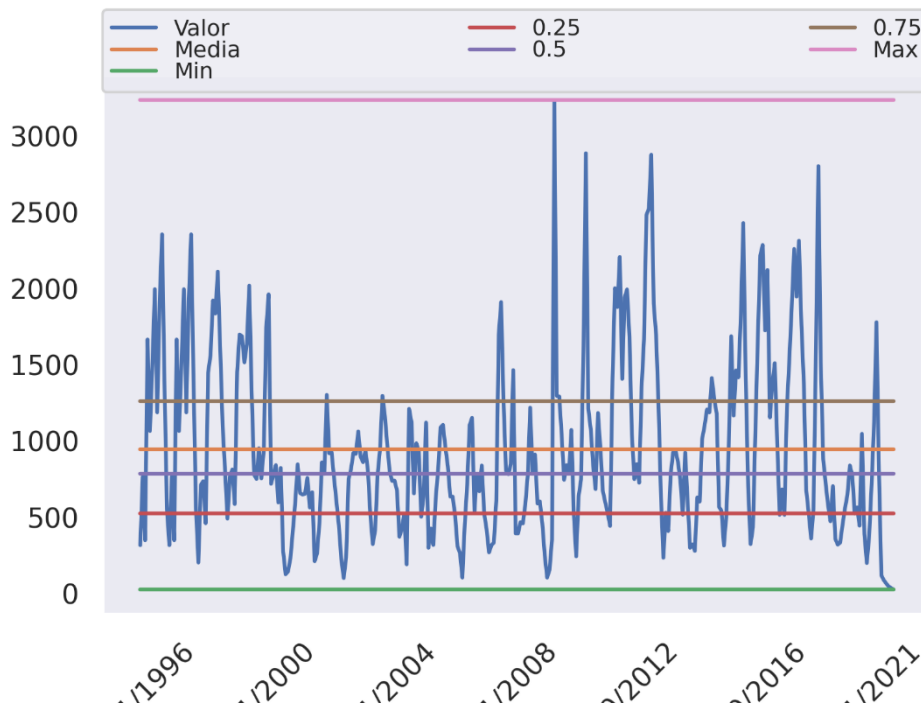


Figura 42 Estadística de los datos de salida de Caudal resultado de la herramienta WEAP

Podemos ver en la Figura 42, años secos consecutivos después del año 2000 y después del año 2012 que ocasionaron pérdidas importantes en la región, ya que como se pudo ver en el modelo, la sequía de la zona responde a aproximadamente tres meses secos consecutivos. Al tratarse de años de baja precipitación, el escenario es grave en la medida que se trata de una región agrícola y pecuaria que requiere suplir una demanda de agua constante. WEAP permite realizar modelos a la medida uniendo la hidrología y las demandas de agua. Lastimosamente no se tuvo acceso a información sobre un levantamiento de la demanda de agua en la cuenca que hubiese sido interesante realizar para la comparación de escenarios para la toma de decisiones. Se sugiere a los tomadores de decisión de la región, tener en cuenta el presente estudio para realizar levantamientos y posteriores escenarios simulados en la herramienta WEAP con la finalidad de tomar decisiones basadas en datos.

En la figura 43, podemos observar cual es el porcentaje de la precipitación que se torna en flujo base, evapotranspiración, inter flujo, humedad de suelo tanto en aumento como en disminución, y caudal.

De estos porcentajes obtenidos desde el modelo calibrado de WEAP, podemos observar en la Figura 43. Para todos los años, el caudal representa un valor entre el 69.67% hasta un 74.81% del total de la precipitación para todos los años, lo cual indica que es una cuenca de respuesta rápida para que la lluvia se transforme en caudal que en la figura 43 está representado por la barra de color amarillo.

El valor que le sigue en magnitud es la evapotranspiración que va en porcentaje desde un 13.86% hasta un 21.76% del total de la precipitación anual para todos los años, en la figura 30 representada de color rojo.

- La disminución en la humedad del suelo en porcentaje va desde un 3.04% hasta un 15.82%.
- El aumento en la humedad del suelo en porcentaje va desde un 1.93% hasta un 8.79%.
- El Inter flujo va desde 5.13% hasta 8.26%.
- El flujo base va desde 4.88% hasta 8.26%.

Estos valores indican que un gran porcentaje del agua que llueve se transforma directamente en caudal, lo cual puede indicar problemas de impermeabilización del suelo y la ausencia de recarga de agua subterránea, razón por la que se sugiere continuar con el estudio de granulometría y geología en campo para tener más datos de lo que sucede con el suelo y subsuelo en relación al flujo y almacenamiento de agua.

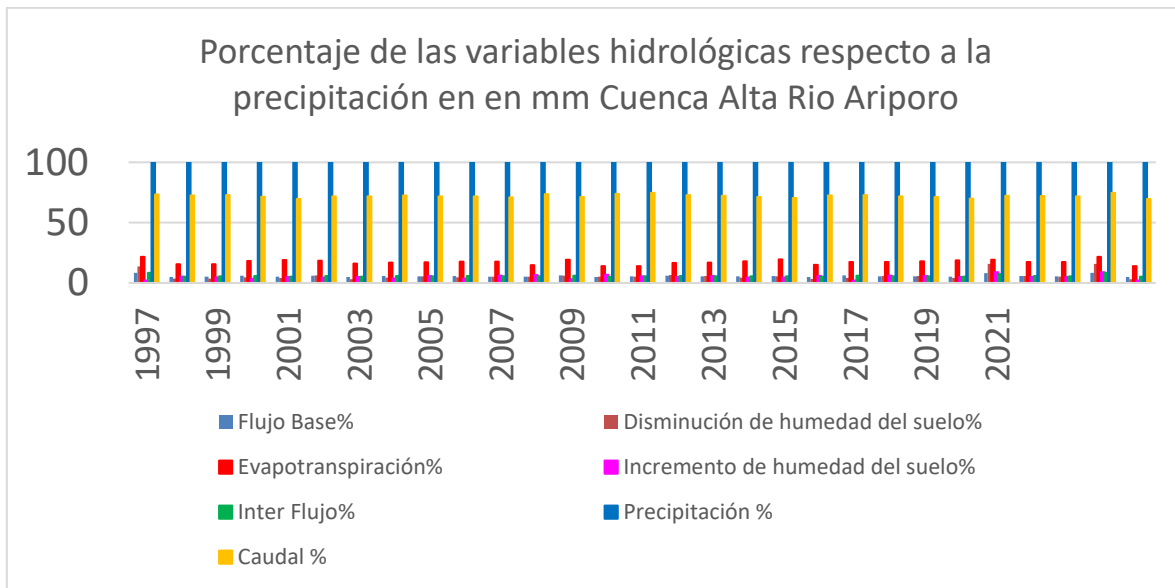


Figura 43 Porcentaje en relación a la precipitación de los resultados del modelo hidrológico WEAP

En el presente trabajo se utilizó la herramienta WEAP configurada de una manera que no permite tener en cuenta variables físicas como la pendiente del terreno y su influencia en las velocidades de respuesta del agua lluvia en la cuenca, la geología de la parte subterránea de la región (datos no existen o no están disponibles). El modelo de dos tanques utilizado en el presente trabajo con la herramienta WEAP, solo permite realizar una aproximación inicial a los procesos de interconexión entre los datos de lluvia, caudal y evapotranspiración. Si se requiere de un mayor detalle en el modelado, cuando se tenga acceso a la información geológica, la herramienta WEAP permite realizar una conexión la herramienta Modflow, herramienta que permite realizar la simulación de procesos de transporte de agua subterránea en medios porosos utilizando un modelo matemático basado en diferencias finitas, de manera que si se tendrán en cuenta los procesos físicos de la cuenca.

## **6. CAPITULO VI**

### **6.CONCLUSIONES**

El flujo base, es una variable indispensable de obtener en una cuenca hidrográfica para establecer las reglas de uso del agua en un territorio, ya que es indispensable su recarga para el abastecimiento de las fuentes superficiales en la temporada de estiaje ya que si el modelo arroja que existe una menor descarga de flujo base para alimentar el caudal en el presente que en el pasado, es posible que el aumento en el uso en el agua subterránea en la cuenca no sea sostenible en el tiempo y se deban establecer reglas de optimización de uso de la misma para evitar inconvenientes de sequía a futuro.

Para el caso de la cuenca del río Ariporo, podemos ver en la Figura 36 del flujo base multianual, los valores se mantienen en el tiempo, por lo que el consumo de agua subterránea no se considera insostenible en el tiempo, sin embargo se puede evidenciar la susceptibilidad de la cuenca a sequías extremas como la del año 2014 donde el flujo base tuvo una disminución importante teniendo para este año un valor mínimo local, razón por la que es necesario realizar una planeación en la cuenca alta para maximizar la infiltración de agua lluvia de acuerdo a la granulometría del suelo de la Figura 10, el uso permitido en POMCAS y la geología existente cuya información no se encuentra fácilmente.

Se debe mejorar en Colombia el acceso a datos libres sobre los acuíferos subterráneos, geología y granulometría para conocer y permitir el estudio de fenómenos y soluciones a la medida para cada región, para este caso en específico, poder enlazar el modelo WEAP a Modflow con la información geológica de manera que se puedan entender mejor los procesos físicos dentro del modelo hidrológico y así poder tener explicaciones y datos más precisos.

La herramienta WEAP no solo permite realizar fácilmente un modelo hidrológico calibrado con los datos de caudal, partiendo de datos espacialmente distribuidos, sino que también permite completar los datos faltantes. Permite agrupar y analizar la información fácilmente de manera que es una excelente herramienta a utilizar en los proyectos de modelación hidrológica en el país como una primera aproximación sin incluir procesos físicos.

La cantidad y calidad de datos de caudal, deben aumentar en la cantidad de estaciones de medición y revisar la operatividad de las mismas, ya que para el caso de la estación de estudio faltaban 13 años de datos y es la única estación en funcionamiento, por tanto, se sugiere mejorar en el control de la operatividad de estas estaciones a fin de poder tener mejores datos y con esto mejores modelos para proteger nuestro recurso hídrico.

Se sugiere a los tomadores de decisión del país, realizar un modelo de las cuencas representativas de su territorio, de manera que puedan crear escenarios simulados en la herramienta WEAP con la finalidad de tomar decisiones basadas en datos para la planeación de todo el territorio.

Es importante poder establecer relaciones entre las variables hidrológicas que arroja el modelo, como la duración en tiempo entre picos como lo que se realizó entre la lluvia y el flujo base, así mismo analizar el tiempo que tarda en llegar la sequía para establecer estrategias de control de extremos de inundación o sequía.

La cuenca alta del río Ariporo, es una cuenca que posee una respuesta rápida entre los eventos de lluvia y reflejarse en los datos de caudal. Con la información que se tiene hasta el momento no es posible definir la causa directa de este comportamiento sin embargo se sugiere profundizar en el tema geológico, de granulometría y de cobertura para aumentar las tasas de infiltración y a su vez, maximizar la recarga de acuíferos utilizando sensores remotos para la ubicación de dichas zonas estratégicas dentro de la cuenca.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

Para la toma de decisiones de planificación de un territorio, se hace necesario tener un modelo a la medida basado en datos que permita planificar el uso del suelo y el uso del agua partiendo de un modelo numérico, donde se recopilen datos como granulometría, geología, coberturas, demandas y ver de qué manera esto puede influenciar el comportamiento del flujo superficial y subterráneo de la cuenca.

Se puede deducir del presente análisis, que es necesario continuar obteniendo datos externos de la cuenca y sus intervenciones históricas para permitir explicar lo que sucede .

Es indispensable que en el futuro sea posible realizar la consulta a detalle de las concesiones para poder proteger de una manera más eficiente el recurso hídrico en el país.

Así mismo, es de suma importancia la liberación de información geológica del país, que difícilmente se puede tener acceso a fin de continuar investigando las causas y consecuencias por ejemplo de los acuíferos o las formaciones rocosas del subsuelo o la granulometría del subsuelo y como esto influencia directamente la respuesta entre la lluvia y el caudal en una cuenca.

Es indispensable la inclusión de datos semi distribuidos en las nuevas herramientas de modelación hidrológicas ya que permiten tener datos en todos los sitios de interés, lo que normalmente es complejo de tener en estaciones de medición en tierra, esto sería una gran contribución a la mejora en la representación de la realidad de un sistema hidrológico regional.

Se debe mejorar en Colombia el acceso a datos libres sobre los acuíferos subterráneos, geología y granulometría para conocer y permitir el estudio de fenómenos y soluciones a la medida para cada región.

Se debe mejorar en Colombia el acceso a datos libres sobre los acuíferos subterráneos, geología y granulometría para conocer y permitir el estudio de fenómenos y soluciones a la medida para cada región.

La cantidad y calidad de datos de caudal, deben aumentar en la cantidad de estaciones de medición y revisar la operatividad de las mismas, ya que para el caso de la estación de estudio faltaban 13 años de datos y es la única estación en funcionamiento, por tanto, se sugiere mejorar en el control de la operatividad de estas estaciones a fin de poder tener mejores datos y con esto mejores modelos para proteger nuestro recurso hídrico.

Se sugiere realizar el estudio con un modelo distribuido, además de realizar la corroboración de datos entre IDEAM y los píxeles de ERA5 de manera agregada a fin de poder estimar los posibles errores en los datos, además de esto, realizar un estudio de los datos de caudal de ERA 5 y revisar su veracidad a fin de poder utilizar este tipo de datos donde no existe información de caudal en el país

## 7. CAPITULO VIII

### 7.BIBLIOGRAFÍA

- Amaranto, A., Munoz-Arriola, F., Corzo, G., Solomatine, D. P., & Meyer, G. (2018). Semi-seasonal groundwater forecast using multiple data-driven models in an irrigated cropland. *Journal of Hydroinformatics*, 20(6), 1227–1246. <https://doi.org/10.2166/hydro.2018.002>
- Araujo, H. F. P. d., Machado, C. C. C., Pareyn, F. G. C., Nascimento, N. F. F. d., Araújo, L. D. A., Borges, L. A. d. A. P., Santos, B. A., Beirigo, R. M., Vasconcellos, A., Dias, B. de O., Alvarado, F., & Silva, J. M. C. da. (2021). A sustainable agricultural landscape model for tropical drylands. *Land Use Policy*, 100(March 2020), 104913. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104913>
- Baiamonte, G. (2019). SCS Curve Number and Green-Ampt Infiltration Models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(10), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001838](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001838)
- Ben G.J.S. Sonneveld, Max D. Merbis, Olcay Unver, A. A. (2018). Nature-Based Solutions for agricultural water management and food security. In *FAO Land and Water Discussion Paper* (Issue December). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10614.86082>
- Bizhanimanzar, M., Leconte, R., & Nuth, M. (2019). Modelling of shallow water table dynamics using conceptual and physically based integrated surface-water-groundwater hydrologic models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(5), 2245–2260. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2245-2019>
- DANE. (2020). *Geoportal del DANE - Geovisor Censo Nacional Agropecuario*. Censo Nacional Agropecuario. <https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/economia/censo-nacional-agropecuario/>
- Dassargues, A. (2019). Hydrogeology: Groundwater Science and Engineering. In CRC Press (Ed.), *Groundwater* (Vol. 57, Issue 3). Taylor and Francis.
- DHIME, I. (2020). *DHIME - IDEAM - IDEAM*. Descarga de Datos Hidrometeorológicos. [http://www.ideam.gov.co/inicio?p\\_p\\_id=101&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=maximized&p\\_p\\_mode=view&\\_101\\_struts\\_action=%2Fasset\\_publisher%2Fview\\_content&\\_101\\_assetEntryId=72968944&\\_101\\_type=content&\\_101\\_urlTitle=dhime](http://www.ideam.gov.co/inicio?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=72968944&_101_type=content&_101_urlTitle=dhime)
- Dinero, R. (2014). *Tragedia ambiental en el Casanare*. <https://www.dinero.com/pais/articulo/tragedia-ambiental-casanare/199407>
- FAO. (2020). *Integrated agriculture-aquaculture: A primer*. VAC SYSTEMS. <http://www.fao.org/3/Y1187E/y1187e10.htm>
- Farrag, M., Pérez, G. C., & Solomatine, D. (2019, January). Experiments with a conceptual distributed hydrological model: impact of cell size, parameter regionalization and routing

- method. In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 21).
- Herman, M. R., Hernandez-Suarez, J. S., Nejadhashemi, A. P., Kropp, I., & Sadeghi, A. M. (2020). Evaluation of Multi- And Many-Objective Optimization Techniques to Improve the Performance of a Hydrologic Model Using Evapotranspiration Remote-Sensing Data. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(4), 1–15. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001896](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001896)
- IDEAM. (2019). *Cambio de la superficie cubierta por bosque natural ARCHIVOS RELACIONADOS - CAMBIO DE LA SUPERFICIE CUBIERTA POR BOSQUE NATURAL - IDEAM*. Cambio En La Cobertura de Bosques En Colombia. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/cambio-de-la-superficie-cubierta-por-bosque-natural>
- IDEAM. (2020). *DEFORESTACIÓN EN COLOMBIA - IDEAM*. Deforestación En Colombia. <http://www.ideam.gov.co/web/bosques/deforestacion-colombia>
- Li, Z., Liu, P., Feng, M., Cui, X., He, P., Wang, C., & Zhang, J. (2020). Evaluating the Effect of Transpiration in Hydrologic Model Simulation through Parameter Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(5), 1–17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001895](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001895)
- Majidi, B., Hemmati, O., Baniardalan, F., Farahmand, H., Hajitabar, A., Sharafi, S., ... & Manzuri, M. T. (2021). Geo-spatiotemporal intelligence for smart agricultural and environmental eco-cyber-physical systems. In *Enabling AI Applications in Data Science* (pp. 471-491). Springer, Cham.
- Mehrnagar, N., Jones, O., Singer, M. B., Schumacher, M., Bates, P., & Forootan, E. (2020). Comparing global hydrological models and combining them with GRACE by dynamic model data averaging (DMDA). *Advances in Water Resources*, 138, 103528. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103528>
- Mohammadzadeh-Habili, J., & Khalili, D. (2020). Assessment of Artificial Recharge Dams and Improvement of Their Groundwater-Recharge Capacity. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001909](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001909)
- Natalia Uribe and Gerald A Corzo P. (2020). *Spatio temporal visualization of soil critical sources areas to assess the dynamics of source pollution in agricultural management practices*. 103434.
- Peter, B. G., Mungai, L. M., Messina, J. P., & Snapp, S. S. (2017). Nature-based agricultural solutions: Scaling perennial grains across Africa. *Environmental Research*, 159(December 2016), 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.011>
- Uribe, N., Corzo, G., Quintero, M., van Griensven, A., & Solomatine, D. (2018). Impact of conservation tillage on nitrogen and phosphorus runoff losses in a potato crop system in Fuquene watershed, Colombia. *Agricultural Water Management*, 209(July), 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.006>
- Xu, Q., Zhao, K., Liu, F., Peng, D., & Chen, W. (2021). Effects of land use on groundwater recharge of a loess terrace under long-term irrigation. *Science of the Total Environment*, 751, 142340.



<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142340>

Zeinali, M., Azari, A., & Heidari, M. M. (2020). Multiobjective Optimization for Water Resource Management in Low-Flow Areas Based on a Coupled Surface Water-Groundwater Model. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(5), 1–15.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001189](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001189)

Zhang, M., Zhang, J., & Song, Y. (2019). Preliminary Research and Application of MIKE SHE Model in Jialingjiang River Basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 304(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/2/022088>

## **8. CAPITULO IX**

### **8. Anexos**

#### **8.1. Antecedentes de la exploración petrolera en la cuenca**

Existió en el año 2012, un programa de exploración petrolífera por parte de Ecopetrol en el en toda la cuenca alta del río. Estas explosiones pudieron ser una de las causas de la fractura en el subsuelo profundizando así el agua subterránea causando que ya no pueda estar disponible para animales y plantas por la profundidad. Esta afirmación, es compleja de probar por la falta de datos de los acuíferos antes y después de la exploración petrolífera, de manera que por ahora únicamente se utilizaran los datos de un modelo hidrológico calibrado para realizar el análisis.

Una noticia relacionada con este tema de impacto de la exploración petrolífera sobre el agua en el año 2014 quedo registrada en los diarios del país, donde una tragedia ambiental de importante magnitud sucedió en el departamento de Casanare (Dinero, 2014).

#### **8.2. Antecedentes y teorías sobre los sistemas de producción agropecuaria**

La proporción de agua para la agricultura sobre la demanda total de agua en Colombia es de un 50% y seguirá representando la mayor parte de la demanda total de agua, donde se espera que crezca aún más. (IDEAM, 2020)

La demanda de agua será cada vez mayor por tanto la cantidad disponible tenderá a disminuir, lo cual obliga al mundo actual a continuar en la investigación y creación de modelos hidrológicos, herramientas de optimización multiobjetivo para el uso del agua. (Ben G.J.S. Sonneveld, Max D. Merbis, Olcay Unver, 2018)

La ganadería extensiva en Colombia ocupa un área de 39,2 millones de hectáreas (Fedegan 2017). Colombia posee una superficie continental de 114,1748 millones de hectáreas, siendo el porcentaje de ganadería de un 34.33% del territorio nacional.

La cantidad de alimentos por unidad de área para ganadería extensiva actualmente en el país, cuenta con una baja rentabilidad y flujo de caja. En la actualidad, el 43% del territorio de la cuenca alta del río Ariporo se utiliza para ganadería extensiva. Unos de los limitantes importantes para tener mayor producción anual de pasturas o cultivos, son los excesos de agua en la temporada de lluvia y la escasez del recurso en la temporada de sequía, que limitan la producción continua por el estrés generado por las condiciones extremas para las plantas. Si es posible obtener los datos hidrológicos, además de utilizar la información de sensores remotos de topografía, será posible planificar sistemas agropecuarios sostenibles y productivos, motivación que hace parte del presente estudio, aspecto que se abordará en fases futuras de la presente investigación, por tanto, el presente documento, se limita a plantear un el modelo hidrológico y analizarlo.

La economía de la región se basa en la ganadería extensiva, donde la productividad por Hectárea al año de este tipo de sistemas es lenta y baja. Bajo una densidad de pastoreo de un animal por cada hectárea de terreno, el rendimiento en ganancia en peso anual es de 210 Kg de alimento por hectárea al año.

Este sistema es poco eficiente en cuanto a la producción de alimentos si se compara con el sistema de producción de alimentos llamado sistema VAC (VAC en vietnamita significa Vuon, Ao, Chuong, que se traduce como jardín, estanque de peces y corral de ganado).

El sistema VAC, consiste en un estanque excavado en tierra que se llena con agua lluvia con un área de 0.1 Hectáreas en Vietnam bajo un sistema integrado de producción con patos, peces y agricultura, utilizando un área de una hectárea, se pueden producir alrededor de 677 Kg de huevos, peces y patos al año (FAO 2021). Alrededor del estanque se cultiva (yuca, papaya, maíz, mata ratón, arroz, plátano, banano, jacinto de agua, naranja, coco, caña de azúcar). Este tipo de sistemas en clima cálido, según la experiencia recopilada por FAO, pueden llegar a una productividad anual de 2000 kilogramos por hectárea al año de alimentos, es decir 1790 Kilogramos por Hectárea al año más que en los sistemas de ganadería extensiva, existentes en un 34.33% del territorio nacional de Colombia, sin embargo establecer estos sistemas requiere de un conocimiento preciso de la hidrología de la zona de estudio y de la topografía para hacer pequeños estanques de manera sostenible.

Los sistemas de producción integrados VAC constan de tres componentes principales:

(1) la agricultura: Cultivos de yuca, papaya, maíz, mata ratón, arroz, plátano, banano, jacinto de agua, naranja, coco, caña de azúcar en multicapas de manera que todas las plantas puedan absorber suficiente agua y energía solar para expresar un buen crecimiento y generar una alta productividad

(2) la acuicultura: Se crean uno o varios estanques en el centro o cerca de uno de los bordes del huerto para usos múltiples. Como la acuicultura, sirve de depósito de agua y como fuente de agua para el cultivo de distintas especies de peces, cada uno con su función dentro del estanque (herbívoros, carnívoros, eliminadores de sobrantes de alimento en el fondo del estanque), de manera que se crea una simbiosis entre dentro del estanque.

(3) la ganadería: Existen infinidad de posibles combinaciones entre: (búfalos, vacas, cerdos, pollos, patos y conejos). Se construyen corrales o jaulas en lugares adecuados para el reciclaje de energía y nutrientes dentro del VAC system.

Estos sistemas al mismo tiempo que regulan la hidrología de la región permitiendo la recarga de acuíferos, hacen que el terreno produzca la mayor cantidad de alimentos posible por hectárea al año pudiendo ser el inicio de un cambio de los sistemas de producción agropecuaria en el país.

Por tanto, el presente estudio es parte inicial y fundamental para la obtención de datos que permita entender el ciclo hidrológico local mediante un modelo que a futuro puedan servir para el desarrollo de investigaciones futuras.

### **8.3 Descripción detallada de los VAC systems**

Como se mencionó en capítulos anteriores, se puede apreciar en la figura 30 un ejemplo de VAC, con la finalidad de aclarar cómo es su funcionamiento y cuáles son las diferentes rutas metabólicas y las relaciones entre subsistemas:

Fitoplancton: Se alimenta de luz solar y el abono del estiércol de pato.

Zooplancton: Se alimenta del fitoplancton.

Pez Herbívoro: Se alimenta de fitoplancton, hierbas flotantes y semillas de árboles cercanos.

Pez carnívoro: Se alimenta de zooplancton, pez herbívoro e insectos.

Jacinto de agua: Crece por el abono del estiércol de patos y la luz solar.

Patos: Se alimentan del jacinto de agua, yuca y maíz.

Cerdos: Se alimentan de yuca, caña de azúcar, maíz y los desperdicios de la cocina.

Maíz, yuca, caña de azúcar: Se abona con estiércol de cerdo y pato. (FAO, 2021)

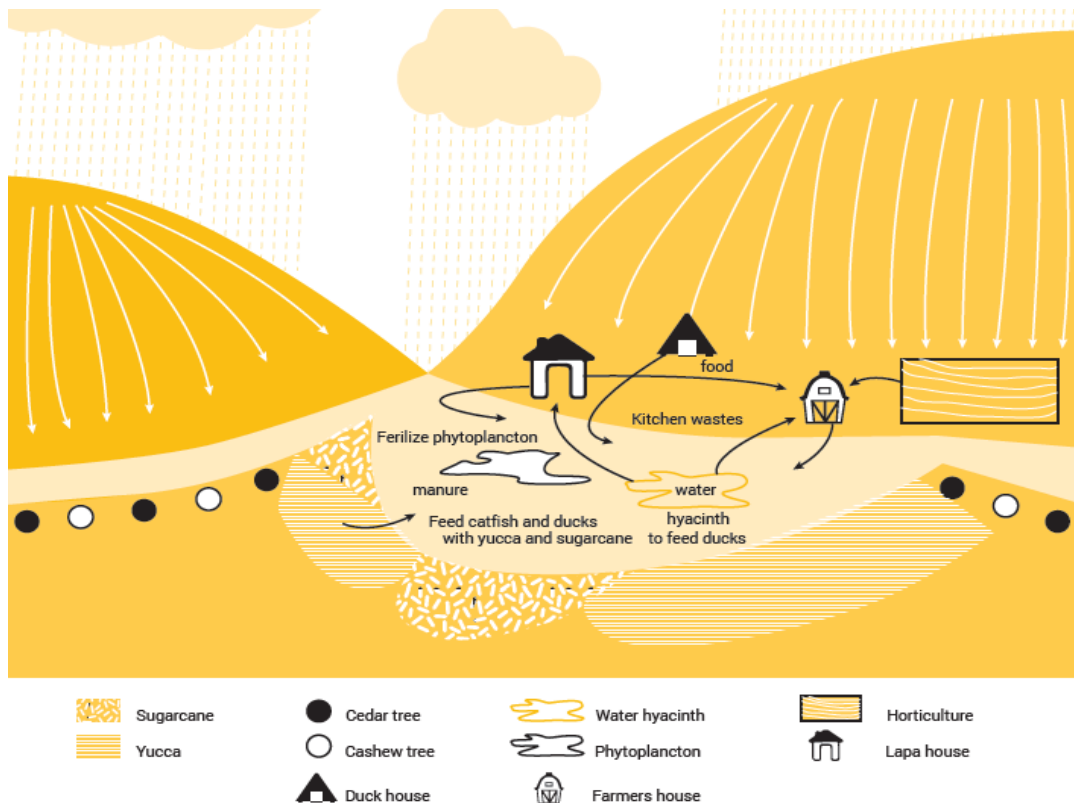


Figura 44 VAC System con especies de Casanare Colombia. Fuente: (Forero G.A. 2013).

Este ejemplo, aunque se encuentra fuera del tema hidrológico, para llegar realmente a soluciones sostenibles para la cuenca es necesario contar con datos, por esta razón se explicó el funcionamiento del sistema VAC donde no solo se debe conocer la topografía del terreno para realizar el correcto dimensionamiento del embalse, si no que se debe tener claridad de las estructuras que requiere un embalse y los datos necesarios para su dimensionamiento, cómo funciona el sistema completo para así, realizar un diseño y empezar a identificar los requerimientos especiales como el vaso del embalse, la corona, tubería de salida, núcleo de arcilla para sostener el vaso del embalse, piso de arcilla poco permeable, aliviadero de excesos de lluvia, entre otros. Se puede decir entonces, que para realizar una correcta planeación de los sistemas productivos y de la zona rural en general, es indispensable conocer cómo funciona el agua partiendo de los datos del modelo y así poder realizar el correcto dimensionamiento de los embalses, donde la hidrología de la zona a una escala diaria e incluso horaria son necesarias.

Los estudios de cuencas en la actualidad, deben buscar el establecimiento de estrategias que aseguren la disponibilidad de agua subterránea haciendo eficiente el uso del agua y la producción de alimentos de manera simultánea. (Peter et al., 2017)

Una aplicación adicional, que tiene el modelo hidrológico calibrado creado, es que además de dar un diagnóstico de parámetros como flujo base, Inter flujo, evapotranspiración y caudal, que nos dan luces sobre lo que ha sucedido en el histórico de la cuenca, si este análisis diarios se realiza con datos diarios, con esta base es posible realizar el dimensionamiento de embalses de almacenamiento de agua para el establecimiento de sistemas de aprovechamiento integrado agropecuario sostenible como los sistemas VAC, se menciona solamente la teoría para en futuras investigaciones poder realizar este tipo de dimensionamientos.

#### **8.4. Métodos de estimación en campo de la recarga de acuíferos.**

- Método de fluctuación del nivel freático: Se mide la variación de nivel de agua en el tiempo dependiendo de los picos de medición de la fluctuación en el nivel, de esta manera se determina la recarga. La fluctuación es causada por los procesos de recarga durante un periodo de tiempo, que se denomina rendimiento específico del acuífero, esta se da por el aumento máximo de nivel de agua en el periodo de recarga. Para estimar la diferencia del aumento en nivel de agua, se define como la diferencia entre el pico de un aumento de nivel de agua y el valor de la curva de recesión antecedente extrapolada en el momento del pico, la curva de recesión es el rastro del hidrograma del pozo de observación que hubiera sucedido si no existiera recarga. Se necesita la distancia entre el pico del nivel observado y la curva de recesión sin el pico. (Betsy Romero (Gidahatari), 2020).
- Método de balance de masa de Cloruro: Cloruro es un trazador ambiental, soluble, económico, conservativo y no es absorbido sustancialmente por la vegetación, se puede medir desde la fuente hasta el punto de medición, es económico. La recarga, se da en función de la precipitación, según la concentración de cloruro en

deposiciones secas en precipitación dividido en la concentración media de cloruro en agua subterránea. (Betsy Romero (Gidahatari), 2020)

- Método del balance Hídrico: Basado en el método de Penman-Grindley, es un balance de agua, se identifica el exceso como escorrentía. A diferencia del método penman, en este se considera que un porcentaje del exceso se convierte en recarga. Se necesita la evapotranspiración total mensual, la escorrentía superficial total mensual y la precipitación total mensual, lo cual nos puede dar el valor de la variación en el almacenamiento de suelo. (Betsy Romero (Gidahatari), 2020).

## 8.5 Tipos de modelos

Un modelo puede definirse como una representación simplificada de procesos y variables, en este caso variables hidrometeorológicas y la interacción entre ellas de manera que se acerque a lo que sucede en la realidad para un caso específico.

Al construir un modelo, es importante saber el alcance que se quiere lograr, los datos disponibles y las limitaciones implícitas de cada caso. La validación con datos reales del modelo creado o calibración es indispensable para que este represente la realidad acertadamente.

Desde el inicio de la hidrología, se crearon modelos de diferentes tipos:

- Físico: Maquetas a escala real.
- Computacional: Representación matemática del fenómeno, las herramientas de modelación pueden tener implícitos métodos numéricos diferentes puede ser:
  - Físicos (Ecuaciones de energía masa y momento)
  - Conceptuales (agregado o simplificado la realidad, entradas = salidas, energía masa y momento), ecuaciones de tanques, este es el caso de WEAP.
  - Conceptuales distribuidos (agregado o simplificado la realidad, entradas = salidas, sin energía masa y momento en pequeñas porciones de área)

- Modelos basados en datos, matemáticos abstractos no detallados, sin referencia física, son de acción y consecuencia (Inteligencia artificial, Estadística, máquinas de aprendizaje, redes neuronales, programación genética, entre otros) logrando representar entradas y salidas.
- Modelos híbridos (Combinación de modelos físicos y basados en datos).

Fuente: (Corzo, 2021)

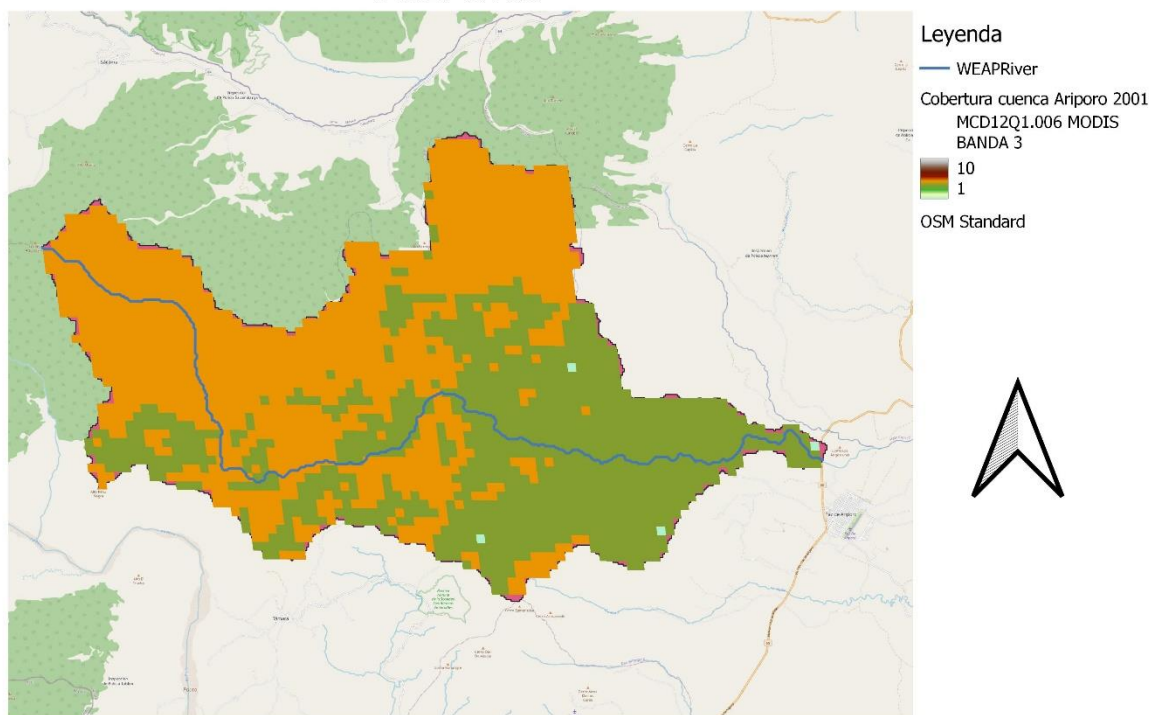
Al simular un proceso, existe al inicio un periodo de calentamiento, donde los datos del modelo no son iguales a los datos de la realidad, debido a la falta de información del periodo anterior. Cuando el modelo pasa el proceso de calentamiento, los datos modelados se empiezan a acercar a los datos de la realidad.

En los modelos simplificados entre lluvia y el caudal, la respuesta es más rápida cuando hay la cuenca tiene un alta pendiente con poca cobertura vegetal. Por otro lado, una cuenca grande y plana que tiene una respuesta más lenta. Es indispensable representar bien los máximos de caudal para estudiar inundaciones y los mínimos para estudiar la sequía mediante la curva de recesión.



## 8.6 Mapa de coberturas año 2001

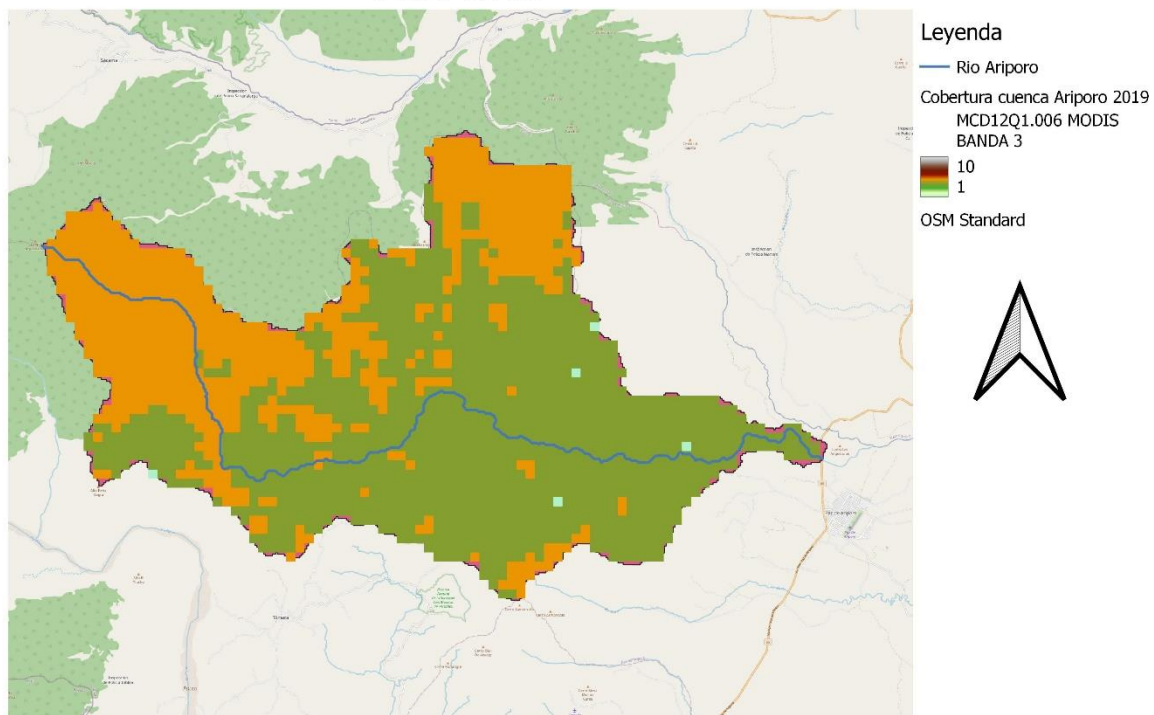
### COBERTURA MODIS 2001 CUENCA ALTA RIO ARIPORO



*Figura 45 Mapa de Cobertura Cuenca Alta rio Ariporo año 2001*

## 8.7 Mapa de coberturas año 2019

### COBERTURA MODIS 2019 CUENCA ALTA RIO ARIPORO



*Figura 46 Mapa de Cobertura Cuenca Alta rio Ariporo año 2019*

### 8.8 Máximos diarios estaciones de lluvia

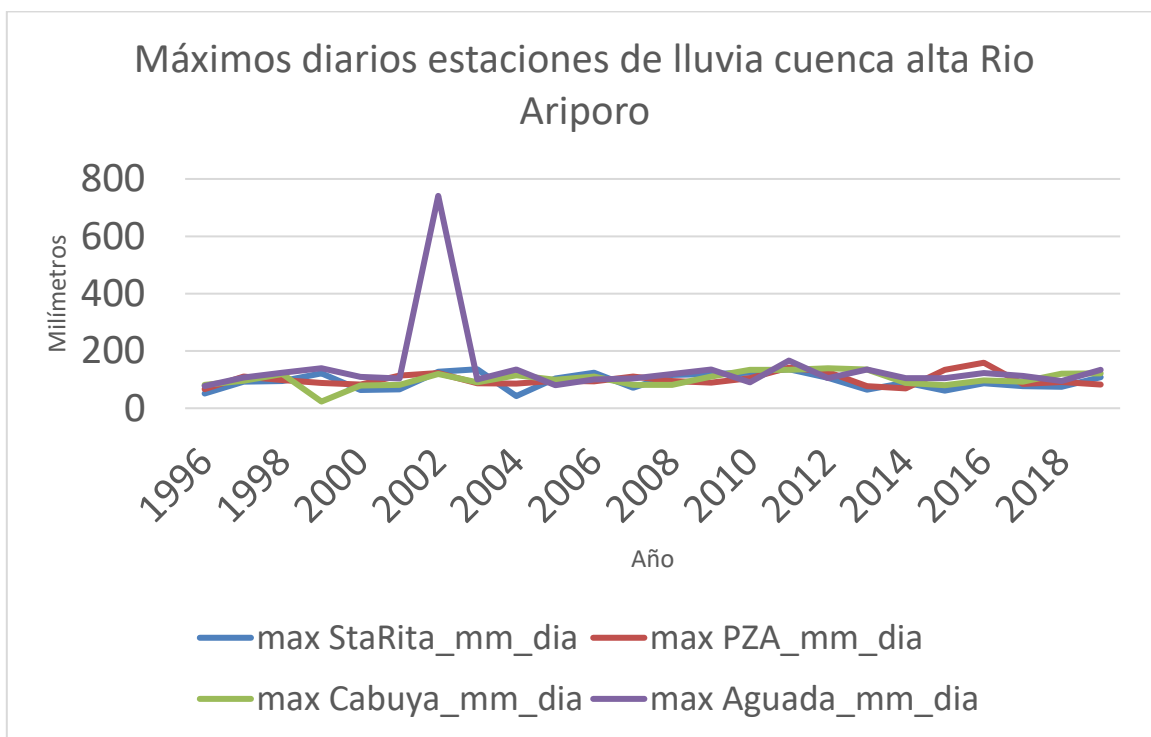


Figura 47 Máximos diarios estaciones de lluvia cuenca alta Rio Ariporo