

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciada en Ingeniería Agrícola

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO ABANGARES
EN GUANACASTE

DIANA CAROLINA MEZA CALDERÓN

CARTAGO, 2018

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO ABANGARES EN
GUANACASTE

DIANA CAROLINA MEZA CALDERÓN

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciada en Ingeniería Agrícola

Ing. Fernando Watson Hernández

Asesor

Ing. Marvin Villalobos Araya

Director Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2018

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios y a la Virgen, por haberme permitido alcanzar una meta muy importante en mi vida.

A mis padres Guadalupe Calderón Cerdas y Gerardo Meza Valverde quienes me han dado todo su amor y apoyo desde el día que me dieron la vida. Y quienes con su esfuerzo y sacrificio lograron que alcanzaré esta meta.

A mis hermanos Brenda Meza Calderón y Daniel Meza Calderón por ser parte fundamental de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al personal de la Escuela de Ingeniería Agrícola, por su apoyo, tiempo y comprensión durante mi proceso de formación.

A todos mis compañeros por el tiempo compartido a lo largo de nuestra carrera universitaria.

A mi amigo y compañero Roy Mora Abarca por su comprensión, paciencia y por todo el apoyo brindado en el transcurso de nuestros años universitarios.

A Leonardo Solano Romero y Fernando Watson Hernández por todo su tiempo, comprensión y por el apoyo brindado para culminar con éxito este trabajo.

A Rafael Oreamuno Vega y Fabián Méndez Corrales del Centro de Investigación en Estudios para el Desarrollo Sostenible de la Universidad de Costa Rica por toda la colaboración brindada para el desarrollo de este trabajo.

Al señor Francisco Bogantes Sánchez de la Municipalidad de Abangares por el apoyo brindado.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	OBJETIVOS	4
1.1.1.	Objetivo general	4
1.1.2.	Objetivos específicos	4
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1.	Concepto de Hidrología	6
2.2.	Definición de Ciclo Hidrológico.....	6
2.3.	Concepto de Cuenca Hidrográfica.....	7
2.4.	La estadística y sus aplicaciones.....	8
2.5.	Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	9
2.6.	Sistema Integrado de Información sobre la Tierra y el Agua (ILWIS)	11
2.6.1.	Historia e importancia	11
2.7.	Modelos Hidrológicos.....	12
2.7.1.	Representación espacial	12
2.7.2.	Representación de los procesos hidrológicos.....	13
2.7.3.	Extensión temporal.....	13
2.8.	Modelo Hidrológico HBV-light.....	14
2.8.1.	Rutina de nieve.....	14
2.8.2.	Rutina de humedad de suelo	14
2.8.3.	Rutina de respuesta	15
2.8.4.	Rutina de enrutamiento	15
2.8.5.	Evaluación de resultados.....	15
III.	METODOLOGÍA	17
3.1.	Recolección de información hidrometeorológica de la Cuenca del Río Abangares.....	18

3.2.	Determinación del área de estudio y selección de estaciones para la elaboración del modelo hidrológico	18
3.3.	Delimitación de la cuenca media de la cuenca del Río Abangares	18
3.3.1.	Modelo de Elevación Digital	18
3.3.2.	Imágenes Satelitales	19
3.3.3.	Hidroprocesamiento	19
3.4.	Clasificación de Uso Suelo de la cuenca media del Río Abangares.....	19
3.5.	Análisis de la información hidrometeorológica para la elaboración del modelo hidrológico	20
3.5.1.	Elaboración de base de datos	20
3.5.2.	Análisis y corrección de las series de datos meteorológicos.....	20
3.5.3.	Análisis estadístico de las series de datos meteorológicos.....	21
3.5.4.	Cálculo de la precipitación, temperatura y evapotranspiración media de la cuenca en estudio	21
3.6.	Modelación Hidrológica utilizando HBV-light	22
3.6.1.	Datos de entrada.....	22
3.6.2.	Configuración de la cuenca: determinación de las zonas de elevación y las zonas de vegetación	22
3.6.3.	Configuración de GAP optimization (optimización utilizando un algoritmo genético).....	23
3.6.4.	Escenarios de cambio climático	23
3.6.5.	Análisis de concesiones superficiales presentes en la cuenca.....	23
3.6.6.	Análisis social y ambiental.....	24
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	25
4.1.	Información hidrometeorológica de la Cuenca del Río Abangares.....	26
4.2.	Área de estudio y selección de estaciones	27
4.3.	Delimitación de la cuenca.....	27

4.4.	Clasificación de Uso Suelo	29
	En la figura 6, se muestra la clasificación de uso de suelo correspondiente a la parta media de la cuenca del Río Abangares.	29
4.5.	Información hidrometeorológica para la elaboración del modelo hidrológico...	30
4.6.	Modelación hidrológica mediante HBV-light	36
4.6.1.	Escenarios de cambio climático para los años 2020, 2050 y 2080.	40
4.6.2.	Concesiones superficiales presentes en la cuenca	42
4.6.3.	Aspectos sociales y ambientales	46
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	48
5.1.1.	Conclusiones	49
5.1.2.	Recomendaciones	49
VI.	BIBLIOGRAFÍA.....	51
VII.	ANEXOS	55

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca del Río Abangares...	26
Cuadro 2. Estaciones fluviográficas ubicadas dentro de la cuenca del Río Abangares.	26
Cuadro 3. Estaciones meteorológicas y fluviográficas seleccionadas que se encuentran ubicadas en la parte media de la cuenca del Río Abangares.....	27
Cuadro 4. Matriz de correlación entre las estaciones tomando en cuenta los datos de precipitación.....	30
Cuadro 5. Matriz de correlación entre las estaciones tomando en cuenta los datos de temperatura.	30
Cuadro 6. Matriz de correlación entre las estaciones tomando en cuenta los datos de evapotranspiración.	30
Cuadro 7. Matriz de correlación entre las estaciones tomando en cuenta los datos de caudal.	31
Cuadro 8. Coeficientes de determinación.	33
Cuadro 9. Caudal concesionado por categorías en la cuenca en estudio.	43
Cuadro 10. Caudal concesionado por categorías aguas abajo de la cuenca en estudio.	43
Cuadro 11. Volumen acumulado para los escenarios 2020, 2050 y 2080.	46
Cuadro 12. Porcentaje que representa el caudal otorgado.	46
Cuadro 13. Porcentaje de variación de caudal para los años 2020, 2050 y 2080.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo Hidrológico.	7
Figura 2. Ciclo de un SIG.	10
Figura 3. Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial	
a) Modelo Agregado b) Modelo Semidistribuido c) Modelo Distribuido.	13
Figura 4. Diagrama de procesos del modelo hidrológico HBV-light.	16
Figura 5. Delimitación de la cuenca media del Río Abangares.	28
Figura 6. Clasificación de uso de suelo de la cuenca media del Río Abangares.	29
Figura 7. Área de influencia de las estaciones con respecto a la variable de precipitación.	
Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 8. Área de influencia de las estaciones con respecto a la variable de temperatura y	
evapotranspiración.	35
Figura 9. Configuración de la cuenca.	36
Figura 10. Parámetros calibrados para la cuenca media del Río Abangares.	37
Figura 11. Modelación hidrológica para la cuenca media del Río Abangares.	39
Figura 12. Cambios en temperatura (°C) y precipitación (%) para la región centroamericana	
en los horizontes de tiempo 2020, 2050 y 2080.	40
Figura 13. Modelación hidrológica de caudales en la cuenca para los años 2020, 2050 y	
2080 respectivamente.	41
Figura 14. Concesiones de la cuenca media del Río Abangares.	42
Figura 15. Curvas de acumulación de volumen.	45

RESUMEN

Un modelo hidrológico es una herramienta útil para la gestión de los recursos hídricos y toma de decisiones tanto a nivel de cuenca como de gobierno local. En este trabajo se aplicó y evaluó la eficiencia del modelo HBV-light utilizando la serie de datos hidrometeorológicos de las estaciones ubicadas en la parte media de la Cuenca del Río Abangares para un período de tiempo comprendido entre los años 2015 al 2017. Los datos fueron proporcionados por el Centro de Investigación en Estudios para el Desarrollo Sostenible (CIEDES) de la Universidad de Costa Rica. Los resultados de la modelación se ajustaron de manera aceptable con los datos observados para la cuenca en estudio. La eficiencia del modelo para la cuenca media del Río Abangares fue de 0.8294 y el valor mínimo aceptable es de 0.65. El modelo fue sometido a variaciones de precipitación y temperatura para escenarios de cambio climático. Por lo que se determinó que el volumen concesionado de la cuenca en estudio es menor a los volúmenes acumulados para los escenarios 2020, 2050 y 2080 con disminuciones de caudal de 29% y 49% para los años 2050 y 2080, esto para las condiciones evaluadas en este estudio.

Palabras Clave

Cuenca, Hidrología, Abangares, Modelación, HBV-light, Escenarios.

ABSTRACT

A hydrological model is a useful tool for the management of water resources and decision making at the basin level as well as local government. In this work, the efficiency of the HBV-light model was applied and evaluated using the hydrometeorological data series of the stations located in the middle part of the Abangares River Basin for a period of time comprised between the years 2015 to 2017. The data were provided by the Center for Research in Studies for Sustainable Development (CIEDES) of the University of Costa Rica. The results of the moderation were adjusted in an acceptable manner with the data observed for the basin under study. The efficiency of the model for the middle basin of the Abangares River was 0.8294 and the minimum acceptable value of 0.65. The model was something like variations of precipitation and temperature for climate change scenarios. Therefore, it was determined that the volume was awarded from the basin in the study to lower the cumulative volumes for the 2020, 2050 and 2080 scenarios with a decrease in the volume of 29% and 49% for the years 2050 and 2080, this for the conditions evaluated in this study.

Keywords

Basin, Hydrology, Abangares, Modeling, HBV-light, Scenarios.

I. INTRODUCCIÓN

El agua, es uno de los elementos más importantes de la naturaleza, se obtiene fundamentalmente por su caída a la tierra en forma de lluvia, fluye por la superficie terrestre creando arroyos, ríos y lagunas, está en constante movimiento de acuerdo a la topografía por donde se desliza; de esta manera, el agua viaja siguiendo la trayectoria que le marcan los suelos, los declives, las quebradas y hondonadas, formando lo que llamamos una cuenca. El ciclo del agua termina donde empezó, es decir, con la transpiración de agua por las plantas que habitan los bosques y la evaporación del agua en el suelo y de los ríos que forman la cuenca hidrográfica (K. Contreras et al., 2008).

Un factor por considerar en referencia al acceso y disponibilidad futuros del agua, es el fenómeno del cambio climático inducido por factores antrópicos. The World Meteorological Organization (2007) plantea el fenómeno del cambio climático como una amenaza por considerar la disponibilidad futura de agua potable, dado que se pronostican cambios en el régimen de precipitaciones y en las temperaturas, sequías más intensas y prolongadas, tormentas tropicales e inundaciones más fuertes; fenómenos estos que incidirán de manera decisiva en la disponibilidad presente y futura del agua (Rojas, Campos, Alpizar, Bravo, & Córdoba, 2003; Wells, 2006).

Además, la deforestación, el crecimiento urbano sin regulación, el mal uso de los suelos, el vertido tanto de desechos sólidos como de aguas servidas sin tratamiento son factores que perjudican la cuenca debido a la falta de gestión integrada sobre el manejo de cuencas.

Según Valverde (2013) se pronostican menores precipitaciones en la casi totalidad del territorio nacional, situación que acentuará las asimetrías existentes en la disponibilidad futura de agua en las distintas cuencas hídricas que conforman el territorio nacional. De acuerdo con los escenarios pronosticados en el patrón de precipitaciones, el Pacífico Norte se vislumbra como la región del país que experimentará las más severas disminuciones en el transcurso del presente siglo.

Los pronósticos de menores precipitaciones con repercusiones en los caudales hídricos deben ser ponderados dentro de las políticas de planificación y gestión del recurso hídrico a futuro, junto con las herramientas técnicas, jurídicas y administrativas orientadas a regular aquellas prácticas que perjudican la calidad ambiental de los sistemas hídricos del país (Valverde, 2013).

En el año 2014, el gobierno declaró emergencia nacional en once cantones de la provincia de Guanacaste, debido a la sequía que se presentó por el fenómeno del Niño. El cantón de Abangares fue uno que se vio vulnerable en cuanto a la disponibilidad de recurso hídrico.

De esta manera la Universidad de Costa Rica en convenio con la Municipalidad de Abangares ha llevado a cabo durante varios años investigación en hidrología, calidad de aguas y de la gestión integrada de los recursos hidráulicos para el desarrollo económico y social de la zona, esto mediante el proyecto denominado “Manejo Integral del Recurso Hidráulico en la Cuenca del Río Abangares para su Utilización Prioritaria en Consumo Humano”.

Actualmente la cuenca del Río Abangares, cuenta con nueve estaciones medidoras de precipitación, seis estaciones meteorológicas y tres estaciones fluviográficas. La información en meteorología e hidrología que se está recopilando, está siendo utilizada para investigación en hidrología, producción y transporte de sedimentos, estimación de evapotranspiración y adaptación al cambio climático y está siendo utilizado por los agricultores de la zona para planificar las siembras y cosechas según las condiciones del clima y que de esta manera los estudios realizados en la cuenca sean de utilidad en la toma de decisiones.

Al ser el agua, simultáneamente, el eje transversal de todo quehacer humano y fuente imprescindible para el equilibrio de nuestros ecosistemas, la dotación de herramientas que propicien una gestión adecuada de la misma se vislumbra como uno de los principales desafíos para las presentes y futuras generaciones

En opinión de Chaves (2014) el ordenamiento territorial es la medida en la que un país establece lineamientos para regular el uso del territorio. Mediante el cual se determinan los lugares aptos para las diferentes actividades humanas, la producción agrícola y la protección de la naturaleza. Gracias al ejercicio del ordenamiento territorial los conflictos locales pueden ser resueltos y el crecimiento urbanístico puede ser desarrollado de manera sostenible con el medio ambiente.

De esta forma la modelación hidrológica recrea la realidad de la cuenca cuando dicho modelo este calibrado, proporciona datos confiables de los caudales que se producen en la cuenca. Y de esta manera se convierte en una herramienta en la toma de decisiones para la gestión de los recursos hídricos a nivel de cuenca como a nivel de gobierno local.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Determinar la oferta hídrica actual y bajo escenarios de cambio climático para la parte media de la cuenca del Río Abangares en Guanacaste.

1.1.2. Objetivos específicos

Construir un modelo hidrológico semidistribuido para la cuenca media del Río Abangares.

Calcular la oferta hídrica de la cuenca media del Río Abangares bajo escenarios de cambio climático preestablecidos.

Analizar el estado actual y futuro de la oferta y demanda del recurso hídrico en la cuenca media del Río Abangares.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Concepto de Hidrología

Según Villón (2004) la hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su origen, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluidos los seres vivos.

Por otra parte, Barquero (2015) definen la hidrología como la ciencia que se encarga de estudiar el comportamiento del agua en la Tierra, sobre todo su distribución y circulación y que se fundamenta sobre todo en el ciclo hidrológico. Además, agrega que la hidrología también estudia las propiedades físicas y químicas y su influencia sobre el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivientes.

Estas definiciones nos llevan a hacer gran énfasis sobre el principal medio por el cual se da la hidrología, el ciclo hidrológico.

2.2. Definición de Ciclo Hidrológico

En opinión de Ordoñez (2011) el ciclo hidrológico es la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la tierra a la atmósfera y volver a la tierra: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y evaporación. El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente, este movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía para elevar el agua (evaporación); la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento).

Además, concibe el ciclo hidrológico como el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso) como en su forma (superficial, subsuperficial, subterránea, etc.). En la Figura 1, se muestra los procesos que están presentes en el ciclo hidrológico.

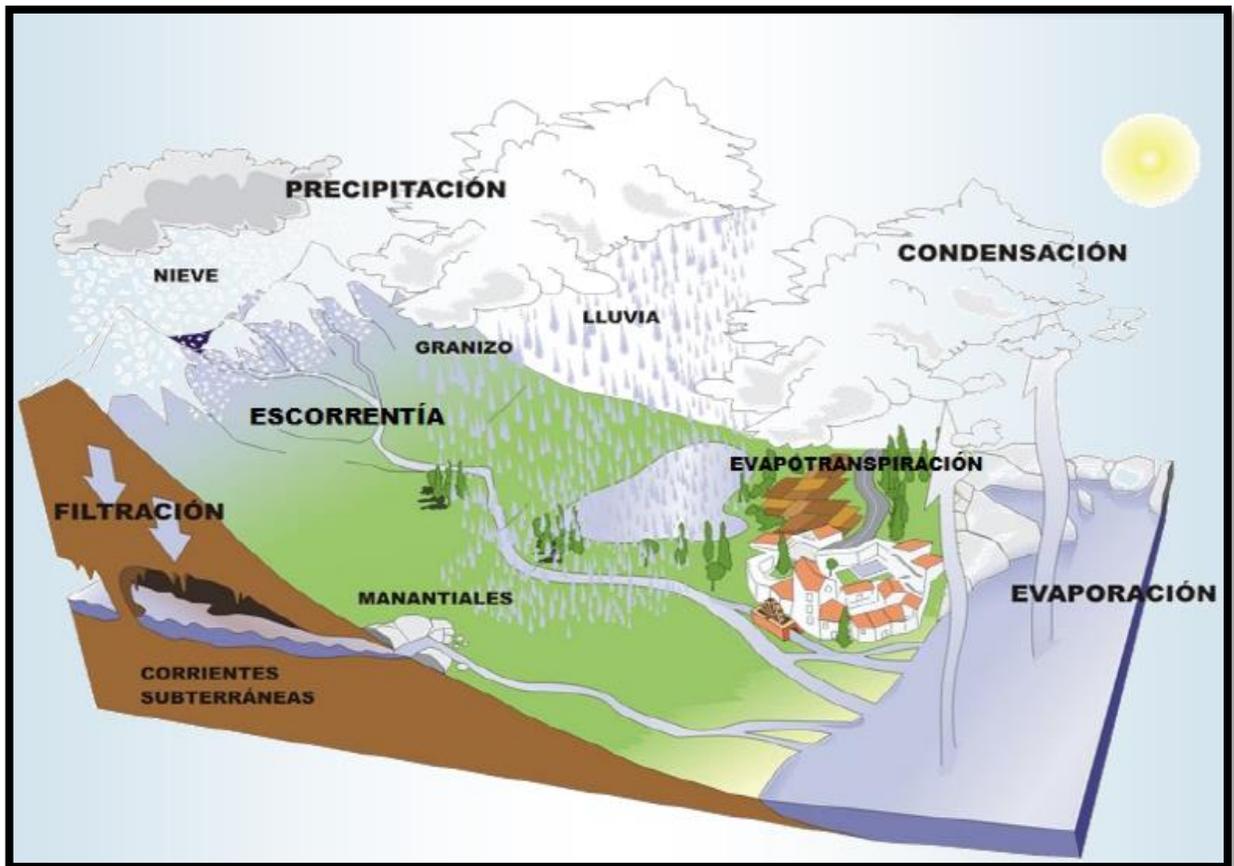


Figura 1. Ciclo Hidrológico.
Fuente: Ordoñez, 2011.

2.3. Concepto de Cuenca Hidrográfica

La cuenca hidrográfica se define como un área geográfica drenada por un río. Esta área posee límites naturales, donde, al caer la precipitación, las aguas superficiales y subterráneas son conducidas hacia una red natural que confluye en un cauce común. El río es solamente un elemento de la cuenca, pero es el elemento más importante de la misma, ya que es el elemento integrador, el que produce la conexión: aguas arriba y aguas abajo (Rivera, 2002).

Según Geralsi, Piccolo, & Perillo (2010) la identificación geomorfológica de una región es de fundamental importancia, puesto que constituye uno de los factores principales que dominan la dinámica hídrica. La morfología regional, condicionada por procesos de sedimentación, erosión, depositación y transporte da lugar a la existencia de cuencas hidrográficas

El agua, a través de su capacidad de erosión y transporte de sedimentos, se comporta como un factor relevante en el modelado de la superficie terrestre y de sus paisajes (Geraldí et al., 2010).

De acuerdo con Ponce (1989) un modelo de cuenca (cuenca de río) es un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico, con el objetivo de simular la conversión de la precipitación en escurrimiento. En principio, las técnicas de modelación de cuencas son aplicables a cuencas de cualquier tamaño, ya sean pequeñas (pocas hectáreas), de tamaño medio (cientos de kilómetros cuadrados) o grandes (miles de kilómetros cuadrados). En la práctica, sin embargo, las aplicaciones de la modelación son generalmente confinadas al análisis de cuencas para el cuales la descripción de variaciones espaciales temporales y/o variaciones espaciales de precipitación está garantizada.

2.4. La estadística y sus aplicaciones

En opinión de Barreto (2012) la estadística es la ciencia cuyo objetivo es reunir información cuantitativa concerniente a individuos, grupos, series de hechos, etc., para deducir de ello, gracias al análisis de estos datos, significados precisos o previsiones para el futuro. La estadística, en general, es la ciencia que trata de la recopilación, organización presentación, análisis e interpretación de datos numéricos con el fin de tomar decisiones efectivas y pertinentes.

Según Badii et al (citado en Badii, Castillo, Landeros, & Cortez, 2007) la estadística es la ciencia que estudia los conjuntos de datos cualitativos y su interpretación en términos matemáticos, estableciendo métodos para la obtención de las medidas que lo describen, así como para el análisis de las conclusiones, con especial referencia a la teoría de la probabilidad, considerada también como ciencia de base matemática para la toma de decisiones en presencia de la incertidumbre. Indica una medida o fórmula especial, tal como un promedio, un número índice o un coeficiente de correlación, calculado sobre la base de los datos. Considerada también como un suministro de un conjunto de herramientas sumamente útiles en la investigación.

De acuerdo con Villón (2006) los estudios hidrológicos requieren del análisis de cuantiosa información hidrometeorológica; esta información puede consistir de datos de precipitación,

caudal, temperatura, evaporación, etc. Los datos recopilados solo representan una información en bruto, pero si estos se organizan y analizan en forma adecuada, proporcionan al profesional una herramienta de gran utilidad que le permite tomar decisiones.

Los métodos estadísticos comúnmente son utilizados para organizar y resumir datos numéricos y han sido empleados por los gobiernos organizados como un medio para la toma de decisiones.

Los datos estadísticos son concisos, específicos y capaces de ser analizados objetivamente por diferentes procedimientos. En función de sus características, los datos se clasifican en cuantitativos y cualitativos; siendo los cuantitativos la base fundamental de estudio de la estadística. El uso de la computadora ha hecho posible que los gobiernos, las empresas y otras organizaciones almacenen y procesen grandes cantidades de datos (Badii, Castillo, Landeros, & Cortez, 2007).

Hoy en día la estadística se ha convertido en una ciencia de las más útiles e influyentes en los diversos campos de conocimiento y brinda grandes posibilidades de aplicación. De esta manera a lo largo del tiempo más disciplinas encuentran en los métodos estadísticos una opción apropiada de planteamiento y solución de determinados problemas.

2.5. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

En opinión de Olaya (2014) a principios de los años sesenta, el creciente interés por la información geográfica y el estudio del medio, así como el nacimiento de la era informática, propiciaron la aparición de los primeros SIG. Desde ese punto hasta nuestros días, los SIG han ido definiéndose en base a la evolución de la informática, la aparición de nuevas fuentes de datos susceptibles de ser utilizadas en el análisis geográfico muy especialmente las derivadas de satélites y del desarrollo de disciplinas relacionadas que han contribuido a impulsar el desarrollo propio de los SIG. Siendo en su origen aplicaciones muy específicas, en nuestros días los SIG son aplicaciones genéricas formadas por diversos elementos, cuya tendencia actual es a la convergencia en productos más versátiles y amplios.

Los Sistemas de Información Geográfica aplicados a las cuencas hidrológicas, han sido utilizados como herramientas para la determinación de sus características fisiográficas

(superficie, pendiente, red de drenaje, forma, etc.) además de variables tales como pérdida de suelos, balances hidrológicos, planeación y gestión hidráulica, transporte de sedimentos y contaminantes, modelación hidráulica para la determinación de áreas de inundación y sequías, cambio climático, fronteras agrícolas, cambios de uso de suelo, deforestación, entre otros (Contreras, Luján, Caro, & Preciado, 2013).

De esta manera los SIG nos facilitan la realización de operaciones y análisis entre capas de información y son muy útiles para visualizar y generar cartografía exponiendo claramente los resultados obtenidos. En la Figura 2 se muestra el ciclo de un SIG.

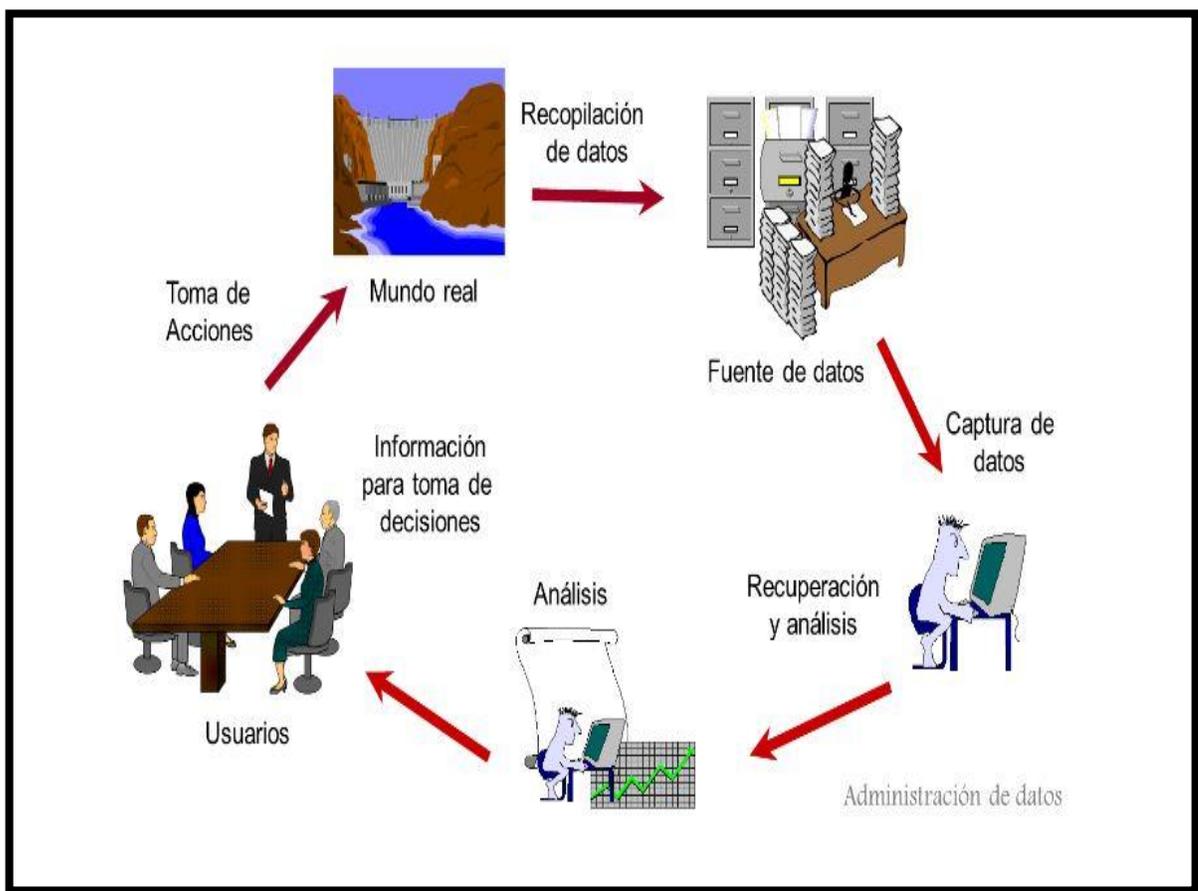


Figura 2. Ciclo de un SIG.
Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

En síntesis, los SIG son una herramienta primordial para la gestión hidrológica, facilitando la realización de cálculos lo que conlleva a una mayor inversión en tiempo y mayor precisión en los resultados.

2.6. Sistema Integrado de Información sobre la Tierra y el Agua (ILWIS)

2.6.1. Historia e importancia

En el año 1984, la Facultad de Ciencias de Geoinformación y Observación de la Tierra (ITC) de la Universidad de Twente recibió una subvención del Ministerio de Asuntos Exteriores de los Países Bajos para dedicarla a la investigación que beneficia el desarrollo de la Tierra y el Agua en los países en desarrollo. El ITC decidió concentrar estos fondos en un único proyecto de investigación multidisciplinar. Este proyecto investigó la metodología de un Sistema de Información Geográfica que podría usarse como una herramienta para la zonificación del uso del suelo y los estudios de gestión de cuencas.

ILWIS fue diseñado para responder a las demandas de los usuarios de la comunidad ITC y su red, para que sea de bajo costo, bajo nivel de ingreso y orientado a aplicaciones. Por lo tanto, cumple por completo uno de los principales objetivos del ITC, es decir, la transferencia de tecnología apropiada a los países en desarrollo. Después de 2000, se reorientó el desarrollo del software ILWIS y el ILWIS se integró más en el programa de investigación del ITC con el objetivo de mejorar la capacidad y la posición de investigación del ITC.

El Sistema de Información Integral de Tierra y Agua es un SIG y software de percepción remota con capacidad para hacer procesamiento digital de imágenes (raster o vector).

ILWIS fue creado con el objetivo de responder a las demandas de los usuarios, ser de bajo costo, con una orientación a ser aplicado en la transferencia de tecnología de los países en desarrollo. Es un paquete de procesamiento de imágenes y SIG fácil de usar y ampliamente distribuido. Está basado en el sistema PC y diseñado en el entorno de Windows, tanto expertos como principiantes pueden manejarlo con facilidad.

Este programa proporciona una potente herramienta para la recolección, almacenamiento, análisis, transformación y presentación de datos. Con los datos de entrada, puede generarse información para modelar la distribución espacial y temporal, patrones y procesos en la superficie de la Tierra. ILWIS provee de un kit de documentación, trata con los conceptos básicos de SIG y procesamiento de imágenes, y es aplicable a muchos campos (como la evaluación del territorio, estudios urbanos, manejo ambiental y de desastres naturales).

2.7. Modelos Hidrológicos

De acuerdo con Montalván (2012) los modelos hidrológicos tienen como objetivo primordial representar los procesos que conforman el ciclo hidrológico y la interrelación entre las variables que influyen en el mismo.

Particularmente los modelos se desarrollan directamente para estudiar el impacto del cambio de uso de suelo y clima. En las últimas décadas se ha mejorado significativamente los modelos hidrológicos, aunque con un grado más de dificultad; pese a ello para obtener unos resultados óptimos de calibración y validación depende de un ingreso de datos precisos y de buena calidad, aunque a su vez ellos también dependen de aspectos como: captura de datos y precisión de sensores (Célleri & Feyen, 2009).

En opinión de Montalván (2012) los modelos hidrológicos se pueden clasificar de acuerdo a las características de interés:

2.7.1. Representación espacial

Modelos Agregados: considera una distribución espacial uniforme de lluvia en la cuenca y supone que los procesos hidrológicos son constantes y globales para toda la cuenca.

Modelos Semidistribuidos: permiten cierta variabilidad espacial de lluvia, divide una cuenca en múltiples subcuencas con lluvia y parámetros constantes para cada una.

Modelos Distribuidos: incorporan la variabilidad espacial de la lluvia y de los parámetros dividiendo la cuenca en celdas, en las que se simulan los diferentes procesos hidrológicos.

En la figura 3, se muestra una representación espacial de una cuenca bajo estos tres tipos de modelos.

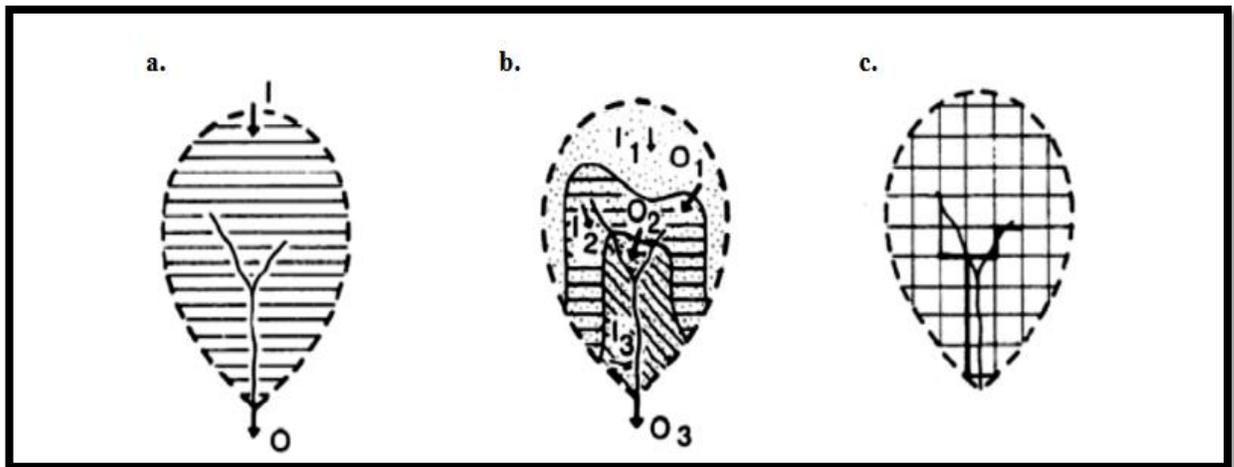


Figura 3. Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial a) Modelo Agregado b) Modelo Semidistribuido c) Modelo Distribuido.
Fuente: Chong-yu, 2002.

2.7.2. Representación de los procesos hidrológicos

Modelos métricos: no necesita conocimiento de estructura ni parámetros de la cuenca, tan solo datos de entrada y salida y su resultado es característico de la cuenca sin interpretación física.

Modelos conceptuales: representa conceptualmente los procesos hidrológicos más importantes, basándose en reservorios o depósitos de agua conectados que se llenan con lluvia o infiltración y se vacían mediante, evapotranspiración o escorrentía, permitiendo generar secuencias continuas de flujo cuyos parámetros deben ser observados en la cuenca.

2.7.3. Extensión temporal

Modelos de episodio: utilizados para simulaciones de un único episodio de lluvia, se ajustan a la evaluación de la escorrentía directa, sin tomar en cuenta el proceso de recuperación de humedad entre episodios de lluvia.

Modelos continuos: simulan caudales diarios, mensuales o estacionarios; considera una generación de escorrentía directa, subterránea, centrándose en la simulación de evapotranspiración y de los procesos a largo plazo para recuperar de la humedad durante los periodos que no hay ocurrencia de precipitación.

2.8. Modelo Hidrológico HBV-light

El modelo HBV-light es un modelo hidrológico que se puede aplicar tanto de manera agregado o semidistribuido; dicho modelo consta de varias rutinas que son: rutina de nieve, rutina de humedad del suelo, rutina de respuesta y rutina de enrutamiento.

HBV-light nos permite aplicar el modelo con diferentes estructuras, que nos permitirá evaluar el modelo de mejor manera, siendo los datos de entrada diarios de lluvia, temperatura, caudal y evapotranspiración de referencia. El modelo HBV-light utiliza un período de warming-up, comúnmente llamado período de calentamiento, durante el cual las variables (humedad del suelo y caudales) evolucionan a partir de condiciones iniciales a sus valores apropiados a las condiciones meteorológicas y los valores de los parámetros. Es decir que después de este periodo de calentamiento el modelo debe representar la dinámica de la cuenca correctamente (Montalván, 2012).

2.8.1. Rutina de nieve

Los valores de acumulación de nieve y deshielo se calculan mediante un método promedio-día tomando en cuenta la elevación y vegetación de la zona (Akhtar, Ahmad, & Booij, 2009). La precipitación simulada se acumula en forma de nieve cuando la temperatura cae por debajo de un valor umbral calibrado (Umbral de temperatura TT) o como líquida con temperaturas por encima del umbral (TT), de acuerdo a una simple expresión grado-día (Bergström, 1992).

2.8.2. Rutina de humedad de suelo

En el suelo la precipitación y derretimiento se dividen en agua de recarga en suelo (SM) o aguas subterráneas (Harlin, 1991). Esto dependerá de la relación entre el contenido de agua en el suelo y el valor que determina la máxima capacidad de almacenamiento o capacidad de campo (FC) (Seibert & Vis, 2012)

2.8.3. Rutina de respuesta

Calcula la escorrentía transformando el exceso de agua (ILQ) en función al almacenamiento de agua en el suelo (módulo de humedad de suelo) (Bergström, 1992). El modelo de un solo depósito lineal es una descripción de la cuenca donde se asume que la escorrentía $Q(t)$ en el tiempo (t) es proporcional al almacenamiento de agua $S(t)$ (Cabrera, 2014).

2.8.4. Rutina de enrutamiento

El módulo final cumple la función de alisar del flujo generado, utilizando una función de ponderación triangular con un parámetro libre (Maxbass) para simular el encaminamiento de la escorrentía a la toma de captación (Seibert, 2005).

2.8.5. Evaluación de resultados

Según Villamarín (2015) para la evaluación de las simulaciones con el modelo HBV-light se utiliza el coeficiente de eficiencia (Reff) que compara la predicción por el modelo con un valor constante del valor medio observado en el período entero

Si, el valor Reff es igual a 1, la aplicación del modelo, los datos meteorológicos observados y sus resultados pueden ser considerados 100% confiables, 'por el contrario, si el valor Reff es igual o menor a 0, tanto los datos observados como los simulados no son confiables (Seibert, 1997).

En opinión de Chong (citado en Villamarín, 2015) la aplicación del modelo HBV-light es confiable cuando el valor de Reff es igual o mayor a 0,65; mientras mayor sea su valor mayor será la eficiencia del modelo

A continuación, se muestra en la Figura 3 un diagrama del proceso del modelo hidrológico HBV-light.

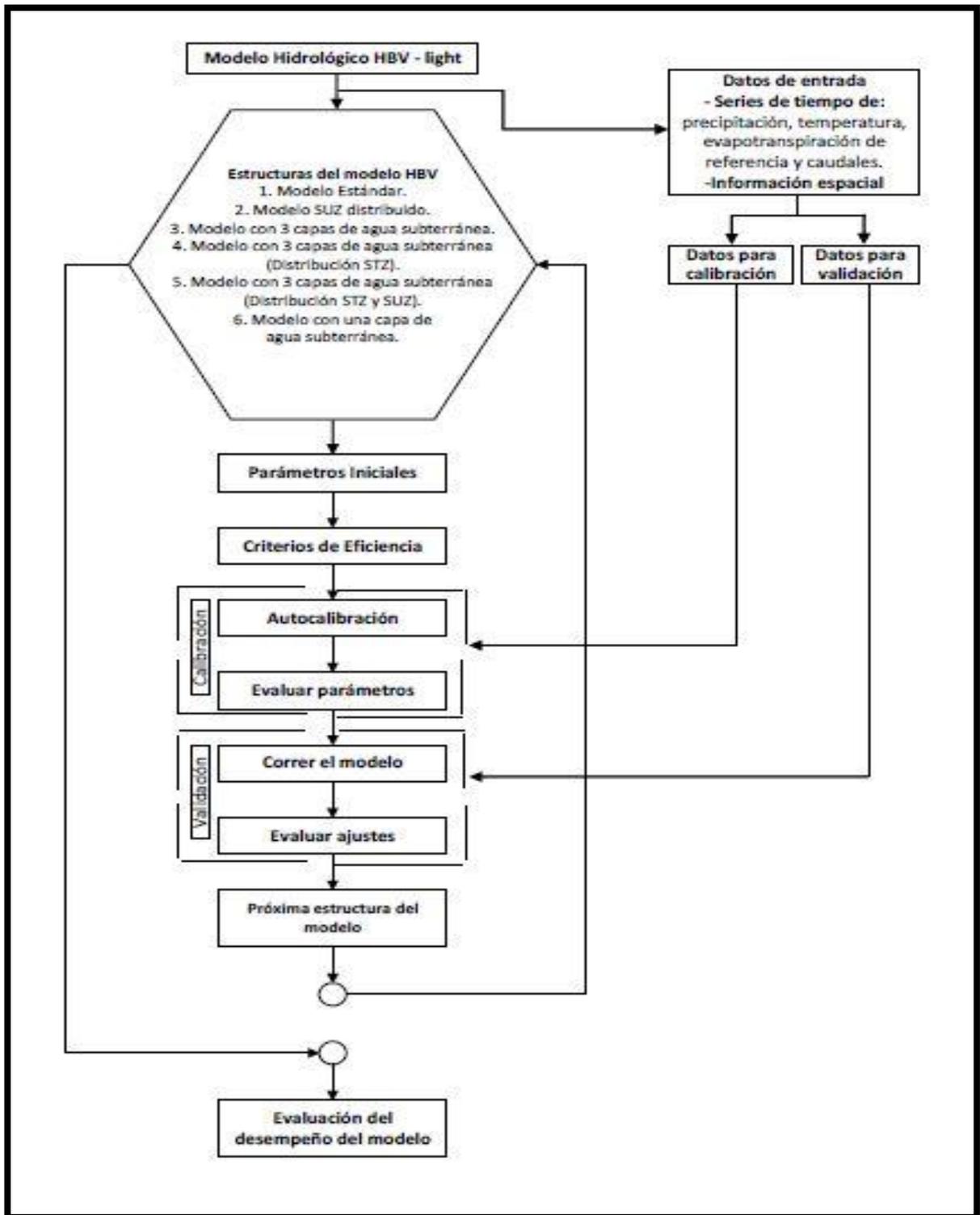


Figura 4. Diagrama de procesos del modelo hidrológico HBV-light.
Fuente: Montalván, 2017.

III. METODOLOGÍA

Para construir el modelo hidrológico de la cuenca media del Río Abangares usando el modelo HBV-light fue necesario llevar a cabo los siguientes procesos que se describen a continuación:

3.1. Recolección de información hidrometeorológica de la Cuenca del Río Abangares

La información de las estaciones meteorológicas (datos de precipitación, temperatura, evapotranspiración, energía, radiación solar, radiación ultravioleta, velocidad y dirección de viento, humedad, etc) y de las estaciones fluviográficas (datos de precipitación, caudal y turbiedad) fue proporcionada por el Centro de Investigación en Estudios para el Desarrollo Sostenible (CIEDES) de la Universidad de Costa Rica para un periodo de tiempo comprendido entre el año 2015 al año 2017.

3.2. Determinación del área de estudio y selección de estaciones para la elaboración del modelo hidrológico

Para seleccionar las estaciones a utilizar y definir el área de estudio de este trabajo se utilizó un Sistema de Información Geográfica libre llamado QGIS, en el cual se pudo visualizar la ubicación de las estaciones meteorológicas y fluviográficas de la Cuenca del Río Abangares.

De esta manera, se estableció el criterio que definió la selección de las estaciones y la delimitación del área de estudio de este trabajo, el cual fue definido especialmente por la ubicación de las estaciones medidoras de caudal.

3.3. Delimitación de la cuenca media de la cuenca del Río Abangares

3.3.1. Modelo de Elevación Digital

Se seleccionó y se descargó el modelo de elevación digital (MED) ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite-1, ALOS), el cual se realizó desde la dirección electrónica <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/> y se escogió el MED.

3.3.2. Imágenes Satelitales

Las imágenes satelitales fueron descargadas de la plataforma Earth Explorer, en donde se escogió imágenes Sentinel 2 (con una resolución de 12,50 x 12,50), se indicó el área de búsqueda, y se visualizaron varias opciones con el fin de escoger la imagen en la zona de estudio con menor nubosidad.

3.3.3. Hidroprocesamiento

Seguidamente, haciendo uso del módulo DEM Hydro-processing del software ILWIS 3.3. se procedió a crear capas raster de: acumulación de flujo, dirección de drenaje, extracción de subcuencas. Por lo que mediante la especificación de un punto de aforo; se procedió a ejecutar el comando para la delimitación de la parte media de la cuenca del Río Abangares para finalmente obtener una capa vectorial de la red de drenaje.

La coordenada de la estación Marimba (proyección CRTM05 latitud 1136201 y longitud 391287) fue el punto de aforo escogido, la cual se encuentra ubicada aproximadamente en la parte suroeste de la cuenca.

3.4. Clasificación de Uso Suelo de la cuenca media del Río Abangares

Para este apartado se utilizó el programa Quantum GIS y su complemento Semi-Automatic Classification (SAP).

Primeramente, se realizó la corrección atmosférica a las bandas de la imagen satelital SENTINEL 2. Posteriormente, se realizó el recorte o extracción de las bandas para el área de estudio. Se crearon las áreas de entrenamiento (ROI) para ello se establecieron cuatro macroclases divididas de la siguiente manera: construcción, suelo, vegetación y agrícola (se usó combinaciones de bandas para mejorar la selección de cada clase). Por último, se realizaron varias previsualizaciones hasta quedar conforme con el resultado de la clasificación.

3.5. Análisis de la información hidrometeorológica para la elaboración del modelo hidrológico

3.5.1. Elaboración de base de datos

Con la herramienta computacional Microsoft Excel 2016 se realizó una base de datos con los registros diarios de precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal para cada una de las estaciones meteorológicas y pluviométricas ubicadas en la parte media de la cuenca del Río Abangares.

3.5.2. Análisis y corrección de las series de datos meteorológicos

Primeramente, con el fin de determinar valores fuera de rango, datos faltantes, etc se realizó una visualización simple de las series de datos de precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal de las estaciones seleccionadas versus el tiempo.

En los gráficos elaborados se evidenció que existen algunos periodos de datos de precipitación, temperatura, evapotranspiración que no se encuentran completos, tal y como se muestra en el Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3 y Anexo 4.

Seguidamente se realizaron cálculos para obtener los porcentajes de los datos faltantes tomando en consideración los diferentes parámetros (precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal) de cada una de las estaciones, esto mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$PDF = \frac{CDF}{TD} * 100 \quad (1)$$

Donde:

PDF: Porcentaje de datos faltantes

CDF: Cantidad de datos faltantes

TD: Total de datos

3.5.3. Análisis estadístico de las series de datos meteorológicos

Para conocer los valores de correlación entre las estaciones con datos de precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal se llevó a cabo un análisis con ayuda del programa Microsoft Excel 2016, específicamente con la fórmula estadística de coeficiente de correlación.

Mediante la herramienta de análisis de datos del programa Microsoft Excel 2016 se efectuó el análisis de regresión lineal. Para esto se realizó una matriz de correlación que determinó las estaciones que mejor predicen el comportamiento de otra.

3.5.4. Cálculo de la precipitación, temperatura y evapotranspiración media de la cuenca en estudio

Con los datos completos de cada una de las estaciones se delimitó la zona de influencia de cada estación dentro del conjunto de las estaciones utilizando el método de Polígonos de Thiessen, esto con ayuda del complemento de QGIS Polígonos Veronoi.

Se realizaron dos delimitaciones de las zonas de influencia para las estaciones que tienen la variable en común de precipitación y la otra delimitación con solo las estaciones con variable de temperatura y evapotranspiración.

Finalizado este proceso, se obtuvieron los pesos para cada estación mediante la siguiente fórmula:

$$PE = \frac{AIE}{ATC} \quad (2)$$

Donde:

PE: Peso para cada estación

ATC: Área total de la cuenca en kilómetros cuadrados

AIE: Área de influencia de la estación en kilómetros cuadrados

Posteriormente se multiplicó el peso de cada estación por el valor diario de cada variable, es decir precipitación, temperatura y evapotranspiración.

3.6. Modelación Hidrológica utilizando HBV-light

Para llevar a cabo la modelación hidrológica de la cuenca media y alta del Rio Abangares se realizó lo siguiente:

3.6.1. Datos de entrada

Se ingresaron los datos de temperatura, precipitación, evapotranspiración y caudal con el formato requerido por HBV-light mediante archivos matriciales en formato texto (.txt.)

3.6.2. Configuración de la cuenca: determinación de las zonas de elevación y las zonas de vegetación

Para la modelación hidrológica en el programa HBV-light se debe configurar parámetros de la cuenca, por lo que se debe de ingresar los datos correspondientes a las zonas de elevación y las zonas de vegetación, tal y como se explica a continuación:

Las zonas de elevación se establecieron con la altitud mínima y máxima mediante el modelo de elevación digital de la cuenca delimitada. Se definieron nueve zonas de elevación cada cien metros aproximadamente.

Por otra parte, las áreas de las zonas de vegetación se establecieron con la información generada mediante la clasificación de uso de suelo de la cuenca. Se definieron tres zonas de vegetación: construcción, suelo-agrícola y vegetación.

Para el caso de suelo-agrícola se sumaron las áreas generados por las macroclases de suelo y agrícola mediante el proceso de la clasificación de uso de suelo; esto debido que el programa solo se puede ingresar tres zonas de vegetación.

3.6.3. Configuración de GAP optimization (optimización utilizando un algoritmo genético)

Se definió la cantidad de veces para ejecutar el modelo y la cantidad de ejecuciones que se desea guardar. Y se estableció para la evaluación de las simulaciones el coeficiente de eficiencia (Reff) y después de estas simulaciones el modelo representa la dinámica de la cuenca.

3.6.4. Escenarios de cambio climático

Se realizó el cambio de la información en los datos de entrada de precipitación y temperatura en donde se calculó los nuevos datos tomando en cuenta los pronósticos de variación para la región centroamericana en los horizontes de tiempo 2020, 2050 y 2080, esto según lo referenciado en el Informe Final de los Efectos del Cambio Climático para Centroamérica (Estado de la Nación, 2010).

Finalmente se corrió la modelación en HBV-light para los pronósticos de los años 2020, 2050 y 2080.

3.6.5. Análisis de concesiones superficiales presentes en la cuenca

Se realizó una búsqueda en la base de datos de la Dirección de Agua del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) sobre las concesiones existentes.

Con la información de las concesiones y haciendo uso de la herramienta QGIS, se recortó la capa de concesiones de la Dirección de Agua para generar otra capa de las concesiones ubicadas dentro de la cuenca media del Rio Abangares.

Posteriormente, se hizo una selección únicamente de las concesiones superficiales otorgadas para la cuenca en estudio.

Seguidamente, se elaboró un cuadro con el número y tipo de expediente, el nombre del expediente, el nombre y tipo de fuente y el caudal concesionado para cada tipo de categoría. Y se calculó el caudal total superficial que hay otorgado y el volumen diario acumulado en la cuenca en estudio.

Se obtuvo los volúmenes acumulados para los escenarios 2020, 2050 y 2080.

Finalmente, se realizó una selección de las concesiones otorgadas en el Río Abangares ubicadas aguas abajo de la cuenca en estudio y poder determinar la variación del volumen acumulado al aumentar los caudales extraídos.

3.6.6. Análisis social y ambiental

Se realizó un análisis sobre los aspectos sociales y ambientales de este estudio en base en el cálculo de los porcentajes equivalentes a los caudales otorgados por categoría y a los porcentajes de variación de caudal para los escenarios 2020, 2050 y 2080.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Información hidrometeorológica de la Cuenca del Río Abangares

La información de las estaciones meteorológicas y las fluviográficas fue proporcionada por el Centro de Investigación en Estudios para el Desarrollo Sostenible (CIEDES) para un periodo de tiempo de marzo 2015 a mayo 2017. A continuación, en el Cuadro 1 y Cuadro 2 se muestra un resumen de las estaciones meteorológicas y fluviográficas ubicadas dentro de la cuenca del Río Abangares.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca del Río Abangares.

Estación Meteorológica	Latitud Proyección CRTM05	Longitud Proyección CRTM05	Elevación (m.s.n.m)	Fecha de instalación
San Rafael	1143858	403729	1097	Febrero de 2014
Campos de Oro	1145580	399663	1085	Marzo de 2015
Colegio Técnico Profesional Las Juntas	1137039	394361	148	Febrero de 2012
Colorado	1126264	378501	20	Marzo de 2014
Cemex	1127672	371094	17	Julio de 2014

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 2. Estaciones fluviográficas ubicadas dentro de la cuenca del Río Abangares.

Estación Fluviográfica	Latitud Proyección CRTM05	Longitud Proyección CRTM05	Elevación (m.s.n.m)	Fecha de instalación
Marimba	1136201	391287	108	Octubre de 2014
Ecomuseo	1137380	399292	256	
Santa Lucía	1138709	392989	177	Noviembre de 2015

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Área de estudio y selección de estaciones

Con la información mostrada anteriormente se llevó a cabo la selección de las estaciones localizadas entre la parte media de la cuenca del Río Abangares, esto debido a que la mayor parte de las estaciones se localizan en este sector y en la parte baja solo se cuenta con información meteorológica y no hay estaciones fluviográficas que proporcione registros de caudales para esta parte de la cuenca. Por lo que se seleccionaron las siguientes estaciones, tal y como se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Estaciones meteorológicas y fluviográficas seleccionadas que se encuentran ubicadas en la parte media de la cuenca del Río Abangares.

Nombre de la Estación	Tipo de Estación	Elevación (m.s.n.m)	Variable de interés
San Rafael	Meteorológica	1097	Precipitación, temperatura y evapotranspiración
Campos de Oro		1085	
Colegio Técnico Profesional Las Juntas		148	
Marimba	Fluviográfica	108	Precipitación y caudal
Ecomuseo		256	Caudal
Santa Lucía		177	Precipitación

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Delimitación de la cuenca

En la figura 5, se muestra la delimitación del área de estudio correspondiente a la parte media de la cuenca del Río Abangares.

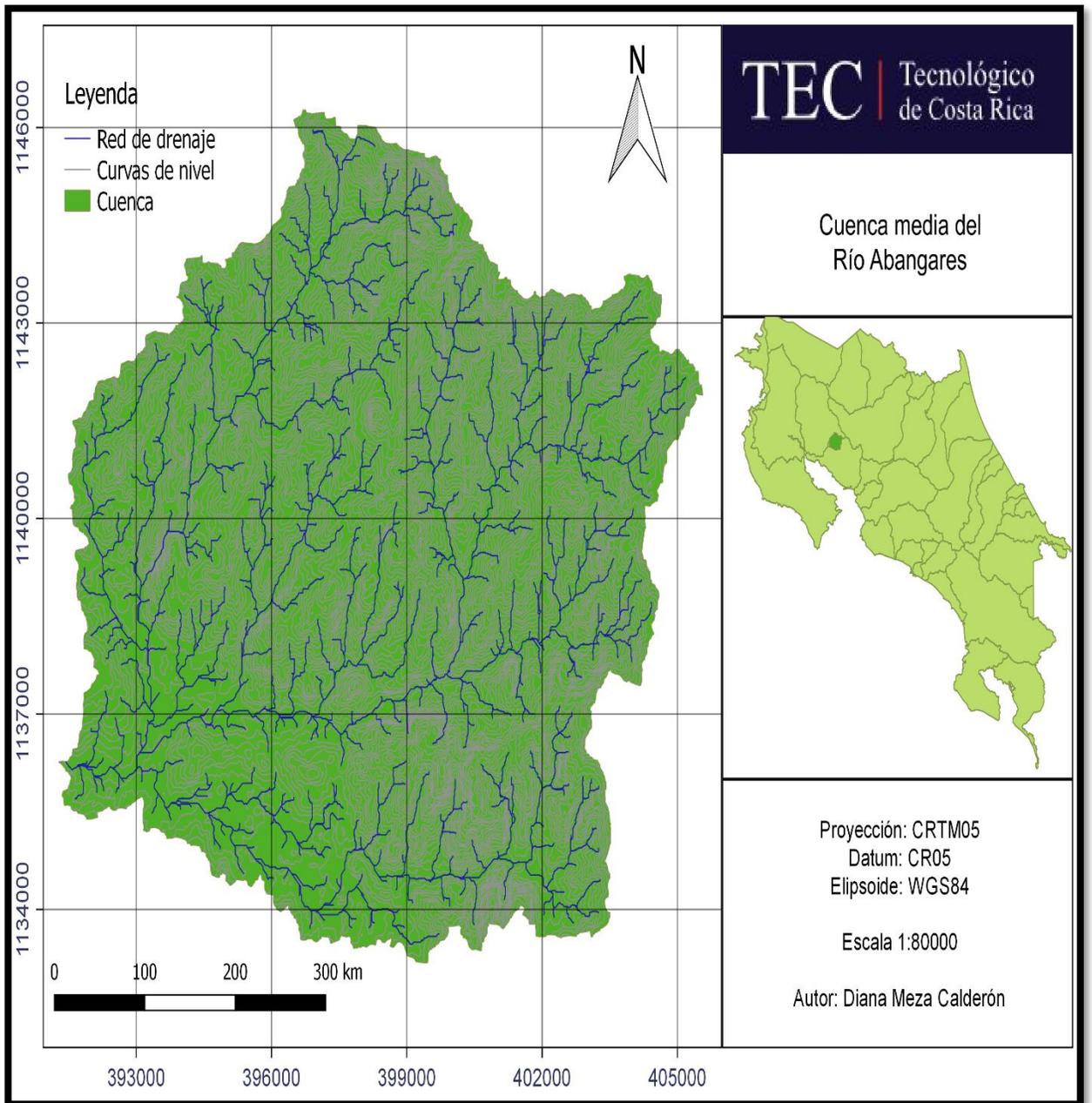


Figura 5. Delimitación de la cuenca media del Río Abangares.
Fuente: Elaboración propia.

La delimitación de la cuenca se realizó mediante las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica y con el software ILWIS tomando como punto de aforo la estación Marimba ubicada en la coordenada proyección CRTM05 latitud 1136201 y longitud 391287 (ver Anexo 5). Y cuya delimitación corresponde a un área de 126,3195 km².

4.4. Clasificación de Uso Suelo

En la figura 6, se muestra la clasificación de uso de suelo correspondiente a la parte media de la cuenca del Río Abangares.

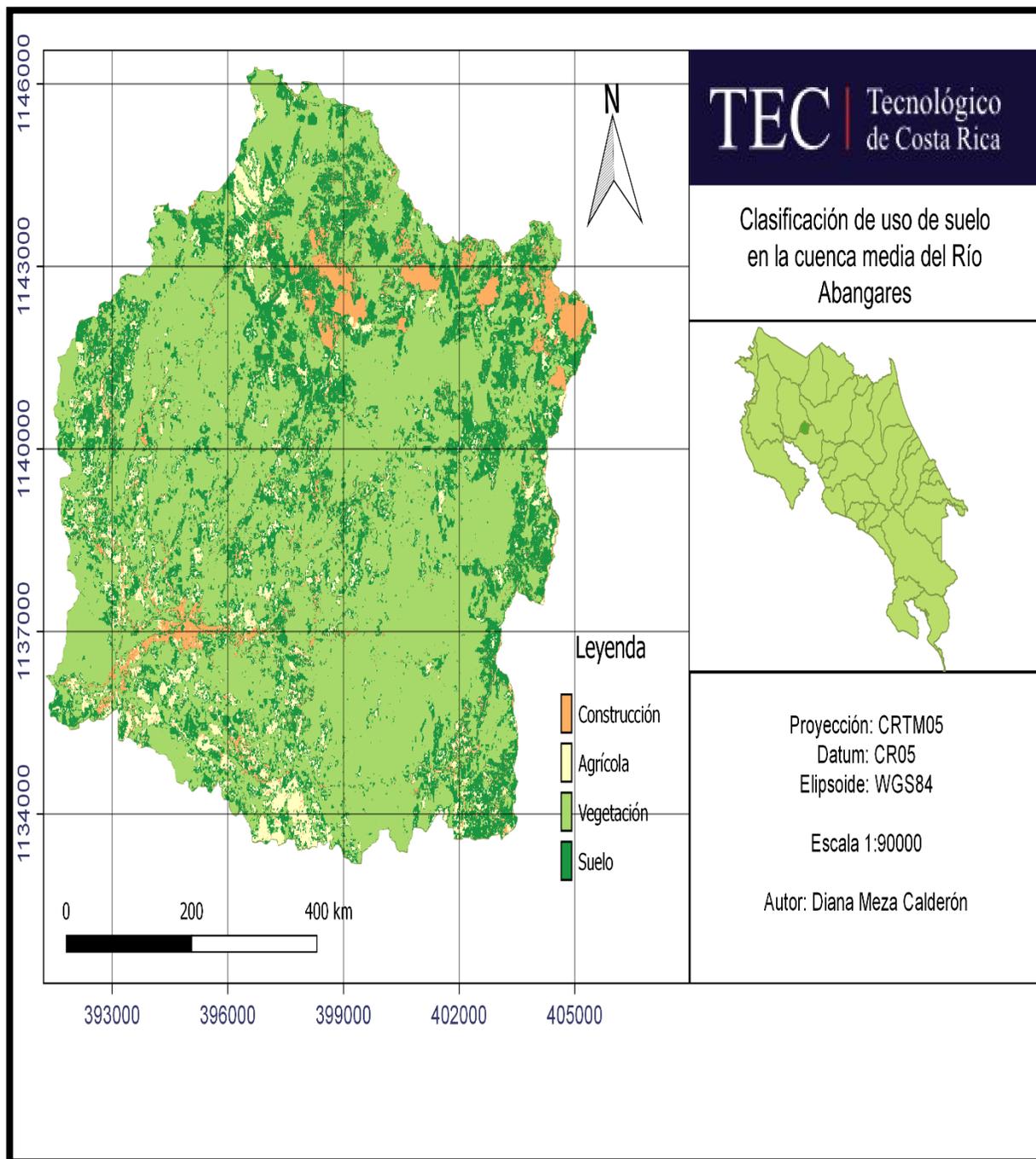


Figura 6. Clasificación de uso de suelo de la cuenca media del Río Abangares.
Fuente: Elaboración propia.

En figura anterior se observa que las partes de color naranja corresponde a las zonas de construcción, las áreas de color beige representan la parte agrícola donde hay presencia de pastos y áreas cultivables, las zonas de color verde oscuro corresponden a los sectores con presencia de suelo desnudo y las zonas de color verde claro representan las áreas donde hay presencia de vegetación, es decir principalmente bosque.

4.5. Información hidrometeorológica para la elaboración del modelo hidrológico

Con el análisis que se realizó a los datos con el fin de determinar el porcentaje de información faltante para cada una de las estaciones seleccionadas (ver Anexo 6, 7 y 8), se determinó el coeficiente de correlación (R) entre las estaciones para las variables de precipitación, temperatura y caudal, tal y como se muestra en los Cuadros 4, 5, 6 y 7. Este proceso se hizo para definir cuales estaciones se podían correlacionar entre ellas para efectuar la completación de datos.

Cuadro 4. Matriz de correlación entre las estaciones tomando en cuenta los datos de precipitación.

Estación	San Rafael	Las Juntas	Campos de Oro	Marimba	Ecomuseo
San Rafael	1,00	0,51	0,75	0,17	0,16
Las Juntas	0,51	1,00	0,56	0,58	0,24
Campos de Oro	0,75	0,56	1,00	0,23	0,08
Marimba	0,17	0,58	0,23	1,00	0,24
Ecomuseo	0,16	0,24	0,08	0,24	1,00

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 5. Matriz de correlación entre las estaciones tomando en cuenta los datos de temperatura.

Estaciones	San Rafael	Las Juntas	Campos de Oro
San Rafael	1,00	0,44	0,93
Las Juntas	0,44	1,00	0,44

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 6. Matriz de correlación entre las estaciones tomando en cuenta los datos de evapotranspiración.

Estaciones	San Rafael	Las Juntas	Campos de Oro
San Rafael	1,00	0,04	0,89
Las Juntas	0,04	1,00	0,04
Campos de Oro	0,89	0,04	1,00

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 7. Matriz de correlación entre las estaciones tomando en cuenta los datos de caudal.

Estación	Marimba	Ecomuseo
Marimba	1,00	0,17
Ecomuseo	0,17	1,00

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que los coeficientes de correlación para las variables de evapotranspiración y caudal son menores a 0,50, se dividió en dos segmentos la serie de datos de la variable de evapotranspiración de las estaciones Las Juntas, San Rafael y Campos de Oro (del 20/02/2017 al 05/02/2017 y del 25/03/2017 al 30/03/2017) para poder determinar las ecuaciones por medio de la regresión lineal para la completación de los datos faltantes de la estación Las Juntas (para dichos segmentos se obtuvo un R de 0,86 con la estación de San Rafael y 0,83 con la estación de Campos de Oro).

De igual manera se dividió en un segmento (del 05/12/2016 al 20/03/2017) la serie de datos de la variable de caudal de las estaciones de Marimba y Ecomuseo para poder determinar la ecuación por medio de la regresión lineal para la completación de los datos faltantes de la estación Marimba (para dicho segmento se obtuvo un R de 0,88).

Tomando en cuenta lo expresado anteriormente y los valores de las correlaciones de los cuadros 5 y 6 más cercanos a uno para cada variable y cada estación se generaron las curvas de regresión (Ver Anexos del 9 a la 21), donde se obtuvo las ecuaciones de la (2) a la (14), tal y como se muestra a continuación:

- **Precipitación:**

$$PESR = PECO * 0,708644 + 0,767732 \quad (2)$$

$$PELJ = PEM * 0,676334 + 2,769067 \quad (3)$$

$$PECO = PESR * 0,790217 + 1,438164 \quad (4)$$

$$PEM = PELJ * 0,490854 - 0,006368 \quad (5)$$

$$PESL = PELJ * 0,988285 + 0,170572 \quad (6)$$

Donde:

PESR: Precipitación de la estación San Rafael en milímetros

PECO: Precipitación de la estación Campos de Oro en milímetros

PELJ: Precipitación de la estación Las Juntas en milímetros

PEM: Precipitación de la estación Marimba en milímetros

PESL: Precipitación de la estación Santa Lucía en milímetros

• **Temperatura:**

$$TESR = TECO * 0,885627 + 2,733555 \quad (7)$$

$$TELJ = TESR * 0,660259 + 13,974863 \quad (8)$$

$$TECO = TESR * 0,975281 + 0,174936 \quad (9)$$

Donde:

TESR: Temperatura de la estación San Rafael en grados Celsius

TECO: Temperatura de la estación Campos de Oro en grados Celsius

TELJ: Temperatura de la estación Las Juntas en grados Celsius

• **Evapotranspiración:**

$$EESR = EECO * 0,817585 + 0,479810 \quad (10)$$

$$EELJ = EESR * 2,204265 - 3,942240 \quad (11)$$

$$EELJ = EECO * 0,904879 + 1,118623 \quad (12)$$

$$EECO = EESR * 0,966263 + 0,175231 \quad (13)$$

Donde:

EESR: Evapotranspiración de la estación San Rafael en milímetros por día

EECO: Evapotranspiración de la estación Campos de Oro milímetros por día

EELJ: Evapotranspiración de la estación Las Juntas milímetros por día

- **Caudal:**

$$QEM = QEEM * 2,918197 - 1,022544 \quad (14)$$

Donde:

QEM: Caudal de la estación Marimba en metros cúbicos por segundo

QEEM: Caudal de la estación Ecomuseo en metros cúbicos por segundo

En el Cuadro 8, se muestra el coeficiente de determinación para cada uno de las ecuaciones obtenidas anteriormente.

Cuadro 8. Coeficientes de determinación.

Ecuación	Coeficiente de determinación (R²)
2	0,97
3	0,33
4	0,92
5	0,33
6	0,99
7	0,86
8	0,19
9	0,86
10	0,79
11	0,73
12	0,37
13	0,79
14	0,78

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el Cuadro 8, para la ecuación número 3 y 5 se obtuvo un R² igual a 0,33, para la ecuación número 8 se obtuvo un R² igual a 0,19 y para la ecuación 12 se obtuvo un R² igual a 0,37 esto se debe a que los coeficientes de correlación obtenidos son inferiores a 0,50 (ver Cuadros 4, 5, 6 y 7), pero al contar únicamente con esta información se decidió realizar las regresiones lineales con la información con la que se contaba.

De esta manera fue posible realizar el proceso de completación de datos de las estaciones mediante la utilización de las ecuaciones anteriormente mostradas y así tener el historial de datos para poder definir el área de influencia de cada estación. A continuación, se muestra en las Figuras 7 y 8 los polígonos de Thiessen generados mediante QGIS. Y utilizando la fórmula (15) se determinó los pesos para cada estación, tal y como se muestra en los Anexos 22 y 23. Con esta información se calculó la precipitación, temperatura y evapotranspiración promedio de la cuenca.

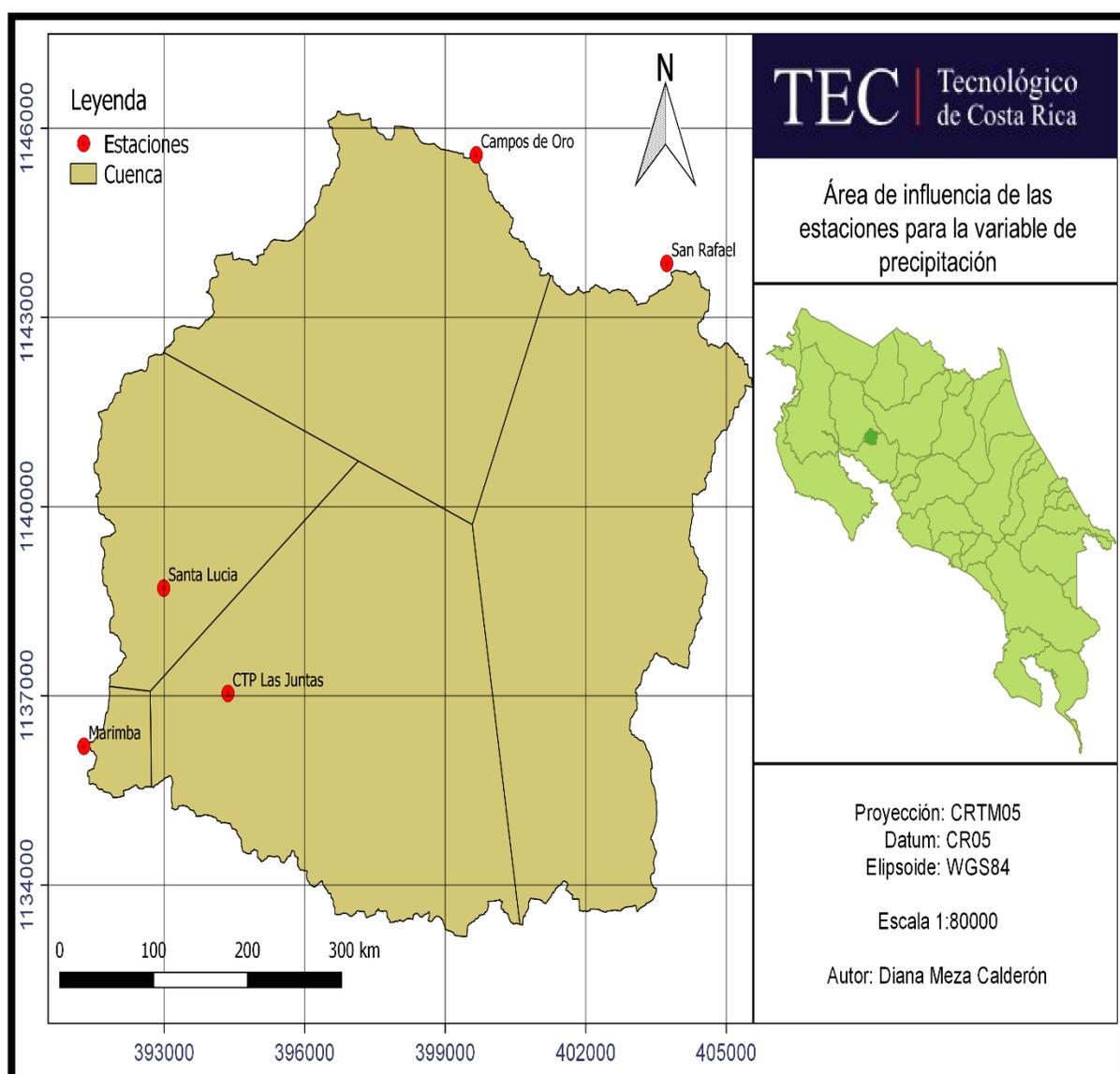


Figura 7. Área de influencia de las estaciones con respecto a la variable de precipitación. Fuente: Elaboración propia.

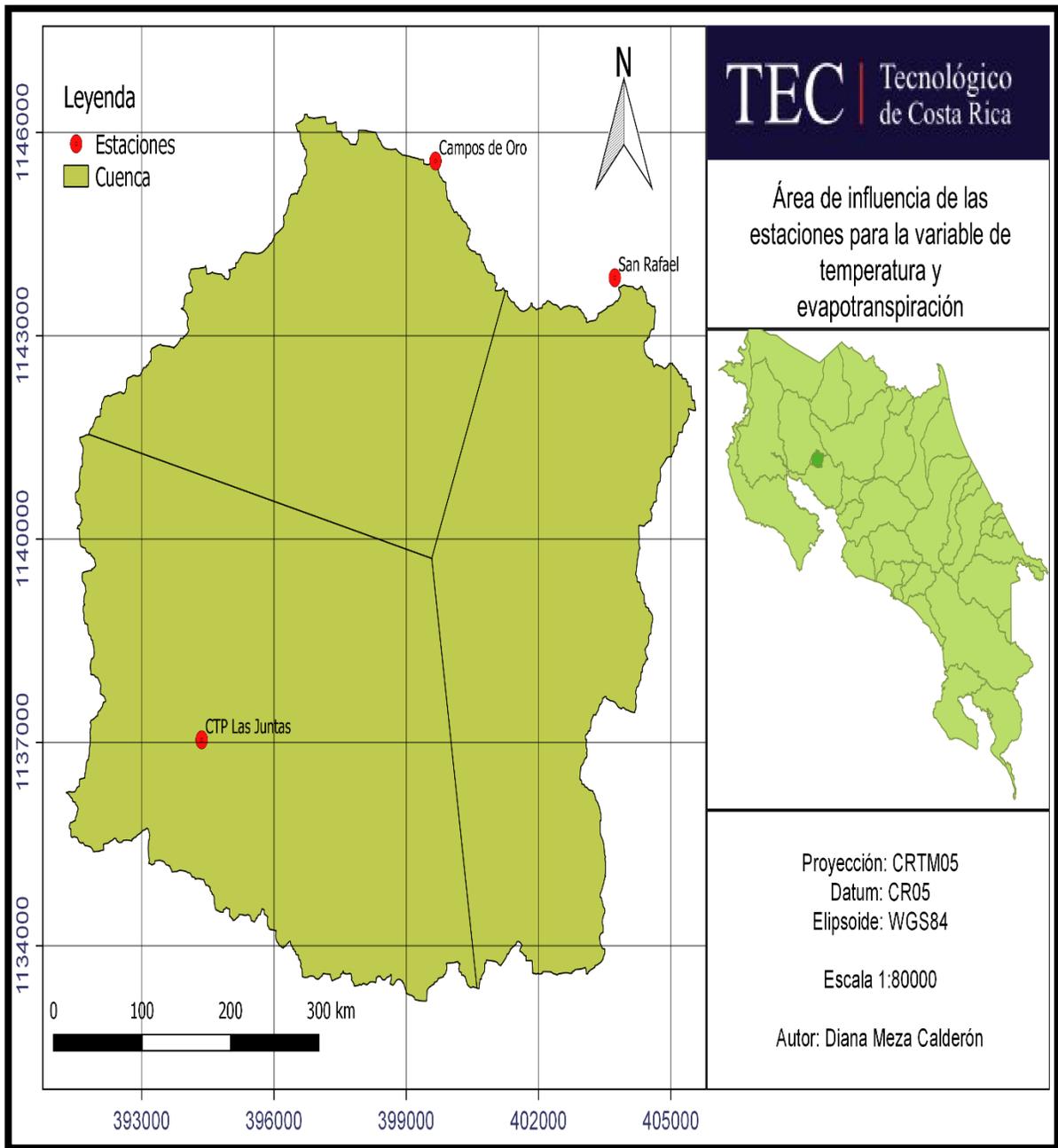


Figura 8. Área de influencia de las estaciones con respecto a la variable de temperatura y evapotranspiración.

Fuente: Elaboración propia.

En los mapas de Polígonos de Thiessen la zona de mejor distribución de estaciones se evidencia con un mayor número de polígonos y disminuye el área de influencia de cada estación generando una estimación más confiable. Sin embargo, en donde la distribución de estaciones es más distante el polígono es de mayor tamaño lo cual disminuye la precisión de la estimación.

4.6. Modelación hidrológica mediante HBV-light

El modelo HBV - light es un modelo hidrológico que consta de varias rutinas como lo son: rutina de nieve, rutina de humedad del suelo, rutina de respuesta y rutina de enrutamiento. En este trabajo no se tomó en cuenta la rutina de nieve. En la Figura 9 se muestra los valores utilizados para las zonas de elevación y de vegetación necesarios para la modelación.

Lake properties			
Elevation	Area	TT	SFCF
Subcatchment 1	0	0	0

Elevation zone	Mean elevation [m]	Subcatchment 1		
		Veg. zone 1	Veg. zone 2	Veg. zone 3
Elevation zone 1	200	0.014194	0.067736	0.080409
Elevation zone 2	300	0.002881	0.030082	0.070247
Elevation zone 3	400	0.004028	0.034739	0.095893
Elevation zone 4	500	0.003656	0.042168	0.125798
Elevation zone 5	600	0.003043	0.041067	0.099721
Elevation zone 6	700	0.004563	0.034591	0.058639
Elevation zone 7	800	0.007087	0.029929	0.034117
Elevation zone 8	900	0.005702	0.022388	0.024669
Elevation zone 9	1021.5	0.01324	0.0268	0.022613

Figura 9. Configuración de la cuenca.

Fuente: HBV-light.

A continuación, en la Figura 10, se presenta los parámetros obtenidos con la calibración automática del modelo en HBV-light (ver Anexo 24).

Snow Routine			
	Veg. zone 1	Veg. zone 2	Veg. zone 3
TT	0	0	0 <input type="checkbox"/>
CFMAX	0	0	0 <input type="checkbox"/>
SFCF	0	0	0 <input type="checkbox"/>
CFR	0	0	0 <input type="checkbox"/>
CWH	0	0	0 <input type="checkbox"/>

Soil Moisture Routine			
	Veg. zone 1	Veg. zone 2	Veg. zone 3
FC	999.99879544	999.99879544	999.99879544 <input type="checkbox"/>
LP	0.5410315295	0.5410315295	0.5410315295 <input type="checkbox"/>
BETA	1.1157150892	1.1157150892	1.1157150892 <input type="checkbox"/>

Response Routine	
PERC	8.0769257628 <input type="checkbox"/>
UZL	149.99981270 <input type="checkbox"/>
K0	0.0100000007 <input type="checkbox"/>
K1	0.05521721501 <input type="checkbox"/>
K2	0.00047621721 <input type="checkbox"/>

Routing Routine	
MAXBAS	1.0000000068 <input type="checkbox"/>

Other	
Cet	0.40284574892 <input type="checkbox"/>

Figura 10. Parámetros calibrados para la cuenca media del Río Abangares.

Fuente: HBV-light.

En la Figura 10, se muestra que cada uno los parámetros cumplen las siguientes condiciones:

Los coeficientes K0, K1, K2 no pueden son mayores que 1.

Se cumple que $K0 > K1 > K2$.

La suma de $K0+K1+K2 < 1$, no existe el riesgo de generar un error en el balance.

Además, se extrae la influencia que tienen los parámetros en la generación de escorrentía:

Los parámetros de humedad en el suelo (FC, PWP y β) determinan la evapotranspiración real y por tanto la escorrentía total generada.

El parámetro β es el factor determinante de la infiltración. Cuanto menor es su valor mayor es la filtración al nivel subsuperficial.

El resto de parámetros regulan la descarga subterránea, y si son definidos correctamente, K0 y Lm determinan la descarga rápida y el resto (K1, y K2) regulan la descarga a más largo plazo y la curva de recesión del río a largo plazo.

En la Figura 11 se presenta los gráficos de la escorrentía observada y simulada para un periodo de tiempo diario comprendido del 10 de noviembre de 2015 al 08 de mayo de 2017.

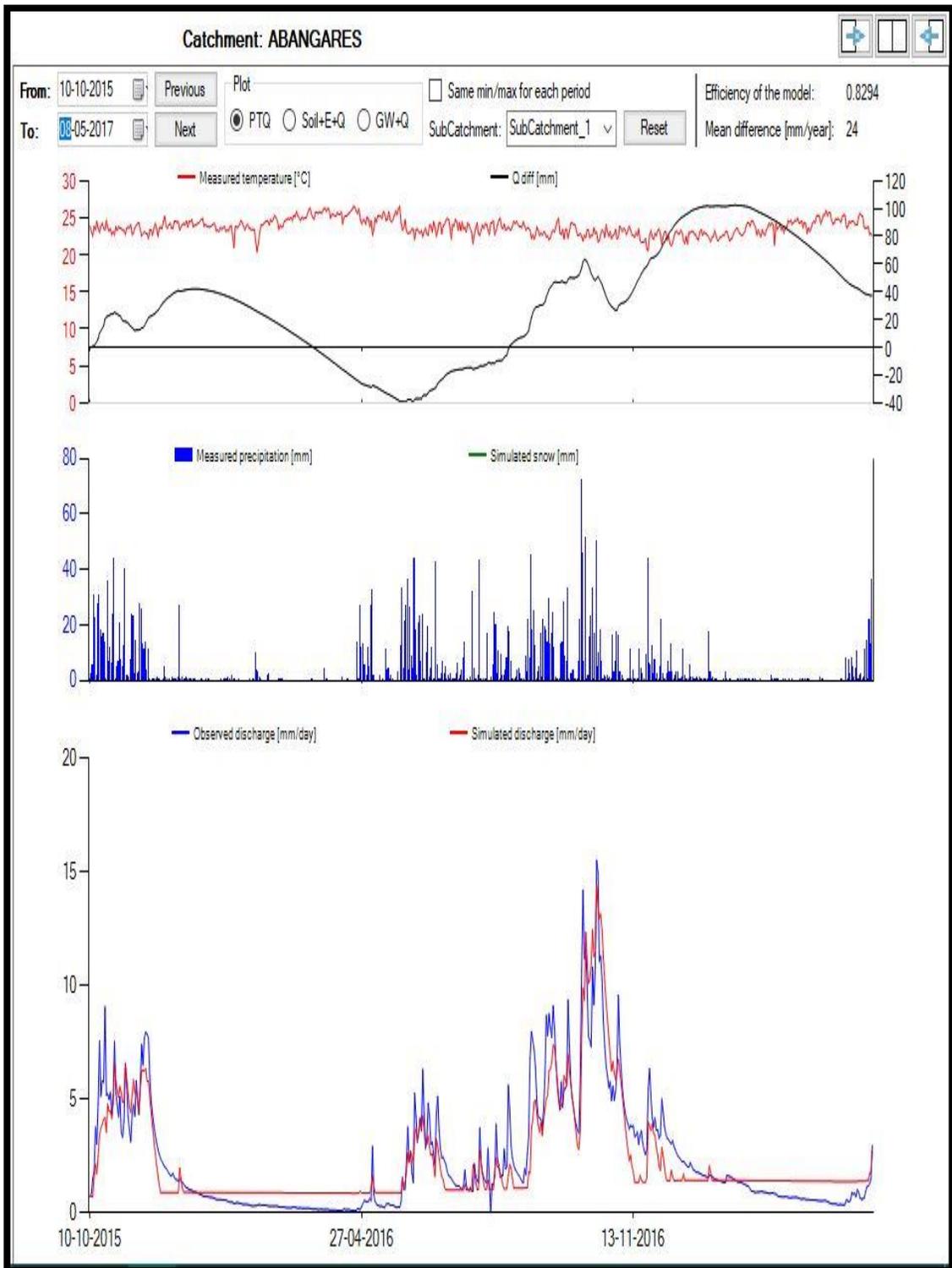


Figura 11. Modelación hidrológica para la cuenca media del Río Abangares.

Fuente: Elaboración propia.

Para este modelo se obtuvo una eficiencia del modelo de 0.8294, esto con respecto a lo obtenido por los resultados simulados con los datos observados. Este modelo nos muestra una buena consistencia entre los valores observados y simulados. A pesar de que en valores de precipitación inferiores a 5 mm el modelo no se ajusta correctamente.

4.6.1. Escenarios de cambio climático para los años 2020, 2050 y 2080.

Con la respectiva calibración del modelo para la cuenca se procedió a modelar tres escenarios tomando en cuenta la variación de la precipitación y la temperatura para los años 2020, 2050 y 2080 esto según lo mostrado en la Figura 12.

Cambio	Estación	2020	2050	2080
Temperatura °C	Seca	+0.4 a	+1.0 a	+1.0
		+1.1	+3.0	a
	Húmeda	+0.5 a	+1.0 a	+1.3
		+1.7	+4.0	a
Precipitación %	Seca	-7 a +7	-12 a +5	-20 a
				+8
	Húmeda	-10 a	-15 a +3	-30 a
		+4		+5

Figura 12. Cambios en temperatura (°C) y precipitación (%) para la región centroamericana en los horizontes de tiempo 2020, 2050 y 2080.

Fuente: Estado de la Nación, 2010.

De la interpretación de dichas variaciones se corrigió la serie de datos de la precipitación y la temperatura (ver Anexos 25 y 26) donde se obtuvieron las gráficas mostrados en la Figura 13, en donde se observa el comportamiento del caudal para los escenarios de los años 2020, 2050 y 2080 respectivamente.

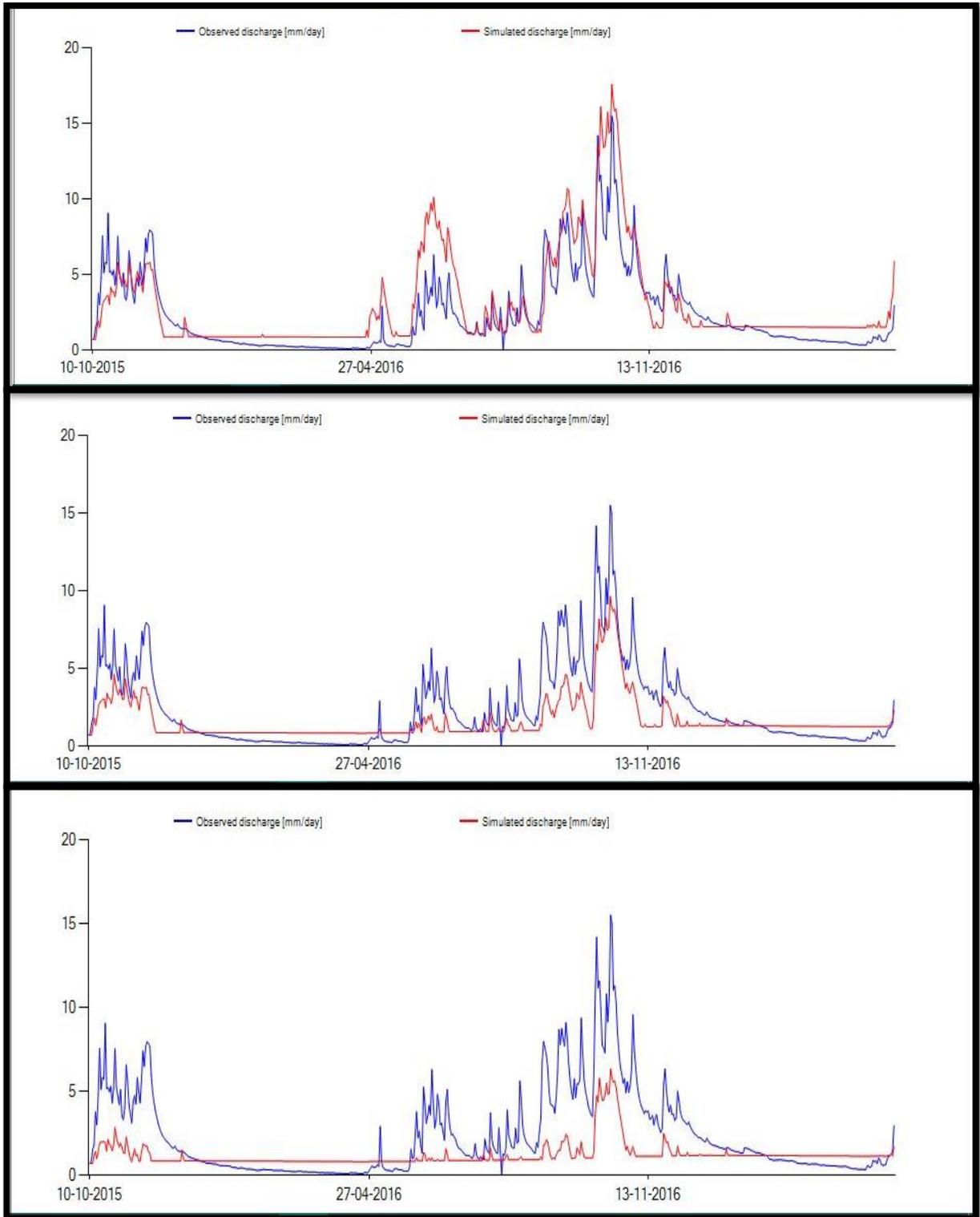


Figura 13. Modelación hidrológica de caudales en la cuenca para los años 2020, 2050 y 2080 respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

4.6.2. Concesiones superficiales presentes en la cuenca

Consultado el Registro Nacional de Concesiones para el Aprovechamiento de Agua y Cauces que maneja la Dirección de Agua del Ministerio de Ambiente y Energía se determinó que existen únicamente 16 concesiones debidamente otorgadas, tal y como se muestra en la Figura 14.

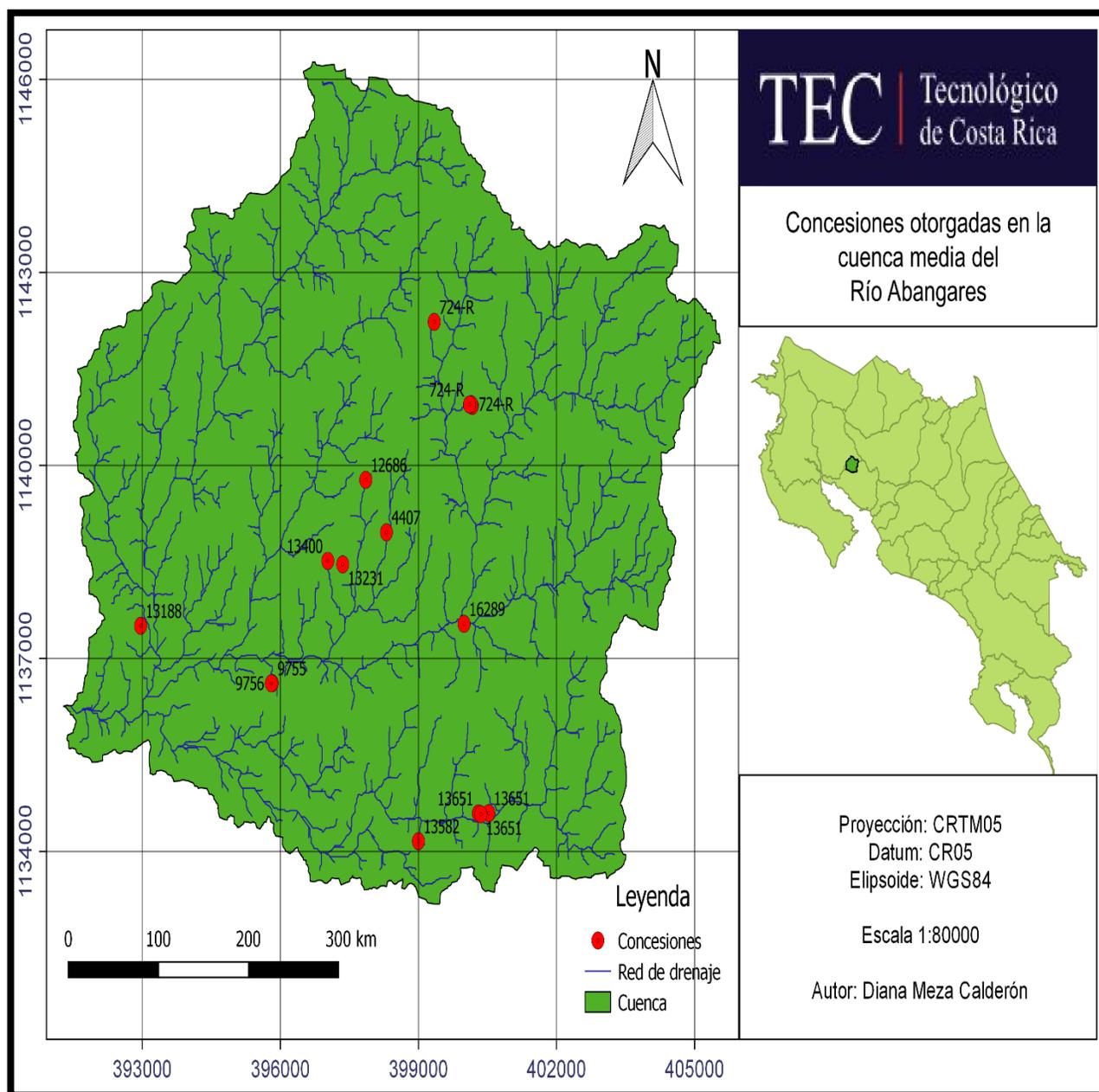


Figura 14. Concesiones de la cuenca media del Río Abangares.
Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, existen registros de expedientes en trámite de solicitud nueva, cancelados por vencimiento y archivados sin más trámite que eventualmente podrían estar aprovechando de estas fuentes, pero sin los respectivos permisos y los cuales no fueron contemplados en este análisis. Con la regionalización de la Dirección de Agua esta situación se pretende corregir con el apoyo de los nuevos funcionarios y la conformación de la Unidad de Control que dentro de sus funciones contempla una mayor regulación en la extracción del recurso hídrico presente en la zona.

El caudal superficial otorgado en la cuenca media del Río Abangares es de 0,014327 metros cúbicos por segundo, los cuales están distribuidos, tal y como se muestra en el Cuadro 9. Para este análisis fue tomado en cuenta únicamente los caudales concesionados dentro de la cuenca en estudio.

Cuadro 9. Caudal concesionado por categorías en la cuenca en estudio.

Categoría	Caudal (m³/s)
Consumo Humano	0,012747
Agropecuario	0,000110
Riego	0,001470

Fuente: Elaboración propia.

El volumen concesionado en la cuenca media del Río Abangares corresponde a 714.241,065600 m³.

Por otra parte, se calculó el caudal concesionado aguas abajo de la cuenca en estudio tomando en consideración lo otorgado únicamente en el Río Abangares obteniendo 0,204017 metros cúbicos por segundo, los cuales están distribuidos, tal y como se muestra en el Cuadro 10. Para este análisis fue tomado en cuenta lo concesionado en la cuenca de estudio más lo otorgado aguas abajo de ella específicamente en el Río Abangares.

Cuadro 10. Caudal concesionado por categorías aguas abajo de la cuenca en estudio.

Categoría	Caudal (m3/s)
Consumo Humano	0,012747
Agropecuario	0,001150
Riego	0,188120
Industrial	0,980000

Fuente: Elaboración propia.

El volumen concesionado tomando en cuenta lo otorgado aguas abajo del Río Abangares corresponde a 10.170.818,697600 m³.

Por lo que vemos que es de vital importancia el control de la ilegalidad, ya que lo que se quiso fue considerar la misma área, pero con diferente caudal otorgado en donde vemos que aumenta considerablemente. En el Cuadro 10 se observa que se cambia el tipo de uso ya que esta zona es donde se da la mayor parte de cultivos extensivos de la zona y hay mayor desarrollo de producción de ganado.

Por lo que en base a los resultados obtenidos (ver Figura 13), se calculó los volúmenes acumulados para lo observado, lo calibrado y para los escenarios de los años 2020, 2050 y 2080, tal y como se muestra en la Figura 14.

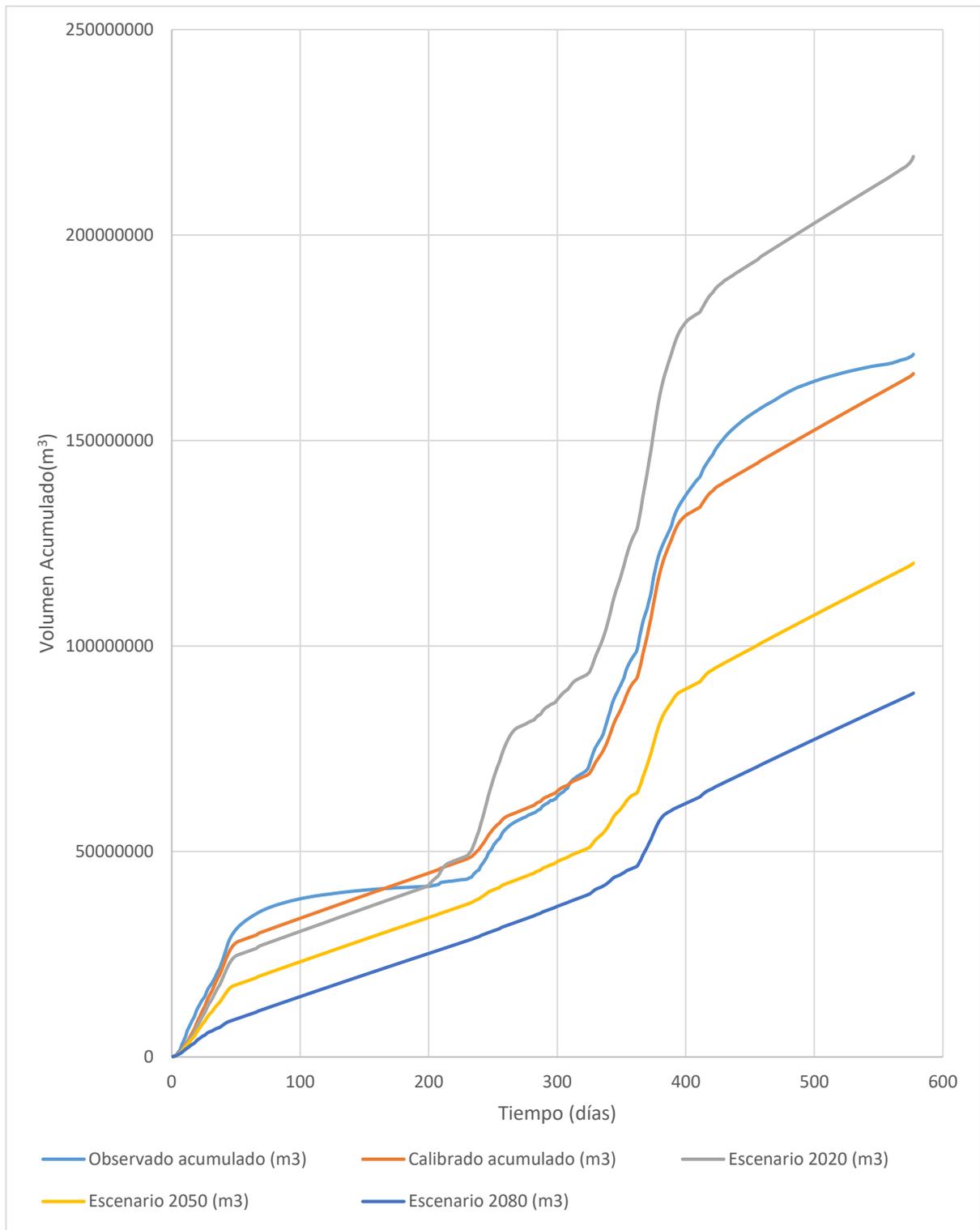


Figura 15. Curvas de acumulación de volumen.

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 11, se muestran los volúmenes acumulados para los escenarios 2020, 2050 y 2080.

Cuadro 11. Volumen acumulado para los escenarios 2020, 2050 y 2080.

Escenario	Volumen acumulado (m3)
2020	219.100.625,633950
2050	120.192.476,020816
2080	88.566.879,400837

Fuente: Elaboración propia.

Según el volumen acumulado concesionado se proyecta que la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca media del Río Abangares no se vería afectado si se mantienen las condiciones para las cuales está evaluado este estudio.

4.6.3. Aspectos sociales y ambientales

Si bien sabemos a nivel nacional la escasez del recurso hídrico es tema de preocupación, también se convierte en una amenaza al desarrollo para una región convirtiéndose en una limitante para que la población mantenga o mejore su bienestar.

El agua en la cuenca media del Río Abangares es esencial para el autoabastecimiento de la población y la cual es administrada por la Municipalidad de Abangares y por las Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunes (ASADAS).

De esta manera, en el Cuadro 12 se muestra el porcentaje otorgado para diversas categorías dentro del área de estudio.

Cuadro 12. Porcentaje que representa el caudal otorgado.

Categoría	Porcentaje del caudal otorgado
Consumo Humano	88,97
Agropecuario	0,77
Riego	10,26

Fuente: Elaboración propia.

Estos porcentajes se deben a que las condiciones topográficas de la cuenca en estudio; es una zona en donde predomina cobertura boscosa, altas pendientes y donde no hay gran desarrollo de cultivos extensivos. Contrario al escenario presente en la parte baja de la cuenca del Río Abangares (ver Cuadro 10) donde se refleja que el riego y lo industrial es el uso predominante en esta zona con topografía más regular y gran desarrollo de cultivos extensivos y ganadería.

En el cuadro 13, se muestra el porcentaje de variación del caudal para los escenarios 2020, 2050 y 2080.

Cuadro 13. Porcentaje de variación de caudal para los años 2020, 2050 y 2080.

Escenario	Porcentaje de variación
2020	17
2050	-29
2080	-49

Fuente: Elaboración propia.

La disponibilidad del recurso hídrico está relacionada al cambio climático ya que incorpora un factor adicional de vulnerabilidad, con escenarios de menores precipitaciones con repercusiones en los caudales de las fuentes. Siendo que la parte ambiental de este proyecto está reflejada en todo el análisis de la determinación de la disponibilidad para la cuenca media del Río Abangares.

Por lo que es absolutamente claro que el agua juega un papel vital en el desarrollo humano y de las comunidades, siendo un factor indispensable en el proceso de desarrollo regional. De ahí la importancia de las políticas de planificación y gestión del recurso hídrico, contar con herramientas técnicas, jurídicas y administrativas orientadas a un mayor apoyo, protección y regulación de los recursos hídricos de la región y a la concientización de la población partiendo del hecho que el recurso hídrico es objeto de múltiples factores de vulnerabilidad que amenazan su viabilidad en el presente y que comprometen su disponibilidad en cantidad y calidad a futuro.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.1. Conclusiones

Se construyó un modelo hidrológico semidistribuido para la cuenca media del Río Abangares con una eficiencia del modelo de 0,8294. Se prevé que para las condiciones para la cual fue realizado este estudio los volúmenes acumulados para el año 2020 sea de 219.100.625 metros cúbicos; mientras que para el año 2050 corresponde a 120.192.476 metros cúbicos y para el año 2080 de 88.566.879 metros cúbicos.

Se determinó que la cuenca tiene concesionado 0.01433 metros cúbicos por segundo correspondiente a un volumen acumulado de 714.241 metros cúbicos. Además, se determinó que el 89% del caudal otorgado es utilizado para consumo humano.

Se pronostica que para las condiciones para las cuales fue realizado este estudio el porcentaje de variación de caudal para el año 2020 aumente un 17%, mientras que para los años 2050 y 2080 se predice una disminución de un 29% y un 49% respectivamente.

5.1.2. Recomendaciones

El modelo tiene el inconveniente de contar con una serie de datos de solamente tres años por lo con la realización de este trabajo se recomienda que sea de utilidad para obtener una base de trabajo en el cual se permita la actualización y que a futuro se transforme en una herramienta de mayor robustez.

Se debe capacitar al personal de la Municipalidad de Abangares para solucionar cualquier inconveniente que se pueda presentar con el funcionamiento de las estaciones meteorológicas y fluviográficas existentes, esto debido al faltante de información encontrada en las series de datos proporcionadas.

Se debe promover para que más entidades públicas o privadas se dediquen a realizar investigación y promuevan el apoyo económico para instalar más estaciones meteorológicas y

fluviográficas en toda la cuenca del Río Abangares con el fin de tener un mayor monitoreo especialmente en la parte de baja de la cuenca del Río Abangares.

Se deben realizar una estrategia de trabajo, campañas de información para que las personas puedan adquirir los permisos respectivos de aprovechamiento ante la Dirección de Agua del Ministerio de Ambiente y Energía y de igual manera impulsar el ingreso de mayor personal con el fin de promover el control y el seguimiento sobre los caudales extraídos dentro de la cuenca.

VI. BIBLIOGRAFÍA

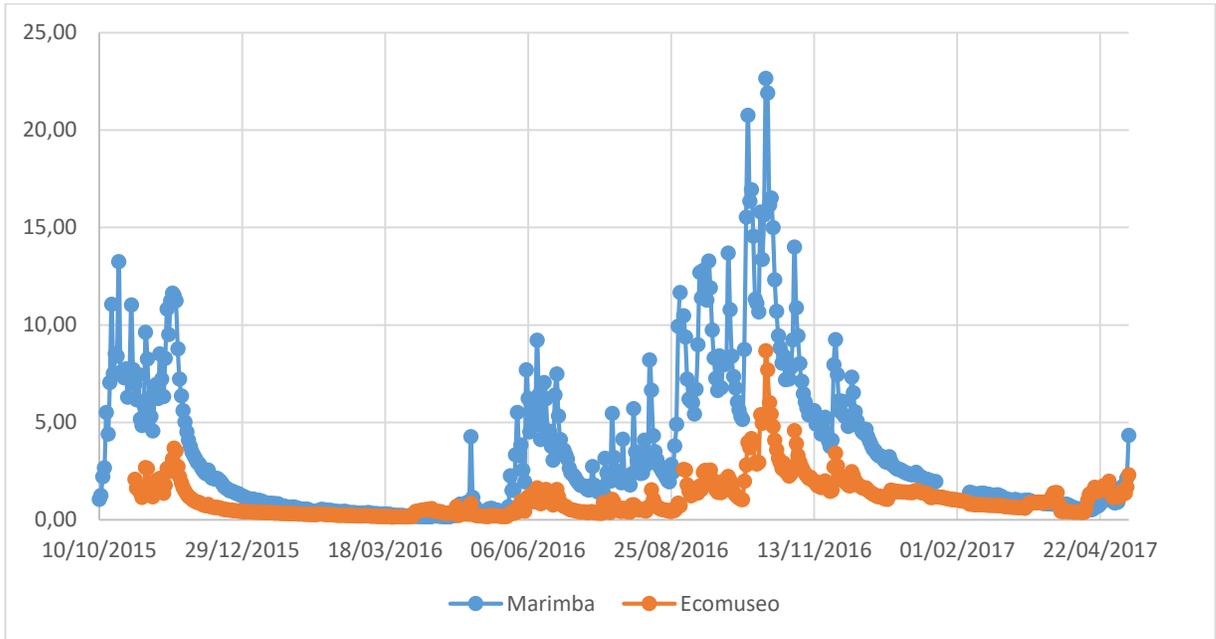
- Akhtar, M., Ahmad, N., & Booij, M. (2009). Use of Regional Climate Model Simulations as input for Hydrological Models for the Hindukush-Karakorum-Himalaya Region (pp. 1070-1088).
- Badii, M., Castillo, J., Landeros, J., & Cortez, K. (2007). Papel de la estadística en la investigación científica. *Innovaciones de Negocios*, 4(1), 107-145. <https://doi.org/ISSN1665-9627>
- Barquero, A. (2015). *Modelación Hidrológica en las Cuencas San Jerónimo-Piedras, Río Blanco y Tenorio usando SWAT*. Universidad de Costa Rica.
- Barreto, A. (2012). El progreso de la Estadística y su utilidad en la evaluación del desarrollo. *Papeles de población*, 18(73), 1-31. Recuperado a partir de <http://www.scielo.org.mx/pdf/pp/v18n73/v18n73a10.pdf>
- Bergström. (1992). The HBV Model - its structure and applications. Recuperado a partir de http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.83589!/Menu/general/extGroup/attachmentColHold/mainCol1/file/RH_4.pdf
- Cabrera, J. (2014). *Evaluación de los recursos hídricos en una cuenca de alta montaña (cuenca del río Bérchules, Sierra Nevada, Granada) utilizando modelos hidrológicos agregados y semidistribuidos*. Universidad de Málaga. Recuperado a partir de http://www.cehiuma.uma.es/TFM_Sobresaliente4.pdf%0A
- Célleri, R., & Feyen, J. (2009). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350-355. <https://doi.org/10.1659/mrd.00007>
- Chaves, M. (2014). *Análisis de los Cambios de Uso de Suelo y su Respuesta Hidrológica de los años 2000 a 2020 en la Cuenca de los Ríos Quebrada Seca y Bermúdez*. Universidad de Costa Rica.
- Chong-yu, X. (2002). *Hydrologic models*. Suecia.
- Contreras, K., Contreras, J., Corti, M., De Sousa, J., Durán, J., & Escalante, M. (2008). *El Agua un Recurso para Preservar*. Mérida.
- Contreras, R., Luján, R., Caro, J., & Preciado, A. (2013). Sistemas de Información Geográfica vía Internet, para el manejo de cuencas y los desastres naturales. *Revista Reaxion*, 1-9.
- Estado de la Nación. (2010). *Informe Final Efectos del Cambio Climático para Centroamérica*.

- Geraldi, A., Piccolo, C., & Perillo, G. (2010). Delimitación y estudio de cuencas hidrográficas con modelos hidrológicos. *Investigaciones Geográficas*, 16(30), 215-225. <https://doi.org/10.4067/S0718-09342002005100014>
- Harlin, J. (1991). Development of a Process Oriented Calibration Scheme for the HBV Hydrological Model. En *Nordic Hydrol* (pp. 15-36).
- Montalván, J. (2012). *Universidad de cuenca. Evaluación del Desempeño del Modelo Hidrológico HBV - Light en una Microcuenca de Páramo*. Universidad de Cuenca. Recuperado a partir de file:///C:/Users/CTRIST~1/AppData/Local/Temp/TECN07.pdf
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica (OSGeo)*.
- Ordoñez, J. (2011). *Ciclo Hidrológico: «Contribuyendo al desarrollo de una cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico»*. Global Water Partnership. Lima, Perú.
- Ponce, V. (1989). Hydrological Models. En *Engineering Hydrology* (pp. 1-61). Editorial Prentice Hall. Recuperado a partir de [http://ing.unne.edu.ar/pub/Modelos hidrologicos_Tema9.pdf](http://ing.unne.edu.ar/pub/Modelos_hidrologicos_Tema9.pdf)
- Rivera, L. (2002). *Evaluación de la Amenaza y Vulnerabilidad a inundaciones en la microcuenca La Soledad, Valle Los Ángeles, Honduras*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Recuperado a partir de <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0269e/A0269e.html>
- Rojas, M., Campos, M., Alpízar, E., Bravo, J., & Córdoba, R. (2003). *El Cambio Climático y los Humedales en Centroamérica: Implicaciones de la variación climática para los ecosistemas acuáticos y su manejo en la región*. San José: Imprenta y Litografía Doble Giro S.A.
- Seibert, J. (1997). *Estimation of Parameter Uncertainty in HBV Model*. Sweden.
- Seibert, J. (2005). *HBV light User's Manual Version 2*. Estocolmo.
- Seibert, J., & Vis, M. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3315–3325.
- The World Meteorological Organization, U. N. E. P. (2007). *Intergovernmental Panel on Climate Change. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Geneva.
- Valverde, R. (2013). Disponibilidad, distribución, calidad y perspectivas del agua en Costa Rica. *Ambientales*, 45, 5-12.

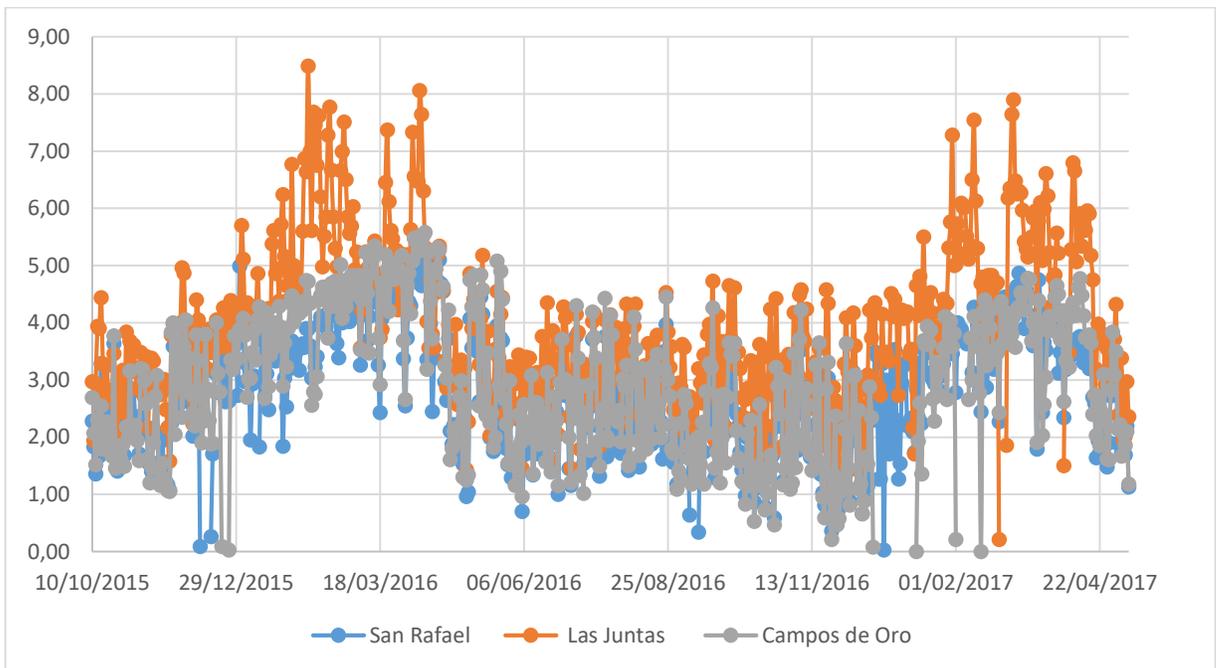
- Villamarín, K. (2015). *Aplicación del Modelo Hidrológico HBV-light en las Cuencas del Río Mira y Portoviejo del Ecuador*. Universidad de Especialidades Espíritu Santo.
- Villón, M. (2004). *Hidrología* (Primera Ed). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Villón, M. (2006). *Hidrología Estadística* (Primera Ed). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Wells, S. (2006). *In the Front Line: shoreline protection and other ecosystem services from mangroves and coral reefs*. Cambridge, United Kingdom.

VII. ANEXOS

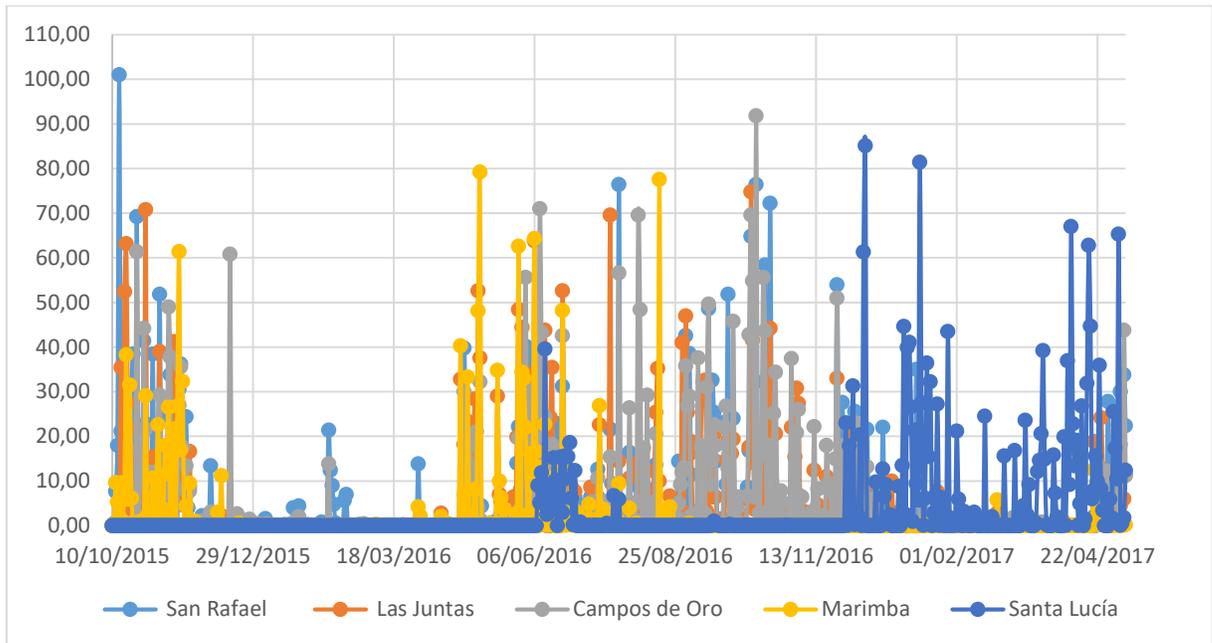
Anexo 1. Gráfico Tiempo versus Temperatura.



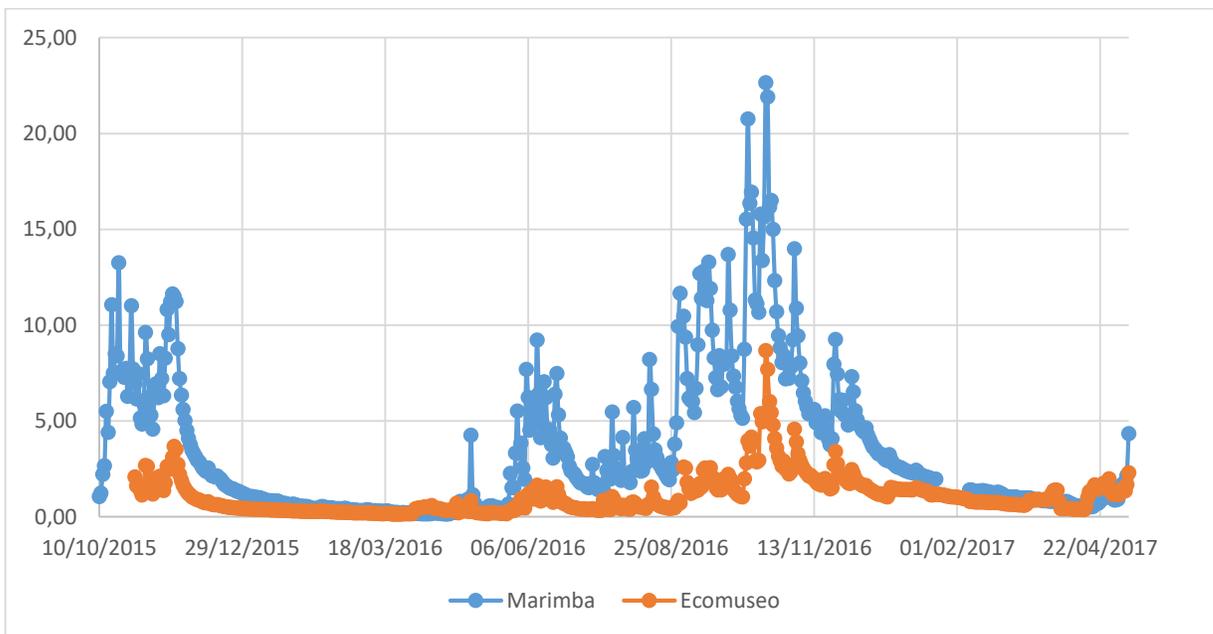
Anexo 2. Gráfico Tiempo versus Evapotranspiración Potencial



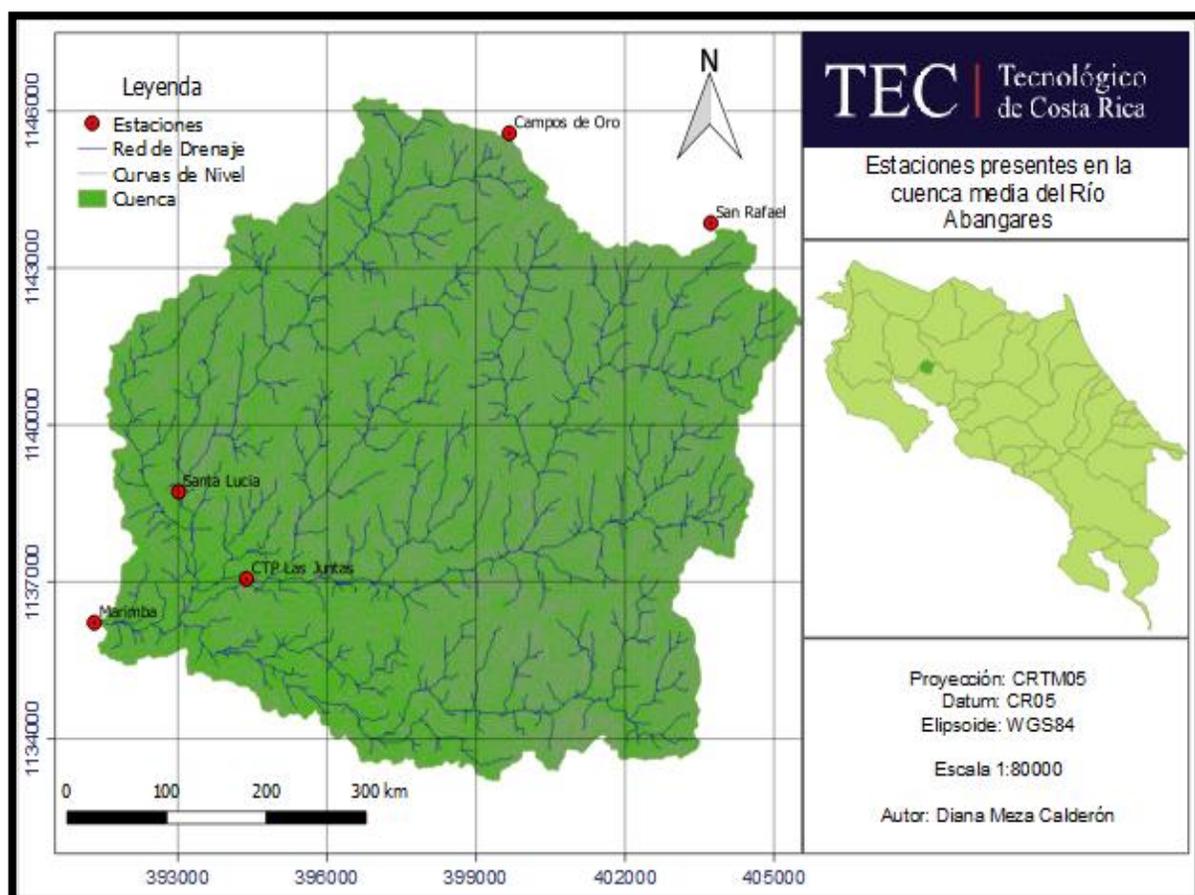
Anexo 3. Gráfico Tiempo versus Precipitación.



Anexo 4. Gráfico Tiempo versus Caudal



Anexo 5. Estaciones presentes en la cuenca media del Río Abangares.



Anexo 6. Porcentaje de datos faltantes en serie de datos de precipitación.

Variable	Precipitación				
Estación	San Rafael	Las Juntas	Campos de Oro	Marimba	Santa Lucía
Datos faltantes	1,38%	0,63%	4,27%	2,64%	30,28%

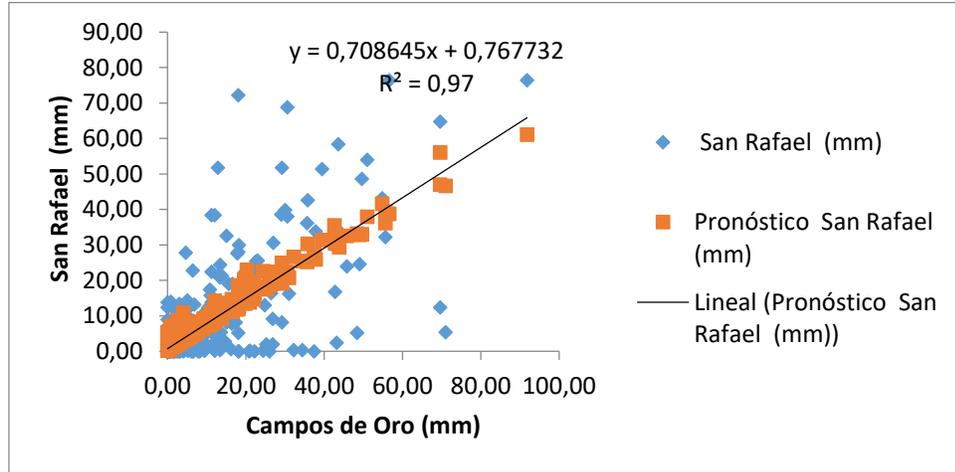
Anexo 7. Porcentaje de datos faltantes en serie de datos de temperatura y evapotranspiración.

Variable	Temperatura y Evapotranspiración		
Estación	San Rafael	Las Juntas	Campos de Oro
Datos faltantes	1,38%	0,63%	4,02%

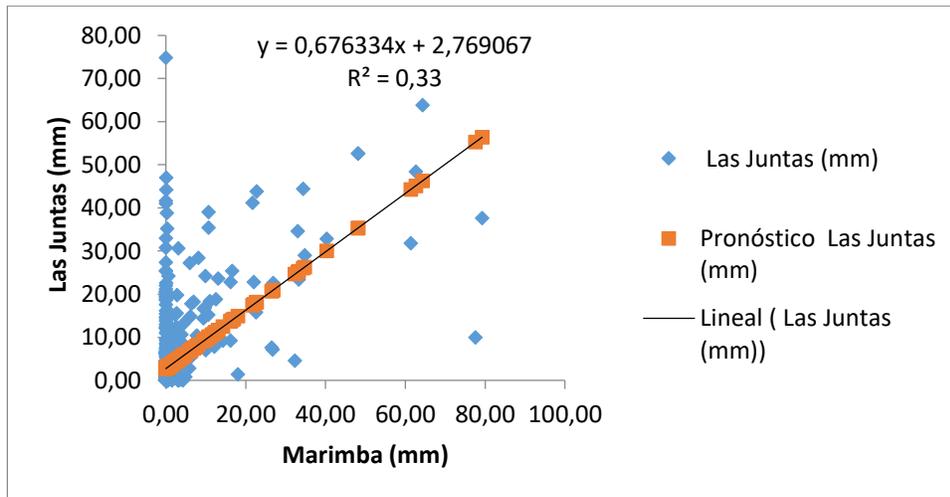
Anexo 8. Porcentaje de datos faltantes en serie de datos de caudal.

Variable	Caudal	
	Marimba	Ecomuseo
Datos faltantes	2,51%	11,56%

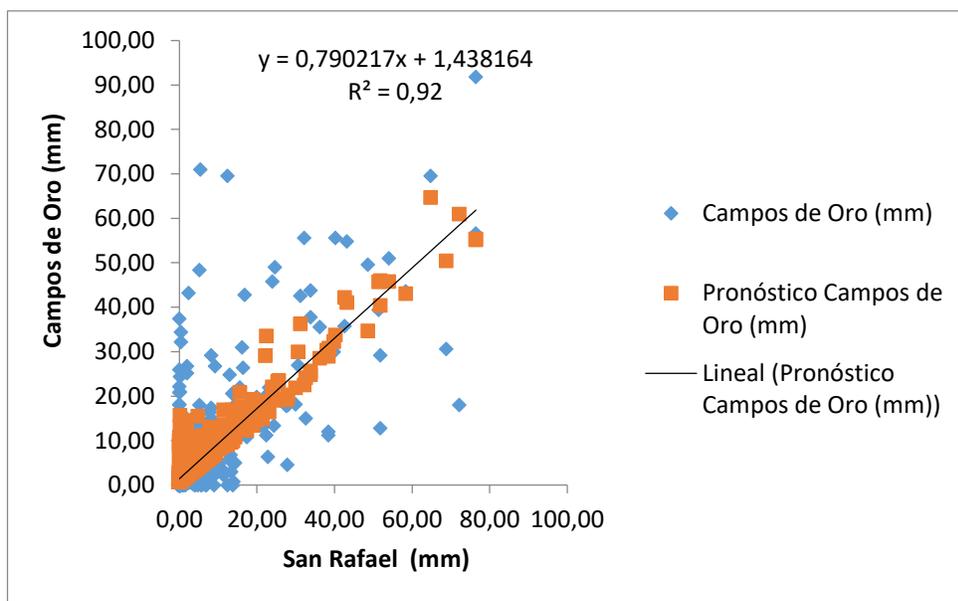
Anexo 9. Curva de regresión para la estación San Rafael correspondiente a la variable precipitación.



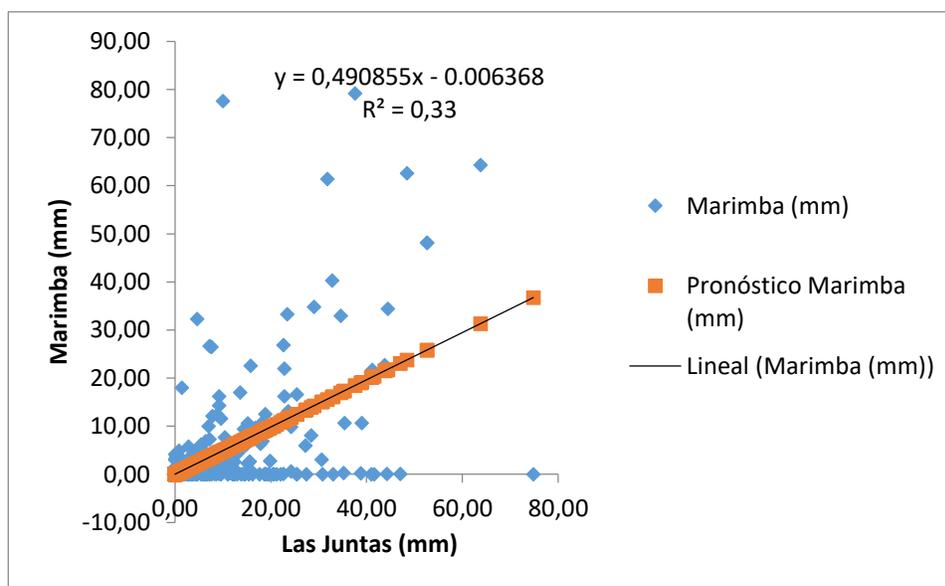
Anexo 10. Curva de regresión para la estación Las Juntas correspondiente a la variable precipitación.



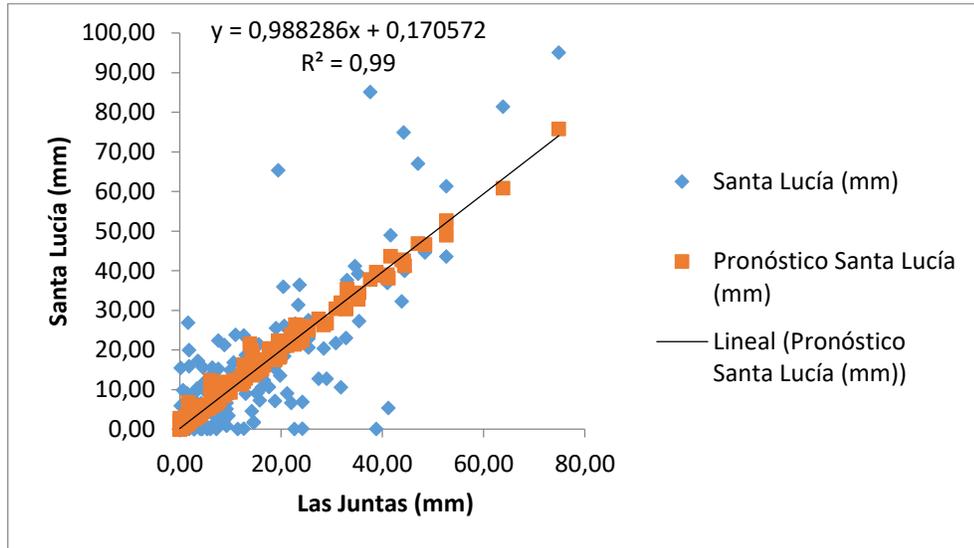
Anexo 11. Curva de regresión para la estación Campos de Oro correspondiente a la variable precipitación.



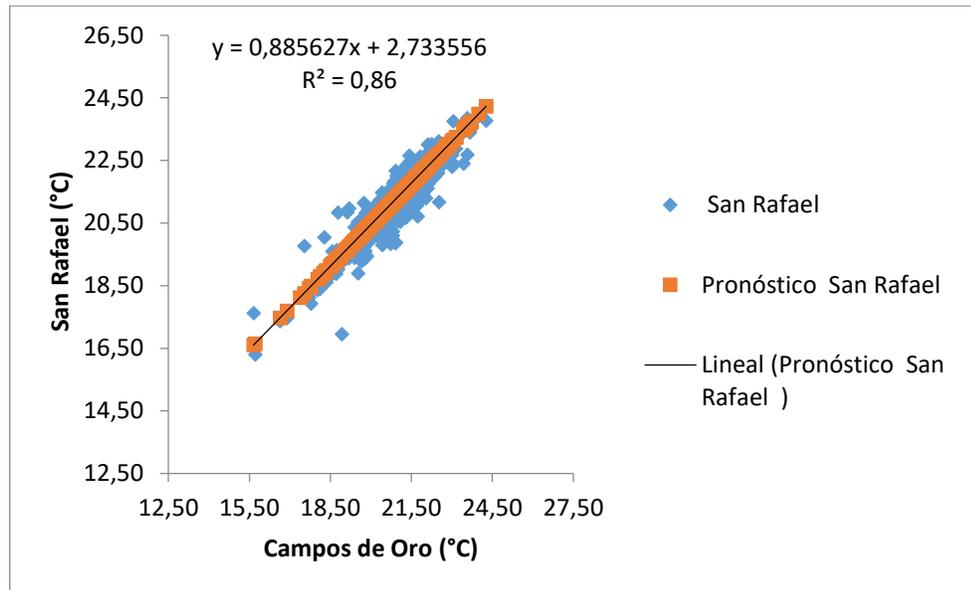
Anexo 12. Curva de regresión para la estación Marimba correspondiente a la variable precipitación.



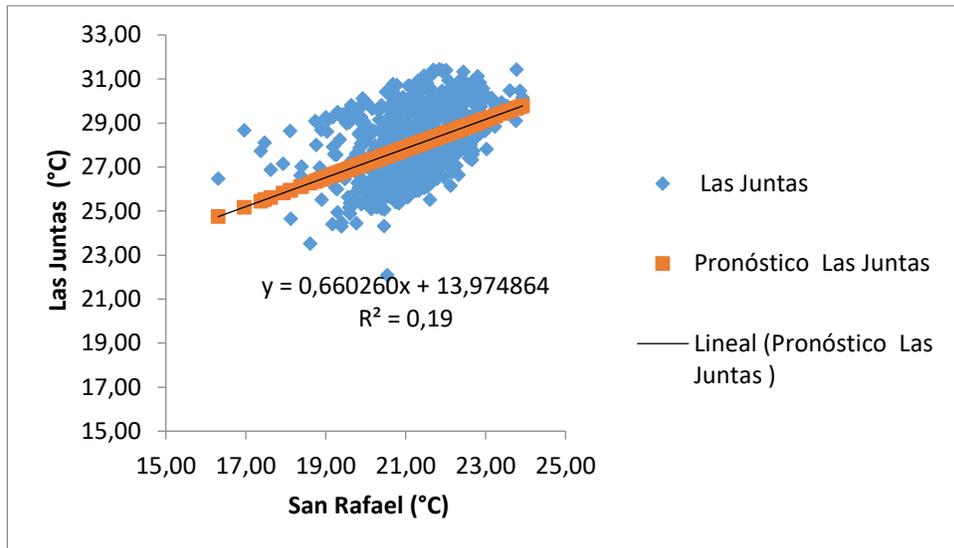
Anexo 13. Curva de regresión para la estación Santa Lucía correspondiente a la variable precipitación.



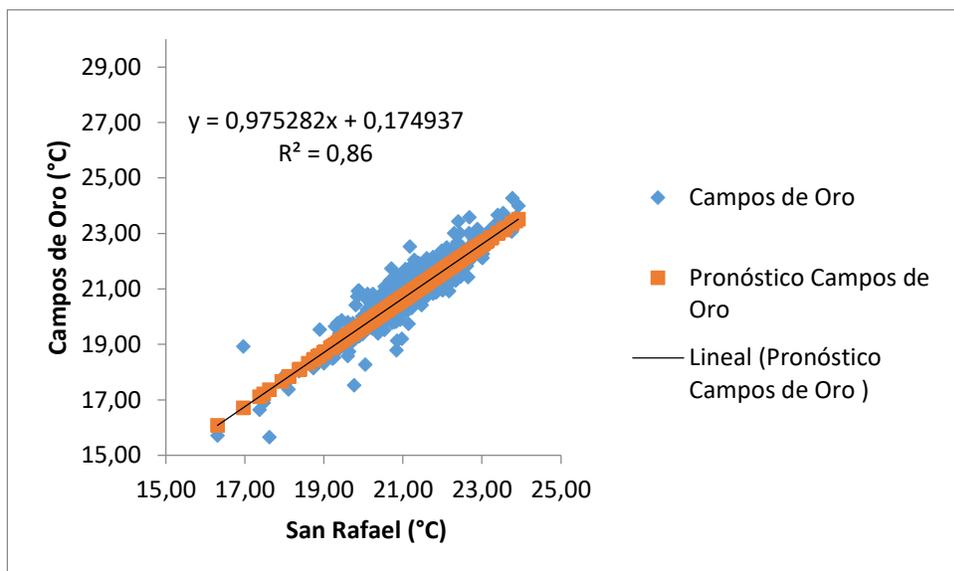
Anexo 14. Curva de regresión para la estación San Rafael correspondiente a la variable temperatura.



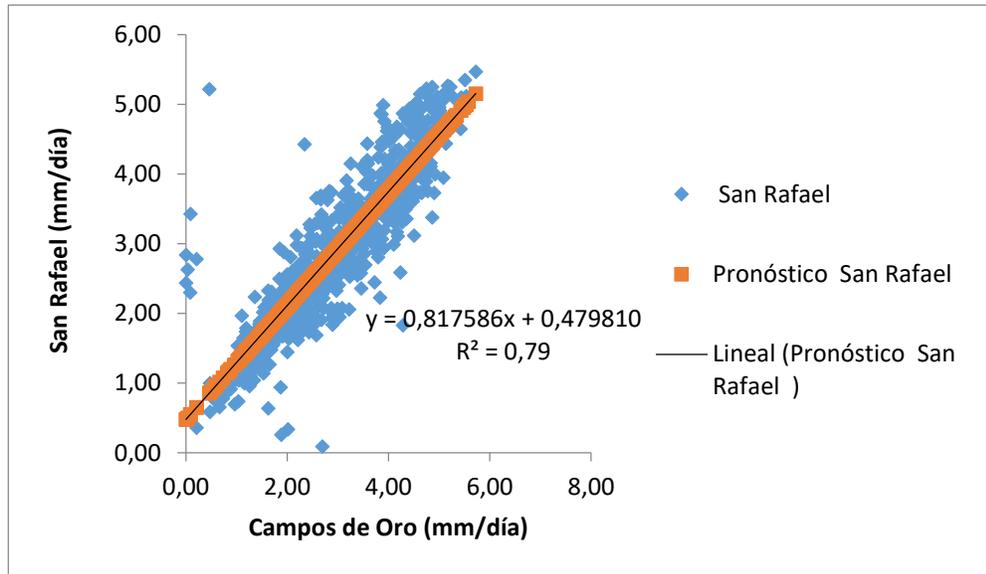
Anexo 15. Curva de regresión para la estación Las Juntas correspondiente a la variable temperatura.



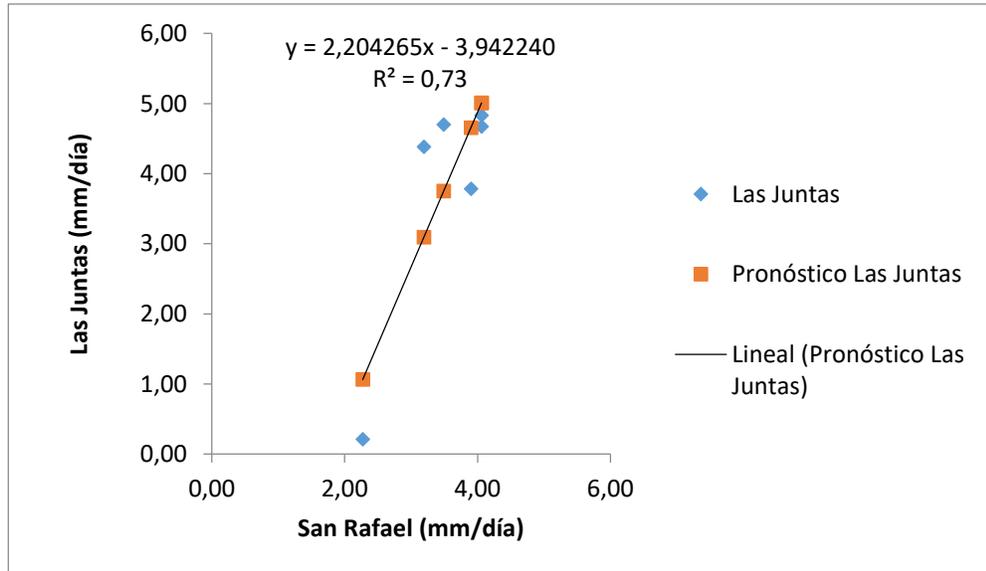
Anexo 16. Curva de regresión para la estación Campos de Oro correspondiente a la variable temperatura.



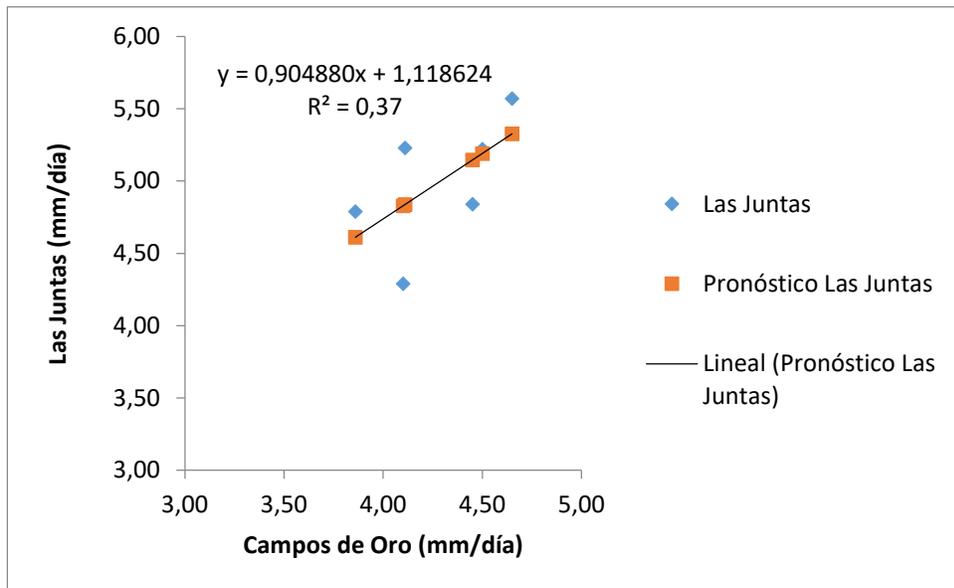
Anexo 17. Curva de regresión para la estación San Rafael correspondiente a la variable evapotranspiración.



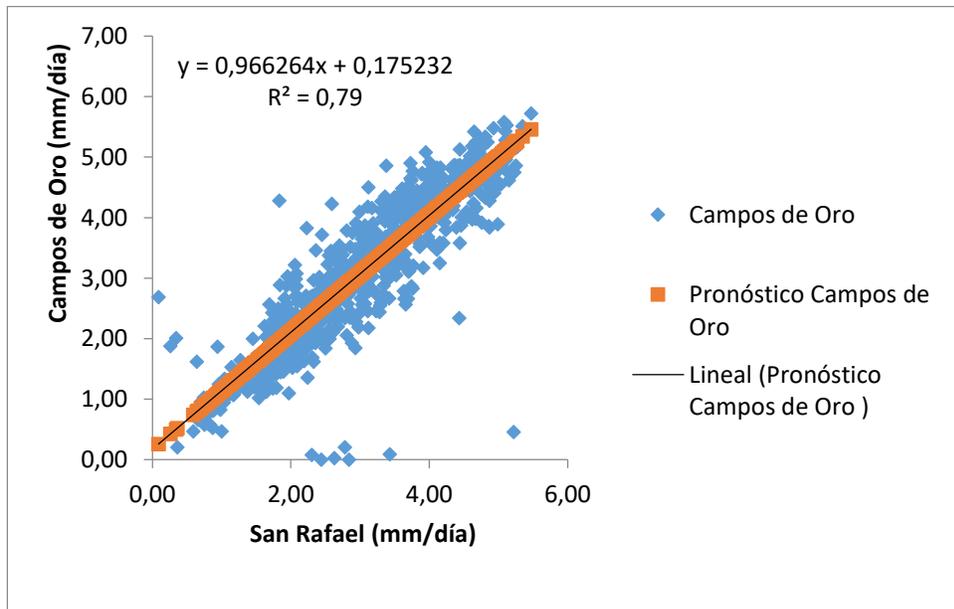
Anexo 18. Curva de regresión para la estación Las Juntas primer tramo correspondiente a la variable evapotranspiración.



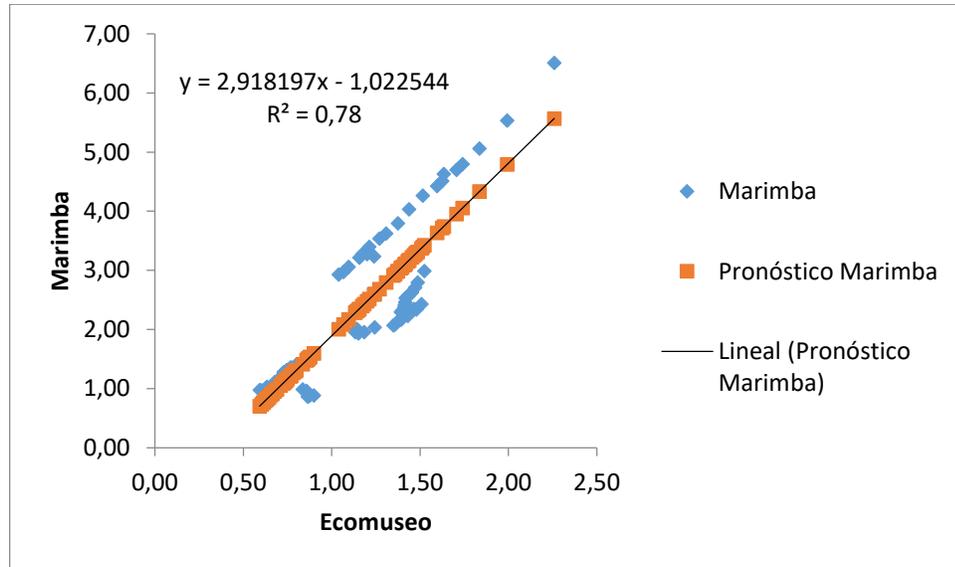
Anexo 19. Curva de regresión para la estación Las Juntas segundo tramo correspondiente a la variable evapotranspiración.



Anexo 20. Curva de regresión para la estación Campos de Oro correspondiente a la variable evapotranspiración.



Anexo 21. Curva de regresión para la estación Marimba correspondiente a la variable caudal.



Anexo 22. Pesos de las estaciones con respecto a la variable precipitación.

Estación	Peso
San Rafael	0,304581
Las Juntas	0,308323
Campos de Oro	0,228572
Marimba	0,014177
Santa Lucia	0,144347

Anexo 23. Pesos para las estaciones con respecto a la variable temperatura y evapotranspiración.

Estación	Peso
San Rafael	0,309405
Las Juntas	0,420377
Campos de Oro	0,270218

Anexo 24. Parámetros de HBV-light.

Nombre	Unidad	Rango válido	Descripción
PERC	mm/ Δt	[0, ∞)	Valor límite de percolación a la celda subterránea
UZL	mm	[0, ∞)	Volumen límite de almacenamiento en la celda sub-superficial
K ₀	1/ Δt	[0,1)	Coefficiente de recesión de descarga rápida
K ₁	1/ Δt	[0,1)	Coefficiente de recesión de descarga lenta
K ₂	1/ Δt	[0,1)	Coefficiente de recesión subterránea
MAXBAS	Δt	[1,100]	Longitud de la función triangular de interpolación
PCALT	%/100m	($-\infty$, ∞)	Coefficiente de dependencia entre la Precipitación y la cota topográfica
TCALT	$^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	($-\infty$, ∞)	Gradiente vertical de temperatura
CFMAX	mm/($\Delta t^{\circ}\text{C}$)	[0, ∞)	Factor grado-intervalo temporal
SFCF	-	[0, ∞)	Factor de corrección de la nieve
CFR	-	[0, ∞)	Coefficiente de rehielo
CWH	-	[0, ∞)	Coefficiente del contenido en agua de la nieve
FC	mm	(0, ∞)	Capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo
LP	-	[0,1]	Fracción del FC por encima del cual AET alcanza ETP
β	-	(0, ∞)	Parámetro que determina la contribución relativa de la escorrentía en la infiltración

Anexo 25. Precipitación observada y proyectada a los años 2020, 2050 y 2080.

Mes	Precipitación observada (mm)	Precipitación proyectada al año 2020 (mm)	Precipitación proyectada al año 2050 (mm)	Precipitación proyectada al año 2080 (mm)
Enero	0,562048	0,522704	0,494602	0,449638
Febrero	0,523934	0,487259	0,461062	0,419147
Marzo	0,120405	0,111977	0,105957	0,096324
Abril	2,203819	2,049552	1,939361	1,763055
Mayo	8,722945	7,850651	7,414503	6,106062
Junio	9,962363	8,966127	8,468009	6,973654
Julio	4,481380	4,033242	3,809173	3,136966
Agosto	8,123575	7,311218	6,905039	5,686503
Septiembre	11,551392	10,396253	9,818683	8,085974
Octubre	14,150542	12,735488	12,027961	9,905380
Noviembre	7,315218	6,583696	6,217935	5,120653
Diciembre	2,254704	2,096875	1,984140	1,803763

Anexo 26. Temperatura observada y proyectada a los años 2020, 2050 y 2080.

Mes	Temperatura observada (°C)	Temperatura proyectada al año 2020 (°C)	Temperatura proyectada al año 2050 (°C)	Temperatura proyectada al año 2080 (°C)
Enero	23,187248	17,390436	46,374496	69,561744
Febrero	23,651003	17,738252	47,302005	70,953008
Marzo	24,747625	18,560719	49,495250	74,242875
Abril	25,133890	18,850418	50,267781	75,401671
Mayo	24,480488	26,928537	61,201220	96,697927
Junio	23,490406	25,839447	58,726016	92,787105
Julio	23,581090	25,939199	58,952725	93,145305
Agosto	23,786999	26,165698	59,467497	93,958645
Septiembre	23,146117	25,460728	57,865292	91,427161
Octubre	23,125611	25,438172	57,814028	91,346165
Noviembre	22,984301	25,282731	57,460751	90,787987
Diciembre	23,350670	17,513003	46,701340	70,052010

Anexo 27. Concesiones otorgadas aguas abajo y en la cuenca media del Río Abangares.

Expediente	Nombre	Latitud CRTM05	Longitud CRTM05	Caudal otorgado (l/s)	Tipo de uso
13651	Compañía Méndez y Trejos Limitada	400528,342000	1134597,733000	0,500000	Riego
13651	Compañía Méndez y Trejos Limitada	400303,328100	1134593,956000	0,500000	Consumo humano y Riego
12686	Luis Gerardo Pérez Valladares	397855,386000	1139776,661000	0,020000	Consumo humano
13651	Compañía Méndez y Trejos Limitada	400355,317500	1134580,904000	0,500000	Consumo humano, Agropecuario y Riego
724-R	Tres Amigos	400170,663400	1140926,388000	0,001000	Consumo humano
724-R	Tres Amigos	400149,687600	1140951,410000	0,234000	Consumo humano
724-R	Tres Amigos	400108,681600	1140947,452000	0,344000	Consumo humano
16289	Municipalidad Abangares	399991,250800	1137539,405000	10,000000	Consumo humano
724-R	Tres amigos	399342,940700	1142231,290000	1,910000	Consumo humano
13582	Jurgen Kurt Knauer	398999,837400	1134161,230000	0,058000	Consumo humano
4407	Inversiones Gazare S.A,	398304,591900	1138962,166000	0,020000	Consumo humano
13231	Ires Sibaja Vindas	397354,040400	1138463,093000	0,030000	Consumo humano
13400	Jorge Manuel y Luis Guillermo ambos Morera Salazar	397030,076900	1138517,420000	0,020000	Consumo humano
9755	Las Niñas de Abangares S.A.	395823,109300	1136616,518000	0,040000	Consumo humano y Agropecuario
9756	Las Niñas de Abangares S.A.	395802,106100	1136614,539000	0,050000	Consumo humano
13188	Agropecuaria los Cartagos, S.A.	392962,822600	1137509,424000	0,100000	Consumo humano y Agropecuario
6516	Agropecuaria Norbel S.A.	388998,938000	1133871,099000	30,000000	Riego
14435	Naranja Rica S.A.	388872,883400	1133825,220000	2,000000	Industrial
8625	Costasem S.A.	388698,522000	1133471,365000	38,000000	Riego
1081	Ganadera San Juan Ltda	388577,431300	1132370,401000	1,040000	Agropecuario
13574	Hacienda Agrícola y Ganadera de Manzanillo, S.A.	387254,411800	1124196,081000	10,000000	Riego
13450	Segares S.A.	386988,987100	1123772,305000	28,650000	Riego
8280	Rancho Cimarrón S.A.	386141,688400	1123525,096000	80,000000	Riego