



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**MODELO HIDROLÓGICO DE LA PARTE ALTA DE LA CUENCA CAHABÓN PARA
ESTABLECER LA OFERTA HÍDRICA CONSIDERANDO EL EFECTO DEL CAMBIO
CLIMÁTICO PARA EL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2000) Y UN FUTURO PRÓXIMO
(2020-2100) UTILIZANDO LOS ESCENARIOS AR5 DEL IPCC**

Ana Isabel Sánchez Girón

Asesorada por el Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza

Guatemala, julio de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MODELO HIDROLÓGICO DE LA PARTE ALTA DE LA CUENCA CAHABÓN PARA ESTABLECER LA OFERTA HÍDRICA, CONSIDERANDO EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2000) Y UN FUTURO PRÓXIMO (2020-2100), UTILIZANDO LOS ESCENARIOS AR5 DEL IPCC

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANA ISABEL SÁNCHEZ GIRÓN

ASESORADO POR EL ING. WALTER ARNOLDO BARDALES ESPINOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA AMBIENTAL

GUATEMALA, JULIO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés De La Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

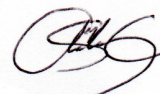
DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Lcda. Ingrid Lorena Benítez Pacheco
EXAMINADORA	Inga. María Alejandra Ma Villatoro
EXAMINADOR	Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

MODELO HIDROLÓGICO DE LA PARTE ALTA DE LA CUENCA CAHABÓN PARA ESTABLECER LA OFERTA HÍDRICA CONSIDERANDO EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2000) Y UN FUTURO PRÓXIMO (2020-2100) UTILIZANDO LOS ESCENARIOS AR5 DEL IPCC

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 24 de julio de 2019.



Ana Isabel Sánchez Girón

Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director de Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
U.S.A.C
Presente.

Estimado Ingeniero Williams Álvarez:

Por este medio, hago constar que yo, el ingeniero Walter Arnoldo Bardales Espinoza, con colegiado número cuatro mil doscientos setenta y nueve (4279); doy como visto bueno el desarrollo del trabajo de investigación final de graduación de la alumna Ana Isabel Sánchez Girón identificada con CUI 3001408780101, alumna a quien he podido apoyar como asesor de su protocolo de tesis.

Dando por concluido el desarrollo de la misma investigación y planteando las soluciones inmediatas y efectivas para el beneficio del lugar donde se desarrolló la misma.

Doy por concluido de forma eficiente ante mi persona el desarrollo de su trabajo de investigación, como tema: "Modelo hidrológico de la parte alta de la cuenca Cahabón para establecer la oferta hídrica considerando el efecto del cambio climático para el periodo de referencia (1981-2000) y un futuro próximo (2020-2100) utilizando los escenarios AR5 del IPCC".

Aprovechando la oportunidad para expresarle mi consideración.

Atentamente,



M.Sc. Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
Maestro en Recursos Hidráulicos Opción Hidrología
Ingeniero Agrónomo
Colegiado 4279

Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza

Colegiado número 4279



Guatemala, 19 de febrero de 2021.
Ref. EIQ.TG-IF.007.2021.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **031-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Ana Isabel Sánchez Girón**.
Identificado con número de carné: **3001408780101**.
Identificado con registro académico: **201503919**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Ambiental**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

MODELO HIDROLÓGICO DE LA PARTE ALTA DE LA CUENCA CAHABÓN PARA ESTABLECER LA OFERTA HÍDRICA CONSIDERANDO EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2000) Y UN FUTURO PRÓXIMO (2020-2100) UTILIZANDO LOS ESCENARIOS AR5 DEL IPCC

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Walter Arnoldo Bardales Espinoza, profesional de la Ingeniería Agronómica

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Ing. Jaime Domingo Carranza González
Colegiado No. 448

Jaime Domingo Carranza González
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo



Guatemala, 12 de julio de 2021.
Ref. EIQ.127.2021

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **MODELO HIDROLÓGICO DE LA PARTE ALTA DE LA CUENCA CAHABÓN PARA ESTABLECER LA OFERTA HÍDRICA CONSIDERANDO EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2000) Y UN FUTURO PRÓXIMO (2020-2100) UTILIZANDO LOS ESCENARIOS AR5 DEL IPCC** del(la) estudiante Ana Isabel Sánchez Girón, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Ambiental.

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Williams G. Alvarez Mejía, M.I.C., M.U.I.E.
DIRECTOR



Escuela de Ingeniería Química

Cc. Archivo
WGAM/wgam



Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**

DTG. 290-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **MODELO HIDROLÓGICO DE LA PARTE ALTA DE LA CUENCA CAHABÓN PARA ESTABLECER LA OFERTA HÍDRICA CONSIDERANDO EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL PERIODO DE REFERENCIA (1981-2000) Y UN FUTURO PRÓXIMO (2020-2100) UTILIZANDO LOS ESCENARIOS AR5 DEL IPCC**, presentado por la estudiante universitaria: **Ana Isabel Sánchez Girón**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, julio de 2021

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Creador todopoderoso, a quien debo este logro y muchas bendiciones en mi vida.
Mis padres	Ana Girón y Rodrigo Sánchez. Por su esfuerzo y apoyo incondicional. Este logro también es de ustedes.
Mis hermanos	Gloria y Rodrigo. Por acompañarme a lo largo de este proceso y brindarme su ayuda cuando lo he necesitado.
Mis abuelos	María Gatica, Gloria Viesca (q. e. p. d.), Vitalino Girón (q. e. p. d.). Por su cariño y enseñanzas, parte esencial en mi vida.
Mis tías	Francisca e Ileana Girón. Por su apoyo y sus consejos.
Mis tíos	Por ser una importante influencia en mi vida.
Mis primos	Por su amistad y palabras de motivación.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por brindarme la oportunidad de estudiar y los dones necesarios para alcanzar este logro.
Guatemala	Por sus riquezas naturales que me impulsaron a seguir esta carrera. Y a su población que por su aporte tuve posibilidad de acceder a una educación superior pública gratuita.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrirme sus puertas y motivarme a influir positivamente en la realidad del país.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme las herramientas necesarias para ejercer mi profesión.
Mi asesor	Msc. Ing. Walter Bardales. Por brindarme su tiempo, conocimientos y apoyo para la realización de este trabajo.
Catedráticos	Por compartir sus conocimientos y contribuir en mi formación académica y profesional.
Mis amigos	Por su invaluable compañía y amistad demostrada en el apoyo a cada proyecto, COEIA, por mencionar un ejemplo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
GLOSARIO	XVII
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
HIPÓTESIS.....	XXVII
INTRODUCCIÓN.....	XXIX
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Justificación	5
1.2. Determinación del problema.....	8
1.2.1. Definición	8
1.2.2. Delimitación	9
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Cambio climático	11
2.2. Escenarios de emisiones.....	12
2.3. Trayectorias de concentración representativas (RCP)	13
2.3.1. RCP 2,6	13
2.3.2. RCP 4,5	13
2.3.3. RCP 6,0	14
2.3.4. RCP 8,5	14
2.4. Modelos climáticos	15
2.4.1. <i>Downscaling</i> o aumento de resolución de los modelos	16

2.4.2.	Estadístico.....	16
2.5.	Escenarios de cambio climático	17
2.6.	Modelos climáticos globales para el área de estudio.....	22
2.7.	Cuenca y morfometría.....	23
2.8.	Parte alta de la cuenca Cahabón	24
2.8.1.	Ubicación geográfica	24
2.8.2.	División política administrativa.....	25
2.8.3.	Población	27
2.8.4.	Actividades productivas	32
2.8.5.	Servicios municipales e infraestructura vial	36
2.8.6.	Hidroeléctricas.....	41
2.8.7.	Caracterización hidrológica	45
2.8.8.	Caracterización biofísica.....	49
2.8.8.1.	Fisiografía.....	49
2.8.8.2.	Geología.....	52
2.8.8.3.	Suelos	54
2.8.8.4.	Uso de la tierra	57
2.8.9.	Caracterización climática.....	58
2.8.9.1.	Temperatura	60
2.8.9.2.	Precipitación	60
2.8.9.3.	Proporción normal	62
2.8.9.4.	CHIRPS.....	62
2.8.9.5.	Evapotranspiración	63
2.8.9.6.	Método de Blaney-Cridle	64
2.9.	Modelo hidrológico.....	65
2.9.1.	Modelos conceptuales.....	66
2.9.2.	Modelos de naturaleza algorítmica básica.....	66
2.9.3.	Modelos de representación espacial	66
2.9.4.	Modelos agregados	67

2.9.5.	Modelos distribuidos	67
2.9.6.	Modelos semidistribuidos	67
2.10.	Herramienta para la evaluación del suelo y agua (SWAT)	68
2.11.	Parámetros del modelo hidrológico.....	71
2.11.1.	Información meteorológica	71
2.11.1.1.	Precipitación	71
2.11.1.2.	Temperatura.....	72
2.11.1.3.	Radiación solar	72
2.11.1.4.	Velocidad del viento	72
2.11.1.5.	Humedad relativa	72
2.11.2.	Topografía	72
2.11.3.	Uso del suelo	73
2.11.4.	Suelo	74
2.12.	Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo ...	75
2.12.1.	Análisis de sensibilidad	75
2.12.2.	Calibración.....	75
2.12.3.	Indicadores estadísticos.....	76
2.12.3.1.	Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE).....	76
2.12.3.2.	Porcentaje bias (PBIAS).....	77
2.12.3.3.	Coeficiente de determinación de Pearson (R ²).....	77
2.12.3.4.	Eficiencia de Kling-Gupta (KGE)	78
2.12.3.5.	Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE).....	78
2.12.3.6.	Desviación estándar de las observaciones (RSR)	79
2.12.4.	Validación	80
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	81

3.1.	Parámetros	81
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	81
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	82
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	82
3.5.	Técnica cuantitativa.....	82
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	83
3.6.1.	Información topográfica	83
3.6.2.	Información de uso de suelo.....	84
3.6.3.	Información de tipo de suelo.....	90
3.6.4.	Información climática 1981-2000	93
3.6.4.1.	Precipitación	95
3.6.4.2.	Temperatura máxima y mínima	103
3.6.4.3.	Radiación solar, viento y humedad	104
3.6.5.	Generador climático	104
3.6.6.	Información climática 2020-2100	111
3.6.7.	Información hidrométrica	113
3.6.8.	Demanda futura de agua sector doméstico	115
3.6.9.	Demanda futura de agua sector agrícola.....	118
3.6.10.	Demanda futura de agua sector hidroeléctrico	123
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	124
3.7.1.	Ordenamiento de los datos de entrada al modelo	124
3.7.2.	Procesamiento de la información en SWAT.....	125
3.7.3.	Procesamiento de la información en SWAT-CUP .	133
3.7.4.	Validación del modelo	142
3.8.	Análisis estadístico.....	143
4.	RESULTADOS	145
4.1.	Modelo hidrológico de la cuenca	145

4.2.	Caudal a futuro	154
4.3.	Demanda futura de agua sector doméstico	162
4.4.	Demanda futura de agua sector agrícola	165
4.5.	Demanda futura de agua sector hidroeléctrico.....	168
4.6.	Comparación de la disponibilidad hídrica a futuro con la demanda por sectores	171
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	173
5.1.	Modelo hidrológico.....	173
5.2.	Caudal a futuro	177
5.3.	Demanda futura de agua sector doméstico	184
5.4.	Demanda futura de agua sector agrícola	185
5.5.	Demanda futura de agua sector hidroeléctrico.....	186
5.6.	Comparación del caudal a futuro con la demanda por sectores.....	188
	CONCLUSIONES.....	191
	RECOMENDACIONES.....	195
	BIBLIOGRAFÍA.....	197
	APÉNDICES.....	209
	ANEXOS	227

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Proyecciones medias multimodelos de CMIP5 para los escenarios RCP 2,6 (izquierda) y RCP 8,5 (derecha).....	20
2.	Mapa de ubicación de la cuenca	25
3.	Municipios en la cuenca	27
4.	Cultivo de cardamomo	33
5.	Crianza de aves de corral.....	34
6.	Artesanías	34
7.	Comercios	35
8.	Áreas protegidas en la cuenca	36
9.	Cobertura de agua por red, 2006	37
10.	Índice de acceso a la energía en el país	39
11.	Infraestructura vial principal en la cuenca.....	40
12.	Presa RENACE	42
13.	Presa RENACE	43
14.	Presa CHICHAIC.....	44
15.	Histograma de frecuencias altimétricas	46
16.	Curva hipsométrica	47
17.	Red hídrica en la cuenca.....	48
18.	Fisiografía y geomorfología en la cuenca	52
19.	Geología en la cuenca	54
20.	Suelos en la cuenca	56
21.	Uso del suelo en la cuenca	58
22.	Regiones climáticas en la cuenca	59

23.	Isotermas en la cuenca	60
24.	Isoyetas en la cuenca	61
25.	Evapotranspiración en la cuenca	63
26.	Ciclo hidrológico en SWAT	70
27.	Mapa de elevación del terreno	83
28.	Mapa de uso del suelo	84
29.	Tabla urban en la base de datos SWAT2012.....	86
30.	Tabla crop en la base de datos SWAT2012.....	86
31.	Modificación de la base de datos SWAT2012.....	87
32.	Tabla de atributos modificada para la capa de uso de suelo.....	88
33.	Tabla de atributos y archivo de texto para el uso de suelo.....	89
34.	Mapa de uso del suelo reclasificado para SWAT	89
35.	Mapa de tipo de suelo.....	91
36.	Tipos de suelo en la base de datos de mapwindow	92
37.	Tipos de suelo en la base de datos de SWAT2012.....	92
38.	Tabla de atributos y archivo de texto para el tipo de suelo.....	93
39.	Mapa de estaciones meteorológicas en la cuenca	95
40.	Descarga de datos en el portal de CHIRPS	96
41.	Script para extraer datos de CHIRPS 2.0 con un shape	97
42.	Archivo de texto con los datos de CHIRPS	98
43.	Generación de series diarias de precipitación.....	100
44.	Descarga de datos en el portal de SWAT	101
45.	Esquema de archivo de texto para los datos de las estaciones con registro de precipitación.....	102
46.	Esquema de archivo de texto para el registro diario de precipitación...	102
47.	Esquema de archivo de texto para el registro diario de temperatura máxima y mínima.....	103
48.	Tabla wgen_user en la base de datos de SWAT2012.....	105

49.	Esquema de archivo de texto de entrada para el registro diario de precipitación utilizado en pcpSTAT	106
50.	Ingreso de información en pcpSTAT	106
51.	Archivo de salida de pcpSTAT	107
52.	Esquema de archivo de texto de entrada para el registro diario de precipitación utilizado en dewpoint estimation	109
53.	Ingreso de información en dewpoint estimation	109
54.	Archivo de salida dewpoint estimation	110
55.	Script para extraer datos de un ráster con un shape	111
56.	Mapa de la estación hidrométrica chajcar en la cuenca	114
57.	Esquema de formato para los datos de caudal observado	115
58.	Mapa de poblados en la cuenca.....	116
59.	Mapa de estaciones con datos de eto en la cuenca	120
60.	Mapa de cultivos en la cuenca	121
61.	Interpolación para el mes de enero	121
62.	Conción del proyecto en SWAT.....	125
63.	Delimitar cuenca y subcuenca.....	126
64.	Ingreso de información de uso suelo	126
65.	Ingreso de información de tipo suelo	127
66.	Ingreso de información de rangos de pendientes	127
67.	Ingreso de información de rangos de pendientes	128
68.	Selección del generador climático	128
69.	Ingreso de información climática	129
70.	Construcción de las tablas para el modelo	129
71.	Selección del método de hargreaves	130
72.	Conción del modelo para su ejecución	130
73.	Importar archivos a la base de datos.....	131
74.	Comprobación del modelo.....	131
75.	Guardar simulación	132

76.	Base de datos SWAToutput.mdb	133
77.	Ventana par_inf.txt.....	134
78.	Ventana sufi2_swedit.def	134
79.	Ventana file.cio	135
80.	Ventana absolute_swat_values.txt.....	136
81.	Ventana observed_rch.txt	137
82.	Ventana var_file_rch.txt	137
83.	Ventana sufi2_extract_rch.def	138
84.	Ventana observed.txt	139
85.	Ventana var_file_name.txt	139
86.	Ventana global sensivity	140
87.	Ventana summary_stat.txt	141
88.	Ventana best_par.txt.....	142
89.	Mapa de subcuencas	145
90.	Comparación entre la serie de caudales mensuales observados y simulados en el periodo de calibración generados con SWAT.....	146
91.	Análisis de sensibilidad.....	147
92.	Análisis de sensibilidad.....	148
93.	Comparación entre la serie de caudales mensuales observados y simulados en el periodo de calibración generados con SWAT-CUP	150
94.	Estadísticos para el periodo de calibración generados por SWAT-CUP	150
95.	Comparación entre la serie de caudales mensuales observados y simulados en el periodo de calibración	151
96.	Caudal observado vs caudal simulado para el periodo de calibración .	152
97.	Comparación entre la serie de caudales mensuales observados y simulados en el periodo de validación	153
98.	Caudal observado vs caudal simulado para el periodo de validación...	154

99.	Diagrama de boxplot para el caudal observado en el periodo 1981-2000	155
100.	Diagrama de boxplot para el caudal simulado a futuro en el periodo 2020-2040	156
101.	Diagrama de boxplot para el caudal simulado a futuro en el periodo 2041-2060	157
102.	Diagrama de boxplot para el caudal simulado a futuro en el periodo 2061-2080	158
103.	Diagrama de boxplot para el caudal simulado a futuro en el periodo 2081-2100	159
104.	Hidrograma del caudal simulado a futuro en el periodo 2020-2040 comparado con el caudal observado	160
105.	Hidrograma del caudal simulado a futuro en el periodo 2041-2060 comparado con el caudal observado	161
106.	Hidrograma del caudal simulado a futuro en el periodo 2061-2080 comparado con el caudal observado	161
107.	Hidrograma del caudal simulado a futuro en el periodo 2081-2100 comparado con el caudal observado	162
108.	Demanda de agua del sector doméstico comparado con la disponibilidad hídrica a futuro	164
109.	Demanda de agua del sector agrícola comparado con la disponibilidad hídrica a futuro para el periodo 2020-2040	166
110.	Demanda de agua del sector agrícola comparado con la disponibilidad hídrica a futuro para el periodo 2041-2060	167
111.	Demanda de agua del sector agrícola comparado con la disponibilidad hídrica a futuro para el periodo 2061-2080	167
112.	Demanda de agua del sector agrícola comparado con la disponibilidad hídrica a futuro para el periodo 2081-2100	168
113.	Relación de caudal futuro y turbinado hidroeléctrica RENACE.....	169

114.	Relación de caudal futuro y turbinado hidroeléctrica CHICHAIC.....	170
115.	Demanda de agua anual por sectores comparado con la disponibilidad hídrica a futuro	172

TABLAS

I.	Características principales de los RCP.....	14
II.	Clasificación de los modelos climáticos	15
III.	Mcg pertenecientes al proyecto CMIP5.....	18
IV.	Clasificación de los 13 modelos climáticos globales que mejor representan las características climáticas para centroamérica	23
V.	Partes de una cuenca.....	24
VI.	Municipios en la cuenca y su división	26
VII.	Población por municipios en la cuenca	28
VIII.	Población por género en la cuenca	29
IX.	Población por área.....	29
X.	Población por edad en la cuenca.....	30
XI.	Población por grupo étnico en la cuenca	31
XII.	Alfabetismo en la cuenca	31
XIII.	Nivel educativo en la cuenca	32
XIV.	Clasificación del uso de suelo en la cuenca para SWAT.....	33
XV.	Tipo de servicio sanitario por municipios en la cuenca.....	38
XVI.	Tipo de alumbrado por municipios en la cuenca	39
XVII.	Hidroeléctricas en la cuenca.....	41
XVIII.	Información técnica hidroeléctrica RENACE	42
XIX.	Información técnica hidroeléctrica CHICHAIC.....	44
XX.	Parámetros morfométricos.....	45
XXI.	Parámetros morfométricos de forma	45

XXII.	Parámetros morfométricos de relieve	46
XXIII.	Características de la red de drenaje	47
XXIV.	Parámetros morfométricos de drenaje.....	48
XXV.	Características fisiográficas y geomorfológicas de la cuenca	51
XXVI.	Características geológicas de la cuenca	53
XXVII.	Clases texturales de los suelos	55
XXVIII.	Clases texturales de los suelos en la cuenca	57
XXIX.	Uso del suelo según SWAT.....	73
XXX.	Parámetros.....	81
XXXI.	Clasificación del uso de suelo en la cuenca según el maga	85
XXXII.	Clasificación del uso de suelo en la cuenca para SWAT	88
XXXIII.	Tipos de suelo en la cuenca según la FAO	90
XXXIV.	Estaciones meteorológicas en la cuenca.....	94
XXXV.	Datos de la estación hidrométrica Chajcar	113
XXXVI.	Tasa de crecimiento porcentual y población para cada municipio en la cuenca	117
XXXVII.	Precipitación	119
XXXVIII.	Evapotranspiración de referencia del cultivo (eto), factores de cultivo (kc) y área (m2)	122
XXXIX.	Rango de valores utilizados para los parámetros en la calibración.....	141
XL.	Criterios de calificación generales para tres estadísticos recomendados en un período mensual	143
XLI.	Criterios de calificación generales para cinco estadísticos recomendados en un período mensual	143
XLII.	Estadísticos para los caudales generados con swat.....	147
XLIII.	Parámetros de calibración.....	149
XLIV.	Estadísticos para el periodo de calibración	151
XLV.	Estadísticos para el periodo de validación.....	153

XLVI.	Estadísticos para el diagrama de boxplot del caudal observado en el periodo 1981-2000	155
XLVII.	Estadísticos para el diagrama de boxplot del caudal simulado a futuro en el periodo 2020-2040	156
XLVIII.	Estadísticos para el diagrama de boxplot del caudal simulado a futuro en el periodo 2041-2060	157
XLIX.	Estadísticos para el diagrama de boxplot del caudal simulado a futuro en el periodo 2061-2080	158
L.	Estadísticos para el diagrama de boxplot del caudal simulado a futuro en el periodo 2081-2100	159
LI.	Población proyectada a futuro en la cuenca	163
LII.	Demanda de agua del sector doméstico	163
LIII.	Demanda de agua del sector doméstico comparada con la disponibilidad hídrica a futuro para cada periodo	164
LIV.	Demanda de agua del sector agrícola (etcrop)	165
LV.	Demanda de agua del sector agrícola comparada con la disponibilidad hídrica a futuro para cada periodo	166
LVI.	Relación de caudal futuro y turbinado hidroeléctrica renace	169
LVII.	Relación de caudal futuro y turbinado hidroeléctrica chichaic	170
LVIII.	Demanda de agua anual por sectores comparado con la disponibilidad hídrica a futuro	171

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°	Grado Celsius
km	Kilómetro
Km²	Kilómetros cuadrados
<	Mayor que
MJ/m²/día	Mega joule por metro cuadrado por día
>	Menor que
m	Metro
m³/s	Metro cúbico por segundo
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetro
%	Porcentaje
W/m²	Unidades de vatios por metro cuadrado

GLOSARIO

Access	Es un sistema de gestión de bases de datos.
ASTER GDEM	Modelo de Elevación Digital Global.
AR5	Quinto Informe de Evaluación del IPCC.
CFSR	Sistema de Reanálisis de Pronóstico Climático.
CHIRPS	Grupo de Datos de Estaciones de Amenazas Climáticas y Precipitaciones Infrarrojas.
CMIP5	Proyecto de intercomparación de modelos acoplados Fase 5.
CN	Curva número.
CO₂ eq	Dióxido de carbono equivalente.
DEM	Modelo digital de elevación.
DSMW	Base de datos de suelo.
EE	Escenarios de emisiones.

ETcrop	Evapotranspiración del cultivo o necesidad de agua del cultivo.
ETo	Evapotranspiración potencial de referencia para el cultivo.
ETP	Evapotranspiración potencial.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
GEI	Gases de efecto invernadero.
GeoTIFF	Archivo de imagen con información georreferenciada.
HRU	Unidades de respuesta hidrológica.
HWSD	Base de datos de suelo armonizada a nivel mundial.
IGN	Instituto Geográfico Nacional.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala.
IPCC	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
Kc	Coeficiente del cultivo o uso de la tierra.

KGE	Eficiencia de Kling-Gupta.
logNS	Coeficiente de Nash-Sutcliffe logarítmico.
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
MapWindow	Sistema de información geográfica en la que se puede visualizar, gestionar, editar y analizar datos.
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
MCGAO	Modelos de circulación global océano-atmósfera.
MCG	Modelos de circulación global.
MCR	Modelos climáticos regionales
MM₅	Modelo regional mesoescala.
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio.
NCEP	Centro Nacional de Predicción Ambiental.
netCDF	Formato de archivo de datos estándar.
NOAA	Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica.
NSE	Coeficiente de Nash-Sutcliffe.

PBIAS	Porcentaje bias.
PCPD	Número medio de días de precipitación en el mes.
PCPMM	Precipitación mensual total media.
PCPSKW	Coeficiente de sesgo para la precipitación diaria en el mes.
PCPSTD	Desviación estándar de la precipitación diaria en el mes.
RAINHMMX	Precipitación máxima en 0,5 horas.
R²	Coeficiente de determinación de Pearson.
RCP	Trayectorias de concentración representativa.
RegCM3	Modelo regional climático versión 3.
RMSE	Raíz cuadrada del error cuadrático medio.
RSR	Desviación estándar de las observaciones.
RStudio	Es un entorno para el lenguaje de programación R.
Script	Archivo de texto que contiene un código que se puede leer o ejecutar en R.

SDM	Métodos estadísticos de regionalización.
SDSM	Modelo estadístico de regionalización.
SIG	Sistemas de Información Geográfica.
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
SWAT	Herramienta de Asesoramiento de Suelo y Agua.
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.
WEAP	Sistema de Evaluación y Planificación del Agua.

RESUMEN

Es importante entender el comportamiento hidrológico de una cuenca y cómo esta es afectada por el cambio climático, porque provee de suministro de agua para uso doméstico, agrícola, industrial, y en especial, una cuenca como la de Cahabón en la que el recurso hídrico es utilizado además para la generación de energía eléctrica. Por ello, en esta investigación, se desarrolló un modelo hidrológico de la parte alta de la cuenca Cahabón, para establecer la oferta hídrica, al considerar el efecto del cambio climático en el periodo de referencia (1981-2000) y un futuro próximo (2020-2100).

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizaron los escenarios climáticos regionalizados del Quinto Informe (AR5) del IPCC, correspondientes a los escenarios de emisión denominados trayectorias de concentración representativa (RCP) 2,6, 4,5, 6 y 8,5, durante cuatro periodos: 2020-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100. Este estudio se apoyó de la herramienta de modelado hidrológico SWAT, la cual ha sido aplicada en estudios a nivel nacional e internacional.

En SWAT se ingresó información hidrológica, meteorológica, topográfica, sobre las propiedades de suelos y uso del suelo, la cual previamente fue ordenada y tabulada.

Para garantizar que el modelo es capaz de representar adecuadamente los caudales mensuales, observados en el punto de aforo de la cuenca, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de los parámetros. Posteriormente, se realizó la calibración y validación del modelo, con lo cual se determinó que los

resultados corresponden al caudal de respuesta de la cuenca. Los indicadores estadísticos califican al modelo como “bueno” y “muy bueno”.

Los resultados obtenidos del caudal a futuro, para los cuatro periodos, muestran que habrá una reducción en los caudales de un promedio aproximado de 20 % en cada mes. Estos valores fueron representados por medio de gráficas de boxplot o diagramas de caja, que muestran cómo será la distribución de los datos y su variabilidad. Además, por medio de hidrogramas se compararon diferentes escenarios, donde, para un escenario promedio, los caudales serán, en su mayoría, menores a los observados.

Con el fin de comparar la disponibilidad hídrica, caudal a futuro, con la demanda, se determinó la necesidad hídrica de los sectores: doméstico, agrícola e hidroeléctrico. De estos sectores, el doméstico, durante el periodo analizado, no se verá afectado. Por otra parte, el sector agrícola presentará un déficit en los meses de enero a agosto. Finalmente, el sector hidroeléctrico, con sus actuales valores de caudal turbinado, no podrá seguir trabajando; tendrá que continuar generando hasta un 50 % de su capacidad.

De los resultados expuestos anteriormente, se concluyó que los potenciales impactos del cambio climático, en la disponibilidad de los recursos hídricos en la parte alta de la cuenca Cahabón, serán económicos y ambientales, porque se disminuirá el rendimiento de los cultivos, se disminuirá la cantidad de energía suplida por las hidroeléctricas y, con el estrés hídrico, se producirá un deterioro del recurso en términos de cantidad y calidad, hecho que afectará la biodiversidad acuática.

OBJETIVOS

General

Elaborar un modelo hidrológico de la parte alta de la cuenca Cahabón, para establecer la oferta hídrica, según el efecto del cambio climático, para el periodo de referencia (1981-2000) y un futuro próximo (2020-2100), a través de la utilización de la información de los escenarios AR5 del IPCC.

Específicos

1. Desarrollar un modelo hidrológico de la parte alta de la cuenca Cahabón, con base en datos meteorológicos, hidrológicos y físicos de la cuenca, de forma que el caudal corresponda al observado en el periodo de referencia 1981-2000.
2. Determinar el caudal a futuro de la parte alta de la cuenca Cahabón, mediante el uso del modelo y los datos de los escenarios AR5 del IPCC, durante cuatro períodos: 2020-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100.
3. Determinar la demanda futura de agua del sector doméstico en la parte alta de la cuenca Cahabón, sustentado en el consumo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la población, proyectada durante cuatro períodos: 2020-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100.

4. Determinar la demanda futura de agua del sector agrícola en la parte alta de la cuenca Cahabón, fundamentado en la necesidad de agua de los cultivos, según la ecuación de Blaney-Criddle, durante cuatro períodos: 2020-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100.
5. Determinar la demanda futura de agua del sector hidroeléctrico en la parte alta de la cuenca Cahabón, al comparar el caudal turbinado con el caudal a futuro durante cuatro períodos: 2020-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100.
6. Comparar la disponibilidad hídrica a futuro con la demanda por sectores, así como realizar una interpretación cualitativa de los potenciales impactos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos en la parte alta de la cuenca Cahabón.

HIPÓTESIS

Es factible elaborar un modelo hidrológico de la parte alta de la cuenca Cahabón para establecer la oferta hídrica, al considerar el efecto del cambio climático para el periodo de referencia (1981-2000) y un futuro próximo (2020-2100), a través de utilizar la información de los escenarios AR5 del IPCC.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático tendrá consecuencias negativas para el ambiente. Entre estos efectos, se menciona la reducción de la oferta hídrica, provocada por el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación. Esta reducción limitará la cantidad de agua disponible para cubrir las necesidades de la población y de los sectores económicos; por lo tanto, el desarrollo del país podría verse afectado. Por eso, es importante la gestión y planificación del recurso hídrico a nivel de cuenca. Para alcanzar este objetivo, es necesario comprender la magnitud a futuro de los impactos del cambio climático en la respuesta hidrológica.

Con el fin de conocer este impacto, en este estudio, se utilizan herramientas de modelación hidrológica que generan los resultados a partir de escenarios climáticos, según describe el capítulo dos que sustenta teóricamente la investigación. Los escenarios climáticos son proyecciones del clima a futuro, con base a escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Los escenarios de emisiones son publicados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC); y toman en cuenta aspectos relacionados a las condiciones socioeconómicas, tecnológicas. En el caso de los escenarios de trayectoria de concentración representativa (RCP), presentados en el Quinto Informe (AR5) del IPCC, también se consideran las políticas. Los RCP son los más recientes y brindan información para los periodos 2020-2099. Es por esta razón que fueron seleccionados para el estudio.

Dado que los resultados de los escenarios climáticos se generan utilizando modelos de circulación global (MCG), la escala no permite que

puedan utilizarse a nivel de cuenca; por lo que se deben de aplicar técnicas de regionalización *Downscaling* previo a ser utilizados. En el caso de este estudio, los escenarios utilizados presentan esta característica, por lo que solo menciona, como parte del marco teórico, una descripción de las metodologías desarrolladas para este fin.

Con los datos a escala regional, es posible aplicar herramientas de modelado hidrológico; de las cuales, actualmente, se cuenta con distintas categorías tales como: conceptuales, de naturaleza algorítmica básica y espaciales. Generalmente, se prefiere la utilización de los modelos espaciales porque, a comparación del resto, permiten hacer un análisis a nivel de sistema, al integrar variables de entrada, salida e intermedias que representan el ciclo hidrológico. Según el tamaño de la cuenca, se pueden utilizar modelos espaciales distribuidos o semidistribuidos. En este caso, la parte alta de la cuenca Cahabón, por su área, se clasifica como intermedia-grande y se utiliza, por tanto, un modelo semidistribuido.

En el caso de los modelos semidistribuidos, se cuenta con la herramienta SWAT, cuyas características lo hacen el programa ideal para modelar la parte alta de la cuenca Cahabón, además, porque utiliza como datos de entrada: clima, escorrentía, propiedades del suelo, topografía, tipo y uso del suelo. Dicha información se puede obtener de mapas del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), de los registros históricos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH) y del Instituto Nacional de Electrificación (INDE).

El procedimiento utilizado para el modelo se describe en el diseño metodológico, capítulo tres. Los datos recolectados se ordenaron y procesaron, previo a ser ingresados en SWAT para ejecutar el modelo. Luego se realizó un

proceso de análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo mediante indicadores estadísticos, para garantizar que el modelo es capaz de simular los caudales a futuro: en este caso, para el periodo 2020-2100, con la información de los escenarios climáticos regionales.

Los resultados del modelo se muestran en el capítulo cuatro, y son utilizados para responder a la hipótesis y, principalmente, al objetivo general de esta investigación, que consiste en elaborar un modelo hidrológico de la cuenca Cahabón, para establecer la oferta hídrica al considerar el efecto del cambio climático, para el periodo de referencia (1980-2000) y un futuro próximo (2020-2099), a través de utilizar los escenarios AR5 del IPCC; esto, con el fin de realizar una interpretación cualitativa de los potenciales impactos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca, al compararlos con la demanda de los sectores: doméstico, agrícola e hidroeléctrico.

Finalmente, y como se explica en la justificación, esta investigación permitirá a las autoridades y a la población comprender el impacto del cambio climático en la cuenca, y utilizar la información como referencia para la adecuada gestión del recurso hídrico. El estudio es relevante para esta parte de la cuenca que, aunque cuenta con estudios de caracterización, como se indican en los antecedentes, capítulo uno, no los hay de modelación hidrológica que consideren el cambio climático. Lo anterior es importante, ya que dota de agua para uso doméstico, agrícola e industrial; asimismo, brinda servicios ambientales y provee energía, generada a través de las hidroeléctricas que actualmente están establecidas y que, según el análisis de resultados del capítulo cinco, se verán afectados.

1. ANTECEDENTES

En Guatemala, el Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA) de la Universidad Rafael Landívar publicó en el 2015 el texto *Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala*¹; en este se muestra la relación de los modelos hidrológicos con las proyecciones climáticas, con el fin de estimar la disponibilidad de agua, tanto para la situación actual como para un escenario a futuro de cambio climático, con base en las proyecciones de precipitación y temperatura al 2020, para el escenario A2 del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y el modelo hidrológico de la plataforma Sistema de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP). A través de este estudio, se analizaron varias cuencas, entre estas la del río Cahabón. Dicha cuenca será la menos afectada al 2020, porque la disminución en la disponibilidad hídrica sería inferior al 10 %.

En la cuenca Cahabón, no existen referencias de estudios más recientes que relacionen el cambio climático y la oferta hidrológica. Sin embargo, conviene mencionar los estudios hidrológicos y de caracterización que se han realizado en la misma y que contribuyen a describir la cuenca. Entre estos, el informe de *Evaluación de calidad del agua y análisis de crecidas en la porción occidental de la cuenca del río Cahabón* de Rudy Machorro y Jaime Requena², quienes concluyen acerca de los niveles de calidad de agua para consumo humano en dicha cuenca, como resultado de factores geológicos y actividades antropogénicas, además del análisis de crecidas, construido a partir de un

¹ Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar. *Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala*. p. 81.

² MACHORRO, Rudy; REQUENA, Jaime. *Evaluación de calidad de agua y análisis de crecidas en la porción occidental de la cuenca del río Cahabón*. p. 94.

banco de datos hidrometeorológicos. Rudy Machorro y Jaime Requena, inclusive, elaboraron un modelo geomorfológico cuantitativo para la cuenca. En 2006, Elián Epaminondas elaboró un diagnóstico del estado actual de los recursos naturales de la cuenca del río Cahabón³, del cual obtuvo la información referente a geología, fisiografía, zonas de vida, clima, capacidad de uso de la tierra, ordenamiento territorial, uso de la tierra, suelos, cobertura forestal y recurso hídrico. En 2009, el ingeniero Reyes Villatoro publicó el informe *Contaminación en el río Cahabón*⁴, con el propósito de determinar qué elementos están contaminando el río Cahabón en la parte alta de la cuenca. El trabajo de Tot Flores (2012)⁵ evalúa el recurso hídrico en el municipio de San Cristóbal, Alta Verapaz, para conocer el estado actual y potencial del mismo.

Respecto a la caracterización climática del área, se cuenta con el estudio publicado por INSIVUMEH *Variabilidad y cambio climático en Guatemala*, en el cual se evalúan los cambios en los registros de precipitación y temperatura para los periodos de 1971-2000 (Línea base o referencia), 2001-2014 (Línea actual) y 2030-2090 (Escenarios de cambio climático B1 y A2), en las regiones climáticas de Guatemala, la cuenca Cahabón está ubicada en la Franja Transversal Norte. Esta región es muy lluviosa; según la línea base 1971-2000, el promedio fue de 2 116,6 mm/año, aunque se ve afectada por el fenómeno de El Niño Oscilación Sur, Atlántico Tropical Norte y Oscilación Ártica, lo que causa déficit hídrico, aunque la tendencia para los escenarios de cambio climático indica un incremento de alrededor de 10,4 mm/año. La temperatura promedio anual en la estación de Cobán oscila entre 17,4 a 19,8 °C, y se espera que aumente 0,07 °C/año, influenciado por el cambio climático.

³ COTTO GUZMÁN, Elián Jacobo Epaminondas. *Aportes para mejorar el manejo de los recursos naturales renovables en la cuenca del río Cahabón, Alta Verapaz*. p. 197.

⁴ REYES VILLATORO, Rodolfo. *Contaminación en el río Cahabón, Alta Verapaz, Guatemala*. p. 73.

⁵ TOT FLORES, Rafael Francisco. *Evaluación del recurso hídrico en Alta Verapaz: Análisis del estado actual y potencial de uso del agua en el municipio de San Cristóbal Verapaz*. p. 183.

Un trabajo de tesis de posgrado referido en esta investigación por el programa que utiliza para la modelación y los escenarios de cambio climático fue desarrollado para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del lago Atitlán, por el ingeniero Edio González en el 2016⁶. En este, se evalúa el Impacto del cambio climático y uso/cobertura en el comportamiento hidrológico, erosión hídrica y disponibilidad de agua para uso agrícola y humano. Se utilizó información disponible de tipo de suelo, uso y cobertura, topografía, clima para ingresar a la herramienta de asesoramiento de suelo y agua (SWAT). Considera una línea base de 1994 al 2015, un escenario de cambio climático RCP 8,5 y dos escenarios hipotéticos de cambio de uso y cobertura.

A nivel internacional, existen numerosos trabajos de investigación sobre modelación hidrológica y cambio climático, de los cuales, a continuación, se mencionan algunos que utilizan SWAT como herramienta de modelado y se hace una breve descripción de estos.

En Chile, Alejandra Sther en 2008⁷ elaboró su tesis doctoral con el objetivo de generar una herramienta capaz de analizar el comportamiento de las cuencas en estudio, bajo escenarios de cambio climático tanto a macro como a meso-escala (sub-cuencas). Incorpora el impacto del aporte nival en la zona y la disponibilidad del recurso agua durante diferentes períodos del año.

En Lima, Perú, Ricardo León presentó la tesis de licenciatura titulada *Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura*⁸, en la que considera la

⁶ GONZÁLEZ CELADA, Edio Giovanni. *Impacto del cambio climático y uso/cobertura en el comportamiento hidrológico, erosión hídrica y disponibilidad de agua para uso agrícola y humano en la subcuenca del río Quiscab, cuenca del lago Atitlán, Guatemala*. p. 86.

⁷ STEHR GESCHE, Alejandra Patricia. *Análisis del comportamiento hidrológico y disponibilidad de agua, bajo escenarios de cambio climático, para dos sub-cuencas del río Biobío incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana*. p. 138.

⁸ LEÓN OCHOA, Ricardo Fernando. *Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático*. p. 96.

incidencia del cambio climático. En este estudio, se investigó el comportamiento hidrológico a futuro en la cuenca media y alta del río Piura, proyectada para mediados del siglo XXI, para un periodo total de 23 años (1986 - 2008). Las principales variables climáticas se proyectaron con los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5.

La Fundación Amigos de la Naturaleza en Bolivia desarrolló un análisis sobre la disponibilidad hídrica y la demanda de agua en la cuenca Piraí⁹, bajo un contexto de situación actual y escenario de cambio climático, a través de la modelación hidrológica en SWAT y WEAP.

En Cuba, destaca el estudio de caso de los investigadores Cavazos y otros, con el título *Modelización hidrológica de los impactos del cambio climático en una cuenca de río tropical río Cauto*¹⁰, con el objetivo de evaluar los impactos proyectados de cambio climático en los recursos hídricos. En este caso, el modelo climático regional RegCM 4,3 se utilizó para forzar el calibrado del modelo para simular regímenes hidrológicos en un período de referencia (1970–2000) y un futuro próximo (2015–2039), bajo el escenario de emisión RCP 8,5.

⁹ Fundación Amigos de la Naturaleza. *Disponibilidad hídrica y demanda de agua en la cuenca Piraí: situación actual y escenario de cambio climático*. p. 63.

¹⁰ CAVAZOS, Teresa; et. al. *Hydrological Modeling of Climate Change Impacts in a Tropical River Basin: A Case Study of the Cauto River, Cuba*. p. 25.

1.1. Justificación

El proceso de cambio climático actual no tiene únicamente causa natural, es así que el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) afirmó que su origen se atribuye, con una certidumbre de 97 %, a la actividad humana, la cual ha alterado la composición de la atmósfera, principalmente por el uso de combustibles fósiles que emiten dióxido de carbono, lo cual sumado a la variabilidad climática global, conlleva cambios en las condiciones predominantes del clima, lo que representa una amenaza para las sociedades humanas, el ambiente, la economía y el desarrollo.

El Quinto Informe del IPCC (IPCC, 2014) señala, según sus proyecciones, que la "...temperatura en superficie continuará aumentando a lo largo del siglo XXI, que es muy probable que las olas de calor ocurran con mayor frecuencia y duren más, y que los episodios de precipitación extrema sean más intensos y frecuentes".¹¹ Estos resultados son a escala global, e indican el carácter general y patrones a gran escala del cambio climático.

Para la escala regional, el *Informe final de impacto climáticos*, publicado por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), muestra cambios en la temperatura entre más 3 °C y menos 1 °C, en las regiones del interior y de las tierras altas de Guatemala, además se presenta una disminución general de las precipitaciones, lo que implicaría que las regiones que tienen una precipitación promedio mostrarán una reducción en la cantidad de lluvia de hasta 100 mm al mes.

¹¹ Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *Informe de síntesis: Cambio climático, 2014*. p. 10.

Lo anterior, crea un cuadro preocupante para el país, el cual es altamente vulnerable a los efectos adversos del cambio climático. También es preocupante a nivel de cuenca, porque las condiciones climáticas definen el comportamiento de la disponibilidad hídrica; además, se debe considerar que el régimen fluvial cambiará por la presión de la actividad antropogénica. Y entre mayor sea el aumento de la temperatura según el IPCC en su Quinto Informe “mayor será el porcentaje de la población mundial que experimentará escasez de agua y que se verá afectada por grandes inundaciones fluviales (evidencia sólida, nivel de acuerdo alto)”.¹²

Estas alteraciones en los recursos hídricos por el cambio climático, según el Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo: “*Agua para todos, agua para la vida del Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos*” (WWAP) de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura (UNESCO), implicarán una crisis del agua que empeorará, por lo que requerirá una administración responsable del agua, lo cual se lograría a través de la reforma de políticas, aplicación de las leyes y una gestión integrada de los recursos hídricos.

Por otra parte, el informe del IPCC señala que según las proyecciones “se reducirán los recursos renovables de aguas superficiales y aguas subterráneas en la mayoría de las regiones secas subtropicales (evidencia sólida, nivel de acuerdo alto), con lo que se intensificará la competencia por el agua entre los sectores (evidencia limitada, nivel de acuerdo medio)”.¹³

Por lo que, para la gestión del recurso hídrico, es necesaria la administración a nivel de cuenca en la que se involucren todos los actores y se

¹² Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *Informe de síntesis: Cambio climático, 2014*. p. 72.

¹³ Ibid.

respondan a los desafíos de: “atender la demanda de agua de calidad adecuada en el presente y para el futuro, incrementar la eficiencia del uso del agua, desarrollar conciencia social y lograr una cultura de paz en torno al agua”.

¹⁴ El primer desafío requiere entender la hidrología de una cuenca y cómo es afectada por el cambio climático.

Específicamente, las cuencas como la de Cahabón protagonizan un papel importante para dotar agua para uso doméstico y para las actividades económicas que en ella se desarrollan, “agrícolas e industriales que abarcan artesanías y otras actividades”¹⁵. Asimismo, brindan servicios ambientales y proveen energía, generada a través de las hidroeléctricas que actualmente están establecidas en esta. En dichas hidroeléctricas, el riesgo de abastecimiento incrementaría por la reducción en precipitaciones y el incremento de la evapotranspiración, lo que podría provocar el desabastecimiento en estas actividades. Es por esta razón que los sectores que se escogieron para proyectar la demanda a futuro son el doméstico, el agrícola y el hidroeléctrico.

La parte alta de la cuenca Cahabón es la que se toma de base para este estudio, ya que cuenta, actualmente, con suficientes estaciones meteorológicas e hidrométricas; lo que aporta los datos necesarios para elaborar el modelo. Además, se pueden determinar las características morfométricas de la cuenca y se cuenta con información y mapas sobre la topografía, tipos y uso de suelos, con lo cual se puede utilizar SWAT para el modelo hidrológico de la misma.

¹⁴ BACA RUEDA, Ricardo. *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos*. p. 22.

¹⁵ RODAS GÓMEZ, Felipe. *Planificación de la cuenca hidrográfica como generadora de desarrollo en la república de Guatemala*. p. 141.

1.2. Determinación del problema

En esta sección se desarrolla el problema que dio origen a esta investigación.

1.2.1. Definición

El cambio climático actual, derivado de actividades antropogénicas y sumado a cambios en el uso del suelo, puede ocasionar impactos sobre el ciclo hidrológico y la disponibilidad del recurso hídrico, lo que provoca variaciones en la escorrentía superficial y la recarga de los acuíferos. Por lo que existe una necesidad urgente de conocer los posibles impactos en la disponibilidad hídrica, debido al cambio climático a nivel de cuenca.

Además, en Guatemala, no se han realizado suficientes estudios con datos de escenarios climáticos a futuro, a escala de cuencas hidrográficas, que permitan modelar los posibles cambios esperados. En el caso de la parte alta de la cuenca Cahabón, aunque existen estudios de caracterización, como se indican en los antecedentes, no los hay de modelación hidrológica, lo cual es importante para la planificación de los recursos hídricos y en especial en esta cuenca que dota de agua para uso doméstico y para las actividades económicas que se desarrollan en ella, "...agrícolas e industriales que abarcan artesanías y otras actividades..."¹⁶. Asimismo, brinda servicios ambientales y provee energía, generada a través de las hidroeléctricas que actualmente están establecidas.

¹⁶ Rodas Gómez, Felipe. *Planificación de la cuenca hidrográfica como generadora de desarrollo en la república de Guatemala*. p. 141.

1.2.2. Delimitación

Establecer cómo los cambios en las variables climáticas pueden modificar la disponibilidad de agua en la parte alta de la cuenca Cahabón; asimismo, producir impacto en sus componentes y en los sectores dependientes. Se utiliza, para cuantificar el recurso hídrico, la modelación hidrológica en el programa SWAT y los datos a futuro de los escenarios de cambio climático AR5 producidos por el IPCC, durante cuatro períodos: 2020-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cambio climático

El cambio climático es definido por el IPCC como “la variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos.”¹⁷

Esta variabilidad del clima es atribuida a causas naturales y a la actividad humana, ambas fuentes de gases de efecto invernadero (GEI): dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y vapor de agua (H₂O). Las fuentes naturales de estos gases son erupciones volcánicas, actividad biológica y la degradación de materia orgánica. La actividad antropogénica produce emisiones de GEI debido al uso de combustibles fósiles, cambio de uso del suelo y a la generación de electricidad, con lo cual ha contribuido al aumento de estos a niveles alarmantes “alterando así el flujo natural de GEI que existe entre las fuentes naturales y la atmósfera”.¹⁸ Lo anterior, contribuye a que la superficie del planeta alcance una temperatura más alta, porque a mayor cantidad de GEI, mayor es la cantidad de calor que se absorbe.

¹⁷ Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *Cambio Climático 2013*. p. 6.

¹⁸ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Gobierno Federal. *Cambio climático*. p. 8.

El aumento de la temperatura media global también tiene otras consecuencias sobre el sistema climático, por eso al cambio climático se le denomina antropogénico (provocado por la acción del hombre).

2.2. Escenarios de emisiones

Los escenarios de emisiones son una representación “...de la evolución futura de las emisiones de sustancias que podrían ser radiativamente activas (gases de efecto invernadero, aerosoles, entre otros.) basada en un conjunto coherente de supuestos sobre las fuerzas que las determinan y las principales relaciones entre ellos”.¹⁹

Para el estudio del cambio climático, la definición de los escenarios de emisiones (EE) de GEI es relevante, ya que, del nivel de emisiones, aerosoles y otros contaminantes en la atmósfera, depende el comportamiento del sistema y los resultados que se obtendrán de las variables climáticas.

El IPCC es el encargado de desarrollar los EE para que puedan ser utilizados a nivel mundial. Estos son publicados en los informes conocidos como Reportes especiales de escenarios de emisiones. Para la elaboración de los EE se toman en cuenta aspectos como el crecimiento poblacional y económico, el desarrollo tecnológico y social, el uso de combustibles y la agricultura. Junto a esta información, los EE proporcionan datos para desarrollar escenarios climáticos.

Los cuatro escenarios establecidos por el IPCC en el Quinto Informe fueron diseñados tomando en cuenta las políticas climáticas del siglo XXI que, a

¹⁹ Ministerio para la Transición Ecológica, Gobierno de España. *MeteoGlosario Visual*. https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/659_escenarios-de-emisiones.

comparación de informes anteriores, no se incluían. Estos escenarios se denominan Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) y cada uno implica diferentes condiciones socioeconómicas, tecnológicas y biofísicas.

2.3. Trayectorias de concentración representativas (RCP)

Son escenarios que "...incluyen rutas temporales para las emisiones y concentraciones del conjunto completo de gases de efecto invernadero, aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso de la tierra / cobertura del suelo".²⁰

Los escenarios son representativos porque conducen cada uno a niveles de forzamiento radiativo total, y son trayectorias porque señalan el camino a seguir para obtener esos resultados.

2.3.1. RCP 2,6

Comprende un escenario de mitigación conducente a un nivel de forzamiento muy bajo. Con un valor máximo en el forzamiento radiativo de 3 W/m² antes de 2100, y posteriormente disminuye. La máxima concentración de CO₂ equivalente para este escenario es 490, después se reduce.

2.3.2. RCP 4,5

Es un escenario de estabilización sin sobrepasar a 4,5 W/m², a partir de 2100 y con 650 CO₂ eq de concentración.

²⁰ MOSS, Richard; et. al. *Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts and response strategies*. p. V.

2.3.3. RCP 6,0

Es un escenario de estabilización no mayor a 6 W/m² a partir de 2100 y con 850 CO₂ eq de concentración.

2.3.4. RCP 8,5

Es un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero, con un aumento de la trayectoria de forzamiento radiativo mayor a 8,5 W/m² en 2100. La concentración de CO₂ equivalente para este escenario es mayor de 1 370 para 2100. En la tabla I se resumen las características principales de los RCP.

Tabla I. **Características principales de los RCP**

Características	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 6,0	RCP 8,5
Emisión de GEI	Muy baja	Mitigación media-baja	Mitigación alta	Mitigación muy alta
Contaminación del aire	Media-baja	Media	Media	Media-alta
Otras características	Crecimiento de población mundial medio, crecimiento medio de PBI, tecnologías de almacenamiento de carbono y disminución de emisiones a partir del 2020.	Crecimiento de población hasta el 2065. Crecimiento de PBI en un orden de magnitud y el uso de energía en tres órdenes. Aplicación de políticas climáticas para fijar el precio de uso de carbono.	Crecimiento de la población hasta el 2100. Un crecimiento del PBI hasta el 2060. Las políticas climáticas inician en el 2060.	Altas emisiones de gases de efecto invernadero. Crecimiento alto de población. Bajo crecimiento de PBI. Modestos cambios tecnológicos y deficiente uso de la energía.
Centro Internacional de Desarrollo	IMAGE (Holanda)	GCAM (USA)	AIM (Japón)	MESSAGE (Austria)

Fuente: OBANDO, Oscar; SÁNCHEZ, Tannia; ASTORAYME, Miguel. *Actualización de los escenarios de disponibilidad hídrica en el Perú en contexto de cambio climático*. p. 4.

2.4. Modelos climáticos

Los modelos climáticos son utilizados para representar cuantitativamente la dinámica climática a futuro; incorporan cada uno de los componentes del sistema climático terrestre. Son aplicados como herramientas de estudio para simular el clima de forma mensual, estacional y realizar predicciones interanuales.

Los modelos climáticos se usan, principalmente, para realizar predicciones y proyecciones sobre el clima. Los modelos climáticos se clasifican, de acuerdo con el número de dimensiones que poseen, de la siguiente manera:

Tabla II. **Clasificación de los modelos climáticos**

Modelo	Número de dimensiones
Media global	0
MBE (variación de la temperatura superficial con la latitud) radiativos-convectivos (perfil vertical de temp. promedio global)	1
Modelos promediados zonalmente (latitud-altitud)	2
Modelos de circulación general (globales)	3

Fuente: CASADO CALLE, María. *Modelos Climáticos*. p. 10.

A través de los modelos de circulación general (MCG), se obtiene el comportamiento climático a futuro, debido al aumento en los gases de efecto invernadero.

Por su complejidad, los modelos climáticos, en muchas ocasiones, no pueden usarse en un área específica, por eso regularmente se usan modelos

más simples que implican una reducción de la escala, para que sean adecuados a climas de escala regional.

2.4.1. *Downscaling* o aumento de resolución de los modelos

El *downscaling*, también conocido como regionalización, es necesaria para que los datos se adecuen a las características regionales. Según el IPCC la escala regional está definida en un rango de 10^4 y 10^7 km².

En la actualidad, existen dos metodologías que son utilizadas para la reducción de escala conocidas como regionalización estadística (*statiscal downscaling*) y dinámica (*dinamical downscaling*).

2.4.2. Estadístico

Los métodos estadísticos de regionalización (SDMs, del inglés *Statistical Downscaling Method*) hacen uso de la información observada para modificar el modelo y ajustarlo a la región, esto con base en "...modelos estadísticos que relacionan de forma empírica las variables de circulación atmosférica a gran escala con las variables locales/regionales observadas en superficie, relacionadas con el fenómeno de estudio".²¹

Estos pueden ser utilizados en una variedad de escenarios y modelos, con alta resolución y valores puntuales; con la desventaja de obtener resultados solo para las variables observadas, e implica que las suposiciones actuales serán válidas en el futuro, es decir, sin variabilidad espacial.

²¹ GAERTNER, Miguel Ángel; GUTIÉRREZ, José Manuel; CASTRO, Manuel. *Escenarios regionales de cambio climático*. p. 6.

Para esta investigación, se utilizaron los MCG del Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional, a los cuales, previamente se les aplicó el método de regionalización estadística, conocido como método de reducción de escala simple o método delta; este consiste en sumar anomalías interpoladas a superficies climáticas mensuales de alta resolución de *WorldClim*.

2.5. Escenarios de cambio climático

Los escenarios climáticos representan el clima a futuro. Un escenario de cambio climático ayuda a conocer información sobre las variables climáticas a futuro con base en los diferentes escenarios de GEI. Proporciona la información necesaria para desarrollar medidas de mitigación y adaptación.

Para la generación de estas proyecciones, se pueden utilizar: escenarios incrementales, escenarios analógicos o escenarios basados en MCG y en modelos de circulación global océano-atmósfera (MCGOA). De estos, los que presentan mayor grado de desarrollo son los MCG.

Los MCG pueden presentar incertezas, por lo cual se hacen evaluaciones del desempeño, a través del uso de herramientas de comparación entre modelos, por medio del proyecto CMIP5, publicado en el Quinto Informe del IPCC.

Tabla III. **MCG pertenecientes al proyecto CMIP5**

No.	Nombre	Institución	Resolución atmosférica	Resolución oceánica
1	ACCESS1.0	Buro de meteorología de Australia (CSIRO)	192x145	360x300
2	ACCESS1.3		192x146	360x301
3	BCC-CSM1.1*	Centro climático de Beijing (BCC)	128x64	360x232
4	BCC-CSM1.1(m)*		320x160	360x232
5	CCSM4	Centro nacional de investigación atmosférica (NCAR/USA)	288x192	320x384
6	CESM1 (BGC)	Centro nacional de investigación atmosférica (NSF-DOE NCAR/USA)	288x192	320x384
7	CESM1 (CAM5) *		288x192	320x384
8	CESM1 (FASTCHEM)		288x192	320x384
9	CESM1 (WACCM)		144x96	320x384
10	CMCC-CESM	Centro Euro-Mediterráneo de Cambio Climático (CMCC/Italia)	96x48	182x149
11	CMCC-CM		480x240	182x149
12	CMCC-CMS		192x96	192x96
13	CNRM-CM5*	Centro Nacional de Investigación Meteorológica (CNRM/Francia)	256x128	362x292
14	CSIRO-Mk3.6.0*	Organización de Investigación Científica e Industrial de Comunicación (CSIRO/Australia)	96x192	189x192
15	CanESM2	Centro Canadiense de Análisis y Modelamiento Climático (CCCma/Canadá)	129x64	256x192
16	FGOALS-g2	Instituto de Física Atmosférica, Academia China de Ciencias y CESS	128x60	360x196
17	FGOALS-s2	Instituto de Física Atmosférica, Academia China de Ciencias	128x108	360x196
18	FIO-ESM*	El Primer Instituto de Oceanografía (SOA/China)	128x64	320x384
19	GFDL-CM2.1	NOAA Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (GFDL/USA)	128x60	360x200
20	GFDL-CM3*		144x90	360x200
21	GFDL-ESM2G*		144x90	360x210

Continuación tabla III.

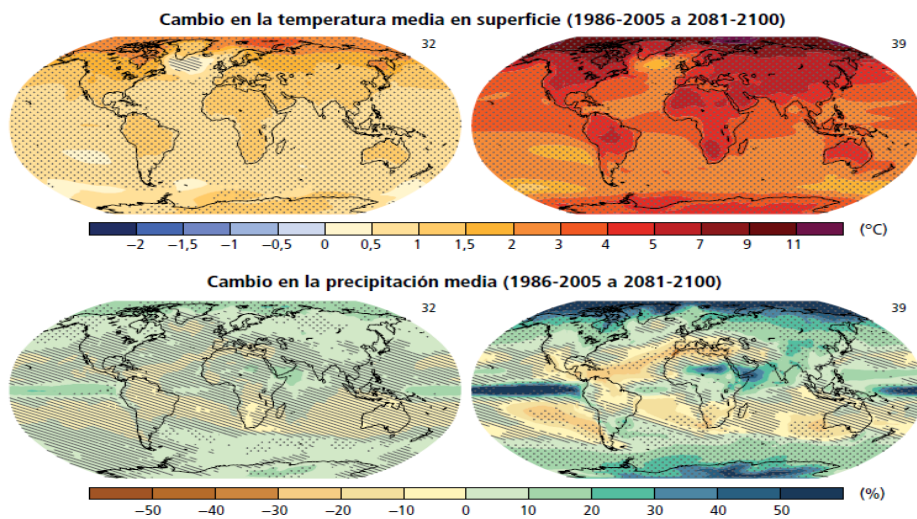
22	GFDL-ESM2M*		144x90	360x200
23	GISS-E2-H*	NASA Goddard Instituto de Estudios Espaciales (NASA GISS/USA)	144x90	144x90
24	GISS-E2-H-CC		144x90	144x90
25	GISS-E2-R*		144x90	144x90
26	GISS-E2-R-CC		144x90	144x90
27	HadCM3	Centro Hadley de Cambio Climático (MOH/UK)	73x96	144x288
28	HadGEM2-AO	Instituto Nacional de Investigación Meteorológica (NIMR/Corea del Sur)	145x192	216x360
29	HadGEM2-CC	Centro Hadley de Cambio Climático (MOH/UK)	145x192	216x360
30	HadGEM2-ES		145x192	216x360
31	IPSL-CM5A-LR*	Instituto Pierre-Simon Laplace (IPSL/Francia)	96x96	149x182
32	IPSL-CM5A-MR*		143x144	149x182
33	IPSL-CM5B-LR		96x96	149x182
34	MIROC5*	Instituto Nacional de Estudios Ambientales Universidad de Tokio (MIROC/Japón)	128x256	224x256
35	MPI-ESM-LR*	Instituto de Meteorología Max Planck (MPI-M/Alemania)	96x192	220x256
36	MPI-ESM-MR*		96x192	404x802
37	MPI-ESM-P		96x192	220x256
38	MRI-CGCM3*	Instituto de Investigación Meteorológica (MRI/Japón)	160x320	368x360
39	NorESM1-M	Centro Climatológico Noruego (NCC/Noruego)	144x96	320x384
40	NorESM1-ME		144x96	320x384

Fuente: PALOMINO LEMUS, Reiner. *Proyecciones de cambio climático para la precipitación en América Tropical mediante técnicas de downscaling estadístico*. p. 26.

Los escenarios climáticos publicados en el Quinto Informe del IPCC (AR5) son resultado del proyecto CMIP5, y muestran los cambios proyectados en el sistema climático para cada escenario de emisión. Estiman, con un nivel de confianza medio, que “la variación de la temperatura media global en superficie para el período 2016-2035, respecto a 1986-2005, es similar para las cuatro

trayectorias de concentración representativas, y es probable que sea de entre 0,3 °C y 0,7 °C”.²² Respecto a la precipitación con el escenario RCP 8,5 se pronostica que “la precipitación media disminuya en muchas regiones secas de latitud media y subtropicales, mientras que es probable que en muchas regiones húmedas de latitud media la precipitación media aumente.”²³

Figura 1. **Proyecciones medias multimodelos de CMIP5 para los escenarios RCP 2,6 (izquierda) y RCP 8,5 (derecha)**



Fuente: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *Informe de síntesis: Cambio climático 2014*. p. 65.

Para Centroamérica con RCP 8,5, las proyecciones climáticas estiman “...para fin del siglo XXI un calentamiento medio de 2,5 °C (rango 1,5 °C a

²² Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *Informe de síntesis: Cambio climático 2014*. p. 63.

²³ *Ibíd.* p. 65.

5,0 °C), reducción del 10 % en las precipitaciones medias anuales (rango - 25 % a +10 %) y disminución de la lluvia durante el verano”.²⁴

Para Guatemala, los resultados básicos del cambio climático publicados por el MARN, en el *Informe Final Impactos climáticos para Guatemala*, se obtuvieron utilizando el modelo climático regional WRF para reducir la escala de los resultados de las simulaciones de escenarios RCP 8,5. El resultado fue un aumento de la temperatura “entre el presente y la década de 2060, que va desde menos de 1 °C a más de 3 °C”²⁵ y “se prevé una disminución en las precipitaciones para la mayor parte del país, al menos en enero y julio”.²⁶

La información que se obtiene de los escenarios de cambio climático permite evaluar los impactos del cambio climático en los diferentes sectores: biodiversidad, recursos hídricos, bosques, sector agrícola, zonas costeras, zonas de montaña, suelo, ecosistemas marinos, transporte, salud humana, industria, energía, turismo, finanzas-seguros, urbanismo y construcción.

Las evaluaciones de cambio climático para el recurso hídrico, tema de esta investigación, buscan fundamentalmente establecer cómo, a diferentes escalas espaciales y temporales, los cambios en los atributos del clima pueden modificar la disponibilidad de agua a nivel de cuenca. Para lo cual, no solo es necesario incluir aspectos climáticos, sino que también es necesario utilizar modelos hidrológicos, que permitan representar adecuadamente los diversos procesos que ocurren en la cuenca y, además, es necesario conocer los aspectos relacionados con las características de esta.

²⁴ MAGRIN, Graciela. *Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe*. p. 16.

²⁵ OGLESBY, Robert; ROWE, Clint. *Impactos climáticos para Guatemala: Resultados preliminares de los modelos climáticos regionales y globales IPCC AR5*. p. 28.

²⁶ *Ibíd.* p. 29.

2.6. Modelos climáticos globales para el área de estudio

Los resultados de las proyecciones climáticas difieren entre uno y otro modelo; por tal hecho, los expertos recomiendan usar en los estudios de evaluación de impactos más de un modelo, y obtener el promedio de sus resultados.

Por eso, en esta investigación, los modelos utilizados fueron seleccionados con base en investigaciones en las que al ejecutar los MCG se representan mejor las características climáticas de la región y, por tanto, se ubicarán entre las primeras posiciones de desempeño.

Para Centroamérica, el estudio utilizado de referencia es el de Hugo Hidalgo y Eric J. Alfaro; su título en español es *Habilidad de los modelos climáticos CMIP5 para reproducir características climáticas básicas del siglo XX en Centroamérica*²⁷. En este, se realizan 107 corridas de MCG disponibles de 48 modelos diferentes; reproduce condiciones climáticas históricas características de Centroamérica. La clasificación final obtenida de esta investigación se muestra en la tabla IV.

²⁷ HIDALGO, Hugo; ALFARO, Eric. *Skill of CMIP5 climate models in reproducing 20th century basic climate features in Central America*. p. 3 419.

Tabla IV. **Clasificación de los 13 modelos climáticos globales que mejor representan las características climáticas para Centroamérica**

No	Modelo
1	cesm1_cam5(1)
2	cesm1_cam5(3)
3	cnrm_cm5(3)
4	cnrm_cm5(1)
5	cesm1_cam5_1_fv2(3)
6	cnrm_cm5(2)
7	cesm1_cam5(2)
8	mpi_esm_p(1)
9	cmcc_cms(1)
10	cesm1_fastchem(3)
11	cesm1_fastchem(2)
12	mpi_esm_p(2)
13	ccsm4(3)

Fuente: HIDALGO, Hugo; ALFARO, Eric. *Skill of CMIP5 climate models in reproducing 20th century basic climate features in Central America*. p. 3 419.

De estos modelos, fueron seleccionados tres que estaban entre los modelos regionalizados disponibles, en este caso: cesm1_cam5, cnrm_cm5 y ccsm4.

2.7. Cuenca y morfometría

Una cuenca se define como “una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida”.²⁸ Al punto de salida, también se le denomina punto de aforo o desagüe; y al aporte de agua por la precipitación se le llama escorrentía.

²⁸ APARICIO MIJARES, Francisco Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. p. 19.

Conocer la salida del sistema fluvial permite, finalmente, hacer una clasificación de las partes de la cuenca, lo cual puede brindar información del comportamiento del agua durante su recorrido, como se observa en la V.

Tabla V. **Partes de una cuenca**

	Parte	Descripción
1	Alta	Corresponde, generalmente, a las áreas montañosas o cabeceras de los cerros, limitadas en su parte superior por líneas divisorias de aguas. En esta zona, las pendientes resultan elevadas, los valles estrechos y los procesos fluviales que prevalecen son erosivos.
2	Media	Zona donde el cauce principal mantiene un curso más definido. La pendiente es menos abrupta que la anterior y los procesos erosivos son más moderados. Reciben aportes de cauces menores.
3	Baja	Zona donde se produce un cambio abrupto de pendiente; el río desagua o desemboca en zonas bajas. El trazado del curso es divagante o sinuoso. Aquí prevalece el proceso de sedimentación.

Fuente: Aquabook. *Partes de una cuenca*. http://aquabook.agua.gob.ar/378_0. Consulta: 24 de septiembre de 2020.

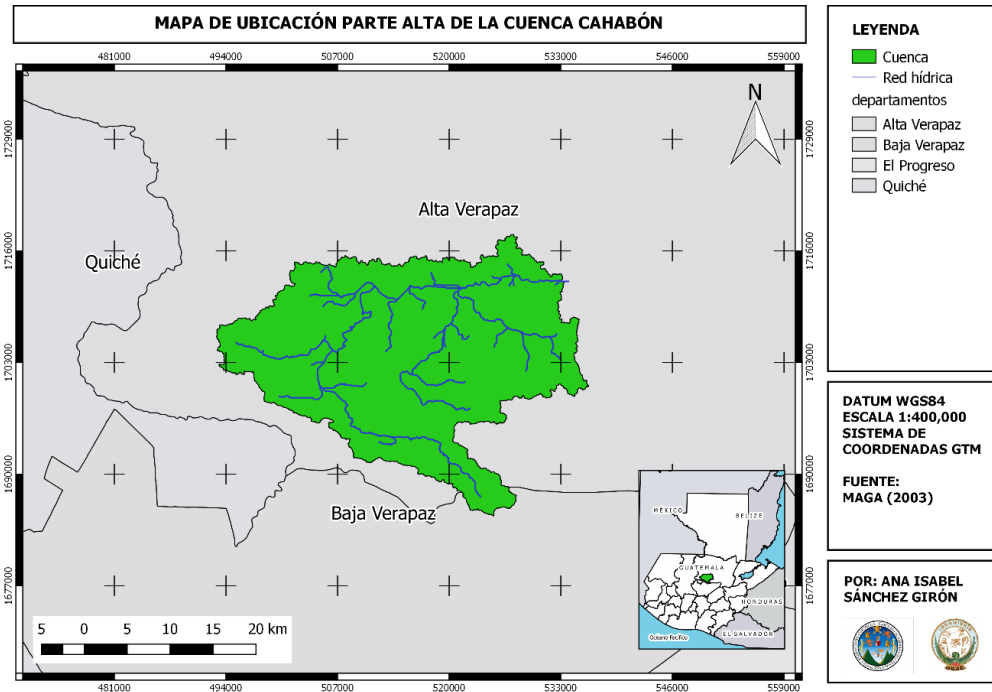
2.8. Parte alta de la cuenca Cahabón

En esta sección se describen aspectos sobre la ubicación, división político-administrativa, demografía y la caracterización física de la cuenca.

2.8.1. Ubicación geográfica

La parte alta de la cuenca Cahabón es la zona en la que se desarrolló el estudio, y está delimitada a partir de la estación hidrológica Chajcar. La cuenca se ubica en el departamento de Alta Verapaz y Baja Verapaz, entre las coordenadas geográficas 15° 12' y 15° 33' de latitud norte y 90° 35' y 90° 10' de longitud oeste. Tiene una extensión territorial de 760 km².

Figura 2. Mapa de ubicación de la cuenca



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

El departamento de Alta Verapaz representa un 98,43 % de la cuenca y Baja Verapaz un 1,56 %. Limita al norte con el municipio de Cobán y San Pedro Carchá; al este, con San Juan Chamelco y Tamahú; al sur, con Purulhá y Tactic; al oeste colinda con los municipios de Santa Cruz Verapaz y San Cristóbal Verapaz.

2.8.2. División política administrativa

La cuenca, políticamente, está dividida en 8 municipios según se observa en la figura 3. De estos 7 pertenecen al departamento de Alta Verapaz y uno al departamento de Baja Verapaz, Purulhá, que ocupa solo un 1,56 % de la cuenca, en la tabla VI se indica la superficie que ocupa cada una.

Cada uno de los municipios se divide en caseríos, aldeas y fincas, según se muestra en la tabla VI que se elaboró con información del censo para el año 2002, realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE).

Tabla VI. **Municipios en la cuenca y su división**

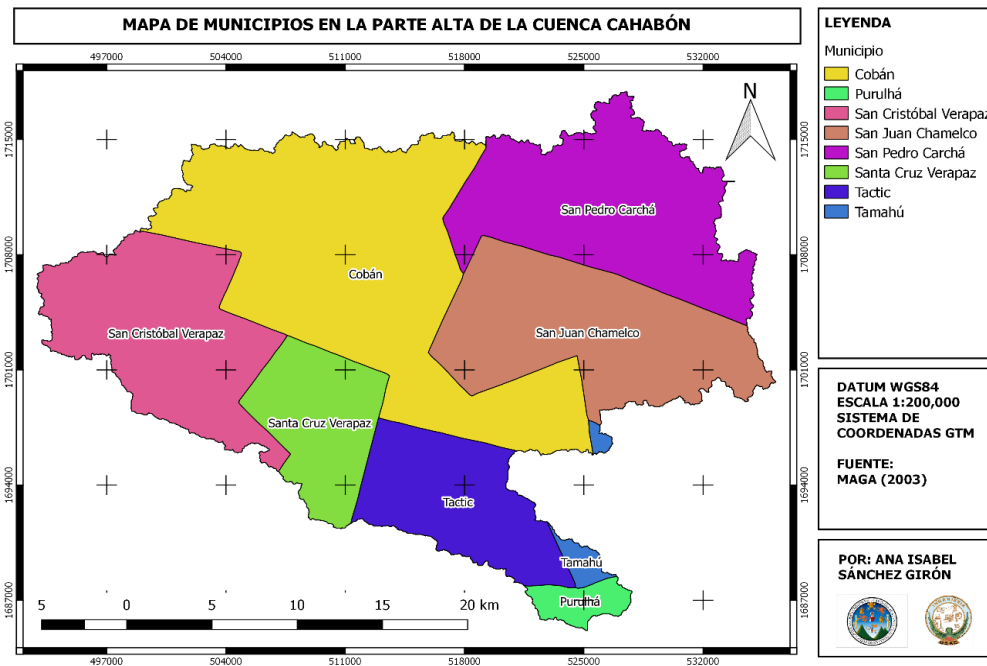
No	Municipio	Área (km ²)	Subdivisión								
			Caserío	Aldea	Finca	Colonia	Hacienda	Lotificación	Paraje	Pueblo	Villa
1	Cobán	233,92	27	7	24	3			1		
2	San Pedro Carchá	132,35	28	8	16	3					
3	San Cristóbal Verapaz	116,27	15	4	18	1					1
4	San Juan Chamelco	126,94	39	10	4					1	
5	Santa Cruz Verapaz	59,11	8	5	16			1		1	
6	Tactic	72,34	26	7	5	1	3		6		1
7	Tamahú	7,15	1								
8	Purulhá	11,92	2	1	3		1				
Total			146	42	86	8	4	1	7	2	2

Fuente: elaboración propia, con base en datos del Censo XI de Población y VI de Habitación para el año 2002, realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE).

La división administrativa es la forma en que se administra el territorio; para Guatemala, puede ser por medio de departamentos o municipios, según indica el artículo 224 de la Constitución Política de la República de Guatemala. Por la situación de la cuenca, la división, en este caso, es por medio de municipios.

En los municipios, el Gobierno Municipal corresponde al Concejo Municipal, que es integrado por el alcalde, los síndicos y los concejales, según indica el artículo 9 del Código Municipal. Los cuales son electos cada cuatro años de forma democrática por los habitantes del municipio.

Figura 3. Municipios en la cuenca



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

2.8.3. Población

La cantidad de población por municipios en la cuenca se muestra en la tabla VII, que se elaboró con información del censo para el año 2002, realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE). Con la tasa de crecimiento determinada en esta investigación, se proyectó la población.

Tabla VII. **Población por municipios en la cuenca**

No	Municipio	Tasa de crecimiento	Censo 2002	Censo 2018	Proyección (habitantes)				
					2020	2040	2060	2080	2100
1	Cobán	2,29 %	51 568	75 828	79 346	124 889	196 571	309 397	486 981
2	Purulhá	3,18 %	1 730	2 946	3 137	5 868	10 977	20 535	38 417
3	San Cristóbal Alta Verapaz	2,76 %	22 085	35 072	37 033	63 811	109 951	189 454	326 444
4	San Juan Chamelco	2,31 %	23 776	35 052	36 690	57 924	91 449	144 378	227 940
5	San Pedro Carcha	2,75 %	27 298	43 295	45 709	78 642	135 304	232 790	400 514
6	Santa Cruz Verapaz	3,12 %	9 900	16 685	17 742	32 786	60 588	111 966	206 910
7	Tactic	2,62 %	16 660	25 838	27 208	45 595	76 408	128 046	214 580
8	Tamahú	2,71 %	332	523	552	942	1 608	2 744	4 684
Total			153 349	235 239	247 415	410 457	682 856	1 139 309	1 906 470

Fuente: elaboración propia, con base en Censo XI de Población y VI de Habitación, 2002 y Censo XII de Población y VII de Habitación, 2018 del Instituto Nacional de Estadística (INE).

Para encontrar la tasa de crecimiento de la población total se utilizó la fórmula de crecimiento poblacional compuesto, ecuación 1.

$$r = \left(\frac{P_f}{P_o} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Donde:

r = tasa de crecimiento poblacional

P_f = población a futuro

P_o = población inicial

n = periodo

La población por género en la cuenca muestra que el 48,23 % de la población son hombres y el resto, 51,77 %, son mujeres.

Tabla VIII. **Población por género en la cuenca**

Género	Población Censo 2002	Población Censo 2018	Porcentaje
Hombres	73 954	115 328	48,23 %
Mujeres	79 395	119 911	51,77 %

Fuente: elaboración propia, con base en Censo XI de Población y VI de Habitación, 2002 y Censo XII de Población y VII de Habitación, 2018 del Instituto Nacional de Estadística (INE).

La población por área descrita en la tabla IX indica que el área rural es más poblada que el área urbana.

Tabla IX. **Población por área**

Área	Población censo 2018	Porcentaje
Urbana	112 813	48 %
Rural	122 425	52 %

Fuente: elaboración propia, con base en Censo XII de Población y VII de Habitación, 2018 del Instituto Nacional de Estadística (INE).

La población por edad está distribuida en diferentes rangos según se muestra en la tabla X. Del total, un 37,4 % está entre 0 a 14 años, un 42,8 % entre 15 a 39 años, 13,4 % entre 40 a 59 y 6,4 % de 60 en adelante.

Tabla X. **Población por edad en la cuenca**

Edad (años)	Población Censo 2018	Porcentaje
0 - 4	30 290	12,9 %
5 - 9	29 989	12,7 %
10 - 14	27 792	11,8 %
15 - 19	27 321	11,6 %
20 - 24	23 261	9,9 %
25 - 29	19 174	8,2 %
30 - 34	16 417	7,0 %
35 - 39	14 484	6,2 %
40 - 44	11 046	4,7 %
45 - 49	8 246	3,5 %
50 - 54	6 481	2,8 %
55 - 59	5 736	2,4 %
60 - 64	4 849	2,1 %
65 - 69	3 922	1,7 %
70 - 74	2 549	1,1 %
75 - 79	1 731	0,7 %
80 - 84	1 117	0,5 %
85 - 89	599	0,3 %
90 - 94	183	0,1 %
95 - 99	47	0,0 %
100 o más	6	0,0 %
Total	235 239	100,0 %

Fuente: elaboración propia, con base en Censo XII de Población y VII de Habitación, 2018 del Instituto Nacional de Estadística (INE).

Los grupos étnicos a los que pertenece la población se pueden observar en la tabla XI, donde el mayor porcentaje lo constituye la etnia maya, en un 89,59 %.

Tabla XI. **Población por grupo étnico en la cuenca**

Grupo étnico	Población Censo 2018	Porcentaje
Maya	210 743	89,59 %
Garífuna	265	0,11 %
Xinka	36	0,02 %
Afrodescendiente/creole/afromestizo	358	0,15 %
Ladina(o)	23 656	10,06 %
Extranjera(o)	180	0,08 %

Fuente: elaboración propia, con base en Censo XII de Población y VII de Habitación, 2018 del Instituto Nacional de Estadística (INE).

En cuanto a la educación, un 72 % de la población es alfabeta. Los datos indican que un 28,38 % de la población no tiene nivel educativo; 41,64 %, nivel primario; 12,14 %, básicos; 9,5 %, diversificado y un 3,33 %, grado de licenciatura.

Tabla XII. **Alfabetismo en la cuenca**

Alfabetismo	Población Censo 2018	Porcentaje
Alfabeta	139 336	72 %
Analfabeta	53 354	28 %

Fuente: elaboración propia, con base en Censo XII de Población y VII de Habitación, 2018 del Instituto Nacional de Estadística (INE).

Tabla XIII. **Nivel educativo en la cuenca**

Nivel educativo	Población Censo 2018	Porcentaje
Ninguno	59 890	28,38 %
Preprimaria	10 096	4,78 %
Primaria, 1-3	39 973	18,94 %
Primaria, 4-5	20 368	9,65 %
Primaria, 6	27 544	13,05 %
Básico	25 620	12,14 %
Diversificado	20 053	9,50 %
Licenciatura	7 024	3,33 %
Maestría y doctorado	470	0,22 %

Fuente: elaboración propia, con base en Censo XII de Población y VII de Habitación, 2018 del Instituto Nacional de Estadística (INE).

2.8.4. Actividades productivas

En la cuenca la actividad productiva predominante es la agrícola, pero también se realizan otras, según se describe más adelante.

Las actividades se dividen principalmente en agrícolas, pecuarias, artesanales, industriales, turismo, comercio y servicio. De las cuales la agrícola, pecuaria y artesanal son de las cuales depende la economía.

En cuanto a las actividades agrícolas la producción de maíz es la que ocupa la mayor parte de la superficie de la cuenca, 39,27 %, y está catalogado como un cultivo anual. Le siguen el café y el cardamomo, ambos cultivos perennes. El maíz es destinado en su mayor parte para consumo interno, el resto de los cultivos se comercializan. También se produce frijol en menor porcentaje, que se destina para autoconsumo.

Tabla XIV. **Clasificación del uso de suelo en la cuenca para SWAT**

Cultivo	Clasificación según el MAGA	Área (km ²)	Área (%)
Maíz	Cultivos anuales	298,5	39,27
Café	Cultivos perennes (café)	8,2	1,08
Cardamomo	Cultivos perennes	5,0	0,65

Fuente: elaboración propia, con base en capa vectorial de uso del suelo 2003, elaborada por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA).

Figura 4. **Cultivo de cardamomo**



Fuente: Fundación Avanti. *Apoyo al Cultivo de Cardamomo, Alta Verapaz.*

<http://foundationavanti.emiweb.es/album-de-fotos/cultivo-de-cardamomo-2.html>. Consulta: 28 de septiembre de 2020.

La producción pecuaria consiste en la crianza de ganado vacuno, aves de corral y ganado porcino.

Figura 5. **Crianza de aves de corral**



Fuente: MAGA Guatemala. *Jóvenes avicultores de #AltaVerapaz.*

<https://twitter.com/MagaGuatemala/status/1245820239138430976/photo/1>. Consulta: 28 de septiembre de 2020.

Las actividades artesanales están relacionadas a la elaboración de tejidos (tejidos típicos de algodón, güipiles, cortes, entre otros.), carpintería y panadería.

Figura 6. **Artesanías**



Fuente: Anónimo. *Alta Verapaz (Cobán).*

altaverapazguatemala.blogspot.com/2014/06/artesantias.html. Consulta: 28 de septiembre de 2020.

El comercio y los servicios son una de las actividades económicas principales, se pueden encontrar comedores, carnicerías, farmacias, tiendas, librerías, ferreterías, agro veterinarias, ventas de ropa y calzado, entre otros.

Figura 7. **Comercios**



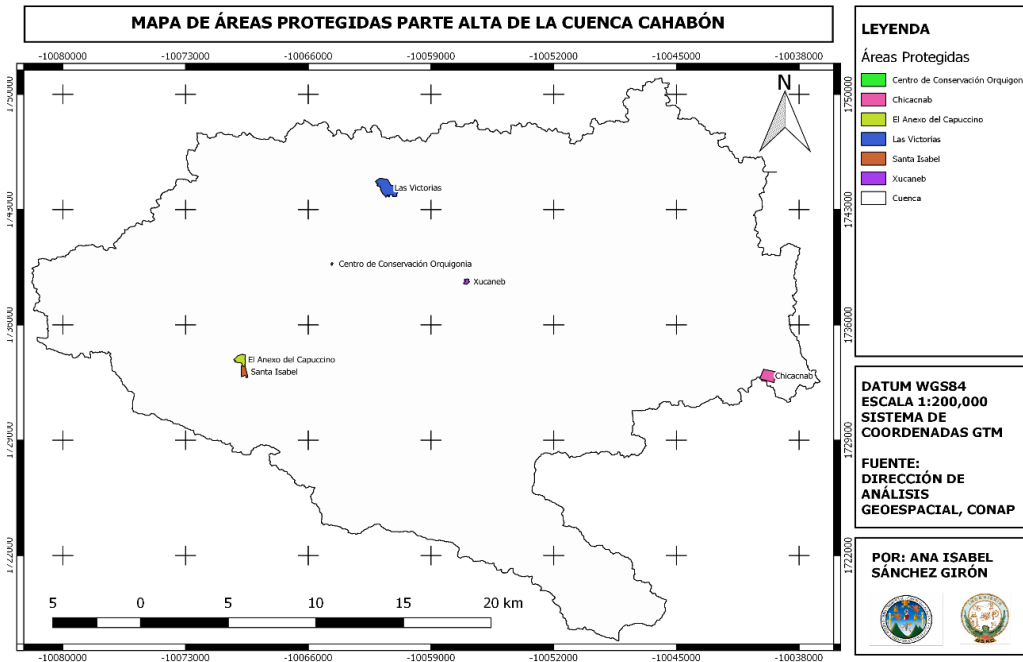
Fuente: CORONADO, Oscar. *En Cobán también hubo filas para adquirir productos en las tiendas.* <https://crnnoticias.com/coban-vive-el-primer-dia-de-toque-de-queda-prolongado/>.

Consulta: 28 de septiembre de 2020.

La industria la conforman fábricas de block, zapatos (Fábrica Cobán, San Cristóbal Alta Verapaz), té (Te chirripeco, Cobán), minerías de yeso, producción de lácteos (Finca Valparaíso, Santa Cruz Verapaz).

El turismo es otra actividad en la cuenca debido a que se cuenta con sitios arqueológicos, balnearios y reservas naturales. Las reservas naturales pertenecientes al sistema guatemalteco de áreas protegidas (SIGAP) se muestran en la figura 8, en total hay 6, de las cuales cinco son reservas naturales privadas (El Anexo del Capuccino, Xucaneb, Centro de Conservación Orquigonía, Santa Isabel y Chicacnab) y uno es un parque nacional (Las Victorias).

Figura 8. Áreas protegidas en la cuenca



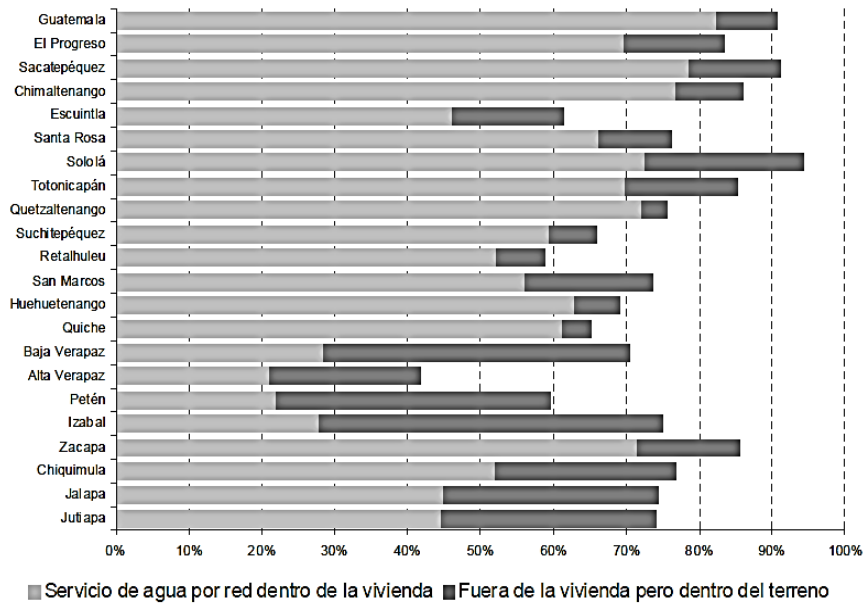
Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

2.8.5. Servicios municipales e infraestructura vial

El servicio de agua potable y drenajes es brindado por la municipalidad, sin embargo, no se cuenta con información documentada sobre la cobertura del servicio a nivel de cuenca. Se realizó el análisis a nivel departamental, ya que Alta Verapaz ocupa la mayor parte de la cuenca.

Respecto a la cobertura del servicio de agua, según la gráfica de la figura 9, esta es menor de 50 %, con el mayor porcentaje de servicio fuera de la vivienda, pero dentro del terreno.

Figura 9. Cobertura de agua por red, 2006



Fuente: Instituto Nacional de Estadística. *Encuesta Nacional de Condiciones de Vida (ENCOVI)*. <https://www.ine.gob.gt/estadisticasine/index.php/usuario/encovi>. Consulta: 20 de septiembre de 2020.

En la tabla XV y XVI, se muestran los datos del Censo 2018 sobre el tipo de servicio sanitario y el tipo de alumbrado por hogares, para cada municipio en la cuenca. Respecto al servicio sanitario solo un 17,51 % de los hogares están conectados a la red de drenaje y el resto, en su mayoría, 67,71 %, tiene letrina o pozo ciego.

Tabla XV. **Tipo de servicio sanitario por municipios en la cuenca**

No	Municipio	Total, de hogares	Inodoro conectado a red de drenajes	Inodoro conectado a fosa séptica	Excusado lavable	Letrina o pozo ciego	No tiene
1	Cobán	43 165	9 365	5 306	2 445	25 609	440
2	Santa Cruz Verapaz	6 066	1 737	923	205	3 110	91
3	San Cristóbal Verapaz	12 172	3 271	797	364	7 608	132
4	Tactic	7 802	5 019	287	151	2 070	275
5	Tamahú	3 614	1 056	143	419	1 873	123
6	San Pedro Carchá	43 589	3 361	1 338	1 531	36 878	481
7	San Juan Chamelco	11 064	1 873	398	497	8 106	190
8	Purulhá	10 874	1 551	191	307	8 423	402
Total		138 346	27 233	9 383	5 919	93 677	2 134

Fuente: elaboración propia, con base en el Censo XII de Población y VII de Habitación, 2018 del Instituto Nacional de Estadística (INE).

El alumbrado por red de energía eléctrica tiene más cobertura que el servicio sanitario; sin embargo, solo lo tienen un 53,97 % de los hogares.

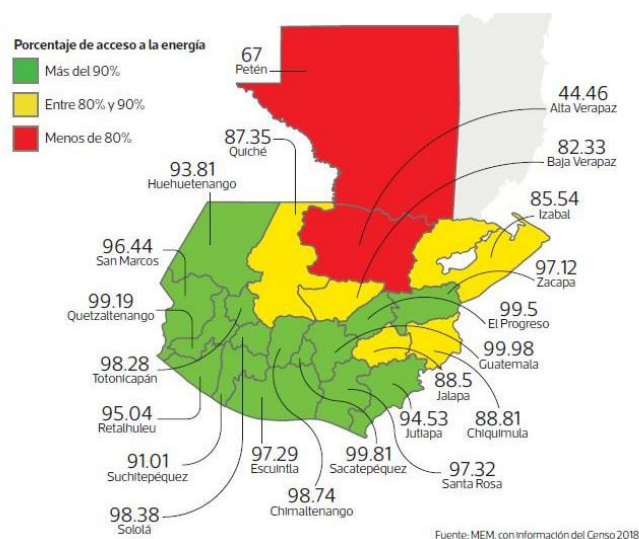
La energía eléctrica es suministrada principalmente por la Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A. (EEGSA); cubre el área urbana completamente, pero en el área rural solo lo tienen algunos poblados. El departamento dónde se encuentra la mayor parte de la cuenca, Alta Verapaz, es el que tiene menor acceso a la energía, con un índice de 44,46 % para el 2018, según muestra la figura 10.

Tabla XVI. Tipo de alumbrado por municipios en la cuenca

No	Municipio	Total, de hogares	Red de energía eléctrica	Panel solar o eólico	Gas corriente	Candela	Otro
1	Cobán	43 165	24 924	8 623	1 731	7 597	290
2	Santa Cruz Verapaz	6 066	4 969	164	133	788	12
3	San Cristóbal Verapaz	12 172	9 216	410	572	1 917	57
4	Tactic	7 802	6 401	230	185	929	57
5	Tamahú	3 614	2 105	278	486	737	8
6	San Pedro Carchá	43 589	16 960	7 717	3 403	15 352	157
7	San Juan Chamelco	11 064	5 901	1 303	499	3 326	35
8	Purulhá	10 874	4 189	2 275	1 488	2 106	816
	Total	138 346	74 665	21 000	8 497	32 752	1 432

Fuente: elaboración propia, con base en el Censo XII de Población y VII de Habitación, 2018 del Instituto Nacional de Estadística (INE).

Figura 10. Índice de acceso a la energía en el país



Fuente: BOLAÑOS, Rosa. *Brechas de conexión eléctrica en el país.*

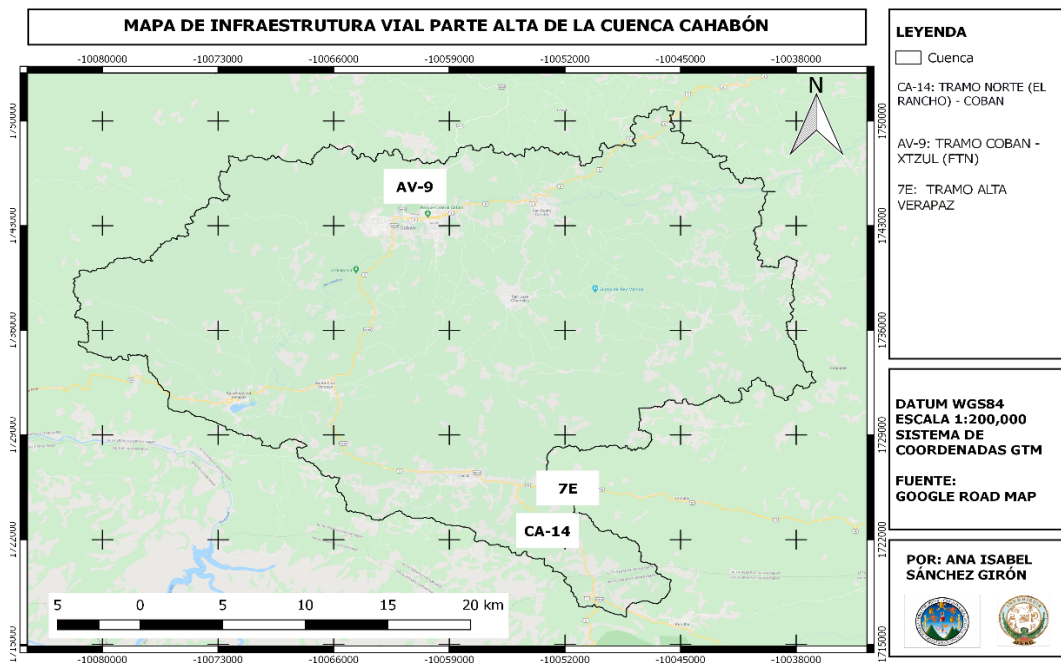
<https://www.prensalibre.com/economia/estos-son-los-tres-departamentos-del-pais-a-los-que-eegsa-ampliara-su-cobertura/>. Consulta: 28 de septiembre de 2020.

No se cuenta con un sitio adecuado para la disposición de la basura y desechos, relleno sanitario; solo existen basureros municipales y clandestinos.

Sobre la cobertura del servicio de salud, solo existe un hospital nacional, ubicado en el municipio de Cobán, y junto con él, la escuela de enfermería, ambos pertenecientes al Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS). Se cuenta con una delegación departamental del IGSS en Alta Verapaz. Existen centros de salud que brindan atención general, pero son escasos y no están identificados.

La infraestructura vial en la cuenca está dividida, principalmente, por la ruta centroamericana CA-14, la nacional 7E y la departamental AV-9.

Figura 11. **Infraestructura vial principal en la cuenca**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

2.8.6. Hidroeléctricas

En la cuenca, están ubicadas dos hidroeléctricas: RENACE y CHICHAIC. Las hidroeléctricas son relevantes por ser una forma de generación de energía renovable. En la tabla XVII, se especifica la ubicación de cada una de ellas.

Tabla XVII. **Hidroeléctricas en la cuenca**

Nombre	Propietario	Tipo	Departamento	Municipio	Coordenadas	
					Longitud	Latitud
CHICHAIC	EGEE del INDE	Presa hidroeléctrica	Alta Verapaz	Cobán	90° 24' 40,87" W	15° 26' 37,19" N
RENACE	Recursos Naturales y Celulosas, S.A.	Presa hidroeléctrica	Alta Verapaz	San Pedro Carchá	90° 14' 11,43" W	15° 29' 22,65" N

Fuente: elaboración propia, con datos de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

La Hidroeléctrica RENACE inició operaciones en julio de 2012; se ubica en el Municipio de San Pedro Carchá, Alta Verapaz y funciona con un embalse de regulación diaria, esto, con el fin de poder cubrir las horas de mayor demanda (18:00-22:00 horas). Los datos técnicos se describen en la tabla XVIII.

Tabla XVIII. **Información técnica Hidroeléctrica RENACE**

Caída bruta (m)	210
Crecida centenaria (m³/s)	750
Crecida milenaria (m³/s)	1 200
Caudal a turbinar (m³/s)	34,50
Tipo de turbina	Francis
Potencia total placa (MW)	68,100
Potencia efectiva (MW)	66,532
Fecha de entrada a operación	marzo de 2004
Tipo de presa	Derivación de caudal
Uso de la presa/embalse	Derivación de caudal
Altura de presa (m)	7,5
Volumen almacenado de agua (m³)	120 000
Altitud de la corona (msnm)	1 205,1
Altitud de río aguas abajo (msnm)	1 200,85
Longitud de corona (m)	26,85

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *RENACE*.

http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=686. Consulta: 28 de septiembre de 2020.

Figura 12. **Presa RENACE**



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *RENACE*.

http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=686. Consulta: 28 de septiembre de 2020.

Figura 13. **Presa RENACE**



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *RENACE*.
http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=686. Consulta: 28 de septiembre de 2020.

La Hidroeléctrica CHICHAIC inició operaciones en julio de 1979; se ubica en el Municipio de Cobán, Alta Verapaz, y funciona con un embalse de regulación diaria. Los datos técnicos se describen en la tabla XIX.

Tabla XIX. **Información técnica Hidroeléctrica CHICHAIC**

Caída bruta (m)	25
Crecida centenaria (m³/s)	98
Crecida milenaria (m³/s)	135
Caudal a turbinar (m³/s)	4,2
Tipo de turbina	Francis eje horizontal
Potencia total placa (MW)	0,6
Potencia efectiva (MW)	0,456
Fecha de entrada a operación	Julio de 1979
Tipo de presa	Concreto estructural – gravedad
Uso de la presa/embalse	Embalse regulación diaria
Altura de presa (m)	5
Volumen almacenado de agua (m³)	36 000
Altitud de la corona (msnm)	1 000,75
Altitud de río aguas abajo (msnm)	999,75
Longitud de corona (m)	40

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *CHICHAIC*.

http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=630. Consulta: 28 de septiembre de 2020.

Figura 14. **Presa CHICHAIC**



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *CHICHAIC*.

http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=630. Consulta: 28 de septiembre de 2020.

2.8.7. Caracterización hidrológica

Dado que el comportamiento hidrológico de una cuenca depende de la precipitación para producir escurrimiento, es necesario conocer los aspectos que condicionan esa respuesta, en este caso, las características morfométricas, determinadas a través de los parámetros que se indican en la tabla XX.

Tabla XX. **Parámetros morfométricos**

	Parámetros de forma	Parámetros de relieve	Parámetros de drenaje
1	Área	Pendiente media del cauce principal	Orden de los cauces
2	Perímetro	Pendiente media de la cuenca	Relación de longitud
3	Longitud de cauce principal	Curva hipsométrica	Relación de bifurcación
4	Factor de forma	Histograma de frecuencias altimétricas	Densidad de cauces
5	Coefficiente de compacidad	Elevación media	Densidad de drenaje

Fuente: elaboración propia.

Estos parámetros pueden ser obtenidos y modelados mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Tabla XXI. **Parámetros morfométricos de forma**

Área	760 km ²
Perímetro	243,66 km
Longitud de cauce principal	72,48 km
Factor de forma	0,14
Coefficiente de compacidad	2,49

Fuente: elaboración propia.

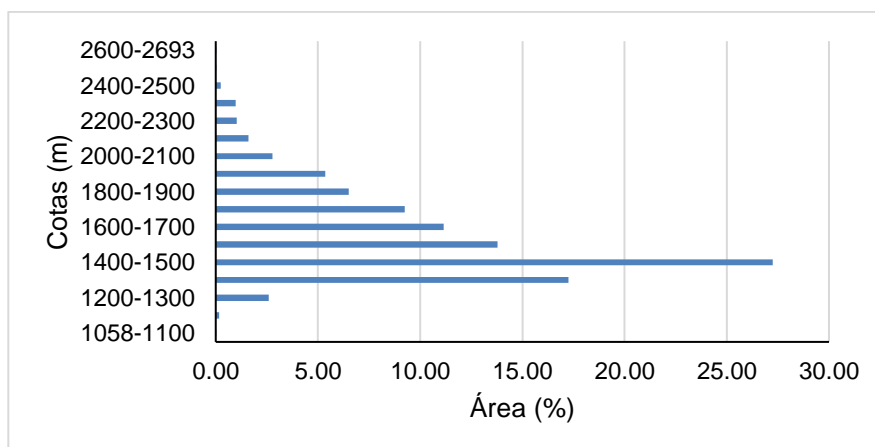
La parte alta de la cuenca Cahabón tiene una superficie delimitada por la divisoria de aguas de 760 km², que la clasifica como una cuenca intermedia-grande. La longitud que recorre la divisoria de aguas es de 243,66 km; y la distancia horizontal, desde el punto de control hasta otro punto aguas arriba, es de 72,05 km. La cuenca tiene un factor de forma bajo de 0,15, menor a la unidad, lo que indica que esta es poco achatada y alargada y estará, por lo tanto, menos sujeta a crecientes. El coeficiente de compacidad de 0,73, se clasifica en la categoría III, con una forma oval-oblonga; y por ser mayor a la unidad, indica la poca tendencia de la cuenca a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento.

Tabla XXII. **Parámetros morfométricos de relieve**

Pendiente media del cauce principal	0,01
Pendiente media de la cuenca	0,13
Elevación media	1 591,4 m

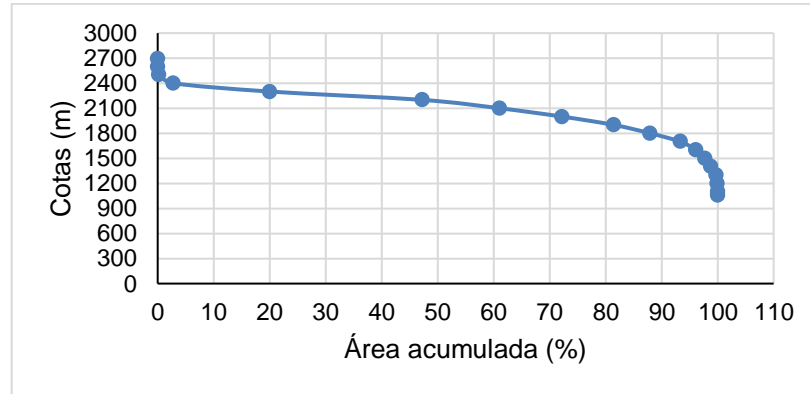
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Histograma de frecuencias altimétricas**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Curva hipsométrica**



Fuente: elaboración propia.

La pendiente media de la cuenca es de 13 %, lo que indica que el relieve es accidentado. Para el cauce principal, la pendiente media es de 0,01. Los valores corresponden a un terreno accidentado, lo que indica una duración promedio de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes del cauce principal. La altura media, 1 591,4 Km, indica el equivalente al 50 % del área de la cuenca. Con base en el análisis hipsométrico, se observa que la cuenca tiene una tendencia de una curva en su etapa de madurez, esto refleja que se encuentra en equilibrio. El histograma indica el porcentaje de área comprendida entre las cotas a cada 100 m en la cuenca.

Tabla XXIII. **Características de la red de drenaje**

Orden	Longitud (km)	Cantidad
1	185	74
2	93,97	37
3	30,84	12
4	27,19	15
5	14,26	9

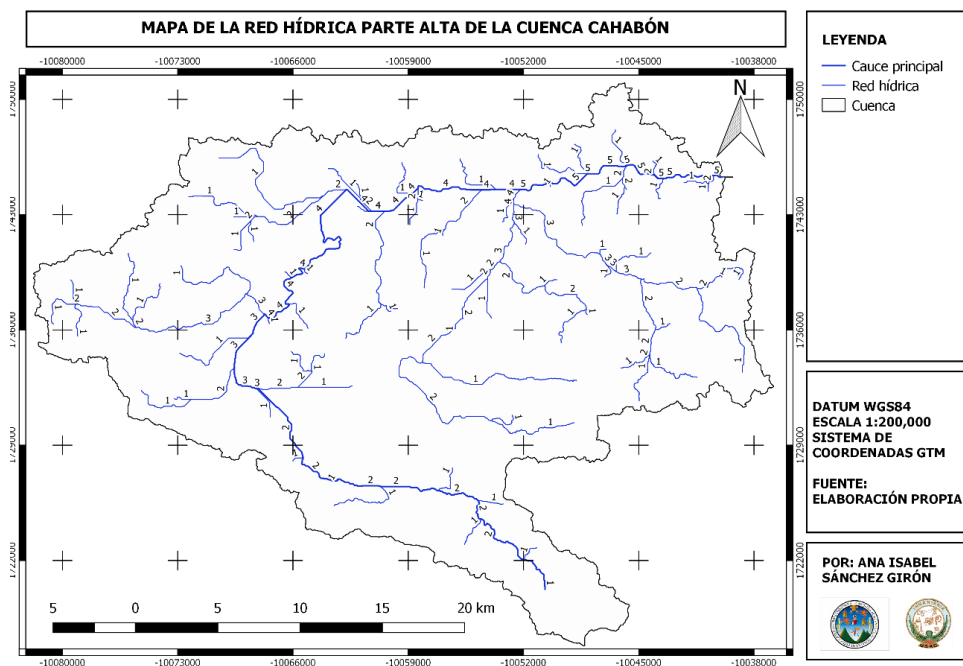
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Parámetros morfométricos de drenaje**

Orden de los cauces	5
Relación de longitud	0,90
Relación de bifurcación	1,89
Densidad de cauces	0,19
Densidad de drenaje	0,46

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Red hídrica en la cuenca**



Fuente: elaboración propia.

La cuenca tiene 74 cauces de primer orden; 37, de segundo; 12, de tercer orden; 15, de cuarto y 9, de quinto. El cauce principal es de 9. La relación de bifurcación de 1,89 indica que en la cuenca las estructuras geológicas no

distorsionan el modelo de drenaje. La densidad de drenaje de 0,46 es un valor muy bajo, es decir que esta región es de alta resistencia a la erosión, a pesar de que, por tratarse de una cuenca en madurez, es muy permeable y de bajo relieve. La frecuencia de cauces de 0,19 establece el número de cauces por km². Este valor, que es bajo, indica que hay poca posibilidad que una gota de agua encuentre cauce en un tiempo menor. La relación entre las longitudes promedio de cauces de órdenes sucesivos es de 0,90.

2.8.8. Caracterización biofísica

La caracterización biofísica en una cuenca permite conocer los elementos bióticos, abióticos y fisiográficos que se interrelacionan en un medio natural. Los componentes biofísicos son igual de importantes que los recursos hídricos en la caracterización de una cuenca, porque son aspectos que influyen en la respuesta hidrológica.

2.8.8.1. Fisiografía

La fisiografía organiza y describe las geoformas con apoyo de la interpretación de imágenes aéreas y otras imágenes de sensores remotos, de acuerdo con las condiciones climáticas del lugar y las características litológicas o por su edad, además de atributos secundarios de carácter morfométrico (pendientes, erosión, pedregosidad y drenaje).²⁹

En Guatemala, la fisiografía es clasificada en 11 grandes regiones. A continuación, se describen las ocupadas por la parte alta de la cuenca Cahabón, con información publicada por la Secretaría General de Planificación

²⁹ VILLOTA, Hugo. *Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras*. p. 3.

y Programación de la Presidencia (SEGEPLAN) del Mapa de Fisiografía y Geomorfología.

- Tierras altas cristalinas: región ubicada entre dos sistemas de fallas en constante evolución. El patrón de drenaje está controlado por las fallas existentes, lo cual caracteriza los cursos de los ríos Cuilco, Chixoy y Motagua. Esta zona forma parte de los sistemas de cordilleras, que se desarrollan desde Chiapas en México, hasta las islas del Golfo de Honduras.³⁰
- Tierras altas sedimentarias: es la región más extensa del país; definida al norte por la cuenca de Petén, y al sur por la fallas y contactos que la separan, en parte dominante, de las tierras altas cristalinas. De este a oeste, se extiende desde la frontera de México, en el oeste, hasta las montañas del Mico, en el este. Dentro de la región, hay una gran variedad de formas de la tierra, como el complejo localizado al norte de la sierra de Chamá, cuyos pliegues, fallas y procesos erosivos han creado un paisaje de colinas paralelas, topografía kártica, anticlinales y sinclinales sumergidos. La sierra de los Cuchumatanes, en su parte sur con gran número de fallas abruptas, domina la parte occidental de la región; mientras en Cobán, se muestran ejemplos clásicos de sumideros (siguanes) y cavernas de piedra caliza. Las elevaciones en la región van desde el nivel del mar hasta 3,700 metros en los Cuchumatanes.³¹

³⁰ Secretaría General de Planificación y Programación de la Presidencia. *Proyecto MAGA-ESPRED-ETIE, Mapa de Fisiografía y Geomorfología*. http://ide.segeplan.gob.gt/tablas/tablas_municipal/pdfs/04_Tablas_Chimaltenango/tabla_43_04.pdf.

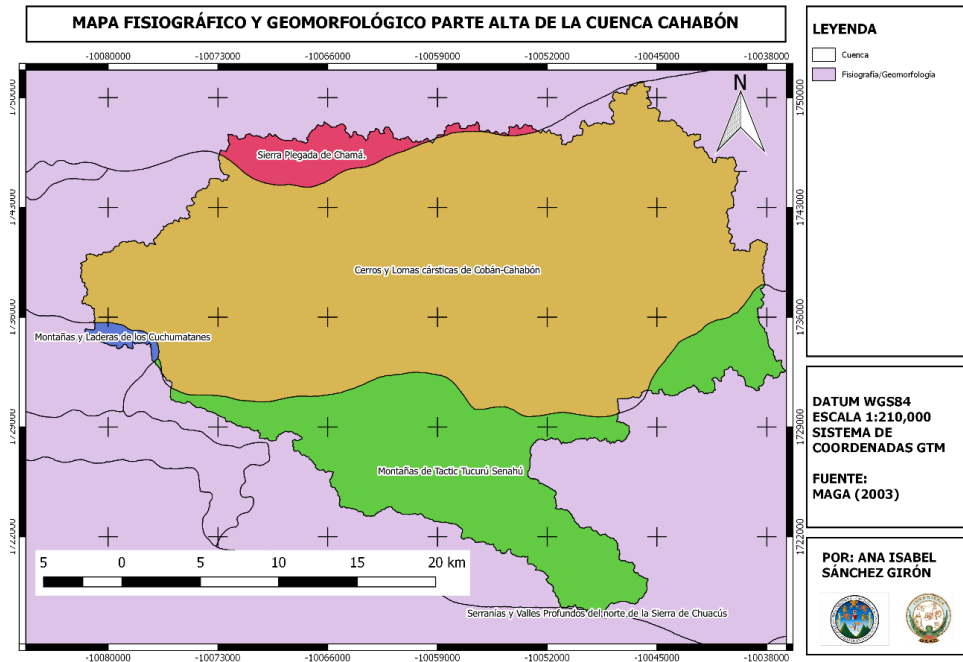
³¹ Secretaría General de Planificación y Programación de la Presidencia. *Proyecto MAGA-ESPRED-ETIE, Mapa de Fisiografía y Geomorfología*. http://ide.segeplan.gob.gt/tablas/tablas_municipal/pdfs/17_Tablas_Peten/tabla_43_17.pdf.

Tabla XXV. **Características fisiográficas y geomorfológicas de la cuenca**

Geoforma	Ubicación	Tipo de roca	Fisiografía
Sierra Plegada de Chamá.	Constituye el eje central norte del país, desde el occidente en Huehuetenango hasta el norte de Izabal, pasando por Quiché y Alta Verapaz.	Carbonatos de las formaciones Ixcoy, Cobán y Campur, dominan las calizas y, en menor grado, las dolomías, algunas intercalaciones de lutitas, limonitas y brechas calcáreas, en la formación de Cobán se encuentran capas de Anhidrita	Tierras altas sedimentarias
Cerros y lomas cársticas de Cobán-Cahabón	Esta unidad se extiende de Cobán a San Cristóbal Verapaz, abarca principalmente el municipio de Cahabón, en Alta Verapaz	Carbonatos, principalmente: calizas, dolomías y evaporitas (anhidrita) de la formación Cobán.	
Montañas de Tactic, Tukurú, Senahú	Se extiende desde Tactic hacia el norte de Purulhá, Tukurú y Senahú, en Alta Verapaz.	Rocas del grupo Santa Rosa (latuitas, areniscas, conglomerados y filitas) carbonatos de la formación Chocal, rocas clásticas (formación Todo Santos); carbonatos y rocas metamórficas del grupo Chuacús y algunas rocas plutónicas.	
Montañas y Laderas de los Cuchumatanes	Eje occidental del país, desde el Noroeste en el departamento de Huehuetenango, en la frontera con México hasta el Noroeste de Uspantán en el departamento de Quiché	Graníticas prepérmicas que afloran en el río Rancho Viejo, rocas sedimentarias, rocas clásticas, calizas y dolomías y, en algunas partes, detríticas carbonatadas	
Serranías y Valles Profundos del norte de la Sierra de Chuacús	De la parte norte de la Sierra de Chuacús, que va desde Cunén en Quiché hasta llegar a Purulhá en Baja Verapaz	Peridotita, Serpentiinita, rocas sedimentarias clásticas de las distintas formaciones, así como carbonatos de la formación Cobán.	Tierras Altas Cristalinas

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Fisiografía y geomorfología en la cuenca**



Fuente: elaboración propia.

2.8.8.2. Geología

La geología se refiere al origen, procesos, formación o cambios en el suelo. Para el estudio geológico de una cuenca, las rocas se clasifican, según cómo se han formado, en tres grandes grupos:

- Rocas sedimentarias: formadas por procesos de diagénesis (compactación y cementación) de los sedimentos, materiales procedentes de la alteración en superficie de otras rocas que, posteriormente, son transportados y depositados por el agua, el hielo y el viento.

- Rocas ígneas: se originan por el enfriamiento y solidificación de un magma, material formado a gran profundidad y constituido por rocas fundidas, fragmentos sin fundir y gases.
- Rocas metamórficas: se originan por la transformación de cualquier tipo de roca en el interior terrestre, debido a las altas presiones y temperaturas.

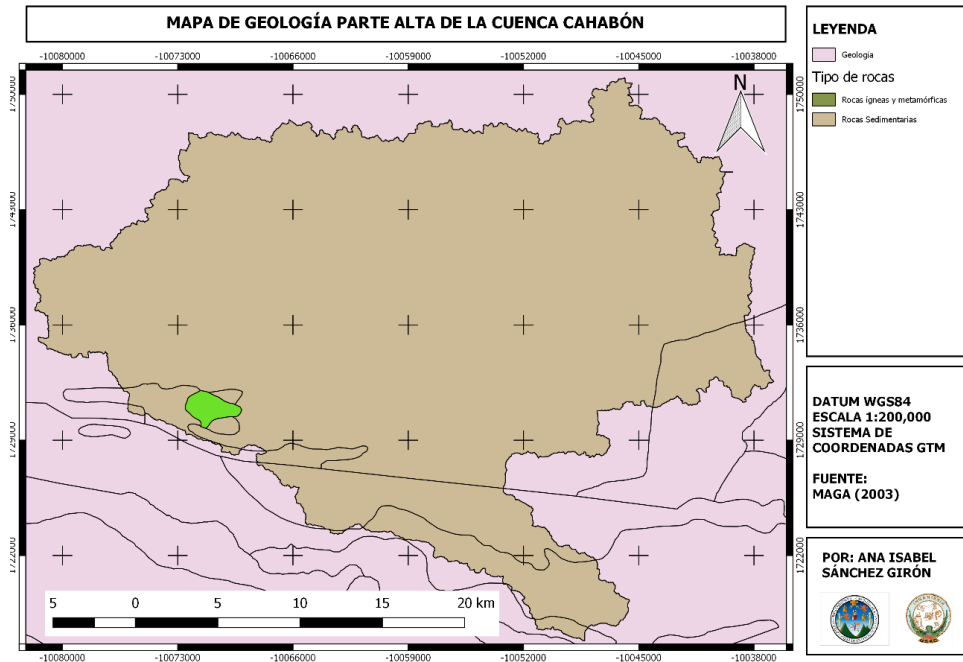
Tabla XXVI. **Características geológicas de la cuenca**

Tipo de roca	Periodo	Características
Rocas sedimentarias	Cretácico	Carbonatos neocomiano-camapanianos. Incluye Cobán, Ixcoy, Campur, Sierra Madre y grupo Yojoa
	Pérmico	Formación Chóchal (carbonatos)
	Jurásico-cretácico	Formación Todos Santos, jurásico superior-neocomiano (capas rojas). Incluye formación San Ricardo
	Carbonífero-pérmico	Grupo Santa Rosa (lutitas, areniscas, conglomerados y filitas). Formaciones Santa Rosa, Sacapulas, Tactic y Macal
Rocas ígneas y metamórficas	Cuaternario	Rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen diverso

Fuente: elaboración propia.

En la parte alta de la cuenca Cahabón, se encuentran los tres tipos de rocas, pero predominan las rocas sedimentarias. En la tabla XXVI, se definen las características y el periodo de cada tipo de roca.

Figura 19. Geología en la cuenca



Fuente: elaboración propia.

2.8.8.3. Suelos

El suelo es la capa superior de la corteza terrestre, situada entre el lecho rocoso y la superficie, compuesta por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos. Constituye la interfaz entre la tierra, el aire y el agua.

Para la clasificación de los suelos, se utiliza la clase textural, que se refiere a “la proporción relativa de las clases de tamaño de partícula (o

separaciones de suelo, o fracciones) en un volumen de suelo dado".³² Para cada tamaño de partícula, se le asigna un nombre, según el sistema utilizado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

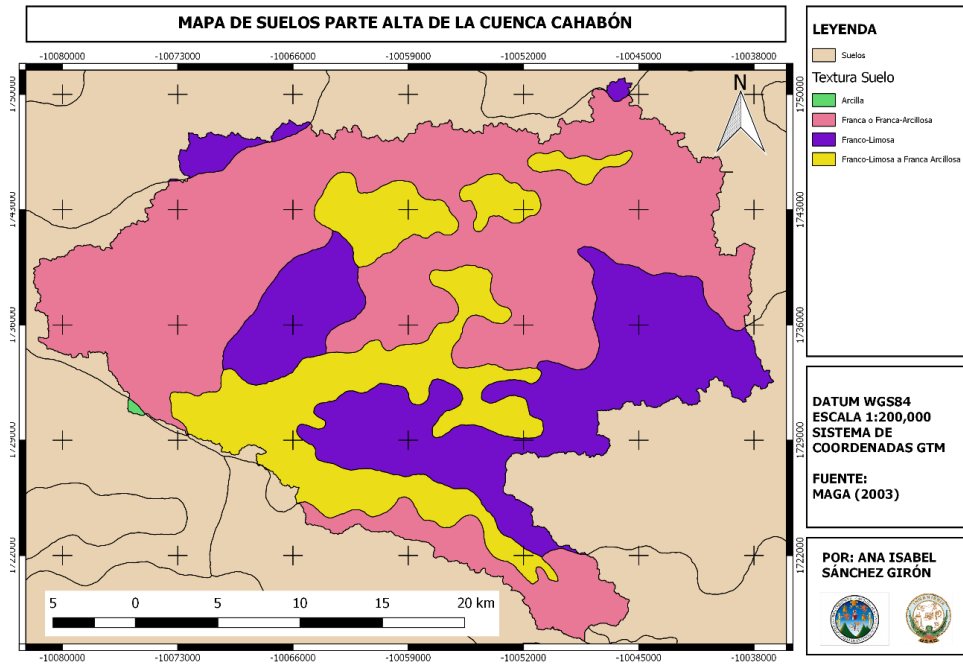
Tabla XXVII. **Clases texturales de los suelos**

Nombres comunes de los suelos (textura general)	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase textural
Suelos arenosos (textura gruesa)	86-100	0-14	0-10	Arenoso
	70-86	0-30	0-15	Franco arenoso
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso
Suelos francos (textura mediana)	23-52	28-50	7-27	Franco
	20-50	74-88	0-27	Franco limoso
	0-20	88-100	0-12	Limoso
Suelos francos (textura moderadamente fina)	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso
	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso
	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso
Suelos arcillosos (textura fina)	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso
	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso
	0-45	0-40	40-100	Arcilloso

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *Textura del suelo*. http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm. Consulta: 21 de abril de 2019.

³² Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *Guía para la descripción de suelos*. p. 26.

Figura 20. Suelos en la cuenca



Fuente: elaboración propia.

En la parte alta de la cuenca Cahabón, se encuentran cuatro clases texturales de suelo, pero predomina el suelo de textura franca o franca-arcillosa. En la tabla XXVIII, se definen las características y el periodo de cada tipo de roca.

Tabla XXVIII. **Clases texturales de los suelos en la cuenca**

Textura	Clase de drenaje	Coloración superficial
Arcilla	Drenaje excesivo	Café grisáceo muy oscuro
Franco-limosa	Buen drenaje	Café muy oscuro
Franco-limosa a franca arcillosa	Buen drenaje	Café muy oscuro
Franca o franca-arcillosa	Buen drenaje	Café muy oscuro

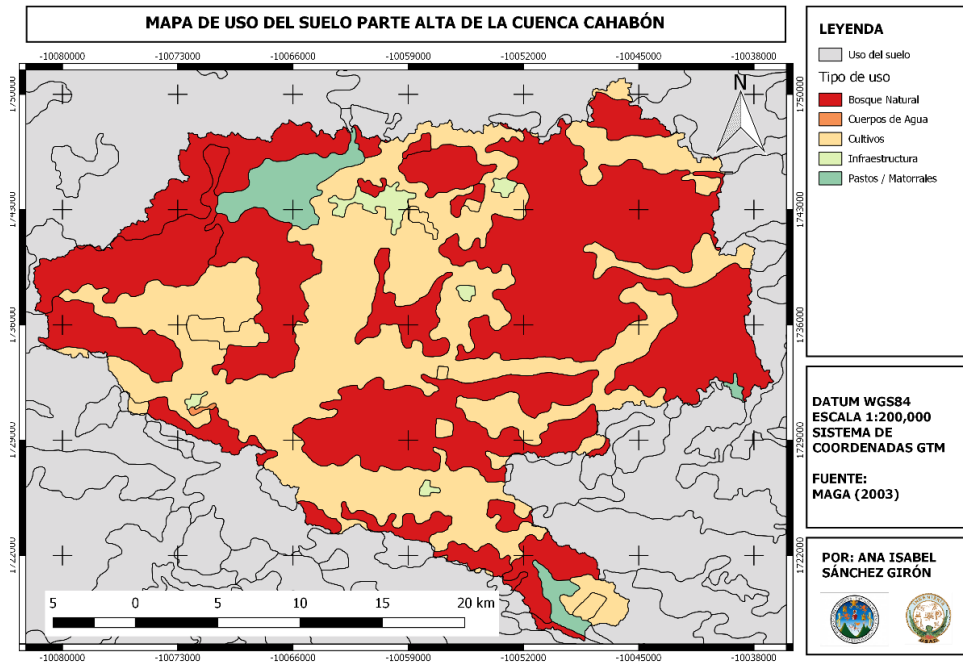
Fuente: elaboración propia.

2.8.8.4. Uso de la tierra

El uso de la tierra se refiere a la destinación asignada al suelo, de conformidad con las actividades que se puedan desarrollar. En la parte alta de la cuenca Cahabón, según el mapa de la figura 21, el uso de la tierra se clasifica en cinco grupos principalmente:

- Bosque natural: ocupa un 54,44 % de la cuenca.
- Cuerpos de agua: ocupan un 0,06 % de la cuenca.
- Cultivos: ocupan un 41 % de la cuenca.
- Infraestructura: ocupa un 1,12 % de la cuenca.
- Pastos/matorrales: ocupa un 3,37 % de la cuenca.

Figura 21. **Uso del suelo en la cuenca**



Fuente: elaboración propia.

2.8.9. Caracterización climática

La caracterización climática en una cuenca comprende el análisis de los elementos climáticos.

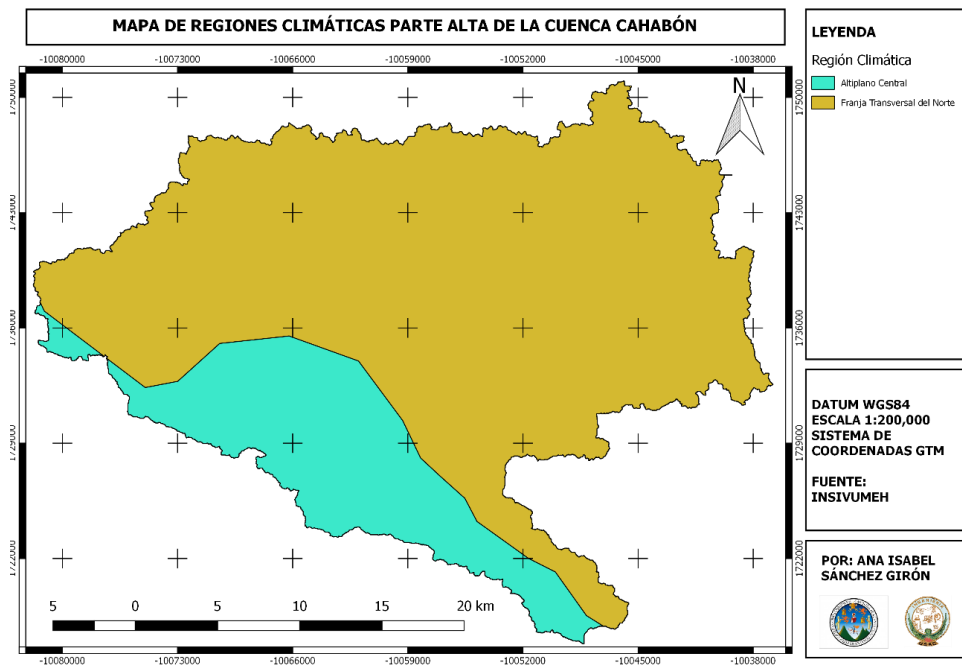
El país climáticamente se divide en 6 regiones, de las cuales la parte alta de la cuenca Cahabón comprende la región del Altiplano Central y la Franja Transversal del Norte.

La Franja Transversal del Norte es la predominante y se caracteriza por ser muy lluviosa; los registros más altos son de junio a octubre. La temperatura desciende conforme aumenta la elevación. El clima es de género cálido, con

invierno benigno cálido, sin estación seca bien definida y semicálidos, con invierno benigno. La vegetación característica es de selva a bosque.

En la región del Altiplano Central, las lluvias no son tan intensas, los registros más altos se obtienen de mayo a octubre; el resto de los meses puede haber déficit. Se registran los valores más bajos de temperatura del país. El clima varía de templado a semifrío, con invierno benigno a semicálidos con invierno benigno, de carácter húmedo y semiseco con invierno seco.

Figura 22. **Regiones climáticas en la cuenca**

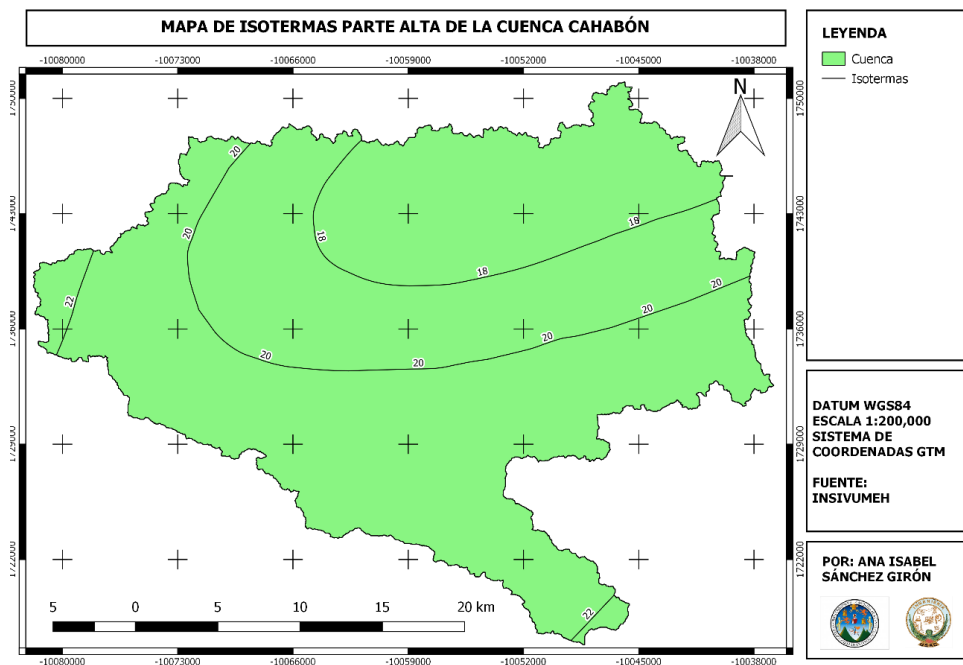


Fuente: elaboración propia.

2.8.9.1. Temperatura

La temperatura en la parte alta de la cuenca Cahabón se analizó a través del mapa de isotermas de la figura 23, que muestra los puntos del territorio que tienen igual temperatura. El mapa muestra que las temperaturas medias anuales más altas se encuentran por encima de 22 °C. La distribución de las isotermas en la cuenca va de los 18 °C a los 22 °C.

Figura 23. Isotermas en la cuenca



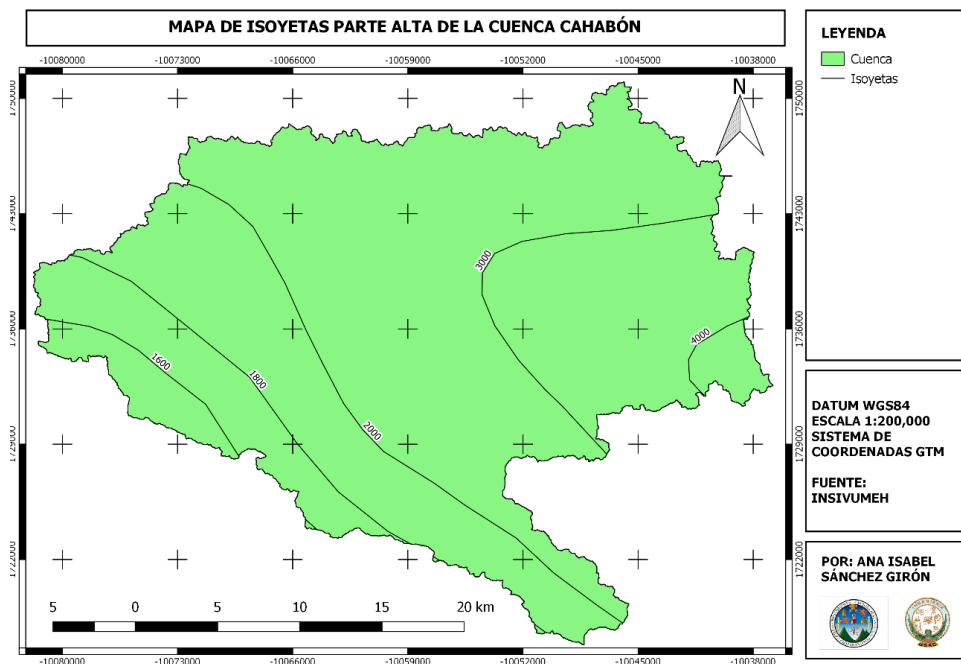
Fuente: elaboración propia.

2.8.9.2. Precipitación

La precipitación en la parte alta de la cuenca Cahabón se analizó a través del mapa de isoyetas de la figura 24, que muestra los puntos del territorio que

tienen igual precipitación. El mapa muestra que la precipitación media anual más alta se encuentra por encima de los 4 000 milímetros de lluvia. La distribución de las isoyetas en la cuenca va de los 1 600 a los 4 000 mm.

Figura 24. Isoyetas en la cuenca



Fuente: elaboración propia.

Generalmente, los registros de las estaciones meteorológicas tienen datos faltantes; estos vacíos en las series de datos son frecuentes por errores del observador o falta de equipo al momento de la medición.

Para estimarlos, en el caso de la precipitación, se puede utilizar el método de proporción normal; en caso de no poder aplicarlo, se pueden rellenar los datos con información satelital de CHIRPS.

2.8.9.3. Proporción normal

El método de proporción normal se utiliza para estimar el dato de precipitación faltante de una estación, al hacer una ponderación de las precipitaciones de al menos tres estaciones próximas a la estación que está siendo evaluada.

$$P_x = \frac{N_x}{n} \left[\frac{P_1}{N_1} + \frac{P_2}{N_2} + \frac{P_3}{N_3} \right] \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Donde:

P_x = precipitación faltante de la estación evaluada (mm)

N_x = precipitación normal anual de la estación evaluada (mm)

n = número de estaciones

P_1 = precipitación para el mes y año de la estación próxima 1 (mm)

N_1 = precipitación normal anual de la estación próxima 1 (mm)

P_2 = precipitación para el mes y año de la estación próxima 2 (mm)

N_2 = precipitación normal anual de la estación próxima 2 (mm)

P_3 = precipitación para el mes y año de la estación próxima 3 (mm)

N_3 = precipitación normal anual de la estación próxima 3 (mm)

2.8.9.4. CHIRPS

El Grupo de datos de Estaciones de Amenazas Climáticas y Precipitaciones Infrarrojas (CHIRPS, por sus siglas en inglés) “es un conjunto de datos de precipitaciones cuasi-globales de más de 35 años. Abarcando 50° S-50° N (y todas las longitudes) y que van desde 1981 hasta casi el presente...”.³³

³³ University of California, Santa Barbara. *CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations*. <https://www.chc.ucsb.edu/data/CHIRPS>.

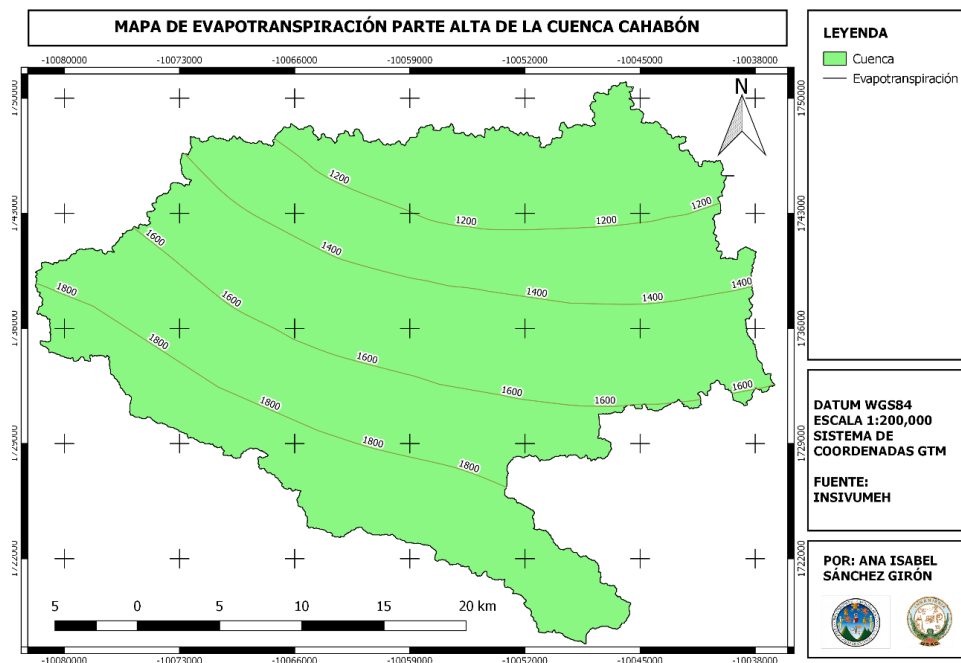
Los datos estimados por CHIRPS incorporan datos de las estaciones meteorológicas presentes y de imágenes satelitales de la NASA y la NOAA; esto, con el fin de reducir el sesgo de los datos.

2.8.9.5. Evapotranspiración

Integra los fenómenos de evaporación a través y desde la superficie del suelo y de la transpiración de las plantas.

En la cuenca, la evapotranspiración potencial media anual se observa en el mapa de la figura 25. Los valores oscilan entre los 1 200 y los 1 800 mm.

Figura 25. Evapotranspiración en la cuenca



Fuente: elaboración propia.

Para los cultivos, es primordial conocer la evapotranspiración para determinar los requerimientos de agua del cultivo. La evapotranspiración de los cultivos se puede estimar por varios métodos, el más conocido es el de Blaney-Cridle.

2.8.9.6. Método de Blaney-Cridle

El método de Blaney-Cridle es un método teórico para estimar la evapotranspiración o necesidad de agua de un cultivo de referencia.

La necesidad de agua del cultivo se define como “la profundidad (o cantidad) de agua necesaria para cubrir la pérdida de agua por evapotranspiración. En otras palabras, es la cantidad de agua que necesitan los distintos cultivos para crecer de manera óptima.”³⁴

La evapotranspiración por medio del método de Blaney-Cridle es dada por la ecuación 3:

$$ET_o = p(0,46T_{mean} + 8) \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Donde:

ET_o = evapotranspiración potencial de referencia para el cultivo (mm/día).

T_{mean} = temperatura promedio diario (°C).

p = porcentaje diario medio de horas anuales para la latitud de la estación (valor que se interpola en la tabla del anexo 1).

³⁴ Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. *CHAPTER 3: CROP WATER NEEDS*. <http://www.fao.org/3/s2022e/s2022e07.htm>.

La demanda del cultivo se determina con la ecuación 4, que relaciona la evapotranspiración potencial con el factor de cultivo (K_c) y el número de días del mes:

$$ET_{crop} = ET_o * K_c * d \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde:

ET_{crop} = evapotranspiración del cultivo o necesidad de agua del cultivo para el mes (mm/mes).

ET_o = evapotranspiración potencial de referencia para la superficie de cultivo para el mes (mm/día).

K_c = factor de cultivo (anexo 2 y 3).

d = número de días para el mes.

2.9. Modelo hidrológico

Un modelo hidrológico es una representación del sistema hidrológico. El sistema hidrológico es representado como un sistema, debido a su complejidad en las diferentes fases del ciclo hidrológico: agua superficial, atmosférica y subterránea, con sus respectivos componentes. Como sistema, el ciclo hidrológico se considera un todo con sus diferentes componentes, donde sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables, y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas del sistema.

Estos modelos pueden clasificarse, según sus características, de acuerdo con la conceptualización de los procesos básicos: empíricos, conceptuales o basados en procesos; la naturaleza de los algoritmos básicos: determinísticos o estocásticos y la representación espacial; agrupados o distribuidos.

2.9.1. Modelos conceptuales

También conocidos como empíricos o de caja negra. Se definen como “representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales”.³⁵

2.9.2. Modelos de naturaleza algorítmica básica

Estos modelos utilizan ecuaciones donde las variables representan el proceso de entradas y salidas, y sus intermedios. Se dice que cuando una de estas variables es aleatoria el modelo es denominado estocástico; en este, las salidas son independientes del tiempo y del espacio, por eso es poco preciso. Caso contrario si todas las variables de la ecuación son no aleatorias, el modelo es clasificado como determinístico, lo que quiere decir que hace una relación de la causa y efecto, lo que implica mayor precisión; sin embargo, no muestra un detalle espacial ni temporal.

2.9.3. Modelos de representación espacial

Los modelos de representación espacial “integran las variables de entrada, salida e intermedios, haciendo un análisis detallado de todo el proceso del sistema, incluyendo las propiedades del suelo, los procesos desarrollados en la capa subsuperficial y en la capa subterránea de la cuenca”.³⁶ Entre estos modelos, se encuentran dos categorías:

³⁵ DEPETTRIS, Carlos; RUBERTO, Alejandro. *Modelos Hidrológicos*. p. 3.

³⁶ PAJARITO GRAJALES, Ximena Julieth. *Implementación del modelo hidrológico SWAT, como herramienta para el manejo del recurso hídrico en la unidad hidrológica del río Hacha-Florencia Caquetá*. p. 23.

2.9.4. Modelos agregados

En estos, “el sistema es promediado en el espacio o considerado como un punto único sin dimensiones”.³⁷ Estos modelos son utilizados en cuencas pequeñas, porque se consideran homogéneas en su distribución y características del suelo.

2.9.5. Modelos distribuidos

Se utilizan para cuencas con características variables y heterogéneas, por lo que subdivide la cuenca en unidades de respuesta hidrológica (HRU) homogéneas; se les asigna parámetros que describen las características individuales de clima, suelo y vegetación. “Esto permite el cálculo no sólo de la respuesta de toda la cuenca sino también la respuesta de las subcuencas individuales”.³⁸

Este modelo presenta la desventaja de que requiere de información detallada, y para esto, son necesarias investigaciones de campo que representan un alto costo y cantidad de tiempo, además el modelo es muy complejo.

2.9.6. Modelos semidistribuidos

Este modelo considera que “los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio y define las variables del modelo como funciones de las

³⁷ WEBERA, Juan; DASSOB, Clarita; JORQUER, Eliana. *Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta*. p. 4 016.

³⁸ DEPETTRIS, Carlos; RUBERTO, Alejandro. *Modelos hidrológicos*. p. 5.

dimensiones espaciales”.³⁹ Este modelo también se utiliza para cuencas grandes cuyas características varían, en este caso se subdivide en subcuencas, con el fin de que las condiciones del suelo sean homogéneas. La variabilidad espacial y temporal se representa con los SIG, con datos reales y detallados de la zona de estudio, a través de la utilización de los modelos WEAP, JAMS, SWAT, entre otros.

Presentan la ventaja de una mayor facilidad para la construcción del modelo que el modelo distribuido, y mejor capacidad para representar la variabilidad de una cuenca a comparación de los modelos agrupados.

2.10. Herramienta para la evaluación del suelo y agua (SWAT)

SWAT es un modelo semidistribuido y de dominio público. Fue desarrollado a escala por el Dr. Jeff Arnold para el USDA; diseñado para pronosticar “el impacto de las prácticas de manejo del suelo sobre la hidrología, los sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas, en cuencas grandes y complejas, con variedad de suelos, usos de la tierra y condiciones de manejo a largo tiempo”.⁴⁰

La información que utiliza este modelo como datos de entrada es clima, escorrentía, propiedades de suelos, topografía, vegetación y uso del suelo en la cuenca.

Las características que presenta este modelo respecto de otros es que se puede utilizar para cuencas grandes. Incluye el componente de gestión y

³⁹ WEBERA, Juan; DASSOB, Clarita; JORQUER, Eliana. *Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta*. p. 4 016.

⁴⁰ URIBE, Natalia. *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario, Versión SWAT 2005*. p. 3.

agricultura, introduce procesos simplificados en el río, una interacción de clase media para agua superficial y subterránea; se utiliza como apoyo para la toma de decisiones, es gratuito, multiplataforma, de código abierto y material de apoyo como manual, foro en línea y soporte; además de ser de uso amigable, tiene interfaz con SIG para ingreso de datos y visualización de resultados. La escala temporal puede ser diaria, mensual o anual.

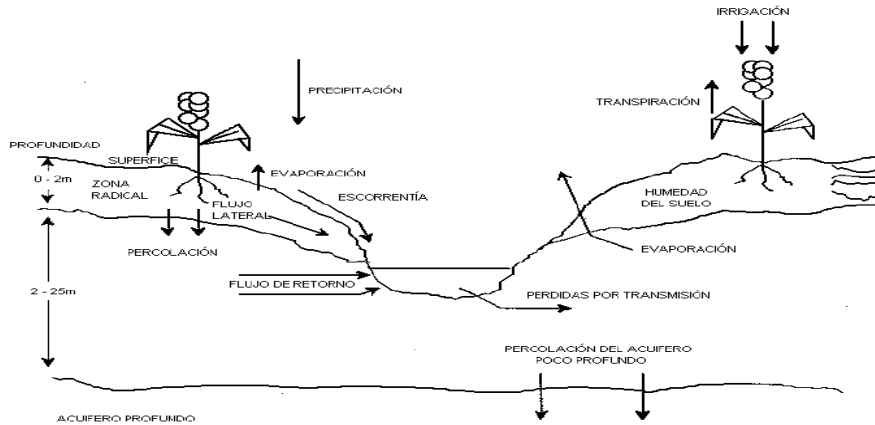
En este modelo, la cuenca se divide espacialmente en subcuencas y estas posteriormente en HRU. Las HRU son unidades homogéneas "...que corresponden a todas las únicas posibles combinaciones de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente".⁴¹ La escorrentía se predice para cada HRU para obtener finalmente la escorrentía total.

La hidrología se divide en dos fases: terrestre y de transporte del ciclo hidrológico (ver figura 26). En la fase terrestre se manejan los aspectos relacionados con la cantidad de agua, sedimentos y pesticidas. Los componentes que se simulan en esta etapa son "el almacenamiento del dosel, la infiltración, redistribución, evapotranspiración, flujo subsuperficial lateral, escorrentía superficial, estanques, canales tributarios y retorno".⁴² En la fase de transporte o de enrutamiento, se llevan a cabo los procesos para el movimiento del agua, sedimentos y pesticidas en la red hídrica hasta los puntos donde se encuentran las estaciones hidrométricas.

⁴¹ URIBE, Natalia. *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario, Versión SWAT 2005*. p. 6.

⁴² LEÓN OCHOA, Ricardo Fernando. *Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático*. p. 6.

Figura 26. Ciclo hidrológico en SWAT



Fuente: URIBE, Natalia. *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario, Versión SWAT 2005.*

p. 7.

En la fase terrestre, el ciclo hidrológico se simula basado en la ecuación del equilibrio del agua, “considerando la zona no saturada y el acuífero superficial por encima de la capa impermeable como una unidad, como se muestra en la ecuación”.⁴³

$$SW_t = SW_o + \sum(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{qw}) \quad [\text{Ecuación 5}]$$

Donde:

SW_t = Contenido final de agua en el suelo (mm H₂O)

SW_o = Contenido inicial de agua del suelo en un día i (mm H₂O)

t = Tiempo (días)

R_{day}: Cantidad de precipitación en un día i (mm H₂O)

Q_{surf} = Cantidad de escorrentía superficial en un día i (mm H₂O)

E_a = Cantidad de evapotranspiración en un día i (mm H₂O)

⁴³ LEÓN OCHOA, Ricardo Fernando. *Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático.* p. 14.

Wseep = Cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i (mm H₂O).

Qqw = Cantidad de flujo de retorno en un día i (mm).

2.11. Parámetros del modelo hidrológico

Los datos de entrada de SWAT, con fin de modelamiento hidrológico, son los que se describen a continuación y se obtienen a través de SIG y registros de estaciones hidrológicas y meteorológicas.

2.11.1. Información meteorológica

Esta información comprende los registros de precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa.

2.11.1.1. Precipitación

SWAT requiere un registro de precipitaciones diaria, cuando se va a utilizar el modelo de curva número para modelar la escorrentía y un mínimo de tres estaciones meteorológicas dentro del área delimitada, para correr el modelo.

Los datos requeridos para ingresar en el modelo son el año, fecha, precipitación diaria en milímetros de lluvia (mm) y elevación (m). Este último dato es utilizado para ajustar la precipitación a la elevación.

2.11.1.2. Temperatura

SWAT requiere un registro de temperatura máxima y mínima diaria. Los datos requeridos para ingresar en el modelo son el año, fecha, temperatura máxima y mínima diaria (°C) y elevación (m). Este último dato es utilizado para ajustar la temperatura a la elevación.

2.11.1.3. Radiación solar

SWAT requiere un registro de los valores de radiación solar diarios. Los datos requeridos para ingresar en el modelo son el año, fecha y la radiación solar diaria (MJ/m²).

2.11.1.4. Velocidad del viento

SWAT requiere un registro de los valores de velocidad del viento. Los datos requeridos para ingresar en el modelo son el año, fecha y la velocidad promedio del viento (m/s).

2.11.1.5. Humedad relativa

SWAT requiere un registro de los valores de la humedad relativa. Los datos requeridos para ingresar en el modelo son el año, fecha y la fracción de humedad relativa (adimensional).

2.11.2. Topografía

Para generar la topografía de la cuenca, se utiliza un DEM que es ingresado al modelo y debe tener un formato grid. El DEM, además, es utilizado

para delimitar la cuenca, subcuencas, la red hídrica del área de estudio y la obtención de las pendientes, así como los parámetros morfométricos.

2.11.3. Uso del suelo

Se utiliza un mapa de uso del suelo para el área de estudio. Estos usos del suelo se deben asociar con el 'tipo de uso del cultivo / suelo'; estos se encuentran bajo la metodología de Corine Land Cover, contenidos en la base de datos del modelo SWAT, ya que esto permite describir las características hidrológicas para cada tipo, debido a la falta de valores establecidos localmente para el parámetro de curva número (CN) del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Es importante mencionar que SWAT calcula el volumen de escorrentía a partir de la CN para cada HRU.

Tabla XXIX. **Uso del suelo según SWAT**

Cobertura	Código SWAT
Mosaico de pastos con espacios naturales	AGRL
Mosaico de cultivos	
Afloramiento rocoso	BARR
Tierras desnudas y degradadas	
Zonas quemadas	
Bosque abierto	FRSE
Bosque de galería y ripario	
Bosque denso	
Bosque fragmentado	FRST
Pastos arbolados	PAST
Pastos en zonas inundables	
Pastos limpios	
Pastos enmalezados	RNGB
Herbazal	
Vegetación secundaria o en transición	

Continuación tabla XXIX.

Aeropuerto	URBN
Red vial, ferroviarias y terrenos asociados	
Tejido urbano continuo	
Tejido urbano discontinuo	
Cuerpos de agua artificiales	WATR
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	
Ríos (5m)	
Zonas arenosas naturales	WETL
Zonas pantanosas	

Fuente: PAJARITO GRAJALES, Ximena. *Implementación del modelo hidrológico SWAT, como herramienta para el manejo del recurso hídrico en la unidad hidrológica del río Hacha-Florencia Caquetá*. p. 58.

2.11.4. Suelo

Los suelos “son un factor determinante para procesos hidrológicos como: escorrentía superficial, infiltración, percolación, flujo lateral subsuperficial, agua disponible para las plantas, entre otros”.⁴⁴ Además, se utilizan para definir los HRU, y también para realizar la mayoría de cálculos hidrológicos que dependen de los parámetros asociados con el tipo de suelo.

Cada clase de suelo debe tener por lo menos información de textura y materia orgánica del perfil del suelo, a fin de poder construir la base de datos que se detalla en la XII. La información de suelos se obtiene de los mapas de

⁴⁴ ARROYO MORALES, Luis; HEIDINGER, Haline; ARAYA MORALES, Eddison José. *Modelo Hidrológico SWAT como Herramienta para Procesos de Toma de Decisión*. p. 8.

suelos, los cuales se deben reclasificar al sistema de clasificación taxonómica de suelo de la FAO/UNESCO (2010), que coincide con la base de datos de propiedades del suelo de SWAT.

2.12. Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo

El análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo se describen en esta sección.

2.12.1. Análisis de sensibilidad

Este análisis se utiliza para identificar y clasificar los parámetros que tienen un impacto significativo en los datos simulados por el modelo, “con la finalidad de limitar el número de parámetros óptimos para el modelo, y asimismo conseguir que el proceso de calibración se vuelva menos complejo y extenso”.⁴⁵ Se realiza a través del software SWAT-CUP.

2.12.2. Calibración

En el proceso de calibración, una vez identificados los parámetros más sensitivos. Se asignan valores a los parámetros de entrada del modelo para generar los caudales simulados. Posteriormente, se compara el caudal observado con el simulado, al utilizar el algoritmo Sequential Uncertainty Fitting 2 (SUFI2), incorporado en el software SWAT-CUP que realiza un análisis gráfico y estadístico, y utiliza los siguientes indicadores: el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), la eficiencia de Kling-Gupta (KGE), el coeficiente de determinación (R²), el sesgo porcentual (PBIAS), la raíz

⁴⁵ LEÓN OCHOA, Ricardo Fernando. *Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático*. p. 50.

cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), y la desviación estándar de las observaciones (RSR).

2.12.3. Indicadores estadísticos

Los indicadores estadísticos se utilizan para evaluar la eficiencia del modelo.

2.12.3.1. Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE)

Se utiliza para determinar el valor de la varianza residual comparado con la varianza de los datos observados. Mientras más se acerca a 1, el modelo es más preciso.

“Busca establecer la eficiencia del modelo para predecir los caudales en comparación con la utilización de la media como predictor de la variable”.⁴⁶ Un coeficiente igual a cero implica que el modelo pronostica los caudales de igual al promedio de los datos; un valor negativo indica que el promedio es mejor pronosticador y uno mayor a cero lo contrario. El coeficiente se calcula según muestra la ecuación 6.

$$NSE = 1 - \sum_{i=1}^N \frac{(Q_{oi} - Q_{si})^2}{(Q_{oi} - \bar{Q})^2} \quad [\text{Ecuación 6}]$$

Donde:

N = número de datos

Q_s = caudal simulado (m^3/s)

Q_o = caudal observado (m^3/s)

⁴⁶ DEL RÍO LA MURA, Pablo Andrés. *Análisis del impacto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca de Pangal en Pangal*. p. 20.

Q = promedio del caudal observado (m³/s)

2.12.3.2. Porcentaje bias (PBIAS)

Mide la tendencia media de los datos simulados para ser mayor o menor que los datos observados. “El valor óptimo de PBIAS es 0, valores cercanos a 0 indican mejor precisión del modelo; valores positivos indican subestimación de la tendencia y valores negativos indican sobrestimación del de la tendencia”.⁴⁷

$$PBIAS = \sum_{i=1}^N \frac{(Q_{oi} - Q_{si})}{(Q_{oi})} * 100 \quad [\text{Ecuación 7}]$$

Donde:

N = número de datos

Q_s = caudal simulado (m³/s)

Q_o = caudal observado (m³/s)

2.12.3.3. Coeficiente de determinación de Pearson (R²)

Mide el grado de correlación entre los datos observados y simulados. Tiene un rango de 0 a 1; donde un R² igual a uno es una correlación perfecta e indica un modelo preciso. Cuando es igual a cero se considera que la predicción es no aceptable; valores mayores a 0,5 se consideran aceptables. El R² presenta la desventaja de determinar la dispersión de los datos y ser sensible a extremos.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - Q_{op})(Q_{si} - Q_{sp})]^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - Q_{op})^2 * \sum_{i=1}^N (Q_{si} - Q_{sp})^2} \quad [\text{Ecuación 8}]$$

⁴⁷ MARTÍNEZ LOAYZA, Carlos Roberto. *Impacto del cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Ica*. p. 40.

Donde:

N = número de datos

Q_s = caudal simulado (m³/s)

Q_o = caudal observado (m³/s)

Q_{po} = promedio del caudal observado (m³/s)

Q_{ps} = promedio del caudal simulado (m³/s)

2.12.3.4. Eficiencia de Kling-Gupta (KGE)

Es utilizada para la calibración y evaluación de modelos. “La eficiencia de Kling-Gupta (KGE) se basa en una descomposición de NSE en sus componentes constitutivos (correlación, sesgo de variabilidad y sesgo medio), aborda varias deficiencias percibidas en NSE”.⁴⁸

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad [\text{Ecuación 9}]$$

Donde:

N = número de datos

Q_s = caudal simulado (m³/s)

Q_o = caudal observado (m³/s)

2.12.3.5. Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE)

Es utilizada como “una medida de diferencia entre datos simulados y datos observados; estas diferencias individuales son llamadas residuos. El RMSE es

⁴⁸ KNOBEN, Wouter; FREER, Jim; WOODS, Ross. *Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores.* p. 4 324.

la raíz cuadrada que mide la magnitud promedio del error, en donde el valor 0 significa un ajuste perfecto”.⁴⁹

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_s)^2}{n}} \quad [\text{Ecuación 10}]$$

Donde:

N = número de datos

Q_s = caudal simulado (m³/s)

Q_o = caudal observado (m³/s)

2.12.3.6. Desviación estándar de las observaciones (RSR)

El factor RSR estandariza el factor RMSE al usar la derivación estándar de las observaciones. Mientras menor sea el valor de RSR, mejor es la simulación del modelo: “valores RSR ≤0,70 consideran a la simulación como satisfactoria”.⁵⁰

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_s)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_{po})^2}} \quad [\text{Ecuación 11}]$$

Donde:

N = número de datos

Q_s = caudal simulado (m³/s)

Q_o = caudal observado (m³/s)

Q_{po} = promedio del caudal observado (m³/s)

⁴⁹ ALBUJA SILVA, Edgar Cristóbal; TENELANDA PATIÑO, Daniel Orlando. *Desarrollo de un modelo conceptual de lluvia-escorrentía para interpretación de procesos hidrológicos en la cuenca altoandina del río Zhurucay*. p. 30.

⁵⁰ MARTÍNEZ LOAYZA, Carlos Roberto. *Impacto del cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Ica*. p. 43.

2.12.4. Validación

La fase de validación del modelo “es el proceso donde se demuestra que el modelo de una zona específica es capaz de realizar simulaciones de suficiente precisión”.⁵¹ La validación se realiza corriendo el modelo para el periodo de referencia, para ello, usa los parámetros que fueron determinados durante la fase de calibración, de manera que se evalúen estos datos generados con datos observados, y se logre validar que el modelo es capaz de proyectar datos.

⁵¹ MARTÍNEZ LOAYZA, Carlos Roberto. *Impacto del cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Ica*. p. 45.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Parámetros

A continuación, se enlistan los parámetros utilizados en la modelación.

Tabla XXX. Parámetros

Parámetros	Independiente	Dependiente
Elevación (m)	x	
Tipo de suelos	x	
Uso de la tierra	x	
Precipitación diaria (mm/d)	x	
Temperatura mínima diaria (°C)	x	
Temperatura máxima diaria (°C)	x	
Velocidad del viento (m/s)	x	
Radiación solar (MJ/m ² /día)	x	
Humedad (fracción)	x	
Caudal (m ³ /s)		x

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

El campo de investigación, geográficamente, está ubicado en la parte alta de la cuenca Cahabón, departamento de Alta Verapaz, Guatemala, con una superficie de 760 km². La cuenca drena hacia la vertiente del Caribe; se localiza en la parte norte de la República de Guatemala, entre las coordenadas geográficas 15° 12' y 15° 33' de latitud norte y 90° 35' y 90° 10' de longitud oeste. La investigación se enfocó en la modelación hidrológica de la parte alta de la cuenca con el programa SWAT, para conocer la respuesta hidrológica para el periodo 2020-2100; se consideran cambios en la temperatura y precipitación, pero no en el uso del suelo.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Ana Isabel Sánchez Girón
- Asesor: Msc. Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
- Asesores externos:
 - Ing. Claudio César Castañón Contreras
 - Ing. Gary Chota Loayza

3.4. Recursos materiales disponibles

Equipo: Computadora portátil marca HP, sistema operativo 64 bits, procesador AMD A10-8700P Radeon R6, 10 Compute Cores 4C+6G 1,8 GHz y RAM 8 GB.

3.5. Técnica cuantitativa

La técnica empleada para este estudio es cuantitativa. Se preparan los datos meteorológicos: precipitación diaria, velocidad del viento, humedad, radiación solar y temperatura mínima y máxima diaria; de los SIG: elevación, uso y cobertura de la tierra; se construye además una base de datos climática y se ejecuta el modelo en SWAT. Con los resultados obtenidos, se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros, se calibra y valida el modelo en SWAT-CUP, al utilizar la información hidrométrica del punto de aforo: caudales. Para verificar la calibración y validación, se realiza un análisis estadístico. Para la simulación en el periodo 2020-2100, se utiliza la información climática (precipitación y temperatura máxima y mínima) de los modelos: CESM1-CAM5, CNRM-CM5 y NCAR-CCSM4; para los escenarios AR5; y el modelo hidrológico calibrado. Finalmente, se compara la respuesta hidrológica obtenida de la aplicación de los escenarios de cambio climático con la demanda de los sectores: doméstico, agrícola e hidroeléctrico.

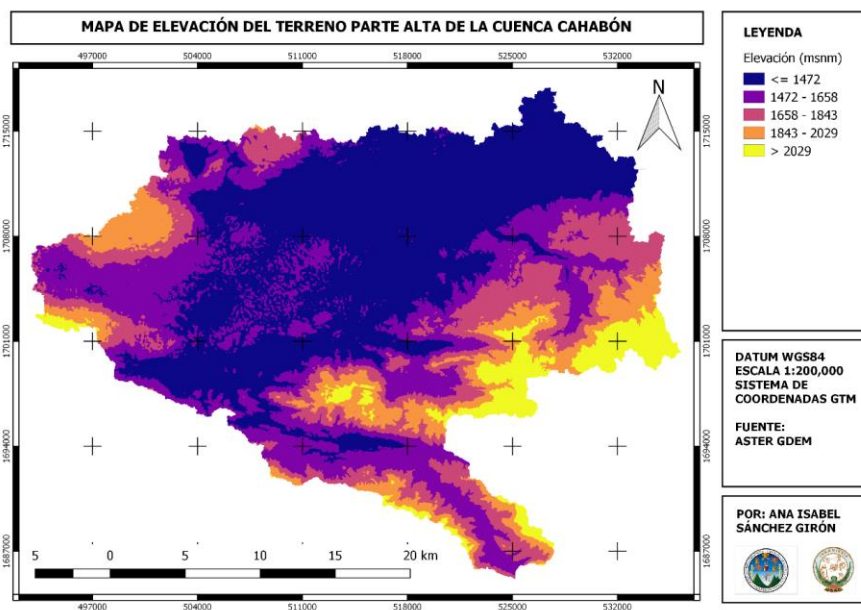
3.6. Recolección y ordenamiento de la información

En esta sección se describe la información utilizada para el modelo.

3.6.1. Información topográfica

La capa con la información de elevación digital del terreno proviene del mapa topográfico ASTER GDEM (Aster Global Digital Elevation Model). Se presenta en formato GeoTIFF, con coordenadas geográficas latitud y longitud, referenciado al geode WGS84 y con resolución espacial de 15 metros, modificada para Guatemala. Este mapa es utilizado posteriormente por SWAT para la delimitación de la cuenca y las redes hidrográficas, así como para la definición de pendientes.

Figura 27. Mapa de elevación del terreno

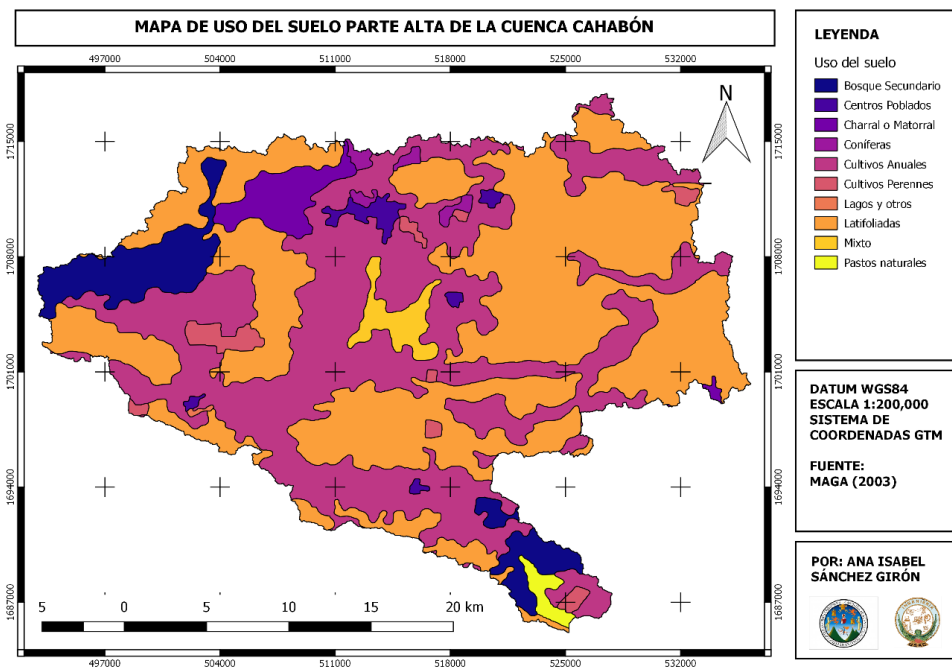


Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

3.6.2. Información de uso de suelo

La capa con los datos de cobertura vegetal y uso de la tierra en la cuenca se obtuvieron del mapa en formato vectorial, shapefile, elaborado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) del año 2003.

Figura 28. Mapa de Uso del Suelo



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

El uso del suelo está clasificado en grupo, subgrupo y detalle como se muestra en la tabla XXXI. Sin embargo, este debe reclasificarse de acuerdo con los criterios usados por SWAT, para ser utilizada en el modelo hidrológico.

Tabla XXXI. **Clasificación del uso de suelo en la cuenca según el
MAGA**

Grupo	Subgrupo	Detalle	Área (km²)	Área (%)
Bosque natural	Latifoliadas		346,4	45,58
Cultivos	Cultivos anuales	Agricultura limpia anual	298,5	39,27
Bosque natural	Bosque secundario (arbustal)		49,3	6,49
Pastos/matorrales	Charral o matorral		20,6	2,71
Bosque natural	Mixto		12,6	1,66
Infraestructura	Centros poblados		8,5	1,12
Cultivos	Cultivos perennes	Café	8,2	1,08
Bosque natural	Coníferas		5,4	0,71
Pastos/matorrales	Pastos naturales		5,0	0,66
Cultivos	Cultivos perennes	Otros cultivos	5,0	0,65
Cuerpos de agua	Lagos, lagunas y otros (lénticos)		0,5	0,06
		Total	760	100,00

Fuente: elaboración propia, con base en capa de uso del suelo del MAGA, 2003.

La información para realizar la reclasificación se encuentra en la base de datos de SWAT, en el directorio C:\SWAT\ArcSWAT\Databases\SWAT2012. Al abrir este archivo con Access, se puede acceder a las tablas con las categorías de uso de suelo urbano, Urban, y para cobertura vegetal y cultivos, Crop.

De estas tablas, se obtienen los valores y nombres que se les deben asignar a los usos de suelo. La categoría para bosques latifoliados, FOEB, no existe dentro de la base de datos de SWAT, por lo que se obtuvo de las bases de datos del plugin MapWindow de SWAT, y se agregó a la base de datos para que pueda ser reconocida después por el programa, ver figura 31.

El plugin MapWindow se puede descargar desde el portal web de SWAT:
<https://swat.tamu.edu/software/mwswat/>.

Figura 29. Tabla Urban en la base de datos SWAT2012

OBJECTID	IUNUM	URBNAM	URBNLNM	FIMP	FCIMP	CURBDEN	URBCOEF	DIRTMX	THALF	TNCONC	TPCO
1	1	URHD	Residential-High Dens	0.6	0.44	0.24	0.18	225	0.75	550	
2	2	URMD	Residential-Medium C	0.38	0.3	0.24	0.18	225	0.75	550	
3	3	URML	Residential-Med/Low	0.2	0.17	0.24	0.18	225	0.75	460	
4	4	URLD	Residential-Low Dens	0.12	0.1	0.24	0.18	225	0.75	460	
5	5	UCOM	Commercial	0.67	0.62	0.28	0.18	200	1.6	420	
6	6	UIDU	Industrial	0.84	0.79	0.14	0.18	400	2.35	430	
7	7	UTRN	Transportation	0.98	0.95	0.12	0.18	340	3.9	480	
8	8	UIINS	Institutional	0.51	0.47	0.12	0.18	340	3.9	480	
9	9	URBN	Residential	0.38	0.3	0.24	0.18	225	0.75	550	

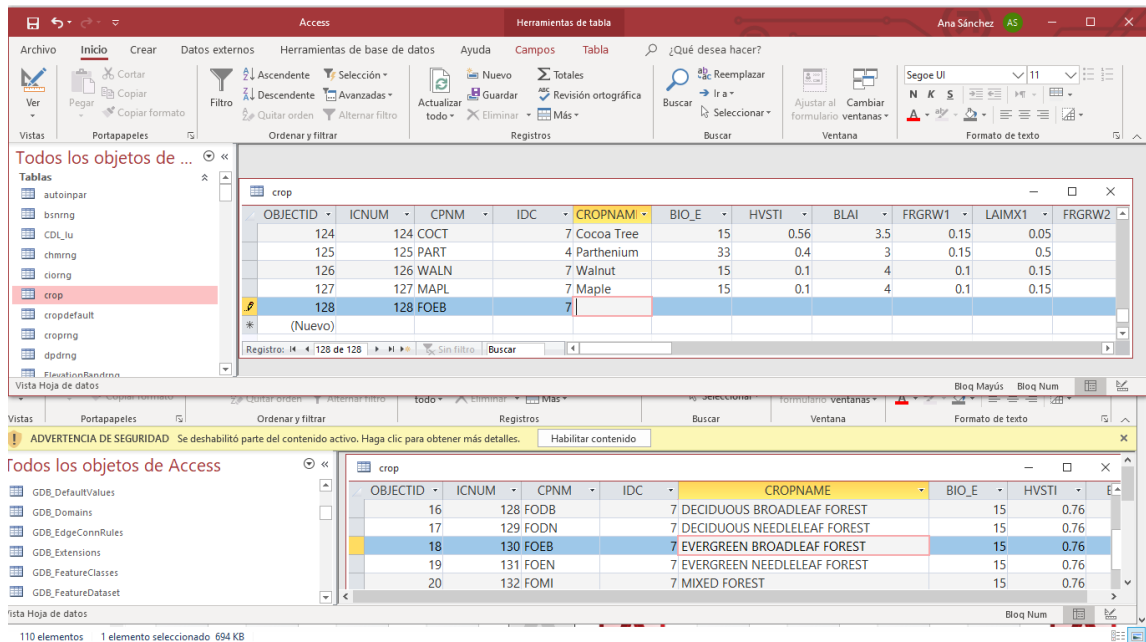
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Tabla Crop en la base de datos SWAT2012

OBJECTID	ICNUM	CPNM	IDC	CROPNAME	BIO_E	HVSTI	BLAI	FRGRW1	LAIMX1	FRGRW2
3	3	AGRC	5	Agricultural Land-Close-g	30	0.4	4	0.05	0.05	0.45
1	1	AGRL	4	Agricultural Land-Generi	33.5	0.45	3	0.15	0.05	0.5
2	2	AGRR	4	Agricultural Land-Row Cro	39	0.5	3	0.15	0.05	0.5
50	50	SWCH	6	Alamo Switchgrass	47	0.9	6	0.1	0.2	0.2
52	52	ALFA	3	Alfalfa	20	0.9	4	0.15	0.01	0.5
106	106	ALMD	7	Almonds	16.1	0.05	1.2	0.05	0.05	0.4
55	55	CLVA	3	Alsike Clover	25	0.9	4	0.15	0.01	0.5
46	46	RYEA	6	Altai Wildrye	30	0.9	3	0.35	0.02	0.62
93	93	APPL	7	Apple	15	0.1	4	0.1	0.15	0.5
77	77	ASPR	6	Asparagus	90	0.8	4.2	0.25	0.23	0.4
102	102	BANA	7	Bananas	30	0.44	4.5	0.05	0.05	0.4
118	118	BARR	6	Barren	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05	0.49
90	90	PEPR	4	Bell Pepper	30	0.6	5	0.15	0.05	0.5
40	40	BERM	6	Bermudagrass	35	0.9	4	0.05	0.05	0.49
48	48	BBL5	6	Big Bluestem	14	0.9	3	0.05	0.1	0.25
78	78	BROC	5	Broccoli	26	0.8	4.2	0.25	0.23	0.4
79	79	CABG	5	Cabbage	19	0.8	3	0.25	0.23	0.4
87	87	CANT	4	Cantaloupe	30	0.5	3	0.15	0.05	0.5
72	72	CRRT	5	Carrot	30	1.12	3.5	0.15	0.01	0.5
112	112	CASH	7	Cashews	15	0.15	4	0.1	0.15	0.5
120	120	CASS	5	Cassava	25	0.95	4	0.15	0.01	0.5

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Modificación de la base de datos SWAT2012**



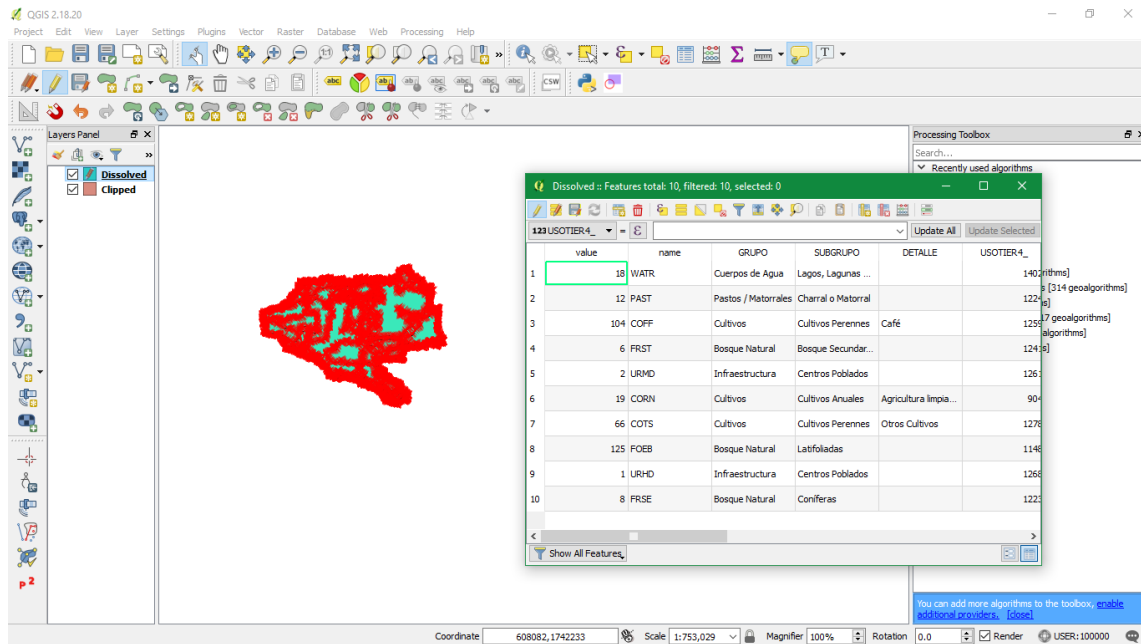
Fuente: elaboración propia.

Una vez se conoce el valor (OBJECTID) y nombre (CPNM) que corresponde a cada uso de suelo se modifica la tabla de atributos de la capa; se crean dos columnas (*value* y *name*) para asignar estos datos.

Con la tabla modificada, se crea un archivo de texto, .txt, que contiene la información de cada uso y que sirve para vincular al momento de leer estos archivos en SWAT, ver figura 33.

Para el uso correspondiente a otros cultivos perennes, que para la cuenca es Cardamomo, no se cuenta con información y, por eso, se sustituyó por un cultivo perenne de características similares, que es el Tabaco.

Figura 32. Tabla de atributos modificada para la capa de uso de suelo



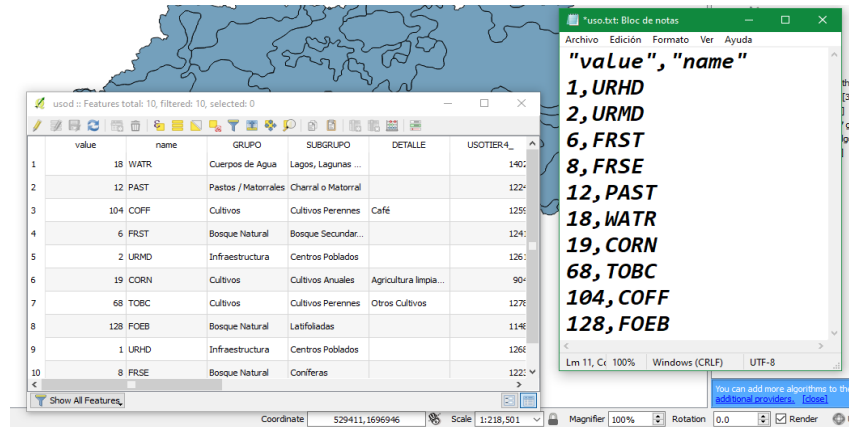
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. Clasificación del uso de suelo en la cuenca para SWAT

Valor	Nombre	Descripción	Clasificación según el MAGA	Área (km ²)	Área (%)
128	FOEB	Bosque de hoja ancha perenne	Latifoliadas	346,4	45,58
19	CORN	Maíz	Cultivos anuales (maíz)	298,5	39,27
6	FRST	Bosque mixto	Bosque secundario (arbustal)	61,9	8,15
12	PAST	Pasto	Charral o matorral	25,7	3,38
104	COFF	Café	Cultivos perennes (café)	8,2	1,08
8	FRSE	Bosque de hoja perenne	Coníferas	5,4	0,71
1	URHD	Zona residencial de alta densidad	Centros poblados	5,4	0,71
68	TOBC	Tabaco	Cultivos perennes (cardamomo)	5,0	0,65
2	URMD	Zona residencial de media densidad	Centros poblados	3,2	0,42
18	WATR	Cuerpos de agua	Lagos, lagunas y otros (lénticos)	0,5	0,06
			Total	760,0	100,0

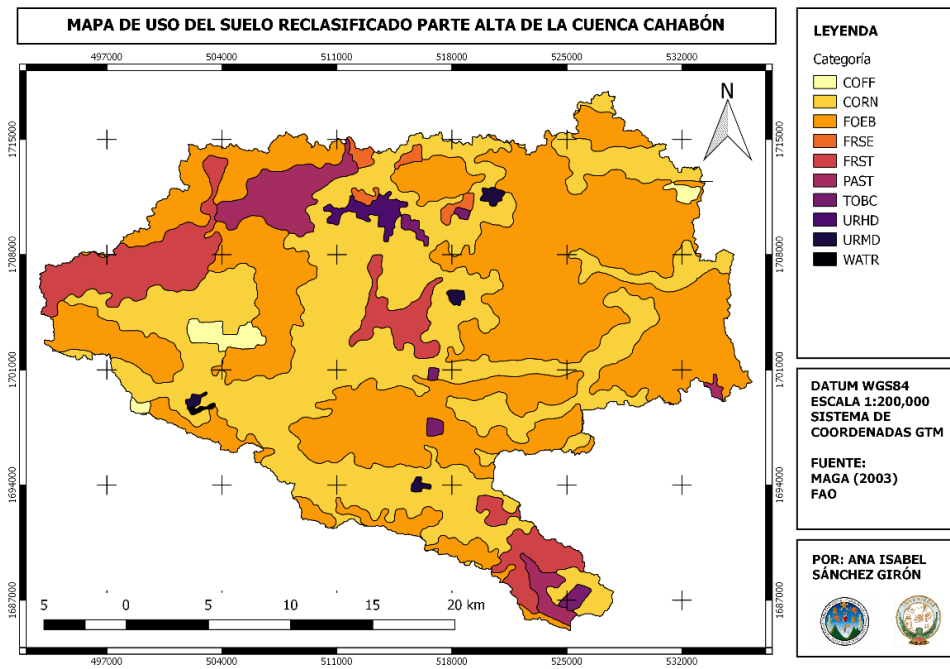
Fuente: elaboración propia, con base en capa de uso del suelo del MAGA, 2003.

Figura 33. Tabla de atributos y archivo de texto para el uso de suelo



Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Mapa de uso del suelo reclasificado para SWAT



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

3.6.3. Información de tipo de suelo

Esta información se encuentra en el archivo vectorial denominado Mapa Digital Mundial de Suelos (DSMW por sus siglas en inglés), que fue elaborado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) y actualizado con información de la Base de Datos Mundial Armonizada de Suelos (HWSD por sus siglas en inglés). Este archivo se puede descargar desde el portal web de la FAO: [http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show %3Fid=14116](http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show_%3Fid=14116).

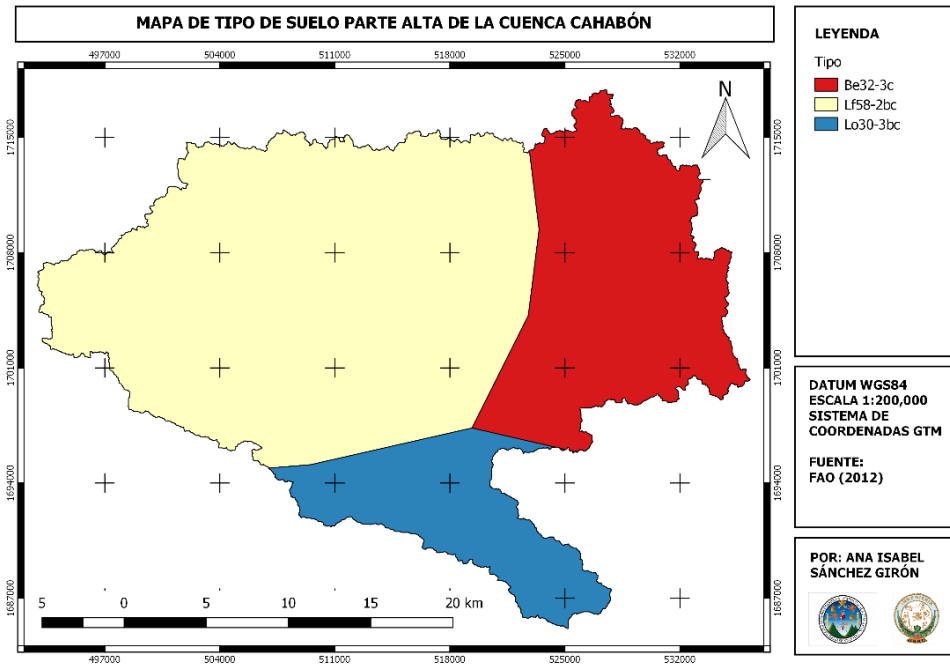
Como esta capa es a nivel mundial y está en coordenadas geográficas, debe cortarse según la forma de la cuenca y re proyectarse a coordenadas GTM. Esto con el fin de que todas las capas tengan la misma georreferenciación, porque, de lo contrario, no es posible procesarlas en SWAT.

Tabla XXXIII. **Tipos de suelo en la cuenca según la FAO**

Código secuencial (SNUM)	Unidad de Mapeo Simbólica de Suelo (FAO SOIL)	Suelo Dominante	Área (km²)
5232	Lf58-2bc	Lf	455,77
5150	Be32-3c	Be	203,29
5239	Lo30-3bc	Lo	100,94
		Total	760,00

Fuente: elaboración propia, con base a capa de tipo del suelo de FAO, 2012.

Figura 35. Mapa de tipo de suelo



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

La base de datos SWAT2012 no tiene la tabla con la información para este tipo de suelo, sin embargo, es posible exportarla de las bases de datos del plugin MapWindow de SWAT hacia nuestra base de datos.

Con esta información, es posible modificar la tabla de atributos de la capa y crear un archivo de texto, .txt, que contenga el valor (OBJECTID) y el nombre (SNAM) que vincule el archivo con ArcSWAT.

Figura 36. Tipos de suelo en la base de datos de MapWindow

OBJECTID	MUID	SEQN	SNAM	SSID	CMPPCT	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXI	SOL_CRK	TEXTURE
1	0		Sample-0			4	A	2032	0.5	0.5	LFS-LFS-S
2	1		Af14-3c-1			2	C	750	0.5	0.5	CLAY_LOAM
3	2		Af17-1-2a-2			2	C	910	0.5	0.5	SANDY_CLA
4	3		Af32-2ab-3			2	D	910	0.5	0.5	SANDY_CLA
5	4		Ao39-2b-4			2	C	1000	0.5	0.5	LOAM
6	5		Ao41-2bc-5			2	C	960	0.5	0.5	LOAM
7	6		Ao63-3b-6			2	C	1000	0.5	0.5	CLAY
8	7		Bc8-2b-7			2	C	820	0.5	0.5	LOAM
9	8		Bc9-2b-8			2	C	1000	0.5	0.5	CLAY_LOAM
10	9		Bd30-2-3c-9			2	C	560	0.5	0.5	CLAY_LOAM
11	11		Bd31-2c-11			2	B	370	0.5	0.5	LOAM
12	16		Be45-2a-16			2	C	980	0.5	0.5	LOAM
13	17		Be47-2a-17			2	C	1000	0.5	0.5	CLAY_LOAM
14	18		Be48-3c-18			2	C	440	0.5	0.5	CLAY
15	20		Be49-3c-20			2	C	760	0.5	0.5	CLAY
16	21		Be50-2-3c-21			2	C	820	0.5	0.5	CLAY_LOAM
17	22		Be51-2a-22			2	D	1000	0.5	0.5	CLAY_LOAM
18	24		Be8-3c-24			2	C	850	0.5	0.5	CLAY
19	26		Be9-3c-26			2	C	930	0.5	0.5	CLAY
20	27		Bh11-1b-27			2	B	1000	0.5	0.5	SANDY_LOA
21	31		Bh12-3c-31			2	C	580	0.5	0.5	CLAY_LOAM

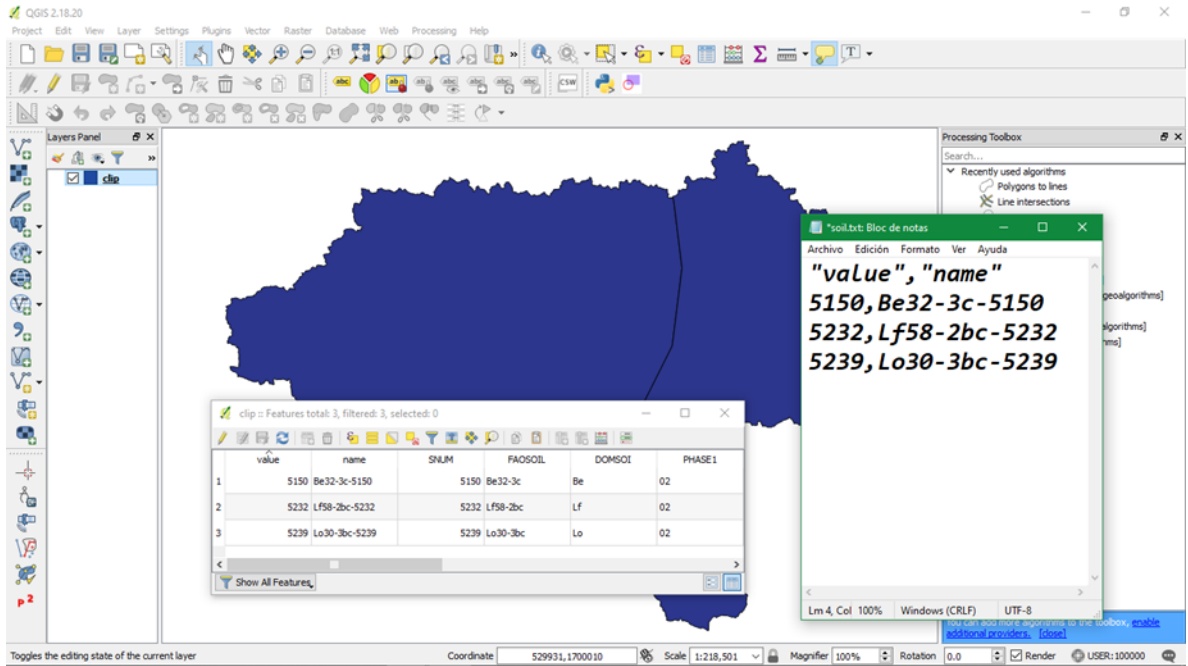
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Tipos de suelo en la base de datos de SWAT2012

OBJECTID	MUID	SEQN	SNAM	SSID	CMPPCT	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXI	SOL_CRK
203		0	Sample-0			4	A	2032	0.5	0.5
204		1	Af14-3c-1			2	C	750	0.5	0.5
403		263	Vc25-3a-263			2	D	1000	0.5	0.5
404		264	Vc26-3a-264			2	D	1000	0.5	0.5
405		265	Vc27-3a-265			2	D	1000	0.5	0.5
406		266	Vc28-3a-266			2	D	1000	0.5	0.5
407		267	Vc29-3a-267			2	D	1000	0.5	0.5
408		268	Vc29-3a-268			2	D	1000	0.5	0.5
409		269	Vc30-3a-269			2	D	1000	0.5	0.5
410		270	Vc31-2-3a-270			2	D	1000	0.5	0.5
411		272	Vc32-3a-272			2	D	1000	0.5	0.5
412		273	Vc33-3a-273			2	D	1000	0.5	0.5
413		274	Vc34-3a-274			2	D	1000	0.5	0.5
414		276	Vc35-3a-276			2	D	1000	0.5	0.5
415		277	Vc36-3a-277			2	D	1000	0.5	0.5
416		278	Vc37-3a-278			2	D	1000	0.5	0.5
417		279	Vc7-3a-279			2	D	910	0.5	0.5
418		280	Vc8-3a-280			2	D	1000	0.5	0.5
419		281	Vc8-3a-281			2	D	1000	0.5	0.5
420		283	Vp1-3a-283			2	C	1000	0.5	0.5
421		285	Vp10-3a-285			2	D	1000	0.5	0.5

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Tabla de atributos y archivo de texto para el tipo de suelo**



Fuente: elaboración propia.

3.6.4. Información climática 1981-2000

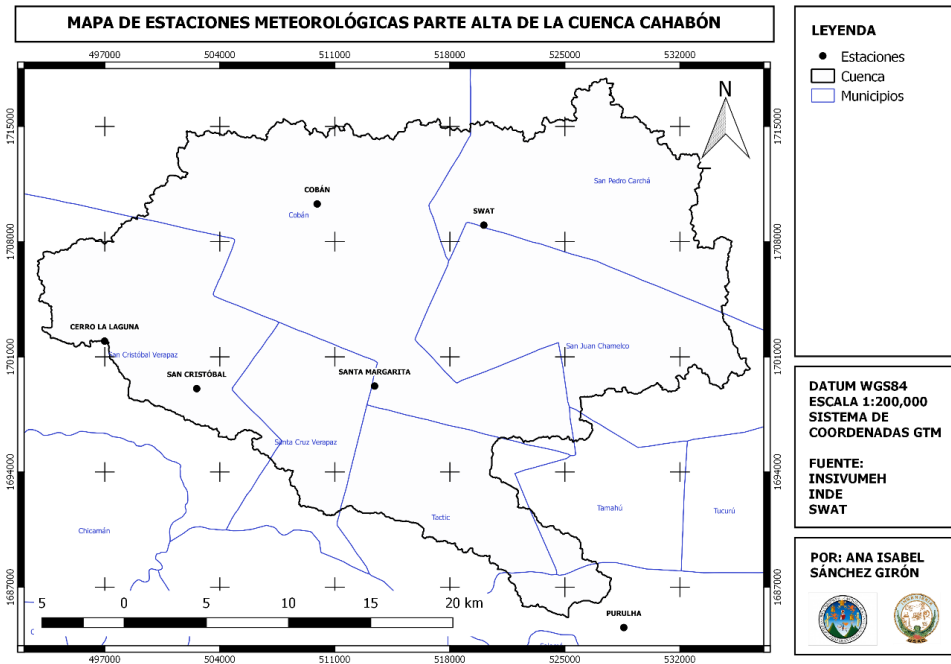
La información climatológica se obtuvo de las estaciones a cargo del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología y Meteorología (INSIVUMEH), del Instituto Nacional de Electrificación (INDE), de datos de CHIRPS y de los Datos Globales para SWAT, producto del Sistema de Reanálisis de Pronóstico Climático (CFSR) del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP por sus siglas en inglés).

Tabla XXXIV. Estaciones meteorológicas en la cuenca

	Estación	Coordenadas		Altitud (msnm)	Periodo	Variables climáticas	Fuente
		Latitud	Longitud				
1	COBÁN	15,4667	-90,408	1 329	1981-2000	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura máxima (°C) • Temperatura mínima (°C) • Temperatura media(°C) • Precipitación (mm) • Humedad (%) • Radiación Solar (J) • Viento (km/h) 	INSIVUMEH
2	SAN CRISTÓBAL	15,365	-90,476	1 389	1981-2000	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación (mm) • Temperatura media(°C) 	INDE
3	CERRO LA LAGUNA	15,391	-90,528	2 012	1981-2000	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación (mm) • Temperatura media(°C) 	INDE
4	SANTA MARGARITA	15,367	-90,375	1 697	<ul style="list-style-type: none"> • 1981-1988 (Datos de CHIRPS) • 1989-2000 	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación (mm) 	INDE / CHIRPS
5	SWAT	15,455	-90,313	1 375	1981-2000	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación (mm) • Temperatura máxima (°C) • Temperatura mínima (°C) 	SWAT
6	PURULHÁ	15,234	-90,234	1 551	1981-2000 (Datos de CHIRPS)	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación (mm) • Temperatura media(°C) 	CHIRPS

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. Mapa de estaciones meteorológicas en la cuenca



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

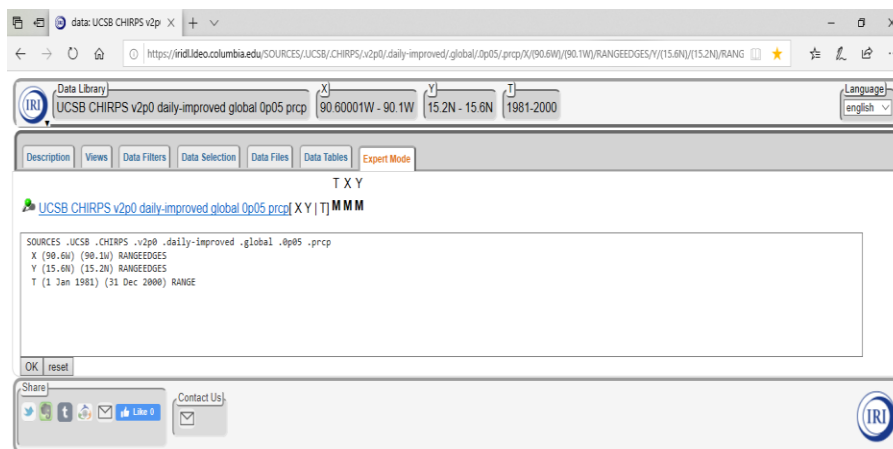
En la tabla XVI, se describe información de las estaciones, de las cuales, actualmente, solo se encuentra en funcionamiento la estación Cobán a cargo del INSIVUMEH. Las estaciones San Cristóbal, Cerro La Laguna y Santa Margarita, propiedad del INDE, no se encuentran en funcionamiento, desde el 2005, las primeras dos, y desde el 2001, la última. Del resto de estaciones SWAT y Purulhá, la información proviene de estimaciones satelitales.

3.6.4.1. Precipitación

En la estación Santa Margarita, el registro de datos empieza hasta en 1989, por lo que se tuvo que completar la información con datos de CHIRPS.

Para descargar los datos de CHIRPS, se ingresa al portal web:
<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.UCSB/.CHIRPS/.v2p0/.daily-improved/.global/.0p05/.prcp/#expert>.

Figura 40. Descarga de datos en el portal de CHIRPS



Fuente: elaboración propia.

La información que se ingresa al portal es el rango X (longitud) y Y (latitud) donde se encuentran los datos y el periodo de esta forma:

X (90,6W) (90,1W) RANGEEDGES
Y (15,6N) (15,2N) RANGEEDGES
T (1 Jan 1981) (31 Dec 2000) RANGE

El resultado es un archivo que se descarga en formato netCDF. Para extraer los datos de este archivo, para la estación de estudio, es necesario hacer uso de un Script en RStudio.

Figura 41. **Script para extraer datos de CHIRPS 2.0 con un shape**

```
#librerias
library(raster)
library(rgdal)
library(maptools)
library(ncdf4)

#directorio donde esta el archivo netcdf
setwd("C:/CHIRPS")
dir()

#cargar el archivo netcdf
satelital<-nc_open("data.nc")

#imprimir la configuración del archivo
print(satelital)

#cerrar
nc_close(satelital)

#crear un archivo multiraster a partir del netcdf y variable de interes
ppsat<-brick("data.nc", varname="prcp")

#cargar archivo con ubicación de estaciones pluviometricas (longitud latitud estacion)
poligono<-readOGR("C:/CHIRPS/SHAPE/STAMARG.shp")

plot(ppsat[[1]])
points(poligono)

#extraer los datos de lluvia del multiraster con la ubicación de las estaciones
datos<-extract(ppsat, poligono, fun=mean, na.rm=T)

datos2<-data.frame(t(datos))
datos2

fila<-nrow(datos2)
rownames(datos2)<-NULL
ndias<-nrow(datos2)

#definir las fechas de inicio de los datos
fecha<-seq(as.Date("1981/01/01"), by="day", length.out = ndias)
fecha2<-format(fecha, "%Y-%m-%d")
meses<-levels(factor(fecha2))

datossatelitales<-data.frame(fecha2, datos2)
colnames(datossatelitales)<-c("Fecha", "PP")
head(datossatelitales)

datossatelitales2<-tapply(datossatelitales$PP, datossatelitales$Fecha,sum)
head(datossatelitales2)

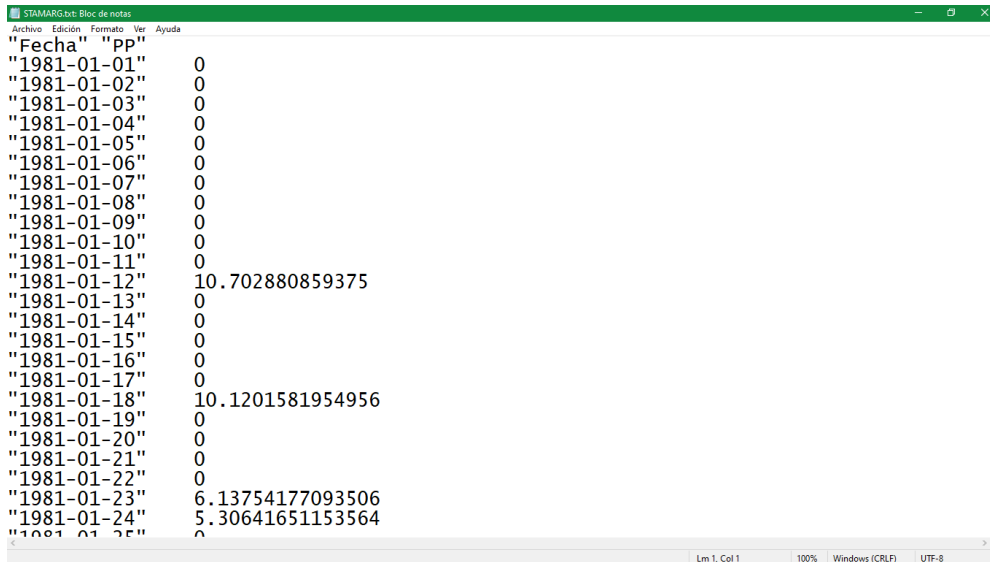
lluviapp<-as.vector("datossatelitales2")
datossatelitales3<-data.frame(meses, lluviapp)

#guardar los datos en un archivo
write.table(datossatelitales, file="C:/CHIRPS/ppdiaria.txt",sep="\t", row.names=FALSE)
```

Fuente: BARDALES, Walter. *Script para extraer datos de CHIRPS 2.0 con un shape*. p. 1.

El script que se muestra en la figura 41 requiere la ubicación del archivo descargado en CHIRPS, el archivo vectorial en formato Shapefile con la ubicación de la estación Santa Margarita y el periodo inicial de los datos, en este caso 01/01/1981. Este script organiza los datos extraídos en las columnas Fecha y PP, para publicarlos posteriormente como un archivo de texto.

Figura 42. Archivo de texto con los datos de CHIRPS



```
STAMARG.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
"Fecha" "Pp"
"1981-01-01" 0
"1981-01-02" 0
"1981-01-03" 0
"1981-01-04" 0
"1981-01-05" 0
"1981-01-06" 0
"1981-01-07" 0
"1981-01-08" 0
"1981-01-09" 0
"1981-01-10" 0
"1981-01-11" 0
"1981-01-12" 10.702880859375
"1981-01-13" 0
"1981-01-14" 0
"1981-01-15" 0
"1981-01-16" 0
"1981-01-17" 0
"1981-01-18" 10.1201581954956
"1981-01-19" 0
"1981-01-20" 0
"1981-01-21" 0
"1981-01-22" 0
"1981-01-23" 6.13754177093506
"1981-01-24" 5.30641651153564
"1981-01-25" ^
```

Fuente: elaboración propia.

En SWAT, la información climática se ingresa de forma diaria; para lo cual, es recomendable que todas las estaciones tengan el registro de datos completos, al menos para la variable de precipitación; sin embargo, como es común, se presentan datos faltantes por diversos factores como falta de continuidad en los registros, errores instrumentales, entre otros. En casos como estos, es necesario estimar los datos faltantes o recurrir al relleno de series de datos.

El método de proporción normal se aplicó para estimar datos faltantes de precipitación a nivel mensual para las estaciones Cobán, San Cristóbal, Cerro la Laguna y Santa Margarita. El procedimiento de cálculo se indica a continuación, a través de la ecuación 2, descrita en el marco teórico:

$$P_x = \frac{N_x}{n} \left[\frac{P_1}{N_1} + \frac{P_2}{N_2} + \frac{P_3}{N_3} \right]$$

Donde:

P_x = precipitación faltante para enero de 1981 en la estación Santa Margarita

N_x = precipitación normal anual de la estación Santa Margarita

n = número de estaciones

P_1 = precipitación para enero de 1981 en la estación San Cristóbal

N_1 = precipitación normal anual de la estación San Cristóbal

P_2 = precipitación para enero de 1981 en la estación Cerro La Laguna

N_2 = precipitación normal anual de la estación Cerro La Laguna

P_3 = precipitación para enero de 1981 en la estación Cobán

N_3 = precipitación normal anual de la estación Cobán

$$P_x = \frac{83,68}{3} \left[\frac{20,1}{43,42} + \frac{40,8}{112,036} + \frac{21,1}{111,47} \right] = 28,35 \text{ mm}$$

Para los casos en los que no se contaba con información en más de dos estaciones, requisito necesario para poder aplicar el método, el dato se rellenó con información satelital de CHIRPS. Esta información está disponible desde el año 1981, y por eso, la línea base que se toma como inicio del periodo de referencia es del año 1981 hasta el año 2000, para completar un total de 20 años.

Las tablas con la información de la precipitación mensual se encuentran en el apéndice 3; en estas, se indica qué datos fueron estimados y cuáles rellenados.

El relleno de datos se realizó de forma mensual, por tanto, son necesarios los datos diarios para ingresar en SWAT. El procedimiento para generar la serie diaria consistió en distribuir el valor mensual tomando como

base el registro diario de un mes. La ecuación utilizada se detalla a continuación:

$$P_x = \frac{P_o * P_m}{P_{mo}} \quad [\text{Ecuación 12}]$$

Donde:

P_x = precipitación diaria corregida (mm)

P_o = precipitación diaria original (mm)

P_m = precipitación mensual corregida (mm)

P_{mo} = precipitación mensual original (mm)

Figura 43. Generación de series diarias de precipitación

Fecha	PP	MENSUALES ACUMCHIRPS	MENSCHIRPS CORREGIDOS	MES	1981	1982	1983	1984	1985
1981-01-01	0	1	30.432271	1	20.1	95	37.1	53.4	32.1
1981-01-02	0	1	30.432271	2	113.1	14.6	55.5	34.2	84.6
1981-01-03	0	1	30.432271	3	34.5	18.5	11.1	82.5	30.4
1981-01-04	0	1	30.432271	4	23.1	61.9	134.4	40.9	84.7
1981-01-05	0	1	30.432271	5	165.8	170.276194	88.9	194.4	44.8
1981-01-06	0	1	30.432271	6	327.9	348	189.1	360.5	259
1981-01-07	0	1	30.432271	7	340.7	269.4	304.4	360.3	301.6
1981-01-08	0	1	30.432271	8	376.5	194.1	253.5	374	242.6
1981-01-09	0	1	30.432271	9	210.1	353.3	194.8	368.6	236.3
1981-01-10	0	1	30.432271	10	188.2	121.3	153.6	201	134
1981-01-11	0	1	30.432271	11	49.2	34.5	75.4	115.4	41
1981-01-12	9.38669872	1	30.432271	12	58	33.4	74.9	67.1	87.1
1981-01-13	0	1	30.432271	MES	1981	1982	1983	1984	1985
1981-01-14	0	1	30.432271	1	30.432271	73.774518	39.7286739	56.6874084	38.173332
1981-01-15	0	1	30.432271	2	69.5936294	43.9894862	46.3107901	37.0749907	70.6411057
1981-01-16	0	1	30.432271	3	99.7372777	31.1296082	23.4469128	45.8848724	62.5499096
1981-01-17	8.66513824	1	30.432271	4	69.7979749	40.2212143	82.9079066	66.2342708	65.4564252
1981-01-18	0	1	30.432271	5	118.178312	170.276194	40.7990303	210.103988	65.797394
1981-01-19	0	1	30.432271	6	509.385418	188.5622	266.089962	292.611044	282.084747
1981-01-20	0	1	30.432271	7	218.097774	186.51968	278.820117	275.518975	199.049021
1981-01-21	0	1	30.432271	8	290.689387	113.50147	208.407403	209.038397	159.634672
1981-01-22	0	1	30.432271	9	179.207667	221.782963	262.929469	306.023129	241.597081
1981-01-23	5.4342041	1	30.432271	10	184.033016	344.846783	106.305013	110.603368	103.054443

Nota: En la matriz, se muestran los datos mensuales de precipitación corregidos (resaltados en verde) y datos originales de CHIRPS (resaltados en amarillo).

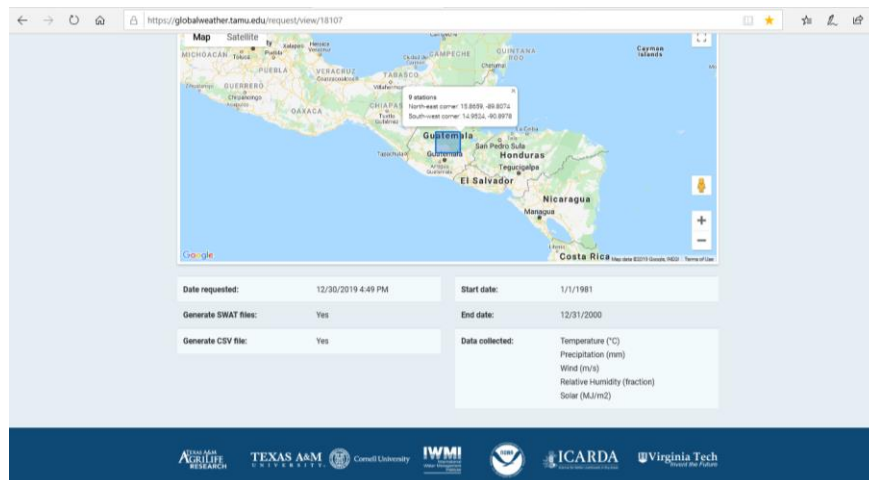
Fuente: elaboración propia.

Realizar esto no implica inconvenientes en los resultados, debido a que el modelo hidrológico se calibrará a nivel mensual.

Para la serie de datos de precipitación de la estación Purulhá y SWAT, no es necesario realizar un procesamiento previo, porque estas son dadas de forma diaria, por lo que ya pueden ser preparados para ingresar a SWAT.

La información climática de SWAT se descarga del portal web: <https://globalweather.tamu.edu/>. En el sitio, se debe delimitar el área alrededor de la cuenca de estudio; debe definirse la fecha de inicio y fin; los datos a descargar (temperatura, precipitación, viento, humedad relativa y radiación solar) y el formato de los archivos (SWAT o CSV). El resultado es una carpeta con información de distintas estaciones, por lo que debe identificarse cuál es la ubicada en la cuenca. En este caso, para la parte alta de la cuenca Cahabón, es la denominada 155-903.

Figura 44. Descarga de datos en el portal de SWAT



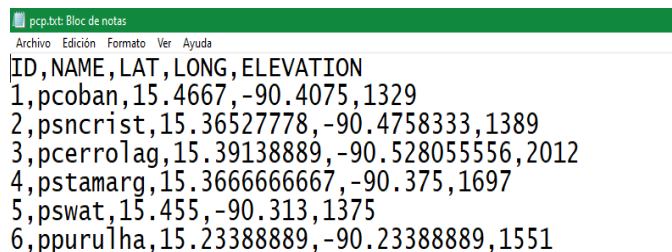
Fuente: elaboración propia.

El ingreso de datos climáticos en SWAT se realiza a través de archivos de texto, .txt, que deben contener el registro de precipitación diaria de cada

estación y, además, se debe crear un archivo con datos de las estaciones (ID, nombre, latitud, longitud y altitud).

El archivo con el registro de datos diarios de precipitación lleva en la primera fila la fecha de registro inicial, con el formato YYMMDD (año, mes y día), seguido por los valores (ver esquema de la figura 45). Este debe guardarse con el nombre designado en el archivo con los datos de las estaciones (ver esquema de la figura 46).

Figura 45. **Esquema de archivo de texto para los datos de las estaciones con registro de precipitación**



```
pcp.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
ID, NAME, LAT, LONG, ELEVATION
1, pcoban, 15.4667, -90.4075, 1329
2, psncrist, 15.36527778, -90.4758333, 1389
3, pcerrolag, 15.39138889, -90.528055556, 2012
4, pstamarg, 15.366666667, -90.375, 1697
5, pswat, 15.455, -90.313, 1375
6, ppuruha, 15.23388889, -90.23388889, 1551
```

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Esquema de archivo de texto para el registro diario de precipitación**



```
pcp04y10n: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
19810101
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
12.69877191
```

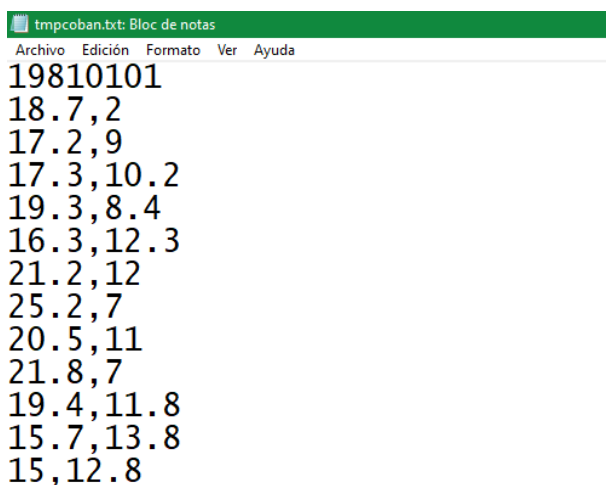
Fuente: elaboración propia.

3.6.4.2. Temperatura máxima y mínima

En el caso de la temperatura máxima y mínima, estos datos solo están disponibles para las estaciones Cobán y SWAT. Para los datos faltantes, debido a que no es posible estimarlos o rellenarlos, se debieron marcar como faltantes, con el número -99 que es reconocido por SWAT.

Los datos deben guardarse como archivos de texto .txt, que deben contener el registro de temperatura máxima y mínima de cada estación; debe seguir este formato TMAX, TMÍN (temperatura máxima, temperatura mínima), con la fecha de registro inicial en la primera fila, con el formato YYMMDD (año, mes y día) seguido por los valores (ver esquema de la figura 47). Además, se debe crear un archivo con datos de las estaciones (tomar como referencia la figura 46).

Figura 47. **Esquema de archivo de texto para el registro diario de temperatura máxima y mínima**



```
tmpcoban.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
19810101
18.7,2
17.2,9
17.3,10.2
19.3,8.4
16.3,12.3
21.2,12
25.2,7
20.5,11
21.8,7
19.4,11.8
15.7,13.8
15,12.8
```

Fuente: elaboración propia.

3.6.4.3. Radiación solar, viento y humedad

Al igual que para la temperatura máxima y mínima, los datos de radiación solar, humedad y viento solo están disponibles para las estaciones Cobán y SWAT. El relleno de datos faltantes, en este caso, también se realizó con -99.

Los datos se deben guardar como archivos de texto .txt, que deben contener el registro diario para cada variable, siguiendo el esquema de la figura 45. Además, se debe crear un archivo con datos de las estaciones para cada variable (tomar como referencia el esquema de la figura 46).

3.6.5. Generador climático

Para la creación del generador climático que será utilizado por el modelo en SWAT, se deben calcular los estadísticos de las variables climáticas que están detallados en el apéndice 7.

Previamente, se debe exportar a un archivo de Excel la tabla del generador climático de la base de datos de SWAT2012, con el fin de completar la tabla con la información correspondiente.

Figura 48. Tabla WGEN_user en la base de datos de SWAT2012

The screenshot shows the Microsoft Access interface with the 'WGEN_user' table open. A context menu is displayed over the 'Exportar' option, listing various export formats. The table data is as follows:

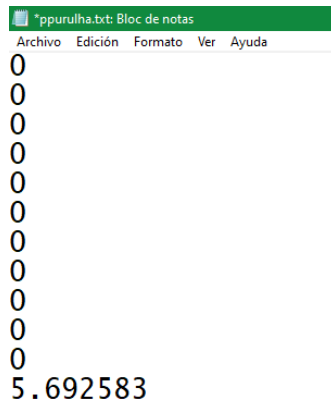
OBJECTID	STATION	WLATITUD	WLONGITU	WELEV	RAIN_YRS	TMPMX1	TMPMX2	TMPMX3	TMPMX4	TMPMX5
1	Sample	33.65	-95.69	179.8	83	11.9	13.9	18.8	23.6	27.6
2	wea62	33.03	-95.92	179.8	10	11.68	13.94	18.82	23.62	27.61
4	wea43	33.25	-95.78	179.8	10	11.68	13.94	18.82	23.62	27.61
1	wea80	33.45	-95.55	179.8	10	11.68	13.94	18.82	23.62	27.61

Fuente: elaboración propia.

Para el cálculo de los estadísticos de la variable precipitación, se utiliza el preprocesador de datos de entrada a SWAT denominado pcpSTAT, que se encuentra disponible para su descarga en el portal web de SWAT: <https://swat.tamu.edu/software/>.

La herramienta pcpSTAT requiere el ingreso del registro de precipitación diaria en un archivo de texto con el formato de la figura 49.

Figura 49. **Esquema de archivo de texto de entrada para el registro diario de precipitación utilizado en pcpSTAT**

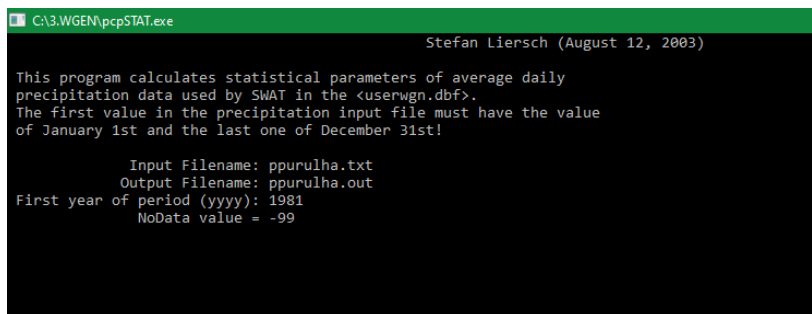


```
*ppurulha.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
5.692583
```

Fuente: elaboración propia.

Una vez se cuenta con la información en este formato, se ubican los archivos en la carpeta donde está almacenado el programa. Se ejecuta el mismo y se procede a ingresar la siguiente información: nombre del archivo con el registro, nombre del archivo de salida, año de inicio de los datos y el valor que representa los datos faltantes (-99), como se muestra en la figura 50.

Figura 50. **Ingreso de información en pcpSTAT**



```
C:\3.WGEN\pcpSTAT.exe
Stefan Liersch (August 12, 2003)

This program calculates statistical parameters of average daily
precipitation data used by SWAT in the <userwgn.dbf>.
The first value in the precipitation input file must have the value
of January 1st and the last one of December 31st!

Input Filename: ppurulha.txt
Output Filename: ppurulha.out
First year of period (yyyy): 1981
NoData value = -99
```

Fuente: elaboración propia.

Los resultados se ubican en la carpeta donde se encuentra el programa; consisten en tres archivos, de los cuales interesa el que lleva el nombre asignado anteriormente como archivo de salida. Este archivo se abre con el bloc de notas, el resultado se puede visualizar en la figura 51.

Figura 51. Archivo de salida de pcpSTAT

Month	PCP_MM	PCPSTD	PCPSKW	PR_W1	PR_W2	PCPD
Jan.	22.55	2.7638	5.4268	0.0941	0.0526	2.85
Feb.	12.59	1.5884	3.8116	0.0812	0.1250	2.40
Mar.	13.40	1.6357	4.4720	0.0761	0.2182	2.75
Apr.	40.38	3.5623	5.3851	0.1610	0.3672	6.40
May.	119.73	6.3125	2.0263	0.2601	0.5830	12.35
Jun.	267.19	9.0869	0.9165	0.4819	0.7154	19.50
Jul.	194.04	8.9955	1.7766	0.3765	0.5278	14.40
Aug.	201.57	8.9731	1.4327	0.3170	0.5604	13.65
Sep.	239.62	9.3619	1.4564	0.4331	0.6416	17.30
Oct.	148.27	10.5297	2.8882	0.1826	0.4000	8.00
Nov.	64.57	6.8430	4.4681	0.1124	0.2857	4.20
Dec.	25.64	4.3257	7.3953	0.0568	0.0769	1.95

PCP_MM = average monthly precipitation [mm]
 PCPSTD = standard deviation
 PCPSKW = skew coefficient
 PR_W1 = probability of a wet day following a dry day
 PR_W2 = probability of a wet day following a wet day
 PCPD = average number of days of precipitation in month

Fuente: elaboración propia.

Con los resultados. se obtienen los siguientes parámetros para cada mes: PCPMM, PCPSTD, PCPSKW, PRW1, PRW2 y PCPD. El parámetro RAINHMMX se determina dividiendo PCPMM a la mitad. La ecuación utilizada se detalla a continuación:

$$RAINHMMX = \frac{PCPMM}{2} \quad \text{[Ecuación 13]}$$

Donde:

RAINHMMX = precipitación máxima en 0,5 horas (mm)

PCPMM = precipitación media mensual total (mm)

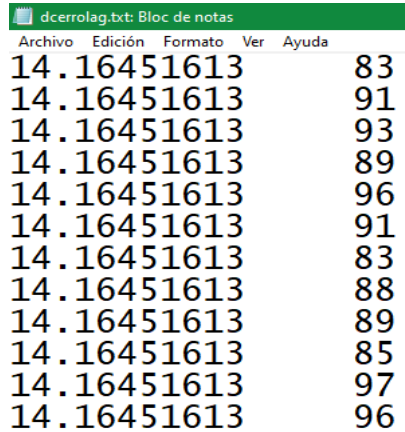
El valor de la temperatura media diaria del punto de rocío por mes se determina con la herramienta *Dewpoint Estimation*, disponible también en el portal web de SWAT: <https://swat.tamu.edu/software/>.

Esta herramienta requiere el ingreso del registro diario de temperatura media y porcentaje de humedad en un archivo de texto, con el formato de la figura 49.

La temperatura media diaria y el porcentaje de humedad se encuentran disponibles solo para las estaciones Cobán y SWAT. Para el resto, excepto por la estación Santa Margarita, se cuenta con la temperatura media mensual, por lo que fue necesario crear una serie diaria utilizando el valor mensual a lo largo de los días. Respecto a la humedad para estas estaciones, se usaron los mismos datos de la estación Cobán.

En el caso de la estación Margarita, que no cuenta con información de temperatura y humedad, se emplearon los resultados de punto de rocío de la estación Cobán.

Figura 52. **Esquema de archivo de texto de entrada para el registro diario de precipitación utilizado en Dewpoint Estimation**

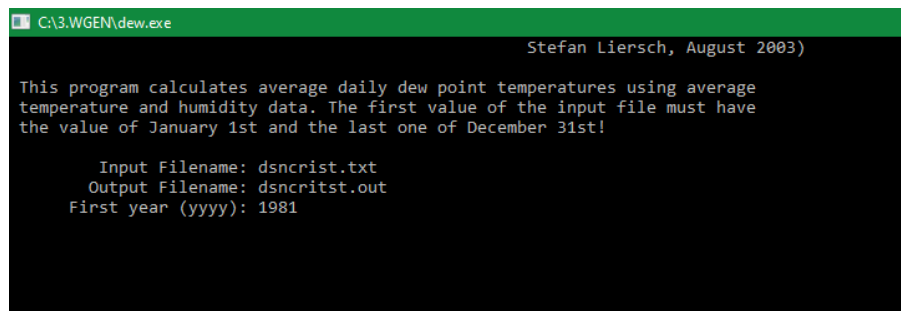


```
dcerrolag.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
14.16451613 83
14.16451613 91
14.16451613 93
14.16451613 89
14.16451613 96
14.16451613 91
14.16451613 83
14.16451613 88
14.16451613 89
14.16451613 85
14.16451613 97
14.16451613 96
```

Fuente: elaboración propia.

Una vez se cuenta con la información en este formato, se ubican los archivos en la misma carpeta que el programa, se ejecuta el mismo y se procede a ingresar la siguiente información: nombre del archivo con el registro, nombre del archivo de salida y el año de inicio de los datos, como se muestra en la figura 53.

Figura 53. **Ingreso de información en Dewpoint Estimation**



```
C:\3.WGEN\dew.exe
Stefan Liersch, August 2003)

This program calculates average daily dew point temperatures using average
temperature and humidity data. The first value of the input file must have
the value of January 1st and the last one of December 31st!

Input Filename: dsncrist.txt
Output Filename: dsncristst.out
First year (yyyy): 1981
```

Fuente: elaboración propia.

El resultado se ubica en la carpeta donde se encuentra el programa. Este archivo se abre con el bloc de notas; el resultado se puede visualizar en la figura 54.

Figura 54. Archivo de salida Dewpoint Estimation

```

dsncrist.out: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
| This file has been generated by the program 'dew.exe'
Input Filename = dsncrist.txt
Number of Years = 20
Number of Records = 7305

Number of NoData Values
tmp = 0
hmd = 289

Average Daily Dew Point Temperature for Period (1981 - 2000)

Month      tmp      hmd      dewpt
Jan        16.66   87.76   14.53
Feb        17.36   85.04   14.69
Mar        18.82   81.19   15.36
Apr        20.45   80.87   16.89
May        21.14   82.37   17.91
Jun        20.85   86.38   18.40
Jul        20.40   85.98   17.88
Aug        20.26   86.03   17.76
Sep        20.65   87.65   18.45
Oct        19.41   88.75   17.43
Nov        18.49   88.22   16.41
Dec        17.30   88.69   15.33
  
```

Fuente: elaboración propia.

Para el resto de las variables (radiación solar, viento, temperatura máxima y mínima), los estadísticos se determinaron en Excel a través de una tabla dinámica que utilizó los registros diarios para las estaciones Cobán y SWAT. El resto de las estaciones no cuentan con esta información, por lo que los resultados de la estación Cobán se replicaron para las demás estaciones.

La tabla del generador climático (ver datos en el apéndice 7), se debe importar, finalmente, a la base de datos de SWAT2012, que con anterioridad se ha modificado con datos de tipo y uso de suelo.

3.6.6. Información climática 2020-2100

Las capas con las proyecciones de los escenarios climáticos a escala regional se descargaron del Portal de datos de GCM del Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional (CGIAR). Estas capas se encuentran en formato ráster tipo TIF. Comprenden 26 modelos climáticos regionales diferentes para los escenarios de emisiones, durante cuatro períodos 2020-2049 [2030], 2040-2069 [2050], 2060-2089 [2070] y 2070-2099 [2080]. Cada conjunto de datos comprende cinco variables de forma mensual (biotemperatura, temperatura media, máxima, mínima y precipitación total).

Para obtener los datos de las capas, es necesario hacer uso de un script en RStudio; el script utilizado se muestra en la figura 55.

Figura 55. **Script para extraer datos de un ráster con un shape**

```
library(raster)
library(rgdal)
library(tiff)

# Ubicación del polígono
poligono<-readOGR("C:/2.CHIRPS/SHAPE/SWAT.shp")

# Directorio
setwd("C:/8.AR5_CIAT_30s/Rcp_8.5/ncar_ccsm4/r1i1p1/2020_2049")

# Listar los raster geotif que están en la carpeta de interés
files <- list.files(pattern = ".tif")

# Crear un multi raster
rastif<-stack(files)

# Extraer datos con polígonos
datos<-data.frame(t(extract(rastif, poligono, fun=mean, na.rm=T)))

# Guardar el archivo de los datos en csv
write.csv(datos, "6prep_2020_2049.csv", row.names = F)
```

Fuente: BARDALES, Walter. *Script para extraer datos de un ráster con un shape*. p. 1.

Este script requiere la ubicación de las capas, el archivo vectorial en formato Shapefile, con la ubicación de la estación y el nombre que se le asignará al archivo de salida. Este script extrae los datos y los publica como un archivo delimitado por comas tipo CSV.

Los datos se deben ordenar y verificar con QGIS a qué corresponden. Para este estudio, son de interés solo las variables de precipitación, temperatura máxima y mínima.

El procedimiento anterior se repite para extraer los datos de los modelos climáticos: cesm1_cam5, cnrm_cm5 y ncar_ccsm4; para los cuatro períodos: 2020-2049, 2040-2069, 2060-2089 y 2070-2099; y para los cuatro escenarios RCP 2,6, 4,5, 6,0 y 8,5; excepto para el modelo cnrm_cm5, que no cuenta con información del escenario RCP 6,0, pero si del resto. Los datos tabulados de los escenarios se encuentran del anexo 4 al 21.

Los datos fueron divididos en periodos de la siguiente forma: los valores de 2020-2049 fueron asignados al periodo 2020-2040; los de 2040-2069, al periodo 2041-2060; los de 2060-2089, al periodo 2061-2080 y los de 2070-2099, al periodo 2081-2100. Esto se hace con el fin de dividir la información en periodos homogéneos.

Esta información se ingresa posteriormente en el modelo calibrado en SWAT, pero es necesaria la serie diaria, ya que los datos de los escenarios son mensuales.

El procedimiento utilizado para generar la serie diaria de precipitación consistió en distribuir el valor mensual tomando como base el registro diario de un mes. Se utilizó la ecuación 13.

La serie diaria de temperatura máxima y mínima se generó utilizando el valor mensual a lo largo de los días.

Estas series deben guardarse como archivos de texto .txt; en el caso de la temperatura máxima y mínima, se sigue el esquema de la figura 47; y para la precipitación, el esquema de la figura 45. Para ambos casos, debe crearse un archivo con los datos de las estaciones, y se toma de referencia el esquema de la figura 46.

3.6.7. Información hidrométrica

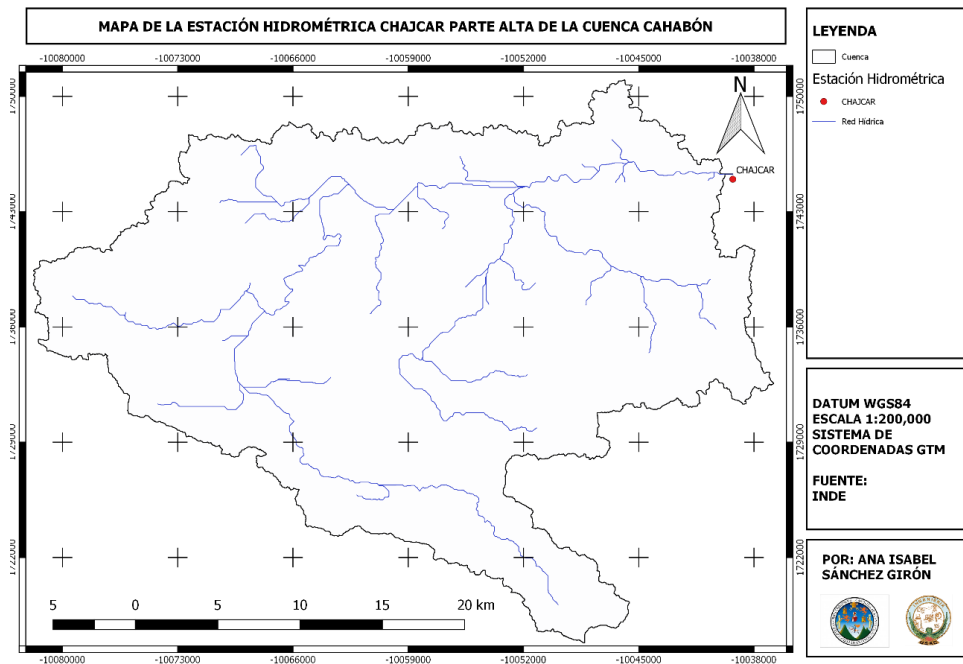
En la parte alta de la cuenca, se pueden identificar tres estaciones hidrométricas (Bethania, Chajcar y RI), de las cuales se seleccionó la estación Chajcar porque tiene datos de caudal del periodo correspondiente a la línea base del modelo hidrológico (1981-2000).

Tabla XXXV. Datos de la estación hidrométrica Chajcar

Estación	Coordenadas		Altitud (msnm)	Periodo hidrológico	Fuente
	Latitud	Longitud			
Chajcar	15,483	-90,184	1 049	1963-2003	INDE

Fuente: elaboración propia.

Figura 56. Mapa de la Estación Hidrométrica Chajcar en la cuenca



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

Los datos de caudal de la estación Chajcar son utilizados para realizar la calibración y, posteriormente, la validación del modelo. Como los datos de caudal son diarios, deben ser obtenidos previamente los valores promedios, para hacer la comparación con la salida del modelo. También deben ser ordenados en un archivo de Excel, para ingresarlos en SWAT-CUP, según lo muestra el formato de la figura 57.

Figura 57. **Esquema de formato para los datos de caudal observado**

1	FLOW_OUT_001_1981	20.96
2	FLOW_OUT_002_1981	19.71
3	FLOW_OUT_003_1981	18.2
4	FLOW_OUT_004_1981	18.79
5	FLOW_OUT_005_1981	18.2
6	FLOW_OUT_006_1981	17.61
7	FLOW_OUT_007_1981	17.04
8	FLOW_OUT_008_1981	15.93
9	FLOW_OUT_009_1981	15.39
10	FLOW_OUT_0010_1981	14.85
11	FLOW_OUT_0011_1981	14.72
12	FLOW_OUT_0012_1981	17.91

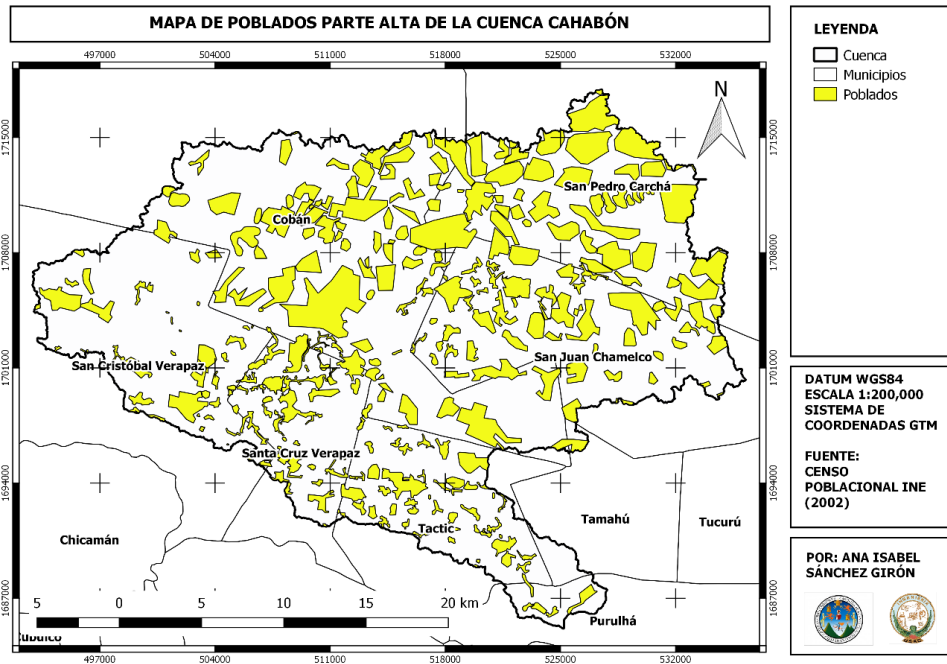
Fuente: elaboración propia.

3.6.8. Demanda futura de agua sector doméstico

La demanda del sector doméstico se conoce al proyectar la población en la cuenca a futuro. Esto se logra conociendo la cantidad de habitantes y las tasas de crecimiento poblacional por municipio en la cuenca.

Para determinar la cantidad de habitantes por municipio, se corta con la herramienta QGIS la capa vectorial de municipios en la cuenca, con la capa de poblados que contiene información de los habitantes en el Censo 2002, realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE). La cantidad de habitantes se muestra en la tabla VII.

Figura 58. Mapa de poblados en la cuenca



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

La tasa de crecimiento poblacional se calcula usando los datos de la población total por municipios, para el año 2002 (anexo 23) y para el año 2018 (anexo 24 y 25), según datos del Censo Poblacional del INE, utilizando la ecuación 1, descrita en el marco teórico:

$$r = \left(\frac{P_f}{P_o} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Donde:

r = tasa de crecimiento poblacional para el municipio de Cobán, Alta Verapaz

P_f = población del año 2018 para el municipio de Cobán, Alta Verapaz

P_o = población del año 2002 para el municipio de Cobán, Alta Verapaz

n = periodo

$$r = \left(\frac{212\,421}{144\,461} \right)^{\frac{1}{17}} - 1 = 0,0229$$

Tabla XXXVI. **Tasa de crecimiento porcentual y población para cada municipio en la cuenca**

Municipio	Tasa de crecimiento (%)	Población Censo 2002
Cobán	2,29	51 568
Purulhá	3,18	1 730
San Cristóbal Alta Verapaz	2,76	22 085
San Juan Chamelco	2,31	23 776
San Pedro Carchá	2,75	27 298
Santa Cruz Verapaz	3,12	9 900
Tactic	2,62	16 660
Tamahú	2,71	332
Total		247 415

Fuente: elaboración propia.

La población para el año 2020, 2040, 2060, 2080 y 2100 se calcula con la tasa de crecimiento poblacional en cada municipio de la cuenca (ver tabla XXXVI) al despejar la ecuación 1, descrita en el marco teórico:

$$P_f = P_o * (1 + r)^n$$

Donde:

r = tasa de crecimiento poblacional para el municipio de Cobán

P_f = población del año 2020 en la cuenca, para el municipio de Cobán

P_o = población del año 2002 en la cuenca, para el municipio de Cobán

n = periodo

$$P_f = 51\,568 * (1 + 0,229)^{19} = 79,346 \text{ habitantes}$$

El consumo se determina, entonces, multiplicando la población total en la cuenca a futuro con la dotación óptima de 100 litros/habitante/día, recomendada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de la siguiente forma:

$$C_f = P_f * d * D * 1\,000 \frac{m^3}{L} \text{ [Ecuación 14]}$$

Donde:

C_f = consumo de agua en miles de metros cúbicos para el mes de enero del año 2020.

D = dotación óptima 100 litros/habitante/día.

d = días del mes de enero.

P_f = población total en la cuenca para el año 2020.

$$C_f = 247\,415 \text{ hab} * 100 \frac{L}{\text{hab} * \text{día}} * 31 \text{ días} * 1\,000 \frac{m^3}{L} = 766\,986,5 \text{ m}^3$$

3.6.9. Demanda futura de agua sector agrícola

La demanda del sector agrícola se determina conociendo la necesidad de agua del cultivo o evapotranspiración del cultivo, según la ecuación de Blaney-Criddle. Para esto, primero se determina la evapotranspiración potencial con los datos de las estaciones de INSIVUMEH dentro y fuera de la cuenca (ver tabla XXXVII y figura 59).

Tabla XXXVII. Precipitación

No.	Estación	Longitud	Latitud
1	Sta. María Cahabón	-89,811	15,608
2	Panzós	-89,644	15,397
3	Chixoy quiché	-90,661	15,356
4	San Agustín Chixoy	-90,439	16,067
5	San Jerónimo	-90,25	15,061
6	Cubulco	-90,614	15,109
7	Las vegas	-88,967	15,6
8	Nebaj	-91,142	15,398
9	Sacapulas	-91,092	15,291
10	Pasabién	-89,68	15,03
11	Cobán	-90,4075	15,4667

Fuente: elaboración propia.

El cálculo requiere datos de temperatura media y porcentaje diario medio de horas anuales para la latitud. Se calcula con la ecuación 3 de la siguiente forma:

$$ET_o = p(0,46T_{mean} + 8)$$

Donde:

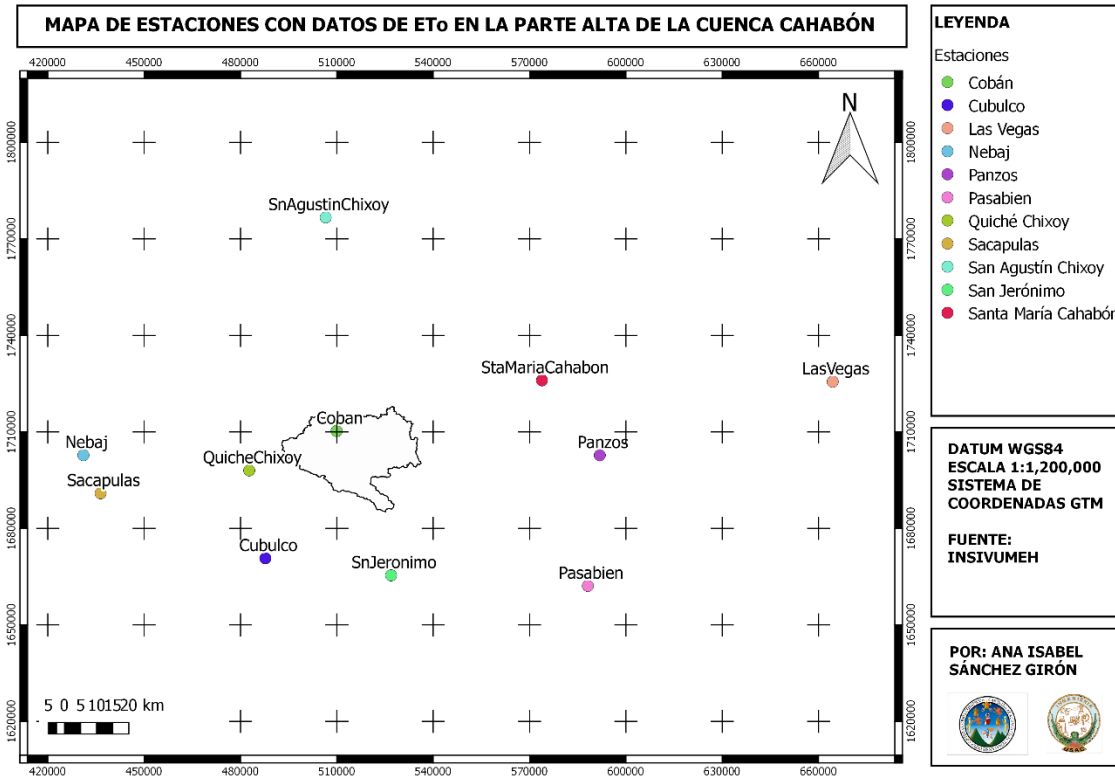
ET_o = evapotranspiración potencial de referencia para el cultivo (mm/día).

T_{mean} = temperatura promedio diario (°C).

p = porcentaje diario medio de horas anuales para la latitud de la estación (valor interpolado en la tabla del anexo 1).

$$ET_o = 0,259 * (0,46 * 16,186 + 8) = 4,001 \text{ mm/día}$$

Figura 59. Mapa de estaciones con datos de ETo en la cuenca

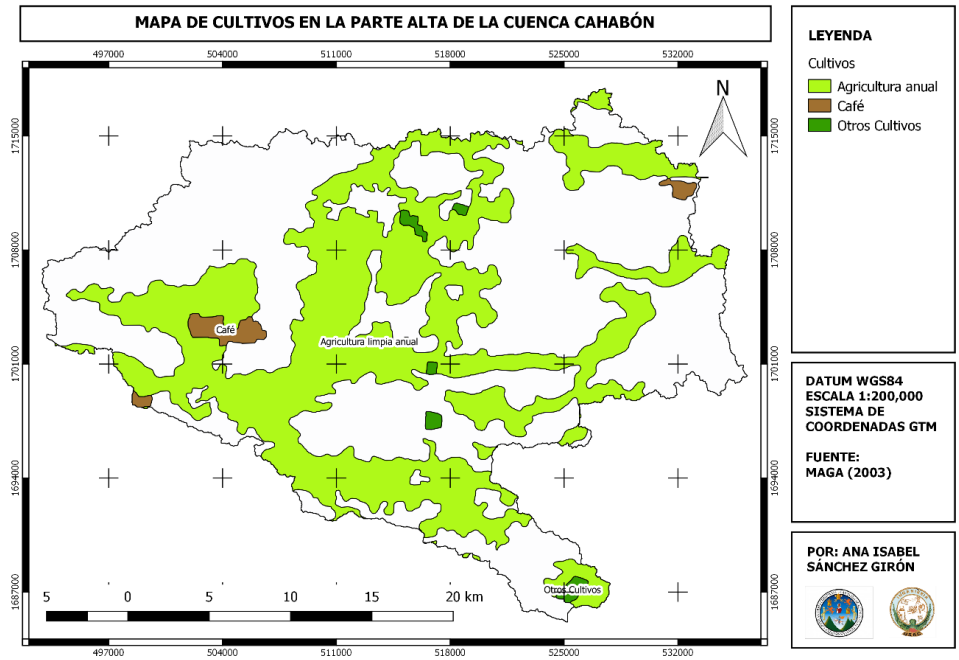


Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

Los valores de temperatura media, latitud de la estación, porcentaje medio diario de horas anuales y la evapotranspiración potencial por estación se encuentran en el apéndice 8.

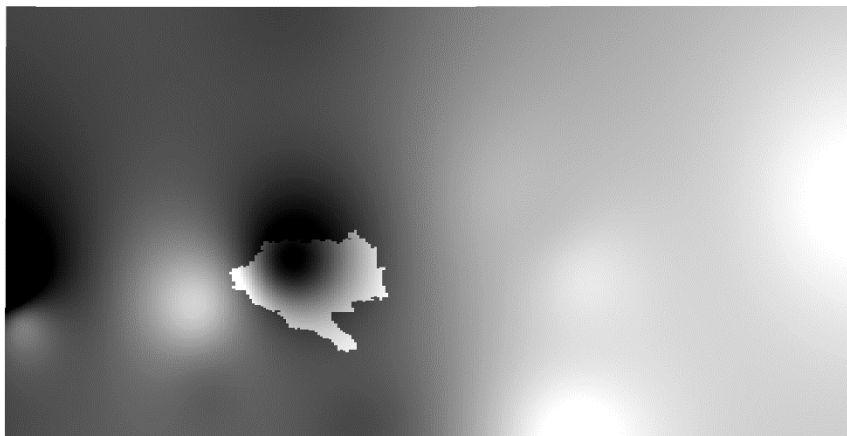
Como la evapotranspiración potencial está dada por estaciones, es necesario obtener el valor promedio para la superficie de cultivo (ver figura 60). Para esto, es necesario hacer uso de la herramienta de interpolación (ver figura 61) y análisis estadístico de zonas en QGIS, y así obtener la evapotranspiración que es utilizada más adelante.

Figura 60. Mapa de cultivos en la cuenca



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

Figura 61. Interpolación para el mes de enero



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

Tabla XXXVIII. **Evapotranspiración de referencia del cultivo (ET_o), factores de cultivo (K_c) y área (m²)**

Cultivo	ET _o (mm/día)		
	Café	Maíz (Cultivo anual)	Cardamomo (otros cultivos)
Enero	4,22	4,21	4,23
Febrero	4,36	4,35	4,37
Marzo	4,71	4,70	4,72
Abril	5,09	5,08	5,10
Mayo	5,32	5,31	5,33
Junio	5,29	5,28	5,29
Julio	5,22	5,21	5,22
Agosto	5,04	5,03	5,03
Septiembre	5,02	5,01	5,02
Octubre	4,71	4,70	4,71
Noviembre	4,34	4,33	4,35
Diciembre	4,10	4,09	4,11
K _c	1,1	1,2	0,7
Área (m ²)	8 217 928,1	298 465 153	4 958 343,62

Fuente: elaboración propia.

Con el valor de evapotranspiración potencial, se puede obtener la cantidad de agua que necesita un cultivo multiplicando por el factor de cultivo, según la FAO (anexo 2 y 3). El cálculo se realiza con la ecuación 4 de la siguiente forma:

$$ET_{crop} = ET_o * K_c * d$$

Donde:

ET_{crop} = evapotranspiración del cultivo de café para el mes de enero (mm/mes).

ET_o = evapotranspiración potencial de referencia para la superficie de cultivo de café para el mes de enero (mm/día).

K_c = factor de cultivo para el café.

d = número de días para el mes de enero.

$$ET_{crop} = 4,22 * 1,1 * 31 = 143,98 \text{ mm/mes}$$

3.6.10. Demanda futura de agua sector hidroeléctrico

La demanda se estima comparando el caudal turbinado promedio mensual con los valores de caudal a futuro promedio para cada periodo que se muestran en los resultados. El valor de caudal turbinado para cada hidroeléctrica se encuentra en los anexos 26 y 28. En el caso de la Hidroeléctrica RENACE, se utilizó de comparación el valor de caudal turbinado máximo, porque los valores no pudieron ser brindados por la empresa, pues no es información pública. Por el contrario, la Hidroeléctrica CHICHAIC, al ser propiedad del Instituto Nacional de Electrificación (INDE), los datos fueron proporcionados para la investigación.

La relación entre el caudal turbinado promedio mensual y el caudal a futuro se calcula con la ecuación 12.

$$\frac{C_f}{C_t} = \frac{C_f}{C_t} * 100 \% * C_e \text{ [Ecuación 15]}$$

Donde:

C_f/C_t = relación de caudal futuro y turbinado para el mes de enero.

C_f = caudal futuro promedio mensual para el mes de enero (m^3/s).

C_e = porcentaje caudal ecológico.

C_t = caudal turbinado mensual para el mes de enero en la Hidroeléctrica RENACE (m^3/s).

$$\frac{C_f}{C_t} = \frac{15,31}{34,5} * 100 \% * 90 \% = 13,779 \text{ m}^3$$

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

En esta sección se describe como fue ordenada y procesada la información para el modelo.

3.7.1. Ordenamiento de los datos de entrada al modelo

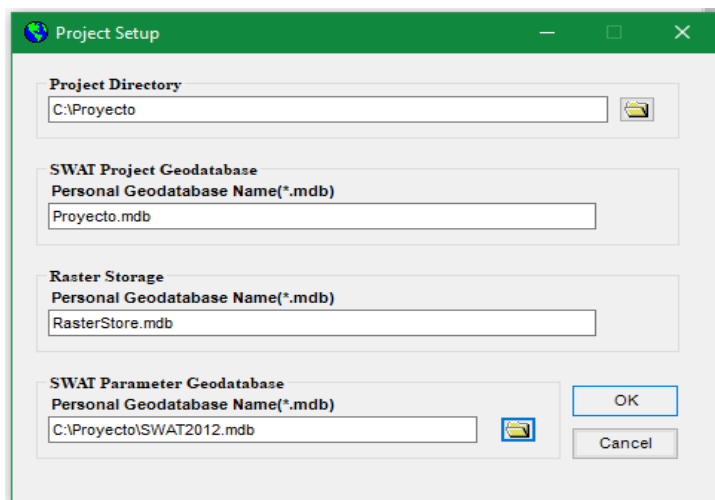
La siguiente información debe ser ordenada en la misma carpeta para ser utilizada por SWAT:

- Datos meteorológicos
 - Archivos tipo .csv con la información meteorológica (temperatura máxima y mínima, precipitación, viento, radiación solar y humedad) por estación.
 - Archivos tipo .csv con la información de ubicación por estación.
- Elevación: capa en formato ráster con la información de elevación digital de la cuenca.
- Uso del suelo: capa en formato vectorial con la información de uso del suelo en la cuenca.
- Tipo de suelo: capa en formato vectorial con la información de tipo de suelo en la cuenca.
- Punto de aforo: capa en formato vectorial con la ubicación del punto de aforo.
- Base de datos: base de datos en Access.
- Escenarios climáticos: estos datos serán posteriormente utilizados en el modelo calibrado:
 - Archivos tipo .csv con la información de los cambios de temperatura y porcentaje de variación de la precipitación para cada escenario en el periodo 2020-2099.
 - Archivos tipo .csv con la información de ubicación por estación.

3.7.2. Procesamiento de la información en SWAT

- Crear proyecto en SWAT.
- Configurar el proyecto en Project Setup: especificar el directorio y seleccionar la base de datos a utilizar.

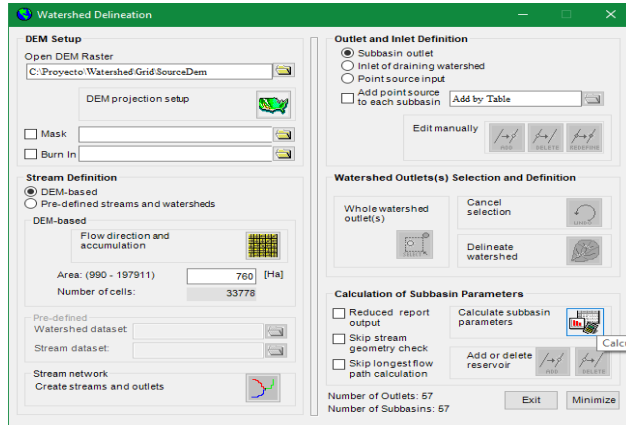
Figura 62. Configuración del proyecto en SWAT



Fuente: elaboración propia.

- Delimitar la cuenca y las subcuencas con Automatic Watershed Delineation: seleccionar capa ráster, punto de aforo y definir resolución (760 Ha).

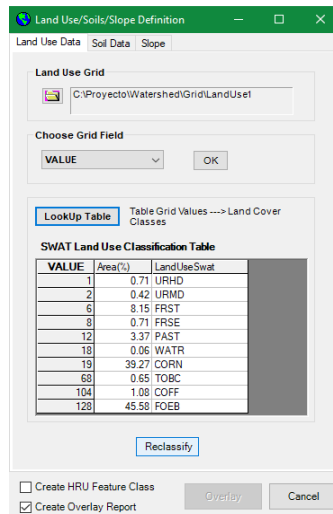
Figura 63. Delimitar cuenca y subcuenca



Fuente: elaboración propia.

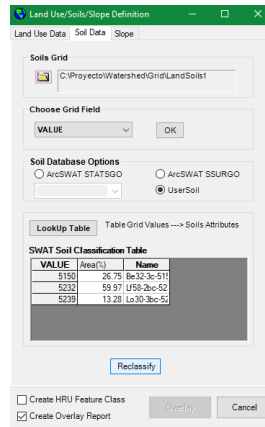
- Definir las unidades de respuesta hidrológica (HRU) con Land Use/Soils/Slope Definition: ingresar la información de las capas de uso y tipo de suelo, así como datos de rangos de pendientes.

Figura 64. Ingreso de información de uso suelo



Fuente: elaboración propia.

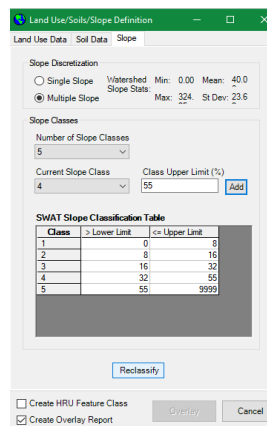
Figura 65. Ingreso de información de tipo suelo



Fuente: elaboración propia.

Los rangos de pendientes se definieron con base a la matriz de capacidad de uso de la tierra, definidas por Instituto Nacional de Bosques (INAB) para la región fisiográfica, donde se encuentra la cuenca (ver tabla en anexo 22).

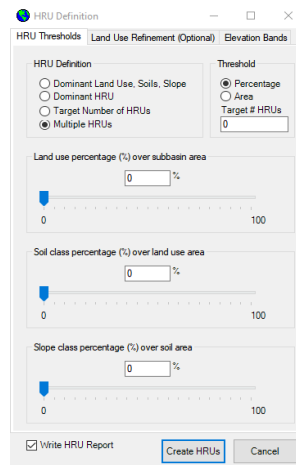
Figura 66. Ingreso de información de rangos de pendientes



Fuente: elaboración propia.

- Definir las unidades de respuesta hidrológica (HRU) con HRU Definition.

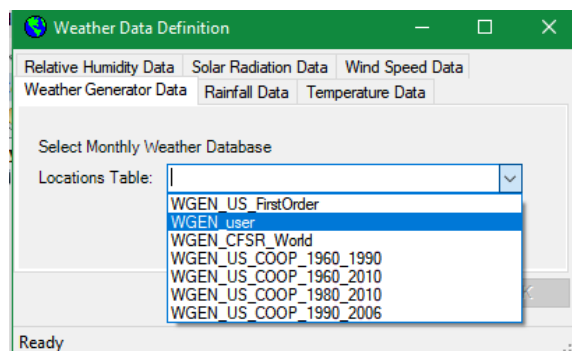
Figura 67. Ingreso de información de rangos de pendientes



Fuente: elaboración propia.

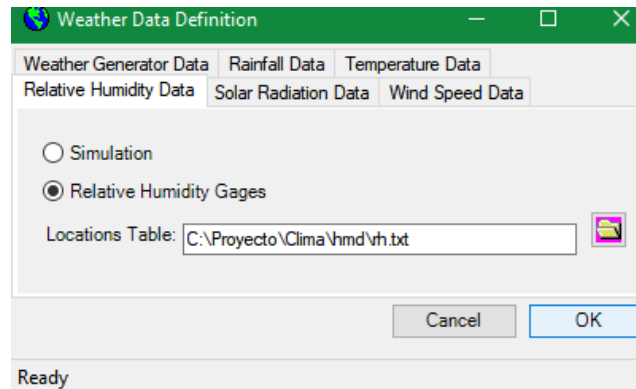
- Definir la información meteorológica en Weather Data Definition: seleccionar el generador climático e ingresar los parámetros meteorológicos a SWAT.

Figura 68. Selección del generador climático



Fuente: elaboración propia.

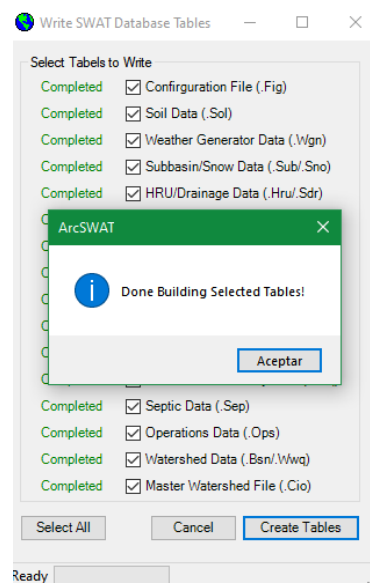
Figura 69. Ingreso de información climática



Fuente: elaboración propia.

- Construir las tablas con información para el modelo con Write SWAT Database Tables.

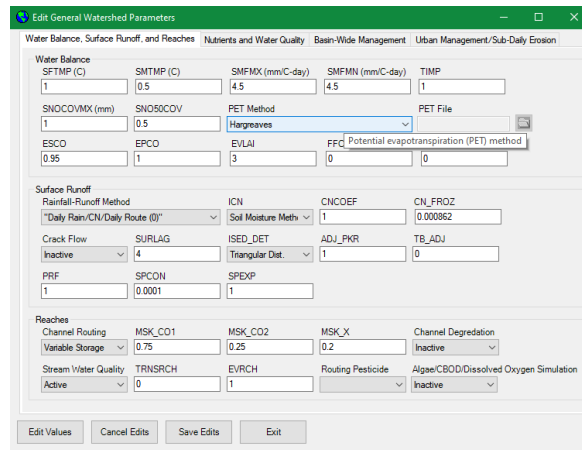
Figura 70. Construcción de las tablas para el modelo



Fuente: elaboración propia.

- Editar información general en Edit General Watershed Parameters: elegir el método de Hargreaves para el cálculo de la evapotranspiración.

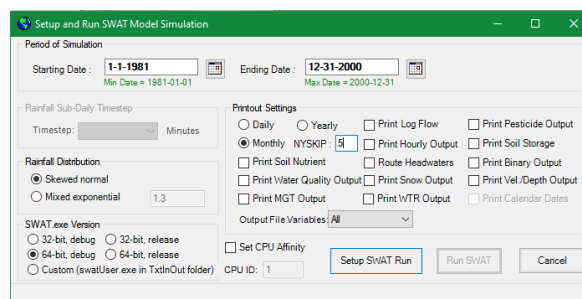
Figura 71. Selección del método de Hargreaves



Fuente: elaboración propia.

- Ejecución del modelo con Setup and Run SWAT Model Simulation: establecer la fecha de inicio y fin de los datos y configurar a 5 años el tiempo a omitir.

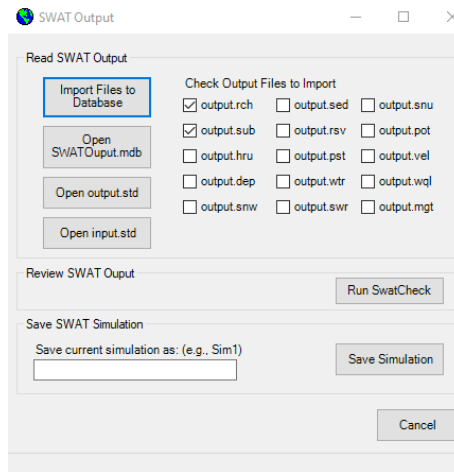
Figura 72. Configuración del modelo para su ejecución



Fuente: elaboración propia.

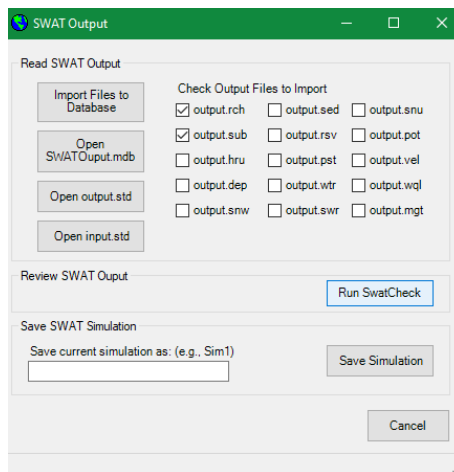
- Generar archivos de salida con SWAT: importar los archivos rch y sub a la base de datos, realizar la verificación y guardar la simulación.

Figura 73. **Importar archivos a la base de datos**



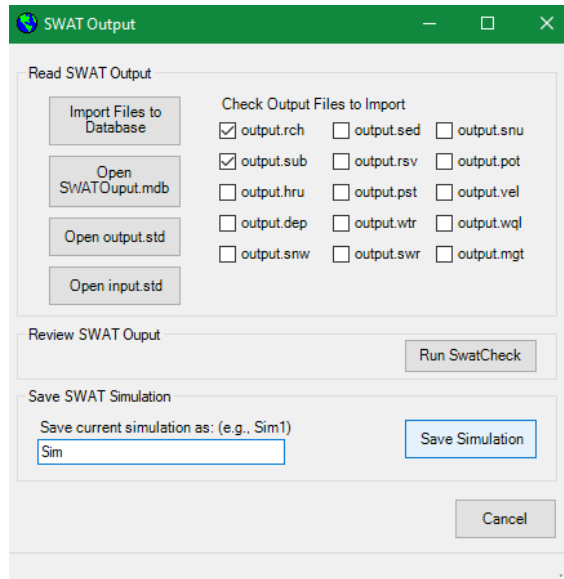
Fuente: elaboración propia.

Figura 74. **Comprobación del modelo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 75. **Guardar simulación**



Fuente: elaboración propia.

- Los resultados de caudal del modelo se encuentran en la base de datos SWATOutput, dentro de la carpeta TablesOut, donde se ubica la simulación (Sim en este caso). Los datos, dentro de la base de datos, corresponden a la tabla rich en la columna FLOW_OUT.

Figura 76. Base de datos SWATOutput.mdb

SUB	YEAR	MON	AREAkm2	FLOW_INcr	FLOW_OUTcr	EVAPcms	TLOSScms	SED_INTon	SED_OUTtc	SEDCONCr	ORGN
1	1986	1	10.69	0.341	0.3406	0.0003093	0	406300	406300	66590	
2	1986	1	723.7	29.83	29.83	0.0007699	0	32950	15500	103.5	11
3	1986	1	11.98	0.468	0.4679	0.0001782	0	365400	365400	54590	
4	1986	1	706.3	29.3	29.3	0.004085	0	438900	26180	203	11
5	1986	1	17.23	0.5322	0.5321	0.0001279	0	968800	312.6	105.9	
6	1986	1	760	30.98	30.98	0.002477	0	635200	31210	260.4	11
7	1986	1	748.6	30.63	30.62	0.01189	0	1103000	31930	279.4	11
8	1986	1	9.966	0.3123	0.3122	0.0000937	0	538700	538700	68000	
9	1986	1	8.685	0.2674	0.2674	0.00007219	0	512600	512600	68860	
10	1986	1	8.102	0.2512	0.2511	0.0001033	0	435000	435000	67900	
11	1986	1	15.06	0.693	0.6921	0.000996	0	66630	66630	17350	
12	1986	1	671.9	27.9	27.9	0.0002457	0	15550	15550	153.8	10
13	1986	1	692.2	28.77	28.76	0.01128	0	309200	23950	168.3	11
14	1986	1	433	19.42	19.41	0.01153	0	99370	9187	104.9	8
15	1986	1	238.8	8.482	8.481	0.0006965	0	23290	6182	198.8	2
16	1986	1	65.17	4.132	4.131	0.001384	0	1028000	2155	82.49	1
17	1986	1	19.69	1.239	1.238	0.001138	0	1009000	1009000	6452	
18	1986	1	11.96	0.7747	0.7741	0.0005279	0	612200	612200	6452	
19	1986	1	36.2	2.284	2.283	0.000683	0	1653000	2408	158.6	1
20	1986	1	375	16.03	16.02	0.004313	0	476100	6232	86.2	6
21	1986	1	414	18.55	18.54	0.002731	0	1609000	10130	114.8	7

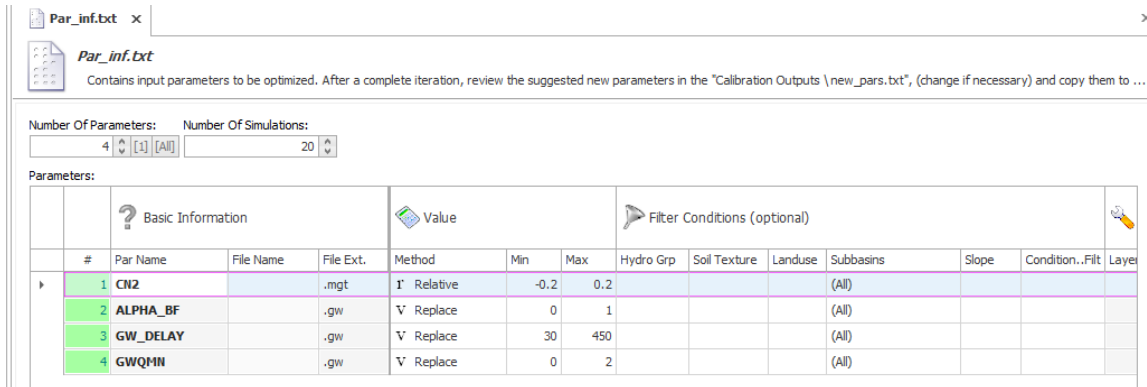
Fuente: elaboración propia.

- El modelo se calibra y valida. Luego se repiten los pasos 1 al 10, para ingresar los datos meteorológicos obtenidos de los distintos escenarios climáticos para el periodo 2020-2099.

3.7.3. Procesamiento de la información en SWAT-CUP

- Crear el proyecto tipo Sufi2 en SWAT-CUP: indicar la ubicación del archivo de salida de la simulación del modelo (TxtInOut); asignar nombre al proyecto y su ubicación.
- Modificar los parámetros de calibración con Calibration Inputs.
- Mantener los valores predeterminados en la ventana Par_inf.txt para realizar una calibración de prueba con 20 simulaciones.

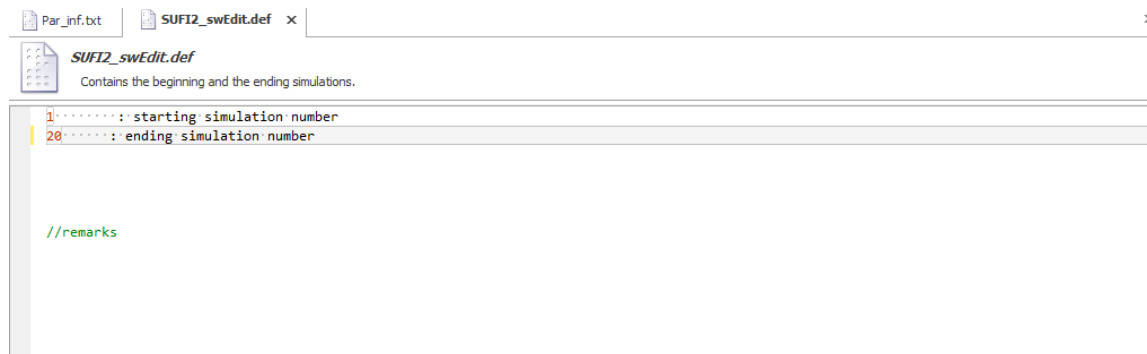
Figura 77. Ventana Par_Inf.txt



Fuente: elaboración propia.

- En la ventana SUFI2_swEdit.def, se indicar la simulación inicial y la final.

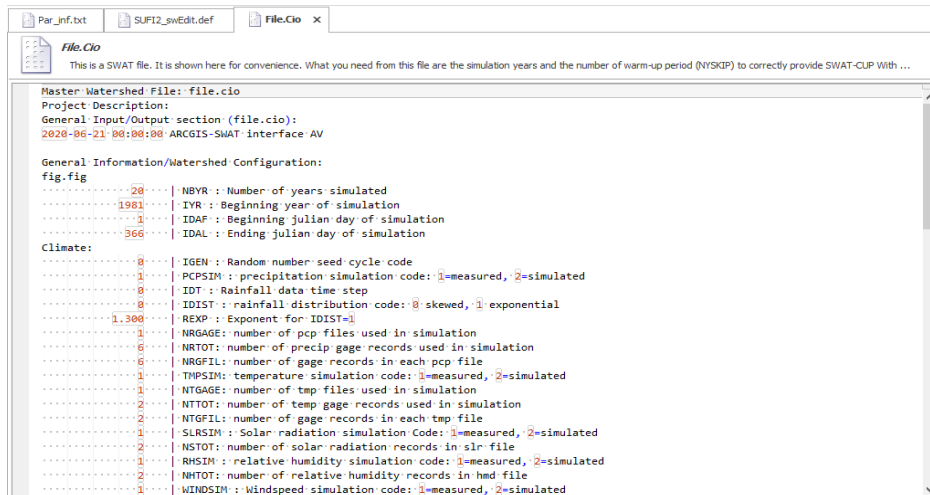
Figura 78. Ventana SUFI2_swEdit.def



Fuente: elaboración propia.

- Indicar en la ventana File.Cio el número de años de los datos (20) y los años a omitir (5).

Figura 79. Ventana File.Cio



```
File.Cio
This is a SWAT file. It is shown here for convenience. What you need from this file are the simulation years and the number of warm-up period (NYSKIP) to correctly provide SWAT-CUP With ...

Master Watershed File: file.cio
Project Description:
General Input/Output section: (file.cio):
2020-06-21 00:00:00 ARCGIS-SWAT interface AV

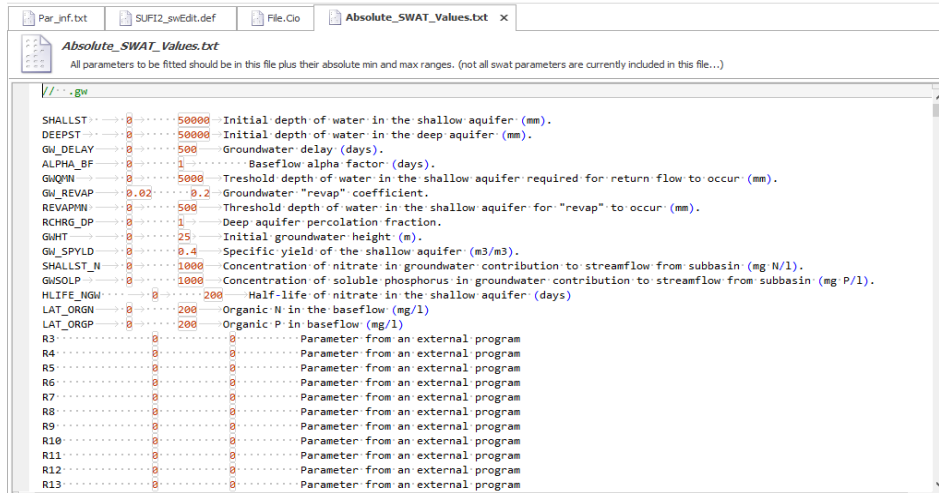
General Information/Watershed Configuration:
fig.fig
.....20.....| NBYR : Number of years simulated
.....1981.....| IYR : Beginning year of simulation
.....1.....| IDAP : Beginning julian day of simulation
.....366.....| IDAL : Ending julian day of simulation

Climate:
.....0.....| IGEN : Random number seed cycle code
.....1.....| PCPSIM : precipitation simulation code: 1=measured, 2=simulated
.....0.....| IDT : Rainfall data time step
.....0.....| IDIST : rainfall distribution code: 0=skewed, 1=exponential
.....1.300.....| REXP : Exponent for IDIST=1
.....1.....| NRGAGE : number of pcp files used in simulation
.....6.....| NRTOT : number of precip gage records used in simulation
.....6.....| NRGFIL : number of gage records in each pcp file
.....1.....| THPSIM : temperature simulation code: 1=measured, 2=simulated
.....1.....| NTGAGE : number of tmp files used in simulation
.....2.....| NTTOT : number of temp gage records used in simulation
.....2.....| NTGFIL : number of gage records in each tmp file
.....1.....| SLRSIM : Solar radiation simulation Code: 1=measured, 2=simulated
.....2.....| NSTOT : number of solar radiation records in slr file
.....1.....| RHSIM : relative humidity simulation code: 1=measured, 2=simulated
.....2.....| NHTOT : number of relative humidity records in hmd file
.....1.....| WINDSIM : Windspeed simulation code: 1=measured, 2=simulated
```

Fuente: elaboración propia.

- Para todas las calibraciones, la ventana Absolute_SWAT_Values no debe modificarse.

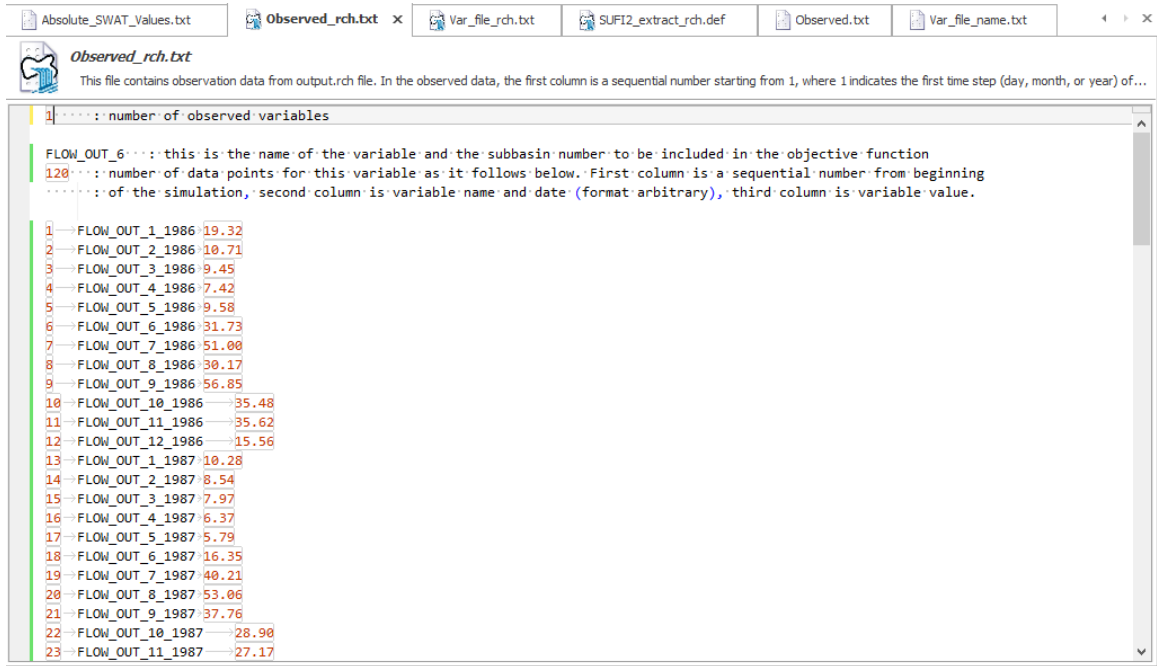
Figura 80. Ventana Absolute_SWAT_Values.txt



Fuente: elaboración propia.

- Los valores de caudal observado, según el formato indicado en la figura 57, deben colocarse en la ventana Observed_rch.txt sin incluir los 5 años que se omiten al inicio y los últimos 5 años que se utilizarán para la validación. Además, hay que indicar lo siguiente: el número de variables observadas (1), el nombre de la subcuenca donde se encuentra el punto de aforo (FLOW_OUT_6) y el número de datos de caudal (120).

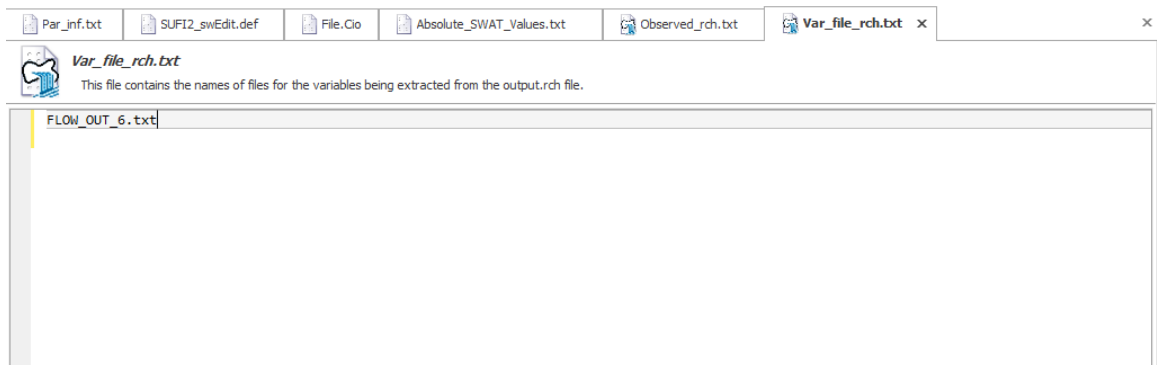
Figura 81. Ventana Observed_rch.txt



Fuente: elaboración propia.

- En la ventana Var_file_rch.txt, indicar el nombre de la subcuenca donde se encuentra el punto de aforo (FLOW_OUT_6).

Figura 82. Ventana Var_file_rch.txt



Fuente: elaboración propia.

- En la ventana SUFI2_extract_rch.def, indicar el número de variables (1), el número de columna donde se encuentran los datos de caudal de salida del modelo (7), la cantidad total de subcuencas (57), la cantidad de subcuencas de donde se obtendrá la información (1), el número de subcuenca (6), el año de inicio de los datos (1986), el último año de los datos (1995) y, finalmente, colocar la opción para que la calibración sea de forma mensual (2).

Figura 83. Ventana SUFI2_extract_rch.def

```

output_rch ..... swat output file name
1 ..... number of variables to get
7 ..... variable column number(s) in the swat output file (as many as the above number)
57 ..... total number of reaches (subbasins) in the project
1 ..... number of reaches (subbasins) to get for the first variable
6 ..... reach (subbasin) numbers for the first variable

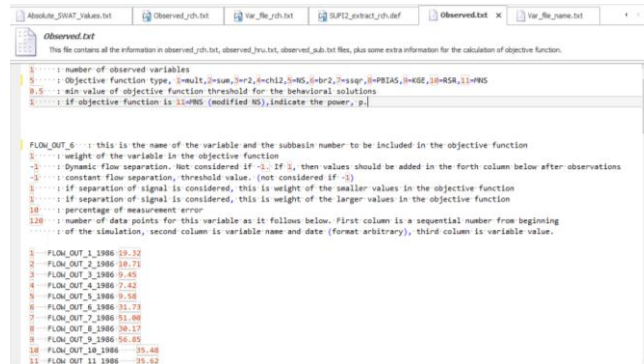
1986 ..... beginning year of simulation not including the warm up period
1995 ..... end year of simulation
2 ..... time step (1=daily, 2=monthly, 3=yearly)

// Remarks
  
```

Fuente: elaboración propia.

- Al igual que con la ventana Observed.rch, en Observed.txt, se indica el número de variables observadas (1), el nombre de la subcuenca donde se encuentra el punto de aforo (FLOW_OUT_6), el número de datos de caudal (120) y los valores de caudal observados. La función objetivo no se modifica, se utiliza la predeterminada.

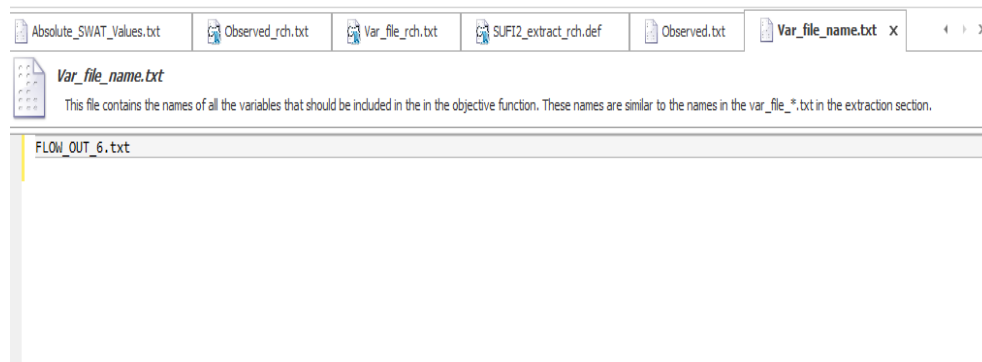
Figura 84. Ventana Observed.txt



Fuente: elaboración propia.

- Finalmente, en la ventana Var_file_rch.txt, se indica el nombre de la subcuenca donde se encuentra el punto de aforo (FLOW_OUT_6).

Figura 85. Ventana Var_file_name.txt



Fuente: elaboración propia.

- Ejecutar la calibración y guardar la primera iteración.

- Realizar el análisis de sensibilidad siguiendo los pasos indicados en el numeral 2 y 3, pero para 25 simulaciones.
- Visualizar los resultados del análisis de sensibilidad de la iteración en la ventana Global Sensivity de la pestaña Sensivity analysis.

Figura 86. **Ventana Global Sensivity**

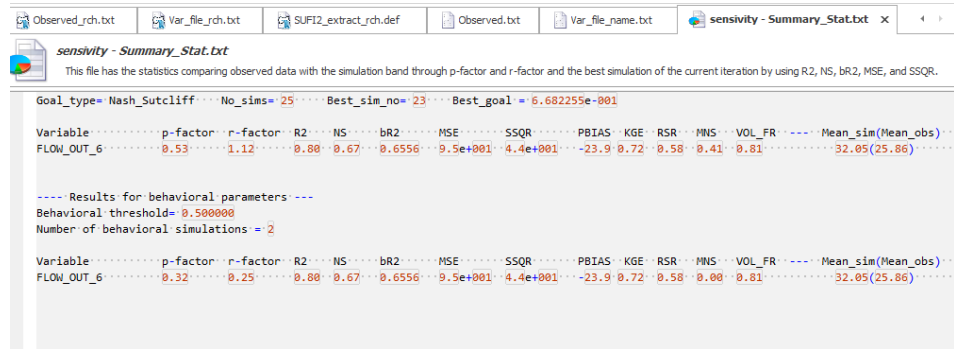
The screenshot shows a software window titled 'sensitivity - Global Sensivity'. Below the title bar, there is a subtitle: 'Global sensitivity analysis can be performed after an iteration.' Below this is a table with three columns: 'Parameter Name', 't-Stat', and 'P-Value'. The table contains 17 rows of data.

Parameter Name	t-Stat	P-Value
5:R_ESCO.hru	-0.055211363	0.957176300
14:R_OV_N.hru	-0.248139827	0.809595253
10:R_SOL_AWC(.,).sol	0.261406539	0.799662810
12:V_GWQMN.gw	-0.262875439	0.798565381
6:V_CH_K2.rte	0.501161883	0.628285285
8:V_CH_N2.rte	0.777563751	0.456778071
2:V_GW_DELAY.gw	0.843646241	0.420723903
13:V_EPCCO.bsn	0.867042630	0.408439989
9:V_REVAPMN.gw	-1.113268240	0.294441645
3:V_GW_REVAP.gw	-1.329848682	0.216284690
4:R_SOL_BD(.,).sol	-1.474225580	0.174518684
15:R_SOL_K(.,).sol	-2.003354326	0.076139889
11:V_ALPHA_BF.gw	2.057923587	0.069714082
7:V_ALPHA_BNK.rte	-3.779142625	0.004354754
1:R_CN2.mgt	-4.921261121	0.000823177

Fuente: elaboración propia.

- Visualizar los resultados del análisis estadístico de la iteración en la ventana Summary_Stat.txt de la pestaña Calibration outputs.

Figura 87. Ventana Summary_Stat.txt



Fuente: elaboración propia.

- Implementar el proceso de calibración final cambiando los rangos de valores para los parámetros identificados en el análisis de sensibilidad en el periodo 1986-1995, según la tabla XXXIX.

Tabla XXXIX. Rango de valores utilizados para los parámetros en la calibración

Método	Parámetro	Tabla de entrada en SWAT	Mínimo valor	Máximo valor
R	CN2	Management (.mgt)	-0,2	0,2
V	GW_DELAY	Groundwater (.gw)	30	450
V	GW_REVAP	Groundwater (.gw)	0	0,2
R	SOL_BD	Soils (.sol)	-0,5	0,6
R	ESCO	HRU (.hru)	0,8	1
V	CH_K2	Routing (.rte)	5	130
V	ALPHA_BNK	Routing (.rte)	0	1
V	CH_N2	Routing (.rte)	0	0,3
V	REVAPMN	Groundwater (.gw)	0	10
R	SOL_AWC	Soils (.sol)	-0,2	0,4
V	ALPHA_BF	Groundwater (.gw)	0	1
V	GWQMN	Groundwater (.gw)	0	2
V	EPCO	Basin (.bsn)	0	1
R	OV_N	HRU (.hru)	-0,2	0
R	SOL_K	Soils (.sol)	-0,8	0,8

Fuente: elaboración propia.

- Visualizar los resultados de la calibración en la ventana Sensivity analysis, Summary_Stat.txt y Best_Par.txt. Si los parámetros estadísticos mostrados en la ventana Summary_Stat.txt cumplen con lo establecido en la tabla XL y XLI, se procede a realizar la calibración, de lo contrario se deben realizar más simulaciones. En este caso, con 100 simulaciones fue suficiente, ya que la mejor simulación fue la número 6; no fue necesario realizar más.

Figura 88. Ventana Best_Par.txt

```

Goal_type= Nash_Sutcliffe  No_sims= 100  Best_sit_no= 6  Best_goal = 7.856675e-001

Parameter_Name  Fitted Value  Min_value  Max_value
11R_CN2_ngt     0.182000     0.200000   0.200000
21V_OH_DELAY.ge 331.899994   30.000000  430.000000
31V_OH_REVAP.ge 0.151800     0.000000   0.200000
41R_SOL_BD(...).sol 0.297500     0.500000   0.600000
51R_ESCO_hru    0.935000     0.000000   1.000000
61V_CN2_rte     0.125000     0.000000   130.000000
71V_ALPHA_BNK_rte 0.445000     0.000000   1.000000
81V_CN2_rte     0.124500     0.000000   0.300000
91V_KCUPRR.ge  0.250000     0.000000   10.000000
101R_SOL_AWC(...).sol 0.250000     0.200000   0.400000
111V_ALPHA_BF.ge 0.250000     0.000000   1.000000
121V_BAQR.ge    1.500000     0.000000   2.000000
131V_SPC0.bsn  0.845000     0.000000   1.000000
141R_DV_N_hru  -0.187000    0.200000   0.000000
151R_SOL_K(...).sol 0.504000     0.000000   0.800000

```

Fuente: elaboración propia.

3.7.4. Validación del modelo

- Ingresar a la base de datos del proyecto en ArcSWAT, y con el asistente de consulta, modificar las tablas con los valores de los parámetros ajustados, mostrados en la ventana Best_Par.txt, después de la calibración, según el método:

Dónde:

r = el valor se multiplica por 1 más el valor del parámetro ajustado.

v = el valor se sustituye por el valor del parámetro ajustado.

- Con la base de datos modificada, se ejecuta el modelo en SWAT para el periodo 1986-2000.
- Realizar el análisis estadístico a los resultados obtenidos.

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realiza con los resultados de caudal obtenidos para el periodo 1986-1995 (calibración) y 1995-2000 (validación). Se realiza un ajuste de desfase y se calculan los estadísticos para comparar con la tabla XXI y XXII, con el fin de evaluar el modelo.

Tabla XL. **Criterios de calificación generales para tres estadísticos recomendados en un período mensual**

Calificación del modelo	RSR	NSE	PBIAS (%)
Muy bueno	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$0,75 \leq NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Bueno	$0,50 \leq RSR \leq 0,60$	$0,65 \leq NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$
Satisfactorio	$0,60 \leq RSR \leq 0,70$	$0,50 \leq NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$
Insatisfactorio	$RSR > 0,70$	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS > \pm 25$

Fuente: MORIASI, Daniel; et. al. *Model evaluation guidelines for systematic Quantification of accuracy in watershed simulations*. p. 891.

Tabla XLI. **Criterios de calificación generales para cinco estadísticos recomendados en un período mensual**

Calificación del modelo	R ²	NSE	RSR	PBIAS	KGE
Muy bueno	$0,75 < R^2 \leq 1$	$0,75 < NSE \leq 1$	$0 \leq RSR \leq 0,5$	$PBIAS < \pm 10$	$0,9 \leq KGE \leq 1$
Bueno	$0,65 < R^2 \leq 0,75$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$0,5 < RSR \leq 0,6$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$	$0,75 < KGE \leq 0,9$
Satisfactorio	$0,5 < R^2 \leq 0,65$	$0,5 < NSE \leq 0,65$	$0,6 < RSR \leq 0,7$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$	$0,5 < KGE \leq 0,75$
Insatisfactorio	$R^2 \leq 0,5$	$NSE \leq 0,5$	$RSR > 0,7$	$PBIAS > \pm 25$	$KGE < 0,5$

Fuente: KOUCHI, Delaram Houshmand; et. al. *Sensitivity of Calibrated Parameters and Water Resource*. p. 6.

El ajuste de desfase se determina al multiplicar por un factor de ajuste cada uno de los valores de caudal obtenidos después de la calibración, de la siguiente forma:

$$Q_a = Q_s * \left(\frac{\overline{Q_o}}{\overline{Q_s}} \right) \quad [\text{Ecuación 16}]$$

Donde:

Q_a = caudal ajustado m^3/s

Q_s = caudal simulado m^3/s

$\overline{Q_o}$ = caudal promedio observado/real m^3/s

$\overline{Q_s}$ = caudal promedio simulado m^3/s

$$Q_a = 28,87 * \left(\frac{27,17}{38,87} \right) = 20,18 \text{ m}^3/\text{s}$$

Los estadísticos se determinan posteriormente utilizando la serie de datos de caudales ajustados con las ecuaciones definidas para el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el coeficiente de determinación (R^2), el sesgo porcentual (Percent bias - PBIAS), eficiencia de Kling-Gupta (KGE), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y la desviación estándar de las observaciones (RSR).

4. RESULTADOS

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos en la investigación mediante figuras, tablas y gráficas. La estructura presentada responde a los objetivos de la investigación. Muestra, en la primera sección, el modelo generado con SWAT, su calibración y validación, posteriormente, los caudales a futuro, la demanda por sectores y su comparación.

4.1. Modelo hidrológico de la cuenca

A continuación, se presenta el modelo hidráulico.

Figura 89. Mapa de subcuencas

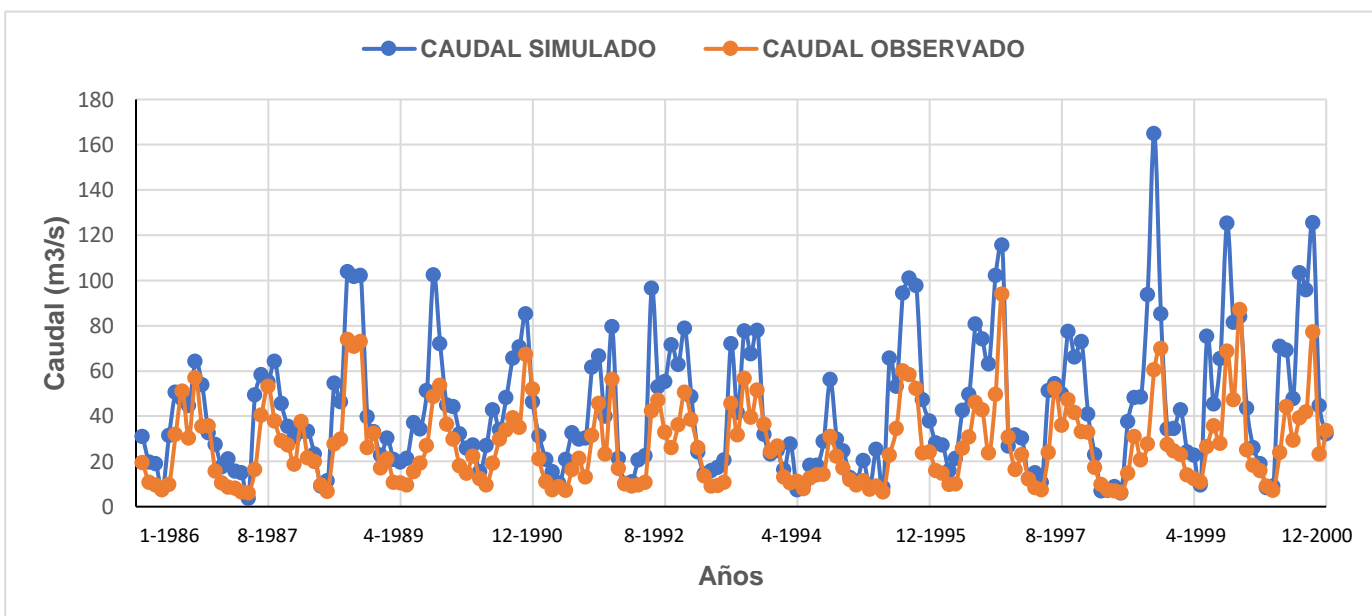


Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

En la figura 89, se muestra la ubicación de la estación hidrométrica Chajcar y el resultado de la división de la cuenca en subcuencas, durante la modelación en SWAT, así como la red hídrica generada.

La serie de caudales generados por el modelo hidrológico en SWAT, para el periodo 1986-2000 (180 meses), en comparación con los caudales observados, se muestra en la figura 90. También se determinaron los estadísticos de estos resultados.

Figura 90. **Comparación entre la serie de caudales mensuales observados y simulados en el periodo de calibración generados con SWAT**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Estadísticos para los caudales generados con SWAT**

R ²	NSE	RSR	PBIAS	KGE
0,87	-0,59	1,26	-59,25	0,15

Fuente: elaboración propia.

Los datos de caudal obtenidos con el modelo en SWAT se procesaron en SWAT-CUP, para ajustar los valores simulados con los observados.

Primero, se realizó el análisis de sensibilidad con el cual se determinó el valor de los factores para los parámetros de ajuste: p-Value y t-Stat (ver figura 91 y figura 92).

Figura 91. **Análisis de sensibilidad**



Fuente: elaboración propia, empleando SWAT-CUP.

Figura 92. **Análisis de sensibilidad**

Parameter Name	t-Stat	P-Value
5:R__ESCO.hru	-0.055211363	0.957176300
14:R__OV_N.hru	-0.248139827	0.809595253
10:R__SOL_AWC(.).sol	0.261406539	0.799662810
12:V__GWQMN.gw	-0.262875439	0.798565381
6:V__CH_K2.rte	0.501161883	0.628285285
8:V__CH_N2.rte	0.777563751	0.456778071
2:V__GW_DELAY.gw	0.843646241	0.420723903
13:V__EPCO.bsn	0.867042630	0.408439989
9:V__REVAPMN.gw	-1.113268240	0.294441645
3:V__GW_REVAP.gw	-1.329848682	0.216284690
4:R__SOL_BD(.).sol	-1.474225580	0.174518684
15:R__SOL_K(.).sol	-2.003354326	0.076139889
11:V__ALPHA_BF.gw	2.057923587	0.069714082
7:V__ALPHA_BNK.rte	-3.779142625	0.004354754
1:R__CN2.mgt	-4.921261121	0.000823177

Fuente: elaboración propia, empleando SWAT-CUP.

La calibración en SWAT-CUP se realiza posterior al análisis de sensibilidad con los rangos máximos y mínimos, mostrados en la tabla XXXI. Se obtiene el valor ajustado de los parámetros tras 100 simulaciones realizadas. La que mejor resulta es la sexta.

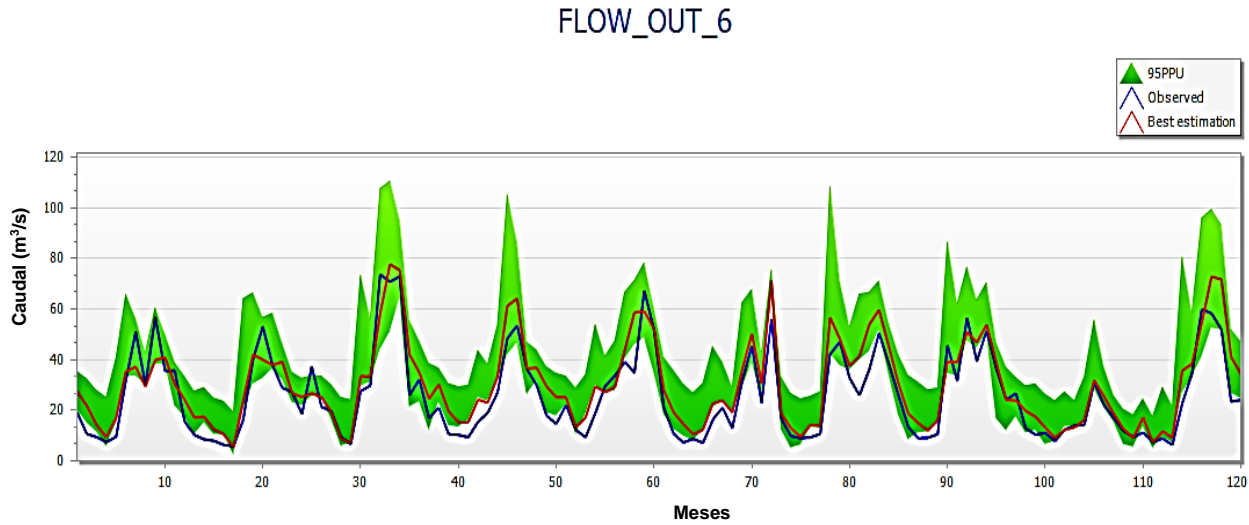
Tabla XLIII. **Parámetros de calibración**

Parámetro	Descripción	Mínimo valor	Máximo valor	Valor ajustado
CN2	Número de curva de escorrentía, según el Servicio de Conservación de Suelos (SCS), inicial para la condición de humedad II (adimensional)	-0,2	0,2	-0,102
GW_DELAY	Tiempo de retraso del agua subterránea (días)	30	450	153,89994
GW_REVAP	Coeficiente de renovación del agua subterránea (adimensional)	0	0,2	0,151
SOL_BD	Densidad aparente húmeda (g/cm ³)	-0,5	0,6	0,2975
ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo (adimensional)	0,8	1	0,935
CH_K2	Conductividad hidráulica eficaz en el aluvión del canal principal (mm/h)	5	130	63,125
ALPHA_BNK	Factor alfa de flujo base para almacenamiento (días)	0	1	0,445
CH_N2	Valor n de <i>manning</i> para el canal principal (adimensional)	0	0,3	0,1245
REVAPMN	Profundidad de umbral del agua en el acuífero poco profundo para que se produzca la percolación al acuífero profundo (mm)	0	10	0,25
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo (mm H ₂ O/mm suelo)	-0,2	0,4	0,259
ALPHA_BF	Factor alfa de flujo base (1/día)	0	1	0,295
GWQMN	Umbral de profundidad del agua en el acuífero poco profundo para el flujo (mm H ₂ O)	0	2	1,59
EPCO	Factor de compensación de absorción de la planta (adimensional)	0	1	0,045
OV_N	Valor n de <i>manning</i> para el flujo terrestre (adimensional)	-0,2	0	-0,107
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada (mm/h)	-0,8	0,8	0,504

Fuente: elaboración propia, empleando SWAT-CUP.

El periodo de calibración comprende del año 1986 al año 1995, para un total de 120 meses. La comparación de estos resultados con el caudal observado, registrado y generado por SWAT-CUP, tras la calibración, se muestra en la gráfica de la figura 93 y los estadísticos generados por este se detallan en la figura 94.

Figura 93. **Comparación entre la serie de caudales mensuales observados y simulados en el periodo de calibración generados con SWAT-CUP**



Fuente: elaboración propia, empleando SWAT-CUP.

Figura 94. **Estadísticos para el periodo de calibración generados por SWAT-CUP**

```

Goal_type=Nash_Sutcliffe...No_sims=100...Best_sim_no=6...Best_goal=.7.856675e-001

Variable.....p-factor...r-factor...R2...NS...bR2...MSE...SSQR...PBIAS...KGE...RSR...MNS...VOL_FR...--- Mean_sim(Mean_obs)
FLOW_OUT_6.....0.64.....1.34.....0.85...0.79...0.7888...6.1e+001...2.1e+001...-16.5...0.82...0.46...0.56...0.86.....30.12(25.86)

---- Results for behavioral parameters ----
Behavioral threshold=0.500000
Number of behavioral simulations=-10

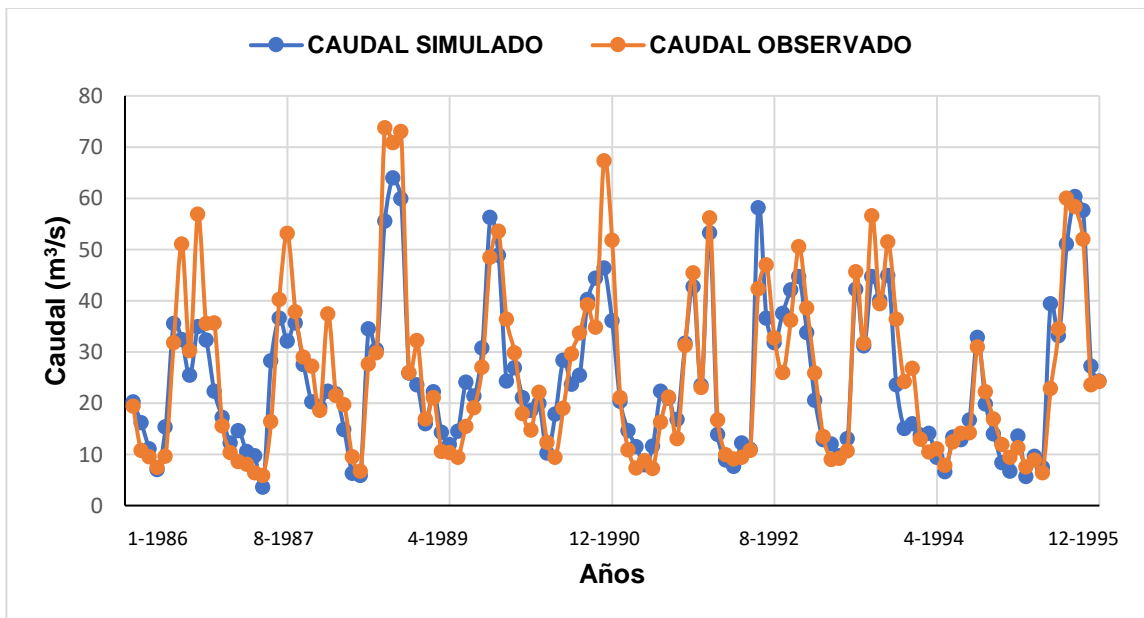
Variable.....p-factor...r-factor...R2...NS...bR2...MSE...SSQR...PBIAS...KGE...RSR...MNS...VOL_FR...--- Mean_sim(Mean_obs)
FLOW_OUT_6.....0.47.....0.69.....0.85...0.79...0.7888...6.1e+001...2.1e+001...-16.5...0.82...0.46...0.00...0.86.....30.12(25.86)

```

Fuente: elaboración propia, empleando SWAT-CUP.

El valor ajustado de los parámetros de calibración se ingresó a SWAT, dónde se corrió el modelo con esta modificación, lo cual generó una serie de caudales a los que se les corrigió el desfase. Se compararon con el caudal observado y se calcularon sus estadísticos.

Figura 95. **Comparación entre la serie de caudales mensuales observados y simulados en el periodo de calibración**



Fuente: elaboración propia.

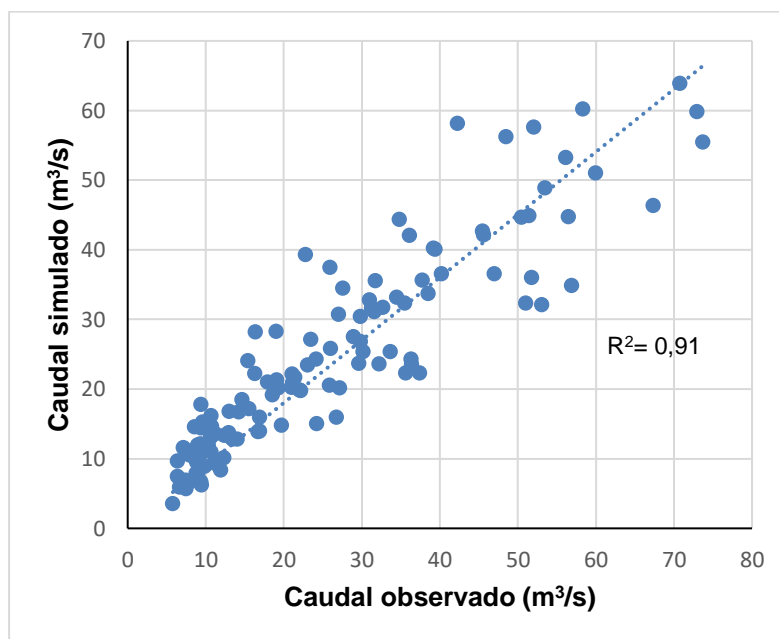
Tabla XLIV. **Estadísticos para el periodo de calibración**

R ²	NSE	RSR	PBIAS	KGE
0,91	0,83	0,42	4,53	0,84

Fuente: elaboración propia.

En la figura 96, se relaciona el caudal observado con el simulado para el periodo de calibración. Además, se muestra el valor para el coeficiente de determinación de Pearson (R^2).

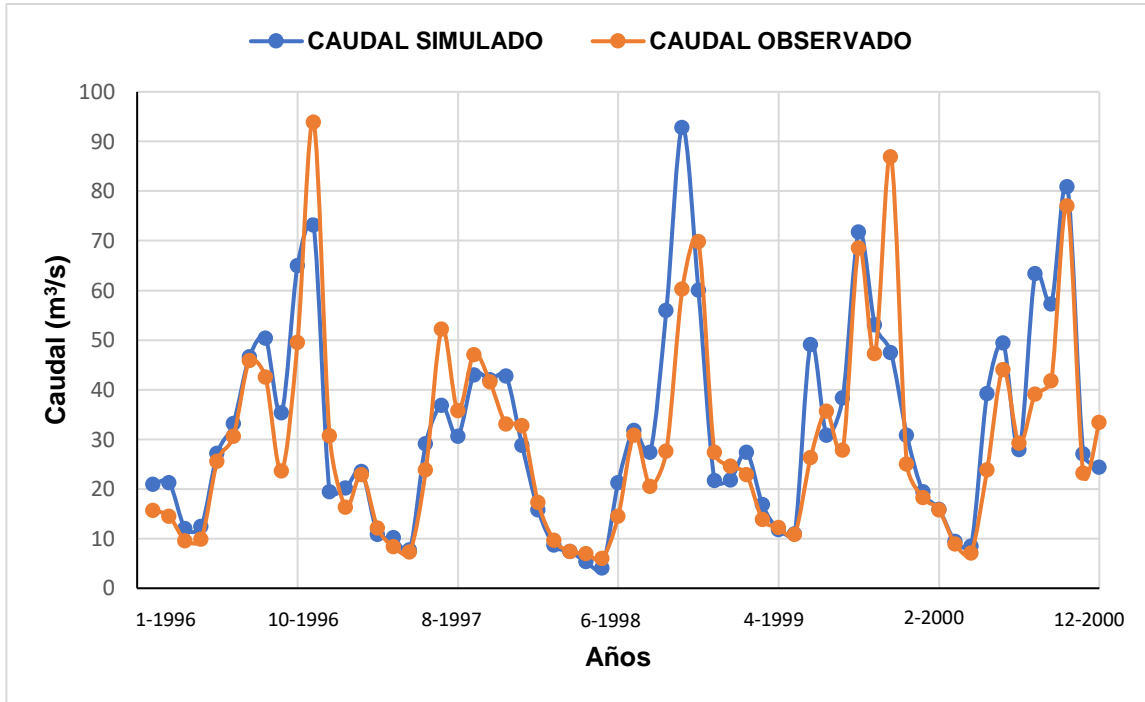
Figura 96. **Caudal observado vs caudal simulado para el periodo de calibración**



Fuente: elaboración propia.

El periodo de validación comprende del año 1996 al año 2000, para un total de 60 meses. Los resultados para este periodo se obtuvieron, al igual que con la calibración final, con la serie de caudales generada tras correr el modelo en SWAT, con los parámetros ajustados y al realizar la corrección de desfase, para así compararlo con el caudal observado, registrado según se muestra en la gráfica de la figura 97. Los estadísticos se detallan en la tabla XLV.

Figura 97. **Comparación entre la serie de caudales mensuales observados y simulados en el periodo de validación**



Fuente: elaboración propia.

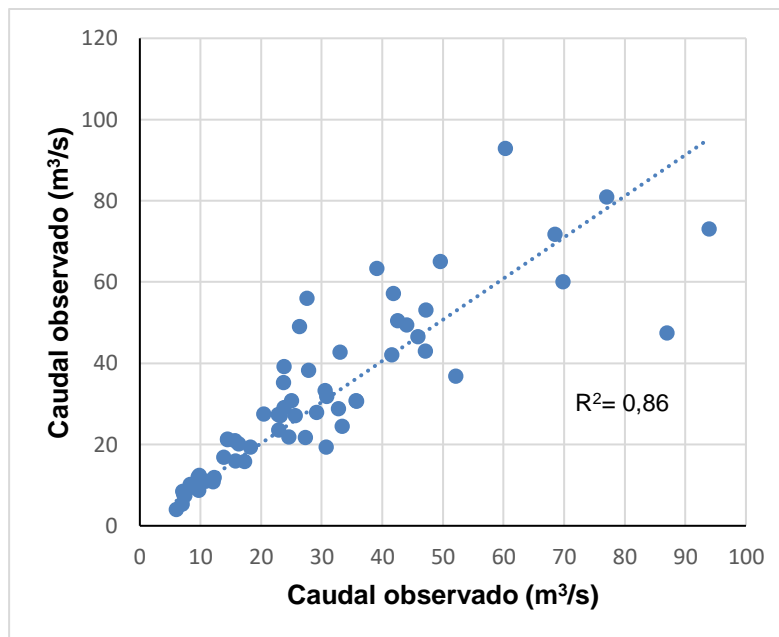
Tabla XLV. **Estadísticos para el periodo de validación**

R ²	NSE	RSR	PBIAS	KGE
0,86	0,71	0,54	-7,87	0,89

Fuente: elaboración propia.

En la figura 98, se relaciona el caudal observado con el simulado para el periodo de validación. Además, se muestra el valor para el coeficiente de determinación de Pearson (R²).

Figura 98. **Caudal observado vs caudal simulado para el periodo de validación**



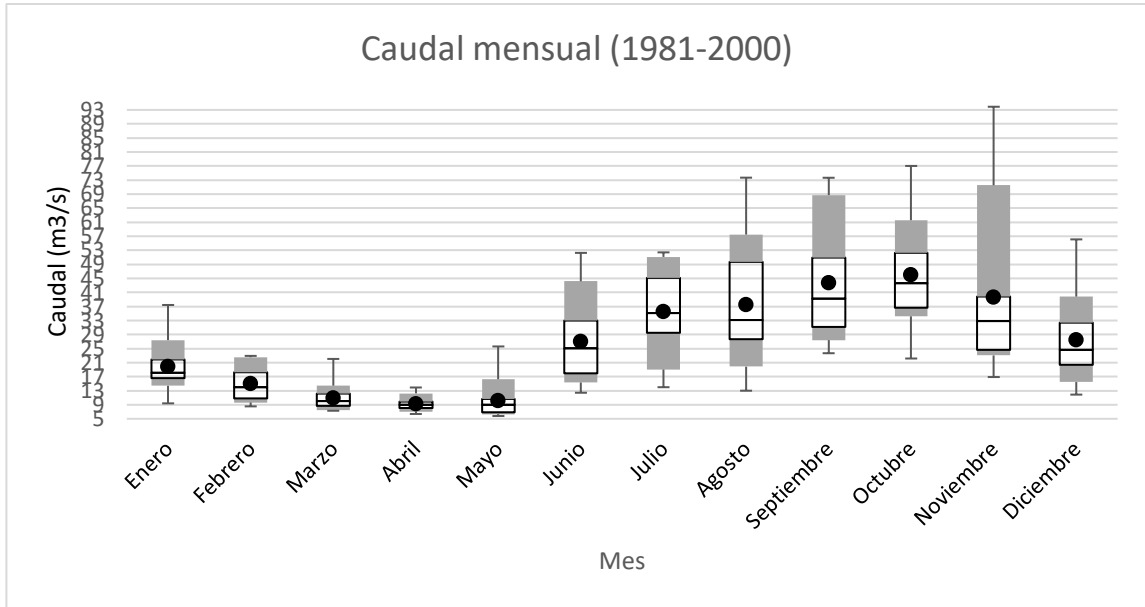
Fuente: elaboración propia.

4.2. Caudal a futuro

El caudal a futuro se analizó a través de diagramas de boxplot, para los cuatro periodos en estudio (2020-2040, 2041-2060, 2061-280 y 2081-2100). Se utilizó los resultados de caudal de los tres modelos climáticos globales (cesm1_cam5, cnrm_cm5 y ccsm4.) para cada uno de los cuatro escenarios AR5 del IPCC (RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 6,0 y RCP 8,5).

Con fines comparativos, se utiliza el diagrama de boxplot para el periodo de referencia de 1981-2000, y evaluar de esta forma los caudales simulados al cotejar los cambios con el caudal observado.

Figura 99. **Diagrama de boxplot para el caudal observado en el periodo 1981-2000**



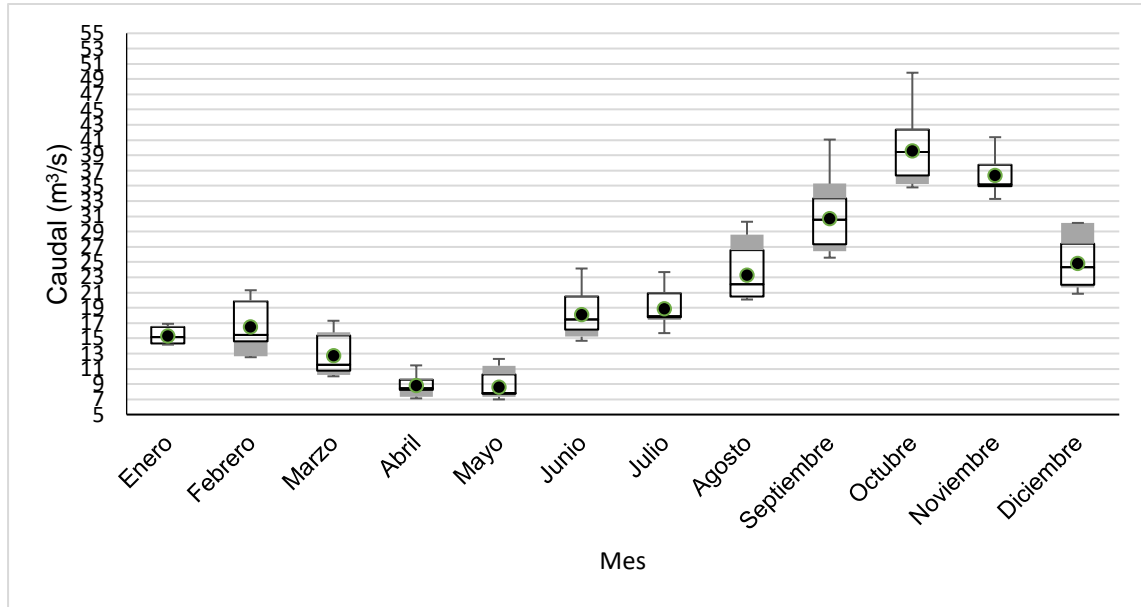
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. **Estadísticos para el diagrama de boxplot del caudal observado en el periodo 1981-2000**

	Mes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Máximo	37,43	22,92	22,06	13,92	25,61	52,27	52,41	73,70	73,67	77,04	93,90	56,11
Percentil 90	27,40	22,53	14,44	12,24	16,27	44,18	51,11	57,48	68,73	61,57	71,54	39,82
Percentil 75	21,92	18,30	12,16	9,97	10,63	32,98	45,15	49,71	50,99	52,22	39,89	32,35
Promedio	19,95	15,00	11,02	9,28	10,20	27,10	35,56	37,59	43,72	46,04	39,63	27,50
Mediana	18,10	13,96	10,01	9,01	9,05	25,06	35,05	33,18	39,28	43,57	32,84	24,59
Percentil 25	16,59	10,76	8,69	8,08	6,83	17,99	29,49	27,65	31,19	36,65	24,62	20,34
Percentil 10	14,41	9,66	7,48	7,07	6,32	15,34	19,05	19,85	27,42	34,19	23,05	15,46
Mínimo	9,40	8,54	7,29	6,37	5,79	12,42	14,00	13,00	23,68	22,18	16,90	11,89

Fuente: elaboración propia.

Figura 100. Diagrama de boxplot para el caudal simulado a futuro en el periodo 2020-2040



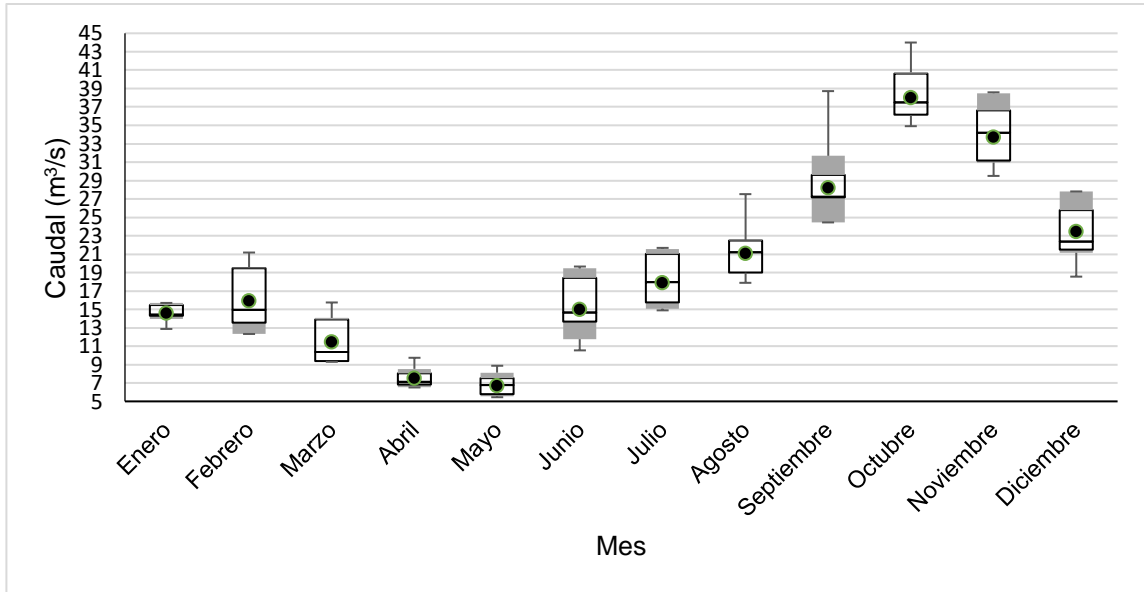
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. Estadísticos para el diagrama de boxplot del caudal simulado a futuro en el periodo 2020-2040

	Mes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Máximo	16,90	21,31	17,30	11,45	12,30	24,16	23,69	30,29	41,07	49,83	41,38	30,13
Percentil 90	16,54	19,99	15,77	9,77	11,42	20,54	20,96	28,59	35,27	42,45	37,81	30,13
Percentil 75	16,52	19,87	15,40	9,60	10,27	20,48	20,93	26,60	33,32	42,34	37,75	27,39
Promedio	15,30	16,51	12,73	8,82	8,59	18,07	18,89	23,27	30,68	39,59	36,34	24,80
Mediana	15,16	15,46	11,52	8,44	7,76	17,49	17,88	22,12	30,52	39,42	35,16	24,33
Percentil 25	14,36	14,58	10,75	8,25	7,72	16,14	17,74	20,48	27,35	36,35	34,94	21,99
Percentil 10	14,25	12,62	10,19	7,36	7,33	15,20	17,44	20,38	26,43	35,26	34,83	21,68
Mínimo	14,17	12,52	10,02	7,12	6,99	14,67	15,68	20,09	25,58	34,79	33,28	20,84

Fuente: elaboración propia.

Figura 101. **Diagrama de boxplot para el caudal simulado a futuro en el periodo 2041-2060**



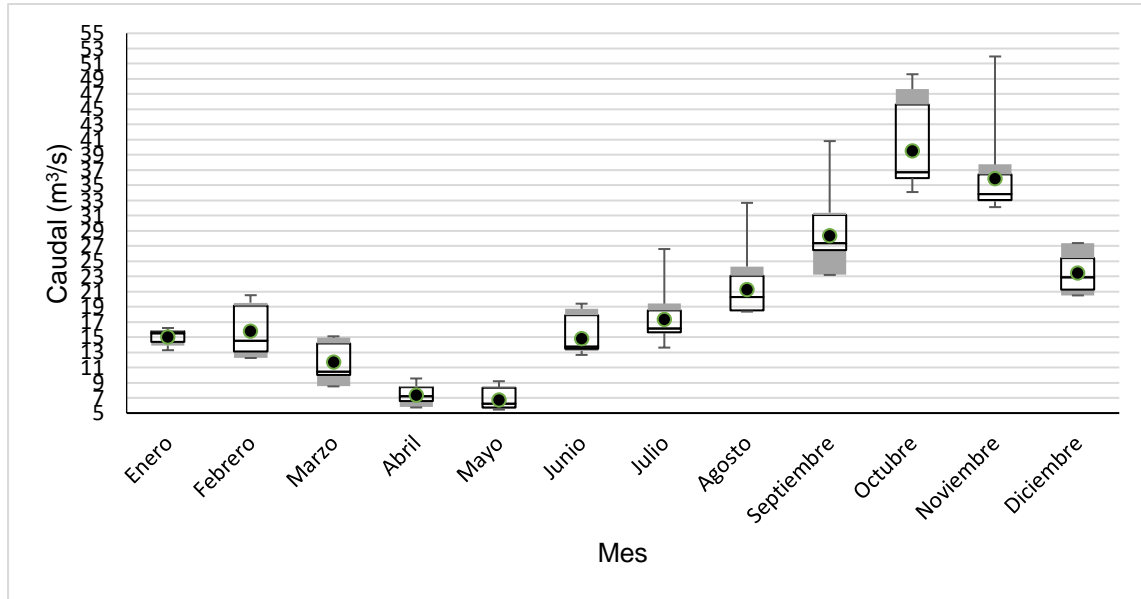
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Estadísticos para el diagrama de boxplot del caudal simulado a futuro en el periodo 2041-2060**

	Mes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Máximo	15,70	21,18	15,75	9,74	8,87	19,65	21,68	27,52	38,72	44,00	38,59	27,81
Percentil 90	15,68	19,51	14,07	8,53	8,12	19,44	21,57	22,50	31,69	40,76	38,50	27,79
Percentil 75	15,48	19,48	13,92	8,04	7,55	18,40	21,03	22,47	29,62	40,59	36,62	25,77
Promedio	14,60	15,95	11,45	7,53	6,70	14,98	17,90	21,12	28,21	38,00	33,70	23,46
Mediana	14,43	14,95	10,35	7,13	6,77	14,68	17,96	21,18	27,24	37,49	34,17	22,36
Percentil 25	14,28	13,53	9,37	6,86	5,76	13,69	15,75	18,99	27,15	36,15	31,20	21,52
Percentil 10	13,94	12,35	9,33	6,55	5,53	11,76	15,08	18,98	24,48	36,10	30,96	21,15
Mínimo	12,87	12,32	9,30	6,51	5,45	10,54	14,89	17,88	24,45	34,91	29,50	18,56

Fuente: elaboración propia.

Figura 102. Diagrama de boxplot para el caudal simulado a futuro en el periodo 2061-2080



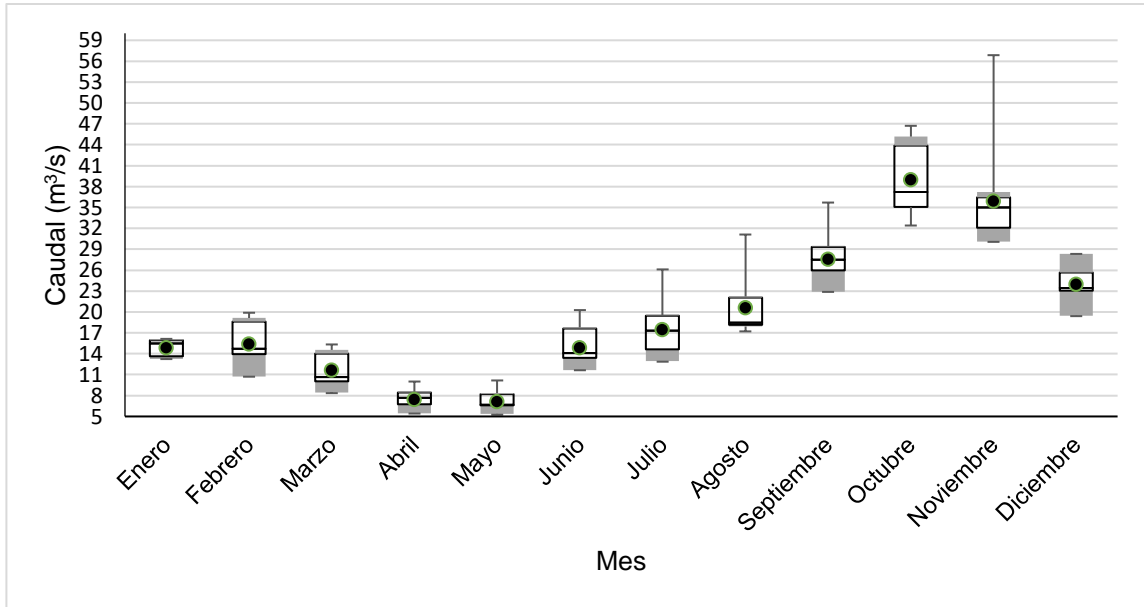
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. Estadísticos para el diagrama de boxplot del caudal simulado a futuro en el periodo 2061-2080

	Mes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Máximo	16,20	20,52	15,11	9,56	9,19	19,40	26,60	32,68	40,81	49,61	51,95	27,38
Percentil 90	15,92	19,53	14,94	8,53	8,38	18,73	19,41	24,29	31,39	47,66	37,73	27,36
Percentil 75	15,76	19,18	14,16	8,41	8,32	17,90	18,52	23,06	31,10	45,64	36,42	25,43
Promedio	15,03	15,77	11,71	7,33	6,73	14,82	17,33	21,26	28,34	39,48	35,86	23,40
Mediana	15,48	14,53	10,45	7,22	6,22	13,77	16,10	20,27	27,38	36,68	33,82	22,84
Percentil 25	14,35	13,12	10,01	6,59	5,73	13,45	15,63	18,53	26,46	35,96	33,05	21,22
Percentil 10	13,89	12,29	8,58	5,78	5,54	13,18	15,53	18,42	23,23	35,93	32,88	20,50
Mínimo	13,28	12,25	8,51	5,74	5,46	12,66	13,62	18,36	23,19	34,10	32,12	20,49

Fuente: elaboración propia.

Figura 103. **Diagrama de boxplot para el caudal simulado a futuro en el periodo 2081-2100**



Fuente: elaboración propia.

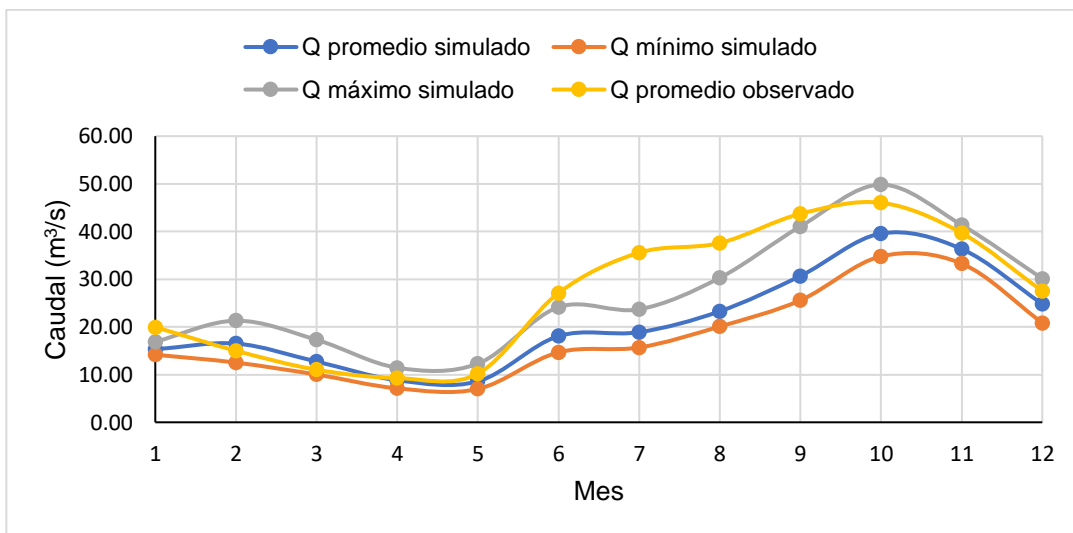
Tabla L. **Estadísticos para el diagrama de boxplot del caudal simulado a futuro en el periodo 2081-2100**

	Mes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Máximo	16,13	19,89	15,34	10,01	10,17	20,26	26,11	31,12	35,70	46,72	56,86	28,33
Percentil 90	16,12	19,13	14,55	8,56	8,35	17,78	19,50	22,22	29,38	45,17	37,20	28,32
Percentil 75	15,96	18,63	14,03	8,42	8,18	17,58	19,47	22,04	29,35	43,86	36,49	25,63
Promedio	14,86	15,41	11,63	7,47	7,10	14,84	17,44	20,60	27,58	38,98	35,94	23,94
Mediana	15,44	14,73	10,66	7,65	6,70	14,14	17,28	18,46	27,51	37,21	35,03	23,44
Percentil 25	13,65	13,91	10,07	6,73	6,58	13,37	14,65	18,14	25,99	35,11	32,08	23,04
Percentil 10	13,26	10,77	8,45	5,48	5,37	11,64	12,95	17,92	22,93	35,05	30,10	19,43
Mínimo	13,24	10,70	8,34	5,41	5,26	11,63	12,86	17,21	22,88	32,41	30,06	19,40

Fuente: elaboración propia.

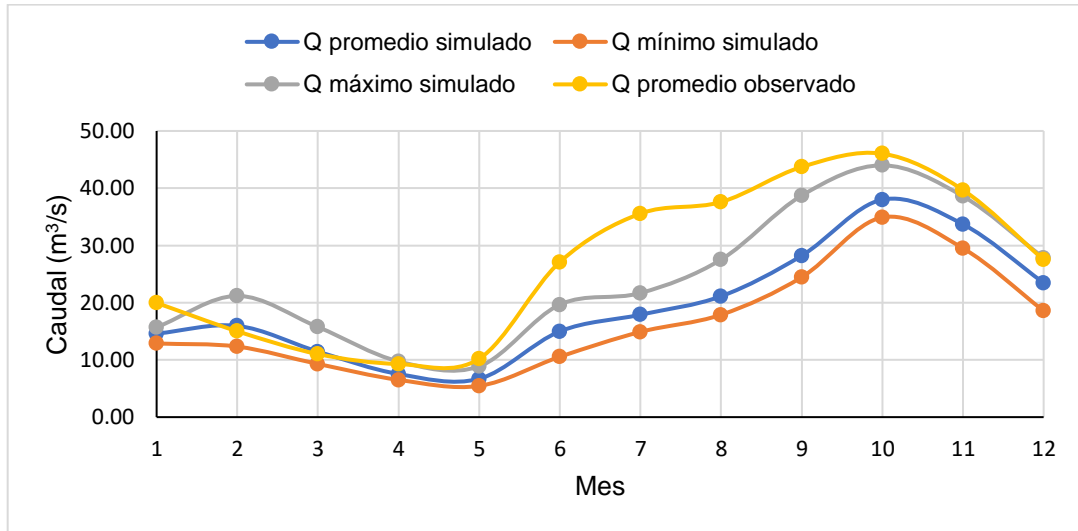
La comparación entre el caudal observado promedio (de 1981 al año 2000) con los caudales obtenidos a futuro (promedio, mínimo y máximo), se muestra en los siguientes hidrogramas para cada periodo.

Figura 104. **Hidrograma del caudal simulado a futuro en el periodo 2020-2040 comparado con el caudal observado**



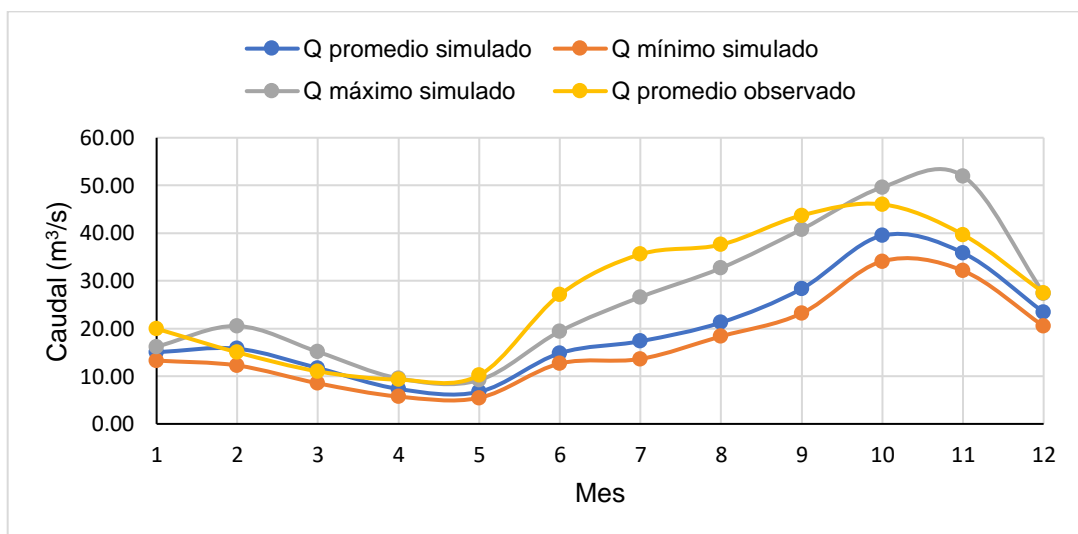
Fuente: elaboración propia.

Figura 105. **Hidrograma del caudal simulado a futuro en el periodo 2041-2060 comparado con el caudal observado**



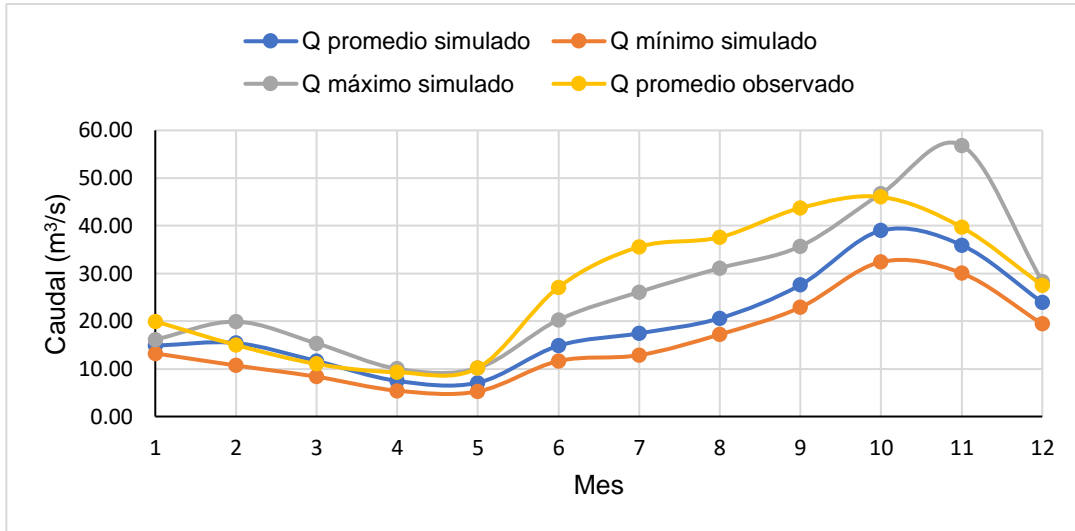
Fuente: elaboración propia.

Figura 106. **Hidrograma del caudal simulado a futuro en el periodo 2061-2080 comparado con el caudal observado**



Fuente: elaboración propia.

Figura 107. **Hidrograma del caudal simulado a futuro en el periodo 2081-2100 comparado con el caudal observado**



Fuente: elaboración propia.

4.3. Demanda futura de agua sector doméstico

La población en la cuenca, con base a la tasa de crecimiento para cada periodo, así como su demanda, se muestra en la tabla LI y LII.

Tabla LI. **Población proyectada a futuro en la cuenca**

Municipio	Tasa de crecimiento (%)	Población (habitantes)			
		2040	2060	2080	2100
Cobán	2,29	124 889	196 571	309 397	486 981
Purulhá	3,18	5 868	10 977	20 535	38 417
San Cristóbal Verapaz	2,76	63 811	109 951	189 454	326 444
San Juan Chamelco	2,31	57 924	91 449	144 378	227 940
San Pedro Carchá	2,75	78 642	135 304	232 790	400 514
Santa Cruz Verapaz	3,12	32 786	60 588	111 966	206 910
Tactic	2,62	45 595	76 408	128 046	214 580
Tamahú	2,71	942	1 608	2 744	4 684
Total		410 457	682 856	1 139 309	1 906 470

Fuente: elaboración propia.

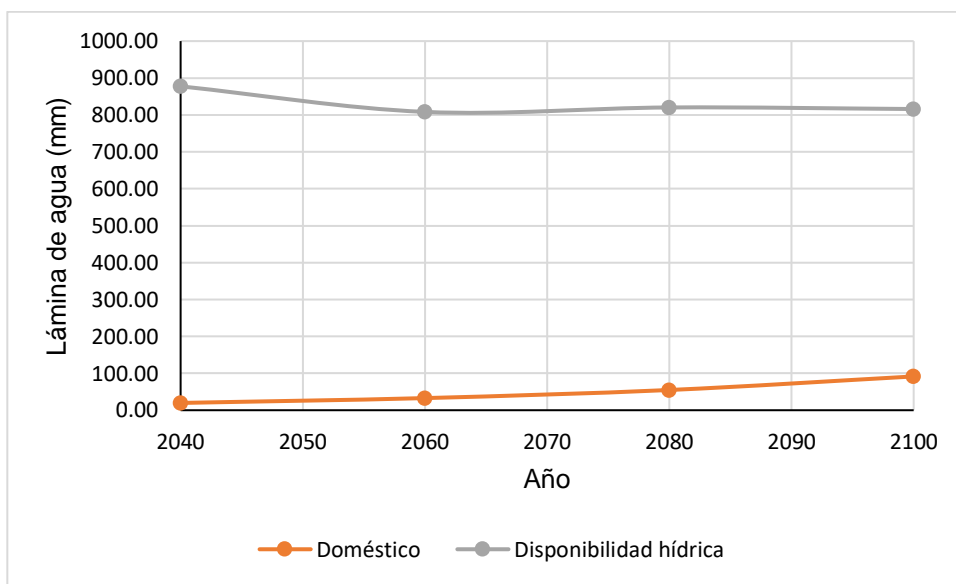
Tabla LII. **Demanda de agua del sector doméstico**

	Demanda de agua (m ³)			
	2040	2060	2080	2100
Enero	1 272 416,7	2 116 853,6	3 531 857,9	5 910 057
Febrero	1 190 325,3	1 980 282,4	3 303 996,1	5 338 116
Marzo	1 272 416,7	2 116 853,6	3 531 857,9	5 910 057
Abril	1 231 371	2 048 568	3 417 927	5 719 410
Mayo	1 272 416,7	2 116 853,6	3 531 857,9	5 910 057
Junio	1 231 371	2 048 568	3 417 927	5 719 410
Julio	1 272 416,7	2 116 853,6	3 531 857,9	5 910 057
Agosto	1 272 416,7	2 116 853,6	3 531 857,9	5 910 057
Septiembre	1 231 371	2 048 568	3 417 927	5 719 410
Octubre	1 272 416,7	2 116 853,6	3 531 857,9	5 910 057
Noviembre	1 231 371	2 048 568	3 417 927	5 719 410
Diciembre	1 272 416,7	2 116 853,6	3 531 857,9	5 910 057
Total	1 502 2726	24 992 530	41 698 709	69 586 155

Fuente: elaboración propia.

La demanda doméstica se compara gráficamente con la disponibilidad hídrica (caudal promedio futuro expresado en lámina de agua), según se observa en la figura 108.

Figura 108. **Demanda de agua del sector doméstico comparado con la disponibilidad hídrica a futuro**



Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Demanda de agua del sector doméstico comparada con la disponibilidad hídrica a futuro para cada periodo**

Lámina de agua (mm)	Año			
	2040	2060	2080	2100
Demanda	19,77	32,88	54,87	91,56
Disponibilidad hídrica	877,43	808,21	820,25	815,99

Fuente: elaboración propia.

4.4. Demanda futura de agua sector agrícola

La demanda futura del sector agrícola es expresada a través de la evapotranspiración del cultivo o necesidad de agua de cada cultivo en milímetros de agua para cada mes (ver tabla LIV).

Tabla LIV. Demanda de agua del sector agrícola (ETcrop)

Cultivo	ETcrop (mm/mes)		
	Café	Maíz	Cardamomo
Enero	143,98	156,73	91,87
Febrero	138,98	151,38	88,78
Marzo	160,49	174,80	102,42
Abril	167,90	182,82	107,02
Mayo	181,47	197,58	115,60
Junio	174,68	190,12	111,05
Julio	178,16	193,96	113,30
Agosto	171,93	187,05	109,24
Septiembre	165,77	180,37	105,35
Octubre	160,61	174,83	102,24
Noviembre	143,17	155,88	91,31
Diciembre	139,97	152,32	89,13

Fuente: elaboración propia.

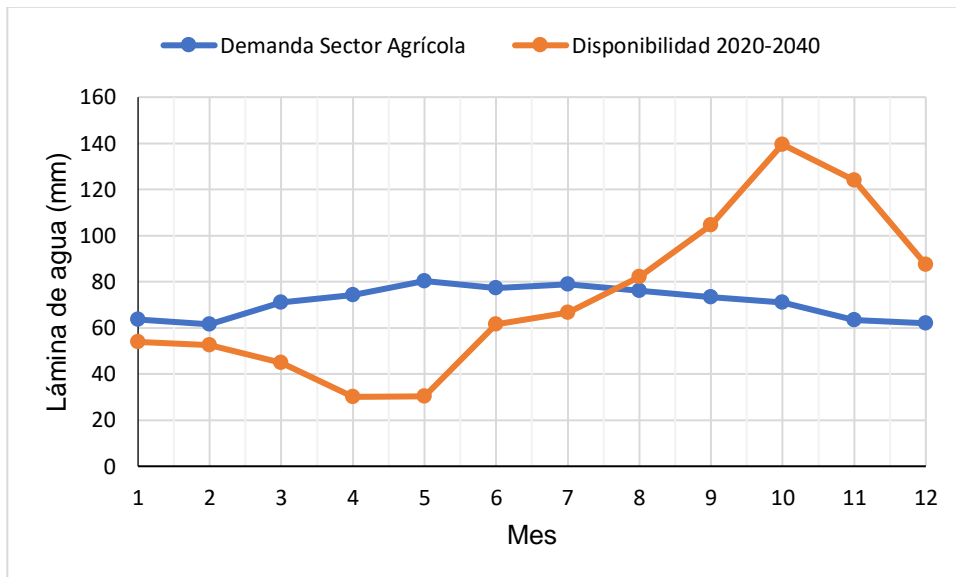
La demanda de los cultivos se compara de forma gráfica con la disponibilidad hídrica (caudal promedio futuro expresado en lámina de agua) de forma mensual para cada periodo, según se observa en las gráficas a continuación.

Tabla LV. **Demanda de agua del sector agrícola comparada con la disponibilidad hídrica a futuro para cada periodo**

Lámina de agua (mm)	Mes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demanda	63,71	61,53	71,05	74,31	80,31	77,28	78,84	76,03	73,31	71,06	63,36	61,91
2020-2040	53,94	52,56	44,87	30,08	30,28	61,63	66,56	82,01	104,64	139,52	123,93	87,41
2041-2060	51,44	50,77	40,36	25,70	23,62	51,09	63,08	74,42	96,21	133,93	114,93	82,68
2061-2080	52,97	50,19	41,25	25,00	23,70	50,54	61,09	74,91	96,66	139,14	122,32	82,48
2081-2100	52,36	49,06	41,00	25,48	25,01	50,63	61,47	72,61	94,06	137,36	122,57	84,38

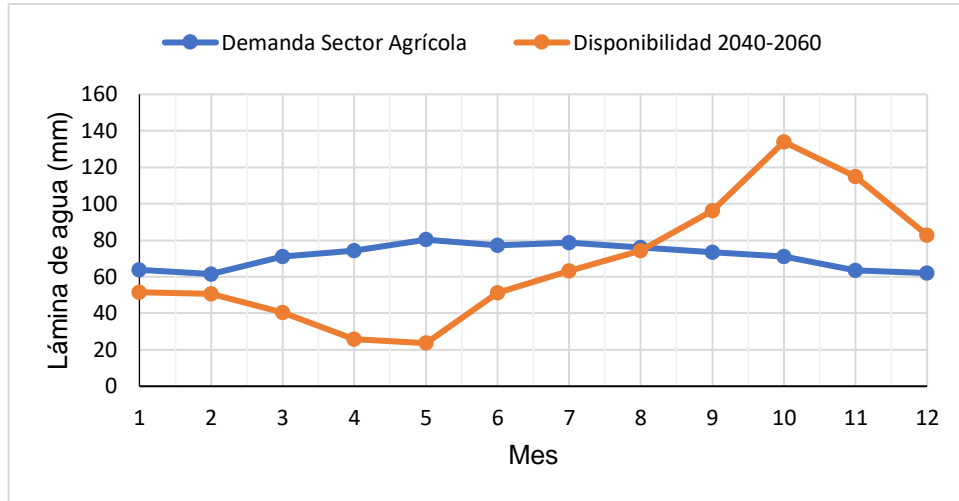
Fuente: elaboración propia.

Figura 109. **Demanda de agua del sector agrícola comparado con la disponibilidad hídrica a futuro para el periodo 2020-2040**



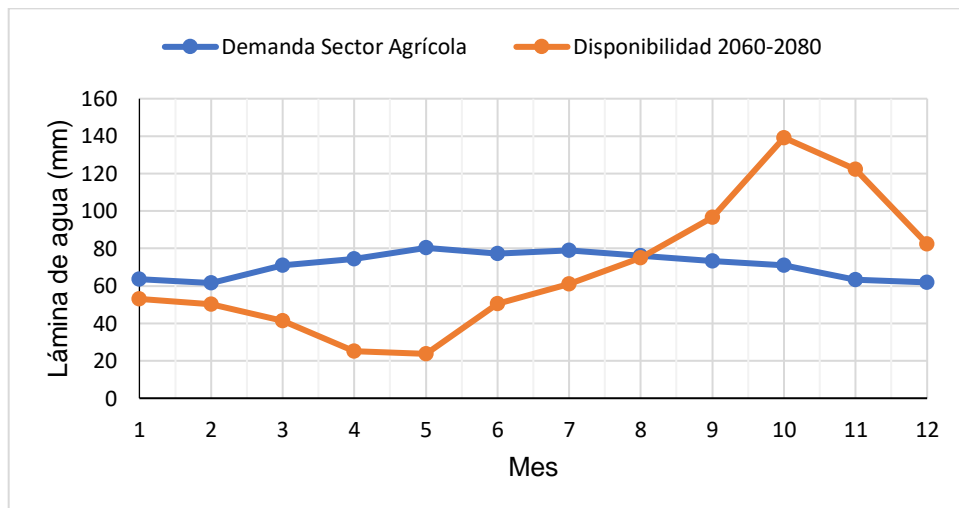
Fuente: elaboración propia.

Figura 110. **Demanda de agua del sector agrícola comparado con la disponibilidad hídrica a futuro para el periodo 2041-2060**



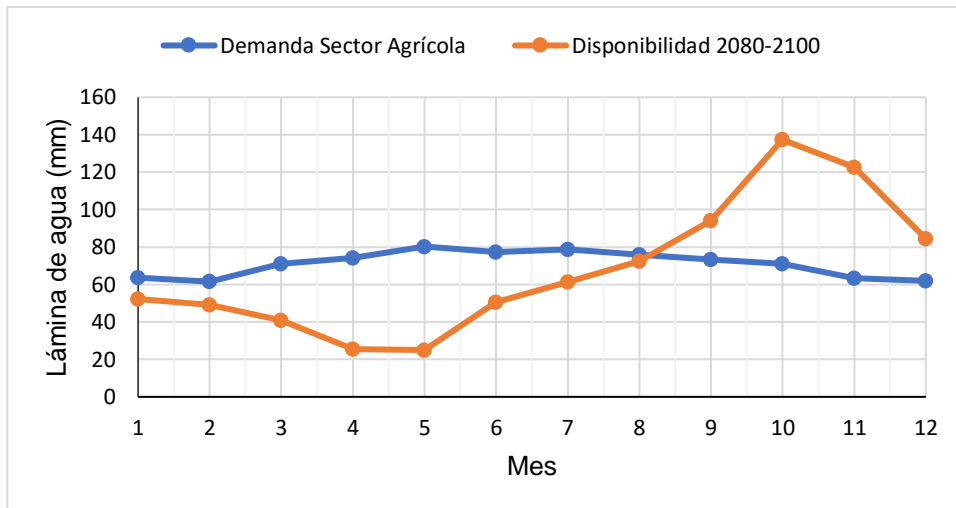
Fuente: elaboración propia.

Figura 111. **Demanda de agua del sector agrícola comparado con la disponibilidad hídrica a futuro para el periodo 2061-2080**



Fuente: elaboración propia.

Figura 112. **Demanda de agua del sector agrícola comparado con la disponibilidad hídrica a futuro para el periodo 2081-2100**



Fuente: elaboración propia.

4.5. Demanda futura de agua sector hidroeléctrico

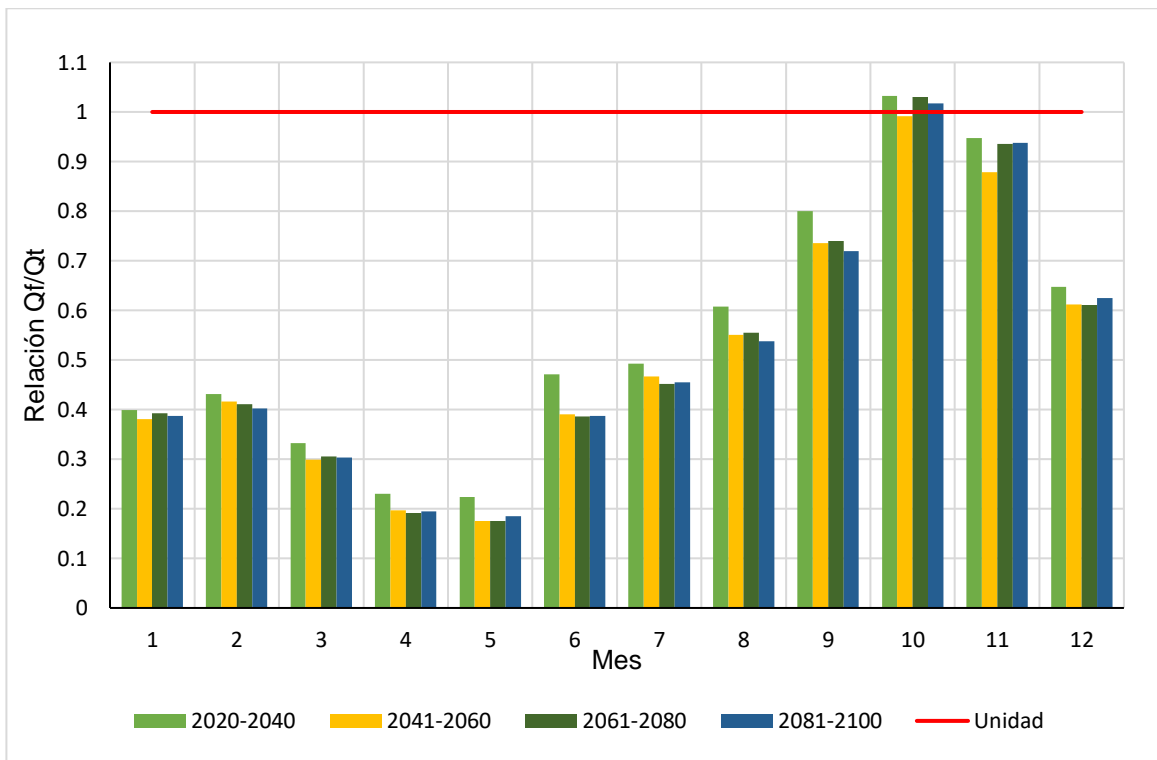
La demanda del sector hidroeléctrico (caudal turbinado) se comparó con el caudal a futuro (caudal promedio) para cada periodo y para cada hidroeléctrica. Los resultados se muestran a través de tablas y gráficas.

Tabla LVI. **Relación de caudal futuro y turbinado Hidroeléctrica RENACE**

Período	Mes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2020-2040	0,40	0,43	0,33	0,23	0,22	0,47	0,49	0,61	0,80	1,03	0,95	0,65
2041-2060	0,38	0,42	0,30	0,20	0,17	0,39	0,47	0,55	0,74	0,99	0,88	0,61
2061-2080	0,39	0,41	0,31	0,19	0,18	0,39	0,45	0,55	0,74	1,03	0,94	0,61
2081-2100	0,39	0,40	0,30	0,19	0,19	0,39	0,46	0,54	0,72	1,02	0,94	0,62

Fuente: elaboración propia.

Figura 113. **Relación de caudal futuro y turbinado Hidroeléctrica RENACE**



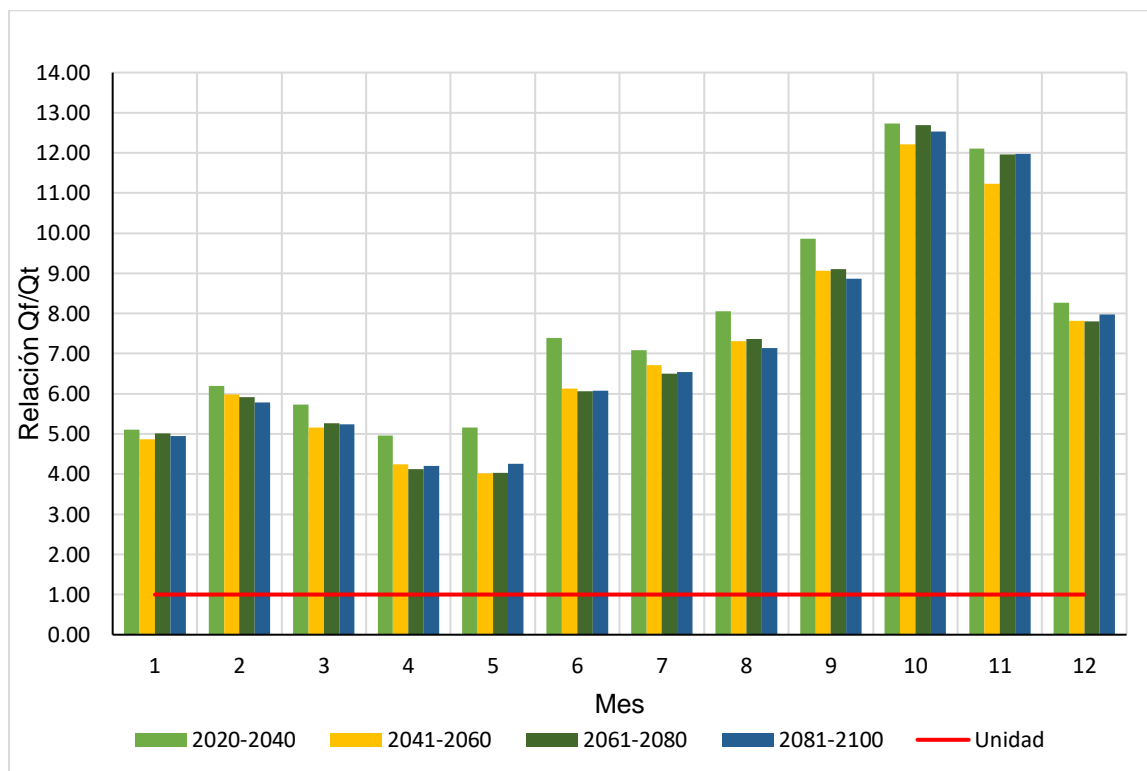
Fuente: elaboración propia.

Tabla LVII. **Relación de caudal futuro y turbinado Hidroeléctrica CHICHAIC**

Período	Mes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2020-2040	5,10	6,19	5,73	4,96	5,16	7,39	7,08	8,06	9,86	12,72	12,11	8,27
2041-2060	4,87	5,98	5,15	4,24	4,02	6,13	6,71	7,31	9,07	12,21	11,23	7,82
2061-2080	5,01	5,91	5,27	4,12	4,04	6,06	6,50	7,36	9,11	12,69	11,95	7,80
2081-2100	4,95	5,78	5,24	4,20	4,26	6,07	6,54	7,13	8,87	12,53	11,98	7,98

Fuente: elaboración propia

Figura 114. **Relación de caudal futuro y turbinado Hidroeléctrica CHICHAIC**



Fuente: elaboración propia.

4.6. Comparación de la disponibilidad hídrica a futuro con la demanda por sectores

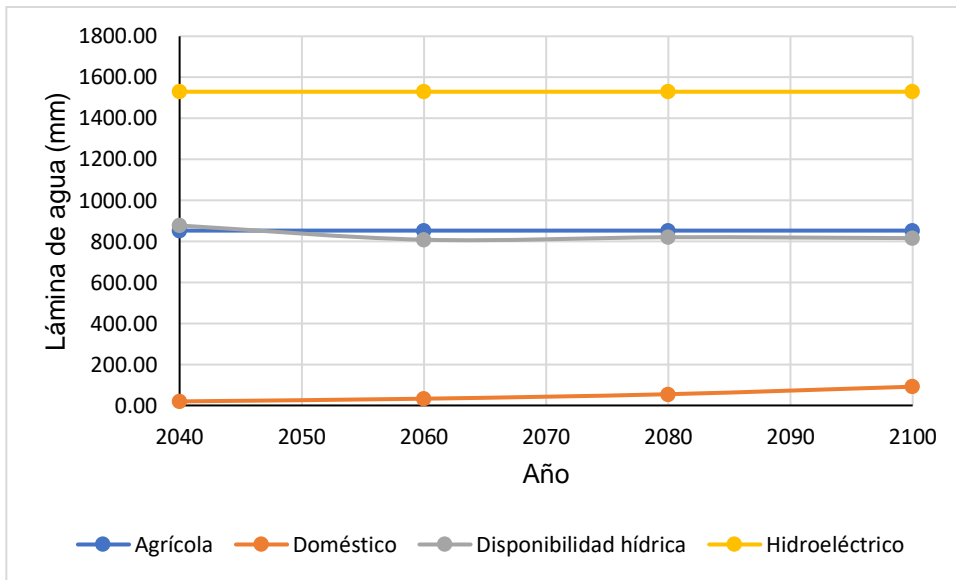
La demanda total por sectores y la disponibilidad hídrica anual se muestran en la tabla LVIII. Su comparación se puede observar de forma gráfica en la figura 115.

Tabla LVIII. **Demanda de agua anual por sectores comparado con la disponibilidad hídrica a futuro**

Sector	Lámina de agua (mm)			
	2040	2060	2080	2100
Agrícola	852,70	852,70	852,70	852,70
Doméstico	19,77	32,88	54,87	91,56
Hidroeléctrico	1 529,78	1 529,78	1 529,78	1 529,78
Disponibilidad hídrica	877,43	808,21	820,25	815,99

Fuente: elaboración propia.

Figura 115. **Demanda de agua anual por sectores comparado con la disponibilidad hídrica a futuro**



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La interpretación de resultados de esta investigación se divide por secciones manteniendo la estructura de los resultados, con el fin de dar respuesta a cada uno de los objetivos.

5.1. Modelo hidrológico

El modelo hidrológico de la parte alta de la cuenca Cahabón se desarrolló con la herramienta SWAT en ArcGIS. Se utilizaron datos físicos y climáticos de la cuenca. Los datos físicos (capa ráster del modelo de elevación digital del terreno) se ingresaron en una primera etapa para delimitar la cuenca, generar la red hídrica y las subcuencas, como se muestra en la figura 89, lo cual permite identificar cuántas subcuencas hay (57) y en cuál se ubica la estación hidrométrica Chajcar (6), además, porque es en ese punto donde se generan los caudales simulados.

En una segunda etapa de la modelación, se ingresan el resto de los datos físicos (uso del suelo, tipo de suelo y rango de pendientes), a partir de los cuales se definen las unidades de respuesta hidrológicas. En la siguiente etapa, se ingresó la información climática, consistente en el generador climático, las series de datos (temperatura máxima y mínima, precipitación, humedad, velocidad del viento y radiación solar) y la ubicación de cada una de las estaciones que contienen esta información para el periodo estudiado (1981-2000).

Finalmente, el modelo se ejecutó para generar los caudales del año 1986 al año 2000; se omiten los 5 primeros años, periodo de calentamiento (1981-1985), para evitar sesgo en los resultados, como lo indica Kue Bum & otros en el artículo científico “Exploration of Warm-up Period in conceptual Hydrological Modelling”⁵². El calentamiento del modelo es un proceso de ajuste para que el modelo alcance un estado 'óptimo', donde se mueven las reservas internas (por ejemplo, la humedad del suelo) de la condición inicial estimada a un estado 'óptimo'.

Los datos de caudal obtenidos de la modelación se compararon con el caudal observado, para identificar si representan el comportamiento del caudal en la cuenca o si es necesario procesarlos en SWAT-CUP. Gráficamente, se puede observar en la figura 79 que estos parecen tener la misma tendencia que los observados; sin embargo, hay caudales picos elevados.

Los estadísticos determinados, tabla XLII, demuestran que el coeficiente de determinación Pearson es cercano a uno, por lo que hay una relación lineal entre ambos valores, no obstante, el resto de los estadísticos, en especial NSE y KGE, están alejados de los valores óptimos recomendables. Según los criterios de calificación generales para tres y cinco estadísticos recomendados por Kouchi, Houshmand y otros en el artículo científico titulado “Sensitivity of Calibrated Parameters and Water Resource Estimates on Different Objective Functions and Optimization Algorithms” y por Daniel Moriasi y otros en “Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations”, tabla XL y XLI, los resultados se posicionan como 'insatisfactorios', por lo cual, se procedió a la aplicación de SWAT-CUP.

⁵² BUM, Kue; et. al. *Exploration of warm-up period in conceptual hydrological modelling*. p. 2.

SWAT-CUP se utilizó para obtener los valores de los parámetros del modelo que se deben modificar, para generar resultados de caudal parecidos a los observados. Para realizar lo anterior, primero se realiza un análisis de sensibilidad; este análisis establece si los parámetros influyen en el modelo a través de los factores p-value y t-Stat, como lo muestra la figura 91 y 92. Un valor de p-value cercano a cero y un mayor valor absoluto de t-Stat indica que el parámetro es sensible, por eso CN2, ALPHA_BNK y ALPHA_BF, se posicionan como los tres parámetros de relevancia en el modelo: donde CN2 es el valor de la curva de escorrentía; ALPHA_BNK es el factor alfa de flujo base para almacenamiento y ALPHA_BF es el factor alfa de flujo base.

Tras el análisis de sensibilidad, se realizó la calibración, para la cual se utilizó un periodo de 10 años (1986-1995); el resto de tiempo se destinó para la validación.

Los parámetros seleccionados fueron elegidos basados en estudios previos de calibración en SWAT: el de Antonio Jódar-Abellán y otros titulado *Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT*⁵³; también, el de Yalina Montecelos titulado *Modelación del efecto de la variación climática en el balance hídrico en dos cuencas (México y Cuba) bajo un escenario de cambio climático*⁵⁴. El rango de valores utilizados para los parámetros fue el recomendado por el programa, esto, con el fin de mantener el comportamiento hidrológico normal en la cuenca. Estos rangos se muestran en la tabla XLIII, para los mismos 15 parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad. Si tras las simulaciones no se obtuviera un resultado satisfactorio, los tres parámetros

⁵³ JODAR-ABELLAN, Antonio; et. al. *Evaluación del Impacto del Cambio Climático sobre una Cuenca Hidrológica en Régimen Natural (SE, España) usando un modelo SWAT*. p. 13.

⁵⁴ MONTECELOS, Yalina. *Modelación del efecto de la variación climática en el balance hídrico en dos cuencas (México y Cuba) bajo un escenario de cambio climático*. p. 114.

considerados como más sensibles se hubieran tenido que modificar, porque son los que más afectan el resultado del modelo, pudiendo, entonces, alterar el ciclo hidrológico, pero este no fue el caso.

Los resultados de la calibración generados por SWAT-CUP se muestran en la figura 93. Como se observa, existe una buena simulación y son pocos los picos; sin embargo, se presenta un rango de incertidumbre (95PPU), lo cual indica que es posible que los resultados con SWAT, en el modelo, oscilen en ese rango, según indica el Manual de SWAT-CUP en la página 17: “esto se conoce como la incertidumbre de predicción del 95 %...”.

Los estadísticos generados por SWAT-CUP (figura 94) indican que la sexta simulación es el mejor resultado de las 100 realizadas; con una calificación general para tres y cinco estadísticos de 'bueno', por lo que no se consideró necesario proseguir con más pruebas y se generaron los resultados con SWAT, modificando los parámetros del modelo, con el valor ajustado mostrado en la tabla XLIII, en cada una de las tablas, según se explica en la metodología. Esto, con el propósito de identificar cuál debía ser el factor de ajuste que los datos deben tener y qué se debe aplicar a la serie en la validación y en los caudales a futuro. Además, permite confirmar si los estadísticos para el modelo se siguen considerando adecuados para la simulación. El factor de ajuste se determinó al dividir el caudal promedio observado con el simulado, para la serie de datos de calibración. Este factor, 0.6989, se multiplica a cada dato de caudal.

Los resultados de la calibración, generados por el modelo tras ingresar los parámetros y hacer el ajuste de desfase, se comparan con el caudal observado en la gráfica de la figura 95. Como se puede ver, los picos no son tan elevados y la tendencia es muy parecida a la de los observados. Los

resultados en la tabla XLIV, según el criterio de calificación para tres estadísticos, considera el modelo 'muy bueno' y para cinco 'bueno', por lo que se confirma que la calibración ha sido exitosa y se puede realizar la validación.

La gráfica de la figura 96 muestra la relación lineal existente entre el caudal observado y simulado, que es correspondiente entre sí para valores entre 5 y 30 m³/s; no así para los valores mayores; sin embargo, el valor de coeficiente de Pearson lo cataloga como una correlación aceptable por ser mayor a 0,5.

La validación se realizó con los datos del periodo 1996-2000, 5 años, esto para comprobar que el modelo sigue siendo satisfactorio. En la validación, se ejecutó el modelo con los parámetros ajustados, determinados en la calibración; y se realizó el ajuste de desfase respectivo, obteniendo así los resultados que, al ser comparados con los caudales observados (figura 97), se mantiene parecida la tendencia y la calificación del modelo. Según la calificación general para los estadísticos 3 y 5 sigue siendo 'muy bueno' y 'bueno', como señala Argota, Trinidad, en su tesis de maestría *En la etapa de validación, los resultados indican generalmente una relación similar entre los resultados de salida tanto medidos como predichos.*⁵⁵ Además, la relación lineal entre los valores, según la gráfica de la figura 98, se mantiene también aceptable.

5.2. Caudal a futuro

Con el modelo calibrado y validado, se pudieron ingresar las series de datos climáticos a futuro para los cuatro periodos: 2020-2040, 2041-2060, 2061-

⁵⁵ ARGOTA, Trinidad. *Simulación hidrológica de la cuenca del río AMAJAC, estado de Hidalgo Aplicando el modelo SWAT*. p. 75.

280 y 2081-2100, los tres modelos climáticos globales (cesm1_cam5, cnrm_cm5 y ccsm4.) y cada uno de los cuatro escenarios AR5 del IPCC (RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 6,0 y RCP 8,5). Además, se utilizó el generador climático y los valores ajustados de los parámetros determinados en la calibración. A los resultados de caudal, se les realizó el ajuste de desfase respectivo al multiplicar los caudales por el factor, como se hizo en la fase de calibración y validación

Las series de datos climáticos a futuro incluyen temperatura y precipitación; esto se debe, según indica León, Ricardo y otros en el estudio *Modelación de la disponibilidad hídrica del rio Piura - Perú, considerando la incidencia del cambio climático* porque “...*tienen un efecto significativo en los sistemas de recursos hídricos (mayores a otras variables climáticas)*”. Otro aspecto de los modelos climáticos para tener en cuenta es que fenómenos como los de El Niño o La Niña no son modelados, como se señala también en esta investigación.

El análisis de estos resultados se realizó por medio de diagramas de boxplot o diagrama de caja, construidos con los caudales observados y simulados. Los diagramas de boxplot para los caudales simulados se construyeron con datos de los modelos y de los escenarios para cada uno de los periodos. A través de estos, se puede analizar la distribución de los datos por medio de las siguientes medidas descriptivas: mediana, máximo, mínimo, percentil 10 y percentil 90, valores que también se encuentran tabulados.

Para el primer periodo 2020-2040, el diagrama de la figura 99 muestra el comportamiento mensual del caudal. En términos de dispersión de los datos de los meses de enero, abril y mayo presentan menor variabilidad, porque los valores están concentrados dentro del rango intercuartil. Enero, octubre y diciembre reflejan una distribución uniforme. Los meses de febrero, marzo, abril,

junio, julio, agosto y noviembre muestran una distribución asimétrica positiva, es decir, el 50 % de los datos se encuentran concentrados debajo de la mediana. Por otra parte, septiembre tiene una distribución asimétrica negativa, el 50 % de los datos se encuentran concentrados arriba de la mediana. Esto indica que, en los meses con distribución simétrica, la probabilidad de que se den valores de caudal dentro del rango es igual de probable. Una asimetría positiva significa que es más probable que se den valores menores a la mediana. La asimetría negativa, por lo contrario, indica la posibilidad de que ocurran valores de caudal mayores a la mediana.

Al comparar el caudal observado promedio, se percibe una tendencia general de disminución de un 22,43 %, hasta llegar a un máximo de 46,9 % en julio. Los meses que presentaron una disminución mayor al 20 % son enero, junio, julio, agosto y septiembre. Se exceptúan los meses de febrero y marzo, con un aumento de 10,11 % y 15,55 % respectivamente, aunque no se consideran porcentajes relevantes, es conveniente resaltarlos.

Los percentiles 10 y 90 indican a partir de qué valor se podría presentar un evento extremo de caudal. El percentil 90 implica la aparición de eventos atípicos superiores al 90 % de los datos de caudal. Para el mes de enero, el valor superado sería de 16,54 m³/s; en febrero, 19,99 m³/s; marzo, 15,77 m³/s; abril, 9,77 m³/s; mayo, 11,42 m³/s; junio, 20,54 m³/s; julio, 20,96 m³/s; agosto, 28,59 m³/s; septiembre, 35,27 m³/s; octubre, 42,45 m³/s; noviembre, 37,81 m³/s y diciembre, 30,13 m³/s. El percentil 10 implica la aparición de eventos atípicos menores al 10 % de los datos de caudal. Para el mes de enero sería a partir de 14,25 m³/s; en febrero, de 12,62 m³/s; marzo, 10,19 m³/s; abril, 7,36 m³/s; mayo, 7,33 m³/s; junio, 15,20 m³/s; julio, 17,44 m³/s; agosto, 20,38 m³/s; septiembre, 26,43 m³/s; octubre, 35,26 m³/s; noviembre, 34,83 m³/s y diciembre, 21,68 m³/s.

Para el segundo periodo 2041-2060, el diagrama de la figura 100 muestra el comportamiento mensual del caudal. En términos de dispersión de los datos, los meses de enero, abril, mayo y septiembre presentan menor variabilidad. Mayo y noviembre muestran una distribución uniforme. Los meses de enero, febrero, marzo, abril, junio, julio, septiembre, octubre y diciembre exponen una distribución asimétrica positiva. Por otra parte, agosto tiene una distribución asimétrica negativa.

Al comparar el caudal observado promedio, aparece una tendencia general de disminución de un 30,08 %; este llega hasta un máximo de 49.67 % en julio. Los meses que presentaron una disminución mayor al 20 % son enero, mayo, junio, julio, agosto y septiembre. Se exceptúan los meses de febrero y marzo con un aumento de 6,34 % y 3,95 %.

El percentil 90, para el mes de enero, indica que los eventos extremos se presentarán a partir de 15,68 m³/s; en febrero, de 19,51 m³/s; marzo, de 14,07 m³/s; abril, de 8,53 m³/s; mayo, de 8,12 m³/s; junio, de 19,44 m³/s; julio, de 21,57 m³/s; agosto, de 22,50 m³/s; septiembre, de 31,69 m³/s; octubre, de 40,76 m³/s; noviembre, de 38,50 m³/s y diciembre, de 27,79 m³/s.

El percentil 10 será menor de 13,94 m³/s en enero; en febrero, de 12,35 m³/s; marzo, de 9,33 m³/s; abril, de 6,55 m³/s; mayo, de 5,53 m³/s; junio, de 11,76 m³/s; julio, de 15,08 m³/s; agosto, de 18,98 m³/s; septiembre, de 24,48 m³/s; octubre, de 36,10 m³/s; noviembre, de 30,96 m³/s y diciembre, de 21,15 m³/s.

Para el tercer periodo 2061-2080, el diagrama de la figura 101 muestra el comportamiento mensual del caudal. En términos de dispersión de los datos, los meses de enero, abril, mayo y julio presentan menor variabilidad. Enero,

abril y diciembre exponen una distribución uniforme. Los meses de febrero, marzo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre noviembre y diciembre muestran una distribución asimétrica positiva. Por otra parte, mayo tiene una distribución asimétrica negativa.

Al comparar el caudal observado promedio, se observa una tendencia general de disminución de un 29,36 %, hasta llegar a un máximo de 51,26 % en julio. Los meses que presentaron una disminución mayor al 20 % son enero, abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre. Se exceptúan los meses de febrero y marzo, con un aumento de 5,12 % y 6,24 %.

El percentil 90 para el mes de enero indica que se presentarán eventos extremos superiores a 15,92 m³/s; en febrero, superiores a 19,53 m³/s; marzo, superiores a 14,94 m³/s; abril, superiores a 8,53 m³/s; mayo, superiores a 8,38 m³/s; junio, superiores a 18,73 m³/s; julio, superiores a 19,41 m³/s; agosto, superiores a 24,29 m³/s; septiembre, superiores a 31,39 m³/s; octubre, superiores a 47,66 m³/s; noviembre, superiores a 37,73 m³/s y diciembre, superiores a 27,36 m³/s.

El percentil 10 indica que serán menores de 13,89 m³/s en enero; en febrero, menores de 12,29 m³/s; marzo, menores de 8,58 m³/s; abril, menores de 5,78 m³/s; mayo, menores de 5,54 m³/s; junio, menores de 13,18 m³/s; julio, menores de 15,53 m³/s; agosto, menores de 18,42 m³/s; septiembre, menores de 23,23 m³/s; octubre, menores de 35,93 m³/s; noviembre, menores de 32,88 m³/s y diciembre, menores de 20,50 m³/s. Para el mes de octubre es más probable que se dé un evento mínimo, porque el percentil 10 y el 25 son parecidos. En febrero, marzo, agosto y octubre, es probable un evento máximo, porque el percentil 75 y el 90 son parecidos.

Para el cuarto periodo 2081-2100, el diagrama de la figura 102 muestra el comportamiento mensual del caudal. En términos de dispersión de los datos, los meses de enero, abril, mayo y diciembre presentan menor variabilidad. Abril y septiembre exhiben una distribución uniforme. Los meses de febrero, marzo, mayo, junio, agosto, septiembre, octubre y diciembre exponen una distribución asimétrica positiva. Por otra parte, enero, mayo, julio y noviembre tienen una distribución asimétrica negativa.

Al relacionar el caudal observado promedio (figura 89) se observa una tendencia general de disminución de un 29,14 %, hasta llegar a un máximo de 50,95 % en julio. Los meses que presentaron una disminución mayor al 20 % son enero, abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre. Se exceptúan los meses de febrero y marzo, con un aumento de 2,76 % y 5,59 %.

El percentil 90, para el mes de enero, indica que se superarán valores mayores de 16,12 m³/s; en febrero, mayores de 19,13 m³/s; en marzo, mayores de 14,55 m³/s; en abril, mayores de 8,56 m³/s; en mayo, mayores de 8,35 m³/s; en junio, mayores de 17,78 m³/s; en julio, mayores de 19,50 m³/s; en agosto, mayores de 22,22 m³/s; en septiembre, mayores de 29,38 m³/s; en octubre, mayores de 45,17 m³/s; en noviembre, mayores de 37,20 m³/s y en diciembre, mayores de 28,32 m³/s. El percentil 10 será menor de 13,26 m³/s en enero, en febrero de 10,77 m³/s, en marzo 8,45 m³/s, en abril 5,48 m³/s, en mayo 5,37 m³/s, en junio 11,64 m³/s, julio en 12,95 m³/s, en agosto 17,92 m³/s, en septiembre 22,93 m³/s, en octubre 35,05 m³/s, en noviembre 30,10 m³/s y en diciembre 19,43 m³/s.

Para los periodos analizados, se identifica que la serie es estacional y que se mantiene un patrón unimodal, al igual que con el periodo de referencia, con la época seca de enero a junio y la época húmeda de julio a diciembre.

A través de los hidrogramas construidos, se puede visualizar el comportamiento del caudal al relacionarlo con el caudal observado promedio, el simulado promedio, el máximo y mínimo. Estos dos últimos valores se colocan con el fin de evaluar una situación favorable y una desfavorable en cuanto al caudal disponible.

El hidrograma del periodo 2020-2040 muestra que el caudal promedio observado se mantiene por arriba del caudal mínimo, en un escenario desfavorable. Para un escenario promedio, el caudal futuro se mantiene por debajo del observado, excepto en los meses de febrero y marzo. Un caudal favorable se encuentra por encima del observado de febrero a mayo y de octubre a diciembre; en el resto de los meses, se presenta una disminución.

Durante el periodo 2041-2060, la tendencia de que un escenario mínimo sea menor que el caudal observado se mantiene y también que un escenario promedio sea menor, excepto por febrero y marzo. La cantidad de meses en los que un escenario favorable puede superar el caudal observado disminuyó, solo los meses de febrero a abril y diciembre en los que se supere el observado.

Nuevamente, para el periodo 2061-2080, un escenario desfavorable y un escenario promedio implican menor caudal que el observado, excepto en los meses de febrero y marzo. En los meses de febrero a marzo y de octubre a diciembre, un escenario favorable implica un aumento de caudal superior al observado; en el resto de los meses, será menor.

El análisis del hidrograma para 2081-2100 muestra una reducción del caudal para el escenario desfavorable y mínimo. Solamente de febrero a abril y de octubre a diciembre, ocurre un aumento que supera al caudal observado.

La posibilidad de que se presente un escenario máximo depende de la distribución de los datos que, como se determinó anteriormente, en su mayoría tienen asimetría positiva, por lo que es menos probable al concentrarse los datos por debajo de la mediana.

5.3. Demanda futura de agua sector doméstico

La demanda del sector doméstico se determinó evaluando, por municipio y a nivel general, el crecimiento poblacional en la cuenca, como se puede observar en la tabla LI, donde los municipios de Cobán, San Pedro Carchá y San Cristóbal Verapaz, concentran la mayor población en la cuenca y, por tanto, son los que presentan la mayor demanda de agua para consumo doméstico.

Con la población determinada, fue posible establecer su consumo para cada periodo de forma mensual, al multiplicar por la dotación recomendada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 100 litros por habitante al día y por los días del mes. Los resultados se muestran en la tabla LII, donde el aumento al 2040 será de 65,9 %; al 2060, de 66,36 %; al 2080, de 66,84 % y al 2100, de 66,88 %.

En la gráfica de la figura 88, se compara la demanda total con la disponibilidad para cada periodo, donde se expresa el volumen en términos de lámina de agua, para poder hacer el cotejo de forma estandarizada, lo cual se logró dividiendo cada volumen (el del caudal promedio a futuro, es decir, la disponibilidad hídrica y el del volumen demandado, esto es lo requerido por el sector doméstico) dentro del área de la cuenca (demanda doméstica).

Como se observa en la gráfica, para el 2040, la demanda de agua solo representa un 2,25 % de la disponibilidad; para el 2060 representa un 4,07 %; al 2080, de 6,69 % y para el 2100 es de 11,22 %.

5.4. Demanda futura de agua sector agrícola

El sector agrícola tiene una demanda que está relacionada con la necesidad de agua de los cultivos (ETcrop), como se muestra en la tabla LIV. Cada cultivo tiene una demanda diferente; el maíz es el que se posiciona como el de mayor demanda, le sigue el café y finalmente el cardamomo. Al analizar por mes, de mayo a julio, se alcanza la mayor demanda y en febrero la menor.

Para comparar, se graficó la demanda total de los cultivos y la disponibilidad hídrica en términos de lámina de agua (mm) para cada periodo mensualmente.

El periodo 2020-2040, según la gráfica de la figura 109, se muestra que se supera la disponibilidad en los meses de enero a julio. En términos porcentuales, el déficit es de 18,11 % para enero, 17,06 % para febrero, 58,35 % para marzo, 147,06 % para abril, 165,22 % para mayo, 25,39 % para junio y 18,45 % julio. En cambio, en el resto de los meses habría un exceso de 7,3 %; en agosto, 29,94 %; en septiembre, 49,06 %; en octubre, 48,87 % en noviembre y 29,17 % en diciembre.

Durante 2041-2060, la demanda de los cultivos no se cubre con la disponibilidad hídrica de enero a agosto, con una diferencia de 23,85 % en enero, 21,2 % en febrero, 76,02 % marzo, 189,18 % abril, 240,05 % mayo, 51,26 % junio, 24,97 % julio, 2,17 % en agosto y 5,72 % diciembre. De

septiembre a noviembre hay un exceso; de 23,8 % en septiembre, 46,94 % en octubre y 44,87 % en noviembre.

En el periodo comprendido de 2061 a 2080, nuevamente no se cubre la demanda, porque hay una deficiencia de 20,27 % en enero; 22,61 %, en febrero; 72,23 %, en marzo; 197,26 %, en abril; 238,82 %, en mayo; 52,89 %, junio; 29,05 %, en julio; 1,49 %, en agosto y 0,24 %, en diciembre. Una diferencia positiva se presenta en un 24,15 % para septiembre; 48,93 %, en octubre y 48,2 %, en noviembre.

Finalmente, para el periodo 2081-2100, se mantiene la misma tendencia con diferencia negativa de enero a agosto, distribuida de la siguiente manera: 21,66 % para enero, 25,43 % febrero, 73,29 % marzo, 191,65 % abril, 221,14 % mayo, 52,64 % junio, 28,25 % julio y 4,71 % agosto. De septiembre a diciembre hay un exceso: 22,06 % en septiembre, 48,26 % en octubre, 48,31 % en noviembre y 2,25 % en diciembre.

5.5. Demanda futura de agua sector hidroeléctrico

La demanda del sector hidroeléctrico se analizó con un enfoque diferente; pues se consideró que la generación energética depende del caudal turbinado, por lo que la comparación se realizó dividiendo este dentro del caudal a futuro (relación de caudal futuro y turbinado Q_p/Q_t), donde un valor igual a uno implicaría que se cubre el caudal necesario; si es menor, indica que hay un déficit, porque el caudal simulado es menor; y si es mayor a uno, implicaría que se cubre y que además hay un exceso. Este procedimiento se realizó para cada una de las hidroeléctricas en la cuenca.

Los datos obtenidos para la Hidroeléctrica RENACE se muestran en la gráfica de la figura 113 y en la tabla LVI. En este caso, el caudal utilizado para hacer la comparación fue el turbinado máximo. En el periodo 2020-2041, la generación solo se puede cubrir en octubre. El resto de los meses se podrá trabajar, pero a menor porcentaje de su capacidad turbinando un 40 % en enero; 43 %, en febrero; 33 %, en marzo; 23 %, en abril; 22 %, en mayo; 47 %, en junio; 49 % en julio; 61 %, en agosto; 80 %, en septiembre; 95 %, en noviembre y 65 %, en diciembre.

Para 2041-2060, en todos los meses, no se alcanzará el caudal turbinado y los porcentajes con los cuales se podrá trabajar son de 38 % para enero, 42 % para febrero, 30 % para marzo, 20 % para febrero, 17 % para mayo, 39 % para junio, 47 % para julio, 55 % para agosto, 74 % para septiembre, 99 % para octubre, 88 % para noviembre y 61 % para diciembre.

De 2061 a 2080, nuevamente solo octubre llega al valor de caudal turbinado: Estos serán los porcentajes de caudal con los que se podrá trabajar: 39 % en enero, 41 % en febrero, 31 % en marzo, 19 % en abril, 18 % en mayo, 39 % en junio, 45 % en julio, 55 % en agosto, 74 % en septiembre, 94 % en noviembre y 61 % en diciembre.

Finalmente, el periodo comprendido de 2081 a 2100 satisface solo la demanda en el mes de octubre, el resto de los meses será solo en estos porcentajes: 39 % enero, 40 % febrero, 30 % marzo, 19 % abril, 19 % mayo, 39 % junio, 46 % julio, 54 % agosto, 72 % septiembre, 94 % noviembre y 62 % diciembre.

Para la Hidroeléctrica CHICHAIC, la relación se calculó utilizando el caudal turbinado promedio; los resultados se muestran en la gráfica de la figura

114 y en la tabla LVII. Los caudales necesarios para la generación son menores a comparación de RENACE; y como se observa, para todos los meses y periodos se puede abastecer, porque la relación es mayor a la unidad, incluso hasta 12 veces, como se percibe en noviembre.

Se debe considerar que, para hacer esta relación, se restó al caudal futuro un 10 %; este porcentaje representa el caudal ecológico.

5.6. Comparación del caudal a futuro con la demanda por sectores

Por medio de la gráfica de la figura 115, se representan los datos mostrados en la tabla LVIII, que son los valores totales proyectados de demanda por sectores y de disponibilidad a futuro para cada final de periodo.

El sector doméstico, para el 2040, representa una demanda del 2,25 % de la disponibilidad hídrica; 4,07 %, para el 2060, 6,69 %, para el 2080 y 11,22 %, para el 2100, por lo que se puede abastecer la demanda. Sin embargo, existe una tendencia de aumento y, además, se debe considerar que, como señala Aridane Hernández, “La demanda de agua se está incrementando en Guatemala debido al aumento de la población, pero, al mismo tiempo debido al cambio en el régimen de precipitaciones, por lo que el país podría empezar a registrar estrés hídrico...”⁵⁶. Esto implica cambios en la cantidad y calidad de agua que según indica el IPCC “...afectarían a la disponibilidad, la estabilidad, la accesibilidad y la utilización de los alimentos. Se prevé una disminución de la seguridad alimentaria y un aumento de la vulnerabilidad de los agricultores rurales pobres”⁵⁷.

⁵⁶ HERNÁNDEZ, Aridane. *Cambio climático en Guatemala*. p. 35.

⁵⁷ Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *EL CAMBIO CLIMÁTICO Y EL AGUA Documento técnico VI del IPCC*. p. 25.

Respecto al tema de calidad del agua, con el aumento de población se incrementará la cantidad de patógenos y nutrientes generados por la población urbana y el sector agrícola que, según indica en el texto *El cambio global amenaza a ríos y peces*, se tendrá como consecuencia cambios en los ecosistemas acuáticos “así, algunos de ellos pasarán de ser permanentes a estacionales y otros desaparecerán, y en todos los casos se reducirá su tamaño y se alterará su composición y funcionamiento”⁵⁸.

El sector agrícola, en cambio, solo podrá ser abastecido para el 2040, al utilizar un 97,18 % de la disponibilidad hídrica. Para el resto de los periodos, hay un déficit: de 5,5 % para el 2060; 3,96 % en el 2080 y 4,5 % en el 2100. Esta deficiencia tendrá como impacto principal la sequía que como indica Aridane Hernández en el informe *Cambio climático en Guatemala*, tendrá consecuencias como “...el aumento de la inseguridad alimentaria y nutricional derivado de la pérdida de cosecha agrícola y la reducción de la producción pecuaria. Esto hace aumentar los precios al reducir la oferta y, además aumentar la inseguridad alimentaria y nutricional. Además, un efecto inmediato es el aumento en los precios de los alimentos”⁵⁹.

El sector hidroeléctrico tiene una demanda total (al sumar lo requerido por la Hidroeléctrica RENACE y por CHICHAIC) que supera casi el doble de lo disponible: para el 2040 falta un 47,16 % para cubrir lo requerido; para 2060, un 42,64 %; 2080, un 46,38 % y 2100, un 46,65 %.

Otros factores que afectarán la generación hidroeléctrica, aparte de la disminución del caudal, será la evaporación y la seguridad de las presas como lo señalan Torben Mideksa y Steffen Kallbekken “...La mayoría de las presas

⁵⁸ BENIGNO, Elvira; ALMODOVAR, Ana. *El cambio global amenaza a ríos y peces*. p. 1.

⁵⁹ HERNÁNDEZ, Aridane. *Cambio climático en Guatemala*. p. 25.

actuales se construyen sin tener en cuenta el posible impacto del cambio climático y puede tener una menor capacidad para manejar eventos extremos frecuentes asociados con el flujo del río”⁶⁰. Además, la mayoría de las presas existentes fueron diseñadas con registros históricos que no consideran las variaciones por el cambio climático que, como lo indica Roberto Schaeffer “...un cambio en las condiciones climáticas podría afectar los sistemas existentes de generación hidráulica y también los futuros por flujos de agua mayores o menores a los históricos”⁶¹, como es el caso para las presas de la Hidroeléctrica RENACE y CHICHAIC.

⁶⁰ MIDEKSA, Torben; KALLBEKKEN, Steffen. *The impact of climate change on the electricity market: A review*. p. 4.

⁶¹ SCHAEFFER, Roberto; et. al. “*Energy sector vulnerability to climate change: A review*”. p. 4.

CONCLUSIONES

1. El modelo hidrológico desarrollado para la parte alta de la cuenca Cahabón, con base en series de datos de la estación hidrométrica Chajcar, estaciones meteorológicas y características físicas de la cuenca, se considera como satisfactorio, tras realizar una comparación gráfica del caudal observado y simulado a nivel mensual para el periodo de calibración (1986-1995) y validación (1995-2000); también, tras establecer los indicadores estadísticos que califican al modelo como ' bueno ' y ' muy bueno '.
2. Se determinó el caudal a futuro de la parte alta de la cuenca Cahabón mediante el uso del modelo y los datos de los escenarios AR5 del IPCC para los periodos 2020-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100.
 - Los resultados indican que durante los periodos analizados en la mayoría de los meses se presentará variabilidad, que se manifiesta a través de una distribución asimétrica de los datos, en su mayoría positiva. Asimismo, indican que los valores de caudal se concentrarán por debajo de la mediana, generalmente, para los meses de julio a diciembre.
 - La tendencia de los valores de caudal a futuro es negativa, con una reducción promedio de 20 % en el caudal, sin embargo, alcanza más de 40 % en el mes de julio. Solo en los meses de febrero y marzo, se presenta un aumento, pero no se considera relevante por estar alrededor de un 10 %.

- Por medio de los percentiles 90 y 10, se evaluó a partir de qué valores se presentará un evento extremo máximo y uno mínimo de forma mensual.
 - Con la representación gráfica de los caudales, se determinó que la estacionalidad unimodal se mantiene, comparada con el periodo base (1981-2000), que presenta la época seca de enero a junio y la época húmeda de julio a diciembre.
 - Los hidrogramas analizados para cada periodo muestran que un escenario desfavorable (caudal mínimo futuro) implica que, en todos los meses, el caudal será mucho menor que el observado. Un escenario promedio (caudal promedio futuro) puede ocurrir en febrero y marzo, porque se mantiene el caudal observado; para el resto de los meses, se presentará una disminución respecto del observado. En cambio, un escenario favorable (caudal máximo futuro), donde se supere el caudal observado, puede ocurrir, generalmente, en los meses de febrero a abril y octubre a diciembre. En el resto de los meses, un escenario favorable tendrá valores menores que el caudal promedio.
3. La demanda futura del sector doméstico para los periodos 2020-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100 será cubierta con la disponibilidad de agua a futuro (caudal promedio) para la población en la cuenca. Sin embargo, la tendencia de los datos implica que el caudal disminuye con el tiempo, pero la demanda, por el contrario, aumenta, por lo que se espera que a futuro esta no pueda ser abastecida.

4. El sector agrícola en la cuenca presenta una demanda que, comparada con la disponibilidad a futuro, implica un déficit durante los periodos analizados (2020-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100); este se marca, generalmente, de enero a agosto. Aunque en el resto de los meses habrá un exceso, este no será suficiente para compensar lo requerido. Los meses más críticos identificados son marzo, abril y mayo.
5. El sector hidroeléctrico en la cuenca, conformado por la Hidroeléctrica RENACE y CHICHAIC, tendrá una demanda equivalente a su caudal turbinado mensual. La relación entre este y el caudal a futuro indica que RENACE no podrá alcanzar su máxima capacidad; por lo que llegará a trabajar con menos de un 50 % de enero a julio; solamente en el mes de octubre se alcanzará el 100 %. Se tendrán como meses más críticos abril y mayo. CHICHAIC, por el contrario, sí cubrirá su demanda, pero esto debido a que su generación energética es menor.
6. La comparación entre el caudal a futuro con la demanda por sectores muestra que los potenciales impactos del cambio climático se verán reflejados en la generación hidroeléctrica y en la agricultura, ya que se disminuirá la disponibilidad del recurso hídrico y, por tanto, se producirán pérdidas económicas y sus efectos se verán reflejados en las poblaciones rurales que dependen de la agricultura para subsistir. Esta situación implícitamente conlleva, además, riesgos para la diversidad biológica, porque se verá afectado su ecosistema, al disminuir el caudal y aumentar junto con la cantidad de habitantes las descargas de aguas residuales. Ante estas circunstancias, se hace necesaria una gestión a nivel de cuenca, que incluya medidas de adaptación para reducir la vulnerabilidad del territorio.

RECOMENDACIONES

1. La resolución del ráster, a partir del cual fue delimitada la cuenca, puede mejorar, por lo que, si en el futuro se cuenta con un ráster para el país de resolución menor a 20 metros, convendría utilizarlo para obtener una buena definición.
2. Un muestreo de suelos en la cuenca para conocer las propiedades hidráulicas de estos puede ser de utilidad, y así construir un mapa detallado de tipo de suelo; en este caso, se podría aplicar la herramienta SPAW, para conocer las propiedades a partir del porcentaje de arcilla, arena y limo obtenidos en los muestreos.
3. Para analizar la cobertura del suelo en la cuenca, se puede actualizar la capa, al considerar los cambios en el tiempo, con el fin de identificar si han existido variaciones relevantes y, de esta forma, conocer también la dinámica territorial.
4. Como parte del procesamiento de la información geoespacial, se debe trabajar con un mismo tipo de coordenadas.
5. Respecto a la información de los cultivos que es utilizada en el modelo hidrológico, actualmente no se cuenta con información para las plantaciones de cardamomo, por lo que este podría ser un tema de investigación de relevancia.

6. La cantidad de estaciones meteorológicas e hidrológicas para modelamientos hidrológicos con una línea base a partir del año 2000 son escasas, por lo que se aconseja a las autoridades aumentar la red de estaciones en los departamentos de Alta y Baja Verapaz. En caso de que esto no sea posible, se puede recurrir a información satelital, pero siempre es preferible un registro histórico, porque puede reducir la incertidumbre del modelo.
7. Este informe puede ser utilizado como parte de una línea base que permita una gestión integrada del recurso hídrico, con una visión a futuro para la adaptación al cambio climático. Es conveniente complementarlo, además, con un estudio hidrogeológico.
8. Una de las medidas que pueden tomar las autoridades en la cuenca para cubrir la demanda de todos los sectores es racionalizar el consumo de agua; pero siempre se debe considerar el cuidado de las fuentes y la inversión en infraestructura que reduzca las pérdidas (identificar y reparar las fugas) y que garantice su disponibilidad y embalses, por ejemplo. Además, se debe invertir en obras de protección contra eventos extremos como inundaciones que, aunque no se reflejan en estos resultados debido a que los modelos climáticos globales no incluyen en sus proyecciones fenómenos como El Niño y La Niña, se deben prever los mismos, para evitar consecuencias desastrosas. En el sector agrícola, se puede invertir en mejorar los sistemas de riego.
9. Las campañas de educación ambiental son necesarias, especialmente para hacer uso eficiente del agua y reducir su contaminación en todos los sectores. También puede promoverse el uso de artefactos ahorradores y la reutilización del agua para riego, por ejemplo.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABBASPOUR, Karim. *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs-A User Manual*. Suiza: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2015. 100 p.
2. ALBUJA SILVA, Edgar Cristóbal; TENELANDA PATIÑO, Daniel Orlando. *Desarrollo de un modelo conceptual de lluvia-escorrentía para interpretación de procesos hidrológicos en la cuenca altoandina del río Zhuruca*. Perú: Universidad de Cuenca, 2014. 58 p.
3. ALMOROX, Jour. *Métodos de estimación de las evapotranspiraciones ETP y ETr*. España: Universidad Politécnica de Madrid, 2008. 19 p.
4. APARICIO MIJARES, Francisco Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. 1a ed. México: Limusa, 1992. 152 p.
5. Aquabook. *Partes de una cuenca*. [en línea]. <http://aquabook.agua.gob.ar/378_0>. [Consulta: 24 de septiembre de 2020].
6. ARGOTA, Trinidad. *Simulación hidrológica de la cuenca del río AMAJAC, estado de Hidalgo Aplicando el modelo SWAT*. México: Instituto Politécnico Nacional, 2011. 131 p.

7. ARROYO MORALES; Luis, HEIDINGER; Haline; ARAYA MORALES, Eddison José. *Modelo Hidrológico SWAT como Herramienta para Procesos de Toma de Decisión*. Costa Rica: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, 2010. 31 p.
8. ASTORAYME VALENZUELA, Miguel Ángel. *Análisis y evaluación comparativa de modelos hidrológicos agrupados y semidistribuidos aplicados al pronóstico de caudales diarios del río Chillón*. Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2017. 174 p.
9. BACA RUEDA, Ricardo. *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos*. Perú: Ministerio de Agricultura y Riego, 2014. 24 p.
10. BENIGNO, Elvira; ALMODOVAR, Ana. *El cambio global amenaza a ríos y peces*. España: 2008. 2 p.
11. BUM, Kue; et. al. *Exploration of Warm-up Period in Conceptual Hydrological Modelling*. Nueva Zelanda: 2017. 37 p.
12. CABRERA, Juan. *Modelos Hidrológicos*. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 2019. 8 p.
13. CAMPOS ARANDA, Daniel. *Procesos del ciclo hidrológico*. México: Universidad de San Luis Potosí, 1998. 550 p.
14. CASADO CALLE, María Jesús. *Modelos Climáticos*. España: Gobierno de España, 2016. 29 p.

15. CAVAZOS, Teresa; et. al. *Hydrological Modeling of Climate Change Impacts in a Tropical River Basin: A Case Study of the Cauto River, Cuba*. Suecia: 2018. 25 p.
16. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *CHICHAIC*. [en línea]. <http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=630>. [Consulta: 28 de septiembre de 2020].
17. _____. *RENACE*. [en línea]. <http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=686>. [Consulta: 28 de septiembre de 2020].
18. CORDÓN SUÁREZ, Ulises; JOHNSON, Wilfredo; CORDÓN SUÁREZ, Enrique. *Diagnóstico Biofísico y Socioeconómico de la Cuenca Bilwi Tingni, Puerto Cabezas, RAAN6*. Nicaragua: 2008. 16 p.
19. COTTO GUZMÁN, Elián Jacobo Epaminondas. *Aportes para mejorar el manejo de los recursos naturales renovables en la cuenca del río Cahabón, Alta Verapaz*. Trabajo de graduación de Ing. Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2006. 197 p.
20. DATA DISTRIBUTION CENTRE IPCC. *Scenario process for AR5*. [en línea]. <https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html>. [Consulta: 12 de abril de 2019].
21. DEL RÍO LA MURA, Pablo Andrés. *Análisis del impacto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca de Pangal en Pangal*. Chile: Universidad de Chile, 2015. 87 p.

22. Departamento de Investigación y Servicios Climáticos. *Variabilidad y cambio climático en Guatemala*. Guatemala: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, 2015. 165 p.
23. DEPETTRIS, Carlos; RUBERTO, Alejandro. *Modelos Hidrológicos*. Argentina: Universidad del Nordeste, 2006. 61 p.
24. EcuRed. *Cobertura boscosa*. [en línea]. <https://www.ecured.cu/Cobertura_boscosa>. [Consulta: 21 de abril de 2019].
25. HERNÁNDEZ, Aridane. *Cambio climático en Guatemala*. Guatemala: Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia, 2007. 55 p.
26. Fundación Amigos de la Naturaleza. *Disponibilidad hídrica y demanda de agua en la cuenca Piraí: situación actual y escenario de cambio climático*. Bolivia: 2010. 63 p.
27. GAERTNER, Miguel Ángel; GUTIÉRREZ, José Manuel; CASTRO, Manuel. *Escenarios regionales de cambio climático*. España: 2012. 7 p.
28. GONZÁLEZ CELADA, Edio Giovanni. *Impacto del cambio climático y uso/cobertura en el comportamiento hidrológico, erosión hídrica y disponibilidad de agua para uso agrícola y humano en la subcuenca del río Quiscab, cuenca del lago Atitlán, Guatemala*. Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, 2016. 86 p.

29. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *Cambio Climático 2013: Bases físicas*. Estados Unidos de América: IPCC, 2013. 22 p.
30. _____ Informe de síntesis: *Cambio climático 2014*. Suiza: Organización Meteorológica Mundial, 2015. 176 p.
31. _____ *EL CAMBIO CLIMÁTICO Y EL AGUA*. Suiza: Organización Meteorológica Mundial, 2008. 224 p.
32. GUEVARA REYES, Miguel Ángel. *Parámetros geomorfológicos*. [en línea]. <<https://www.slideshare.net/MiguelAngelGuevaraReyes/parametros-geomorfologicos>>. [Consulta: 20 de abril de 2019].
33. HIDALGO, Hugo; ALFARO, Eric. *Skill of CMIP5 Climate Models in Reproducing 20th Century Basic Climate Features in Central America*. Reino Unido: 2014. 24 p.
34. KOUCHI, Delaram Houshmand; et. al. *Sensitivity of Calibrated Parameters and Water Resource Estimates on Different Objective Functions and Optimization Algorithms*. Suecia: 2017. 16 p.
35. HURTADO PIDAL, Jorge René; YÁNEZ BORJA, Darwin Benigno. *Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tool) para Análisis del Caudal de Escorrentía Superficial en la Cuenca Hidrográfica del Río Las Juntas*. Ecuador: 2015. 16 p.

36. IBÁÑEZ ASENSIO, Sara; MORENO RAMÓN, Héctor; GISBERT BLANQUER, Juan. *Morfología de las cuencas hidrográficas*. España: Universidad Politécnica de Valencia, 12 p.
37. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar. *Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala*. Guatemala: 2015. 81 p.
38. Instituto Nacional de Estadística. *Características de la población y de los locales de habitación censados*. Guatemala: 2002. 278 p.
39. _____. *Encuesta Nacional de Condiciones de Vida (ENCOVI)*. [en línea]. <<https://www.ine.gob.gt/estadisticasine/index.php/usuario/encovi>>. [Consulta: 20 de septiembre de 2020].
40. Instituto Nacional de Estadística. *XII Censo Nacional de Población y VII de vivienda*. [en línea]. <<http://redatam.censopoblacion.gt/bingtm/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CPVG T2018&lang=esp>>. [Consulta: 20 de mayo de 2020].
41. JARVIS, Andy; RAMÍREZ VILLEGAS, Julian. *Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method*. Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 2010. 18 p.
42. JODAR-ABELLAN, Antonio; et. al. Evaluación del Impacto del Cambio Climático sobre una Cuenca Hidrológica en Régimen Natural (SE, España) usando un Modelo SWAT. México: 2018. 13 p.

43. KNOBEN, Wouter; FREER, Jim; WOODS, Ross. *Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores*. Alemania: 2019. 9 p.
44. LEÓN OCHOA, Ricardo Fernando. *Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático*. Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2017. 96 p.
45. LEÓN, Ricardo, y et. al. *Modelación de la Disponibilidad Hídrica del Río Pura - Perú, Considerando la Incidencia del Cambio Climático*. Perú: 2019. 11 p.
46. LUX CARDONA, Benjamín. *Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas*. Guatemala: 2016. 8 p.
47. MACHORRO, Rudy; REQUENA, Jaime. *Evaluación de calidad de agua y análisis de crecidas en la porción occidental de la cuenca del río Cahabón*. Guatemala: Centro Universitario del Norte, 2002. 94 p.
48. MAGRIN, Graciela. *Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe*. Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2015. 80 p.
49. MARTÍNEZ LOAYZA, Carlos Roberto. *Impacto del cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Ica*. Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014. 83 p.

50. MEZA RODRÍGUEZ, Demetrio; MARTÍNEZ RIVERA, Luís Manuel. *Análisis morfométrico de las cuencas de la red MEX-LTER: estudio de diez cuencas a nivel nacional en México*. México: Red Mexicana de Investigación Ecológica a Largo Plazo, 2010. 57 p.
51. MIDEKSA, Torben; KALLBEKKEN, Steffen. *The Impact of Climate Change on the Electricity Market: A review*. Reino Unido: 2010. 6 p.
52. Ministerio para la Transición Ecológica, Gobierno de España. *MeteoGlosario Visual*. [en línea]. <https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/659_escenarios-de-emisiones>. [Consulta: 12 de abril de 2019].
53. MONTECELOS, Yalina. *Modelación del efecto de la variación climática en el balance hídrico en dos cuencas (México y Cuba) bajo un escenario de cambio climático*. México: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 2018. 114 p.
54. MORIASI, Daniel; et. al. *Model evaluation guidelines for systematic Quantification of accuracy in watershed simulations*. Suecia: 2017. 16 p.
55. MOSS, Richard; et. al. *Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts and response strategies*. Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2008. 132 p.

56. OBANDO, Oscar; SÁNCHEZ, Tannia; ASTORAYME, Miguel. *Actualización de los escenarios de disponibilidad hídrica en el Perú en contexto de cambio climático*. Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2015. 89 p.
57. Observatorio cambio climático Canarias. *Modelización Climática de Alta Resolución en terrenos de orografía compleja*. España: Observatorio cambio climático Canarias, 2016. 45 p.
58. Oficina Española de Cambio Climático. *Plan nacional de adaptación al cambio climático*. España: Ministerio de Ambiente, 2006. 59 p.
59. OGLESBY, Robert; ROWE, Clint. *Impactos climáticos para Guatemala: Resultados preliminares de los modelos climáticos regionales y globales IPCC AR5*. Guatemala: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2014. 40 p.
60. ORDOÑEZ GÁLVEZ, Juan Julio. *¿QUÉ ES CUENCA HIDRÓLOGICA?* Perú: Sociedad Geográfica de Lima, 2011. 44 p.
61. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *Guía para la descripción de suelos*. Italia: 2009. 111 p.
62. _____ *Textura del suelo*. [en línea]. <http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm>. [Consulta: 21 de abril de 2019].

63. OVIEDO TORRES, Blanca Elvira. *Generación de escenarios de cambio climático regionales y locales a partir de modelos globales*. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010. 17 p.
64. PAJARITO GRAJALES, Ximena Julieth. *Implementación del modelo hidrológico SWAT, como herramienta para el manejo del recurso hídrico en la unidad hidrológica del río Hacha-Florencia Caquetá*. Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2017. 97 p.
65. PALOMINO LEMUS, Reiner. *Proyecciones de cambio climático para la precipitación en América Tropical mediante técnicas de downscaling estadístico*. España: Universidad de Granada, 2015. 216 p.
66. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos. *Agua para todos, agua para la vida: informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo*. Francia: Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura, 2003. 36 p.
67. REYES VILLATORO, Rodolfo. *Contaminación en el río Cahabón, Alta Verapaz, Guatemala*. Trabajo de graduación de Maestro en Ciencias con la Especialización en Diseño, Planificación y Manejo Ambiental, Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Arquitectura, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2009. 73 p.
68. RODAS GÓMEZ, Felipe. *Planificación de la cuenca hidrográfica como generadora de desarrollo en la república de Guatemala*. Trabajo

de graduación de Ing. Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2014. 198 p.

69. RODRÍGUEZ CAMINO, Ernesto. *Modelos climáticos*. España: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2017. 27 p.
70. SCHAEFFER, Roberto; et. al. *Energy Sector Vulnerability to Climate Change: A Review*. Alemania: 2012. 12 p.
71. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones*. México: Gobierno Federal, 2009. 93 p.
72. Secretaría General de Planificación y Programación de la Presidencia. *Proyecto MAGA-ESPREDE-CATIE, Mapa de Fisiografía y Geomorfología*. [en línea]. <http://ide.segeplan.gob.gt/s/s_municipal/pdfs/04_s_Chimaltenango/_43_04.pdf>. [Consulta: 20 de 4 de 2019].
73. _____ *Proyecto MAGA-ESPREDE-CATIE, Mapa de Fisiografía y Geomorfología*. [en línea]. <http://ide.segeplan.gob.gt/s/s_municipal/pdfs/17_s_Peten/_43_17.pdf>. [Consulta: 20 de abril de 2019].
74. STEHR GESCHE, Alejandra Patricia. *Análisis del comportamiento hidrológico y disponibilidad de agua, bajo escenarios de cambio climático, para dos sub-cuencas del río Biobío incorporando el*

impacto del aporte nival en la zona cordillerana. Chile: Universidad de Concepción, 2008. 138 p.

75. TOT FLORES, Rafael Francisco. *Evaluación del recurso hídrico en Alta Verapaz: Análisis del estado actual y potencial de uso del agua en el municipio de San Cristóbal Verapaz*. Trabajo de graduación de Ing. Geología, Centro Universitario del Norte, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2012. 183 p.
76. University Corporation for Atmospheric Research. *PARA-Agua Project*. Perú: U.S. Agency for International Development, 2014. 72 p.
77. University of California, Santa Barbara. *CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations*. [en línea]. <<https://www.chc.ucsb.edu/data/CHIRPS>>. [Consulta: 16 de 10 de 2020].
78. URIBE, Natalia. *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario, Versión SWAT 2005*. Estados Unidos: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 2010. 47 p.
79. VILLOTA, Hugo. *Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras*. 2a ed. Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2005. 183 p.
80. WEBER, Juan; DASSOB, Clarita; JORQUER, Eliana. *Desarrollo y Calibración de un Modelo Hidrológico de Simulación Mixta*. Argentina: 2010. 24 p.

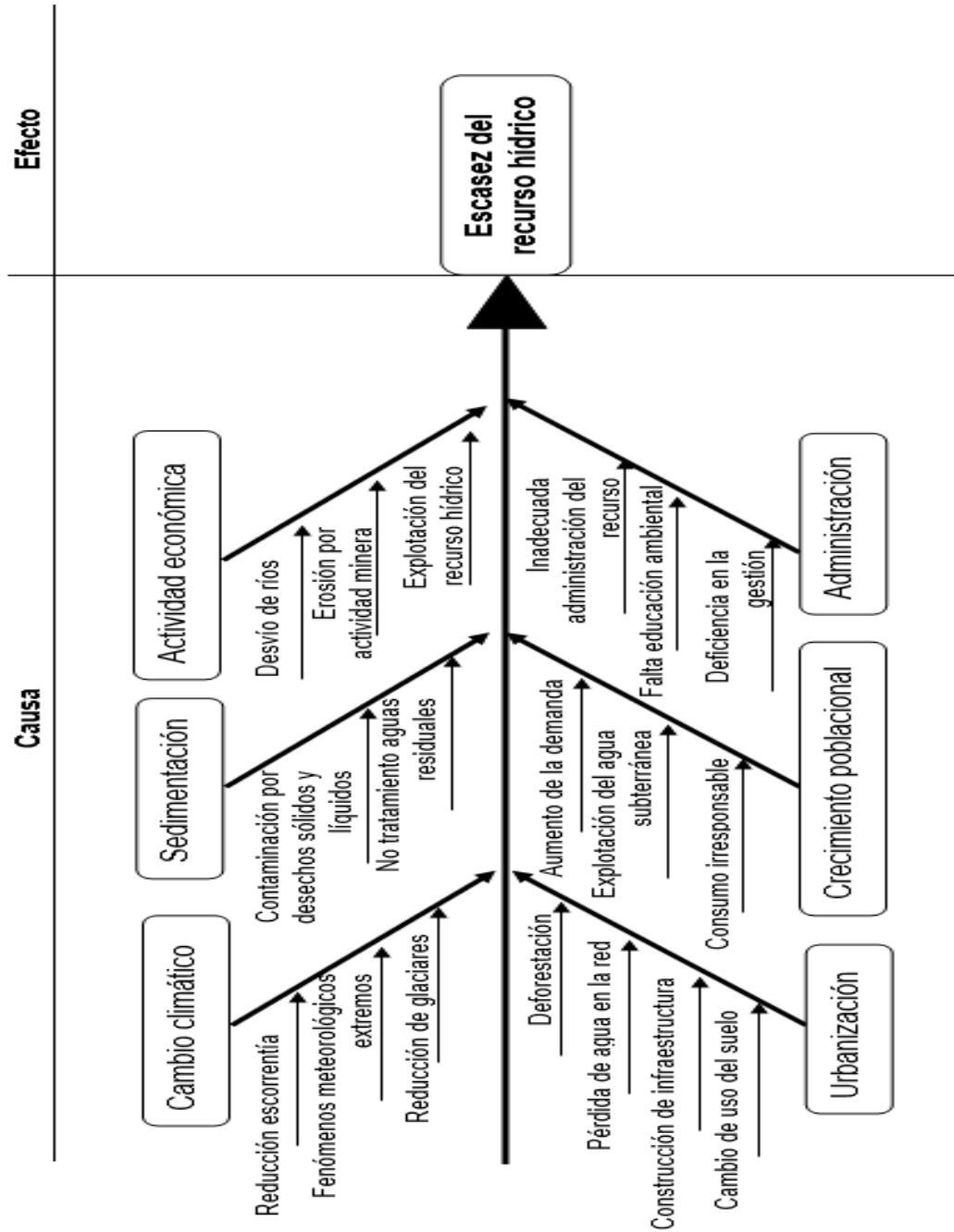
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

Área	Curso	Contenido
Complementaria	Climatología	Fenómenos meteorológicos y alteraciones climáticas
Sanitaria	Geología	Procesos geológicos
	Sanitaria 1	Estimación de población futura
Aguas	Hidrología	Ciclo hidrológico, caracterización morfométrica de una cuenca, caudal, precipitación: estimación de datos faltantes
	Manejo de Cuencas	Caracterización biofísica de una cuenca
Área de química industrial	Química Ambiental	Componentes ambientales y calentamiento global
Básica	Estadística 1	Construcción de gráficos estadísticos, interpretación y cálculo de indicadores de la estadística descriptiva
	Estadística 2	Estadística inferencial y estimación
	Ecología	Recursos naturales, calentamiento global y cambio climático
	Geografía	Geomorfología y cartografía
Administración	Legislación Ambiental 2	Cambio climático conceptos generales
Dibujo y topografía	Topografía 3	Cartografía y sistemas de información geográfica
	Taller de Sistema de Información Geográfica	Representación de la información geográfica,

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Precipitación promedio mensual (mm) de la estación Cobán

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1981	28,35	210,66	66,18	95,43	188,86	348,54	237,45	305,75	145,79	250,99	125,32	108,38
1982	153,92	45,63	37,91	117,18	214,88	271,88	219,41	196,17	283,51	191,22	125,05	98,64
1983	52,72	52,85	23,32	194,63	92,80	233,32	281,17	205,81	237,00	263,71	159,79	183,09
1984	86,38	102,18	86,58	85,92	274,17	297,79	323,92	313,36	303,95	229,06	200,37	122,02
1985	67,73	135,56	45,90	138,01	67,34	281,71	229,77	183,13	217,55	193,56	114,27	163,65
1986	112,19	71,42	94,89	61,45	266,52	276,96	180,94	170,11	215,98	179,92	134,68	96,60
1987	44,08	44,66	50,44	52,21	23,47	306,60	278,49	255,42	176,37	167,70	158,17	84,04
1988	101,36	98,64	60,46	48,21	51,87	339,40	242,74	360,73	302,33	99,28	64,89	61,64
1989	115,00	165,00	117,00	167,00	148,00	250,62	197,00	253,00	447,00	233,00	192,00	179,00
1990	138,00	137,00	180,00	126,00	149,00	278,00	156,00	209,00	216,00	254,00	486,00	167,00
1991	93,00	67,00	86,00	55,00	146,00	248,00	193,00	179,00	321,00	212,00	103,00	338,00
1992	76,00	25,00	54,00	223,00	344,00	419,00	286,00	234,00	262,00	181,00	381,00	198,00
1993	113,00	36,00	48,00	158,00	164,00	330,00	185,00	310,00	16,70	197,30	9,50	8,30
1994	16,80	4,40	135,20	4,80	17,10	11,70	13,50	163,00	26,20	5,10	10,60	6,90
1995	8,00	9,10	8,40	69,36	121,00	299,00	221,00	289,00	264,00	208,01	129,00	141,00
1996	75,00	118,00	52,00	133,00	236,00	164,00	272,00	159,00	159,00	344,00	434,00	40,00
1997	84,00	118,00	71,00	60,00	128,00	397,00	250,00	251,00	324,00	169,00	190,00	118,00
1998	73,00	2,00	5,00	68,00	121,00	274,00	257,00	199,00	288,00	613,00	326,00	99,00
1999	158,00	273,00	65,00	202,00	97,00	355,00	200,00	184,00	374,00	253,00	514,00	101,00
2000	85,00	47,48	0,00	66,00	504,00	277,00	188,00	280,00	340,00	553,00	156,00	138,00
2001	53,00	106,73	121,37	88,83	268,07	155,79	186,54	190,68	270,03	367,27	149,90	117,40
\bar{x}	82,60	89,06	67,08	105,43	172,53	276,92	219,00	232,91	247,16	245,96	198,26	122,36
Nx	83,68	86,77	68,47	114,80	181,26	277,52	201,54	225,83	253,16	274,04	244,26	127,85

Nota: datos faltantes estimados por el método de proporción normal resaltados en verde y datos rellenos con información de CHIRPS resaltados en amarillo.

Fuente: elaboración propia, con datos del INSIVUMEH y CHIRPS.

**Apéndice 4. Precipitación promedio mensual (mm) de la
estación San Cristóbal**

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1979			53,7	52,1	120,3	216,8	251,4	326,9	329,9	188	140,5	73,1
1980	24,4	26,5	31,4	65,7	50,3	285,1	357,3	192,4	300,8	231,5	64,6	39,9
1981	20,1	113,1	24,5	23,1	165,8	327,9	340,7	376,5	210,1	188,2	49,2	58
1982	95	14,6	18,5	61,9	170,3	348	269,4	194,1	353,3	121,3	34,5	33,4
1983	37,1	55,5	11,1	134,4	88,9	189,1	304,4	253,5	194,8	153,6	75,4	74,9
1984	53,4	34,2	82,5	40,9	194,4	360,5	360,3	374	368,6	201	115,4	67,1
1985	32,1	84,6	30,4	84,7	44,8	259	301,6	242,6	236,3	134	41	87,1
1986	50,7	40	46,8	24,9	217,4	335,9	196,4	216,3	266	154,9	88,8	47,5
1987	26,7	15,3	25	31,5	20,5	350,3	422,9	249,9	189,7	77,1	42,3	36,3
1988	44,1	46,8	53,43	53,28	49,81	296,9	220,7	374,8	297,6	249,2	100,1	40,22
1989	45,1	63,52	56,95	77,5	100,1	244,2	212,3	284,5	422,9	161,2	137,2	47,9
1990	50,2	48,9	45,5	52,5	103,7	284,9	198,2	218	289,8	176,7	203	60,7
1991	46,9	25,3	40,1	66,7	85,2	225,4	177,9	78,8	229,1	184,3	39,4	138,7
1992	23,5	12,3	28,6	88,3	130	302,3	281,1	180,9	373,9	143,7	248,5	124,6
1993	43,6	16,4	16,9	102,2	98,6	422,5	163,1	316,5	240,7	177,3	49,6	53,8
1994	85	29	87,7	68,8	84,1	186,1	88,3	196,6	158,2	96,8	45,1	32,3
1995	34,6	44,1	34,2	186,7	62,7	412,6	278,5	400,2	373,9	264	57	69,9
1996	34,5	35,9	35,8	65,9	187	330,5	293,7	176,2	231	236,5	189,6	39,2
1997	51,8	50,4	36,5	40,1	97,7	113	239,7	184,9	467,6	129,4	166,3	57,1
1998	37,7	0,5	41,7	102,6	78,7	343,7	306,5	184,5	301,1	422,2	178,7	42,6
1999	58	71,9	56,1	87,9	73,5	308,4	244	308,7	366,7	210,7	113,4	25,5
2000	55,4	25,6	1,8	20,2	372,1	304	148,2	338	283,8	275,1	71,1	60,7
2001	25,6	64,2	97,7	50,4	164,7	156,6	335,4	173,8	283	232	64,4	64,1
2002	13,5	33,9	53	4,6	105,3	132,6	235,3	284,4	291,5	158,2	83,4	77,5
2003	49,1	38,6	125,1	14,5	101,5	238,6	262	230,7	294,1	90,2	301,6	37
2004	49	26,9	34,9	99,6	196,7	339,8	181,2	123	165,7	119,9	86,17	30,85
\bar{x}	43,49	40,72	45,00	65,42	121,70	281,34	256,56	249,26	289,23	183,73	107,16	58,46
Nx	43,42	39,77	44,15	65,91	123,65	282,23	259,90	249,29	294,03	186,28	108,00	60,37

Nota: datos faltantes estimados por el método de proporción normal resaltados en verde y datos rellenos con información de CHIRPS resaltados en amarillo.

Fuente: elaboración propia, con datos del INSIVUMEH y CHIRPS.

**Apéndice 5. Precipitación promedio mensual (mm) de la
estación Cerro La Laguna**

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1979	84,2	122,3	56	71,8	363,8	291,6	246,5	311,4	382,2	395,8	395,6	292,1
1980	54,8	67,3	109,2	134,1	57,9	433,7	190,2	242	346,5	450,3		136,4
1981	40,8	242,3	109	56,7	186,1	367,7	406,1	389,5	141,8	234,7	144,5	105,2
1982	174	62,2	60,9	104,6	163,7	214,9	332	254,8	381,4	262,1	160,3	99,8
1983	33,56	36,42	19,25	174,2	61,6	258	346,4	220,8	307,2	342,1	143,4	215,5
1984	114,8	139,6	127,2	127,5	273,9	331,8	424	299	298,5	191,5	145,9	126,4
1985	102,9	106,9	73,9	138,4	35,8	288,6	259,8	180,4	387,5	228,8	104,7	169,9
1986	160,3	74,4	151,9	69,3	292,5	217,6	205,3	137,6	227,4	165,7	94,4	93,2
1987	58,2	68	99,9	37,5	26	272,6	326,4	342,8	263,5	227	170,6	90,4
1988	165,4	95,5	189,4	39,9	74,2	358,9	284,8	524,1	348,3	359,1	107,4	134,8
1989	111,6	156,2	117,6	140,9	169,7	204,4	215	285,4	556,8	233,8	248,2	217
1990	117,5	87,3	113,5	112,4	82,6	347,3	217	243,7	261,2	315,3	543,1	135,3
1991	104,4	69,1	61,4	139	181,7	201,8	142,5	120,6	294,2	223,6	106	365,2
1992	104,9	21	75	74,7	211	392,1	256,6	213	360,8	220	357,6	136,9
1993	110,3	52,2	83,3	150,9	183,2	387,2	161	313,2	398,5	314,2	91,8	111,5
1994	214,1	64	162,6	92,6	83,1	212,1	110,5	162,9	275,5	97	95,7	73,5
1995	66,1	97,3	88,1	210,5	121,7	341,4	335,7	426,5	392,5	328,4	124,7	137,2
1996	116,8	88,1	150,8	124,5	206,3	310,4	360,7	228,3	339,2	503,5	617,8	115,5
1997	111,8	187	36	115,2	203,1	435	282,4	213,4	328,8	204,3	360,3	128,3
1998	128,3	15,3	63,9	80,4	100,8	392,5	308	162,3	274,1	924,9	241	124,7
1999	152,5	238,8	140,2	190	158	374,9	241,8	274,2	412,9	238,1	382,6	79,4
2000	122,7	48,6	17,5	49,1	464,7	232,4	158,2	342,3	361,5	428,8	151	170,9
2001	93,7	106,1	119,1	134	347,5	130,8	212,8	204,8	325,1	425,8	56,9	108,1
2002	63,8	130,9	159	20,7	228,8	152,7	259,3	292,8	343,1	184,9	161,6	134,5
2003	113,7	68,3	209,7	65	302	167,1	228,6	210,8	243,6	151,4	552,2	156,8
2004	113,3	82,6	114,6	138,1	243,3	375,2	200,2	124,6	173,1	127,4	104,4	22,92
\bar{x}	109,02	97,22	104,19	107,38	185,50	295,87	258,15	258,51	324,05	299,17	226,47	141,59
Nx	112,04	99,65	107,59	107,38	186,37	295,87	258,15	263,86	330,08	306,04	231,55	146,34

Nota: datos faltantes estimados por el método de proporción normal resaltados en verde y datos rellenos con información de CHIRPS resaltados en amarillo.

Fuente: elaboración propia, con datos del INSIVUMEH y CHIRPS.

**Apéndice 6. Precipitación promedio mensual (mm) de la
estación Cobán**

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1980	67,2	156,1	72,7	94	232,4	395,9	179,9	188,5	292,4	440,9	143,2	89
1981	21,1	187,7	145,6	184,6	140	375,5	147,7	264,4	161,8	265,1	87	105,6
1982	198,1	54,8	73,9	131,3	331,7	269,9	214,2	211,9	278	160	99,2	132
1983	91,7	48,7	28,3	162,8	86,6	270	379,7	216,5	337	258	122,1	193,6
1984	93,9	118,9	81,2	50	266,3	226	407,1	376,1	400,4	219,3	144,3	108,6
1985	85,9	139	69,5	118	73,5	317,4	284,6	190,8	166,5	178,1	108,2	151,2
1986	158,7	67	184,3	66,6	192,9	294,3	259,4	214,1	267,8	163	80,3	103,1
1987	49,7	44,6	78,2	61,4	14,8	317,3	284,7	268,4	179,3	185,8	154,1	92,1
1988	127,3	119,2	154	72,3	47,9	340,3	198,4	436,1	354,3	286,3	161,4	136,2
1989	83,5	123,6	116,8	161,6	124,9	187,5	145,5	235	356,1	237,4	171	188,9
1990	129	121,3	151,6	134	128,4	275,8	169,8	232,2	227,9	229,1	334,8	196,2
1991	106,5	57,2	31,2	71,6	188	303,8	194,8	117,4	349,9	228,9	106,1	307,9
1992	73,7	21,2	73,2	154,8	228,3	355,2	233,3	214,3	182,9	125,1	363,1	191,6
1993	92,7	39,5	50,6	130,5	231,1	353,6	165	268,8	180,6	235	105,7	92,1
1994	225,8	71,6	153,4	59,1	199,5	125,8	175,5	184,4	136,4	78,8	66	77,4
1995	78,3	139,7	81,6	383,3	92,1	390,6	249,2	395	415,6	295,8	119,9	77,7
1996	101,6	190,5	77,8	128,1	172	222,5	314,5	210,7	167,9	387,5	479,5	99,9
1997	172,4	125,2	46,3	83,95	59,2	357,5	229,3	204,2	372,9	210,5	259	79
1998	69,9	2,9	13	72,5	151,2	244,8	230,2	120,1	262,3	685,2	207,5	76,7
1999	174,3	201,6	112,3	132,7	58,5	309	226,7	229,7	445,8	220,6	407,6	105,8
2000	102	47,7	52,31	86,6	415,8	235	173,8	241,2	326	467,9	120,3	159,3
2001	58,4	94,5	218,4	35,3	220,8	189,3	150,3	260,6	347,3	378	189,1	116,7
2002	45,3	146,3	173	7,9	264,7	285	275	266,9	333,5	212,2	236,4	137,6
2003	129,1	115,4	382,5	61,7	131,5	236,9	254,8	166,6	176,4	200,2	414,3	143,2
2004	77,9	71,2	63,5	90,7	146,7	246	151,2	119,2	223,8	153,2	211,3	76,6
2005	64,7	28,3	109,4	245,4	92,9	340,3	201	390,9	310,2	156,9	3,7	70,39
2006	286,8	155	127,3	88,6	166,1	423	239,4	125,4	240,9	239,1	246,6	162,2
2007	89,2	49,9	161,8	35,9	89,8	392,7	237,3	548,5	310,4	491	200,6	41,9
2008	148,3	101	131,7	80,5	201,4	213,8	561,1	297,1	380,8	577,9	101,6	46,9
2009	68,8	103,1	58,3	89,9	213	129,3	210,6	178,5	164,8	121,9	169,6	81,5
2010	102,8	64,5	32,6	123,8	388	272,9	353,9	396,1	460,5	174,2	157,1	155,4
2011	117,2	49,7	101,8	165,6	151	233,1	197,6	339,2	322,9	462,6	146,2	86,5
2012	153,5	69,6	84,6	175,9	177,4	187,1	138,9	271,9	114,4	265	80,7	75
2013	142,2	70,9	102	133,2	204	246,9	180,7	227,9	280,8	315,9	227,8	144,4

Continuación apéndice 6.

2014	71,8	114	236,7	201,6	317,7	264,5	172,6	209,4	285,2	484,6	372,5	104,9
2015	104,5	94,2	115,8	62,9	110,7	138,1	177,9	37	186,2	223	346,4	218,4
2016	81,3	155,9	44,3	50	209,3	215,7	175,8	329,6	216,8	258,8	143,8	108,2
2017	130,5	39,3	146,5	77	140,3	322,8	161,7	293,9	321,2	524,6	177,5	110,8
2018	161,7	44,9	68,6	160,8	90,35	232,3	152,8	112,5	135,2	289,7	116	73,2
\bar{x}	111,21	93,48	107,86	113,50	175,27	275,32	227,07	245,92	273,67	284,28	189,27	120,97
Nx	111,47	93,48	109,32	114,28	178,02	275,46	227,07	245,92	277,28	273,14	189,27	122,30

Nota: datos faltantes estimados por el método de proporción normal resaltados en verde y datos rellenos con información de CHIRPS resaltados en amarillo.

Fuente: elaboración propia, con datos del INSIVUMEH y CHIRPS.

Apéndice 7. **Tabla con los datos del generador climático**

STATION	Cobán	San Cristóbal	Cerro La Laguna	Santa Margarita	SWAT	Purulhá
WLATITUDE	15,4667000	15,3652778	15,3913889	15,3666667	15,4550000	15,2338889
WLONGITUDE	-90,4075000	-90,4758333	-90,5280556	-90,3750000	-90,3130000	-90,2338889
WELEV	1 329	1 389	2 012	1 697	1 375	1 551
RAIN_YRS	20	20	20	20	20	20
TMPMX1	21,98330632	21,98330632	21,98330632	21,98330632	22,49550645	21,98330632
TMPMX2	23,28369176	23,28369176	23,28369176	23,28369176	24,75285487	23,28369176
TMPMX3	25,54006515	25,54006515	25,54006515	25,54006515	27,85329839	25,54006515
TMPMX4	27,05890411	27,05890411	27,05890411	27,05890411	29,70613	27,05890411
TMPMX5	27,58137255	27,58137255	27,58137255	27,58137255	29,36904362	27,58137255
TMPMX6	26,99712838	26,99712838	26,99712838	26,99712838	26,634015	26,99712838
TMPMX7	25,66019737	25,66019737	25,66019737	25,66019737	26,22326452	25,66019737
TMPMX8	25,98253707	25,98253707	25,98253707	25,98253707	26,79425645	25,98253707
TMPMX9	26,16482143	26,16482143	26,16482143	26,16482143	25,48146	26,16482143
TMPMX10	24,10490909	24,10490909	24,10490909	24,10490909	24,04174194	24,10490909
TMPMX11	22,8875	22,8875	22,8875	22,8875	23,10684167	22,8875
TMPMX12	22,05726073	22,05726073	22,05726073	22,05726073	22,04913889	22,05726073
TMPMN1	10,97315876	10,97315876	10,97315876	10,97315876	11,6864629	10,97315876
TMPMN2	10,94539007	10,94539007	10,94539007	10,94539007	12,01455398	10,94539007
TMPMN3	11,43940887	11,43940887	11,43940887	11,43940887	13,2743629	11,43940887
TMPMN4	12,96400679	12,96400679	12,96400679	12,96400679	15,71841	12,96400679
TMPMN5	14,10243506	14,10243506	14,10243506	14,10243506	16,80603231	14,10243506
TMPMN6	15,52922297	15,52922297	15,52922297	15,52922297	16,967865	15,52922297
TMPMN7	14,87796053	14,87796053	14,87796053	14,87796053	15,8561371	14,87796053
TMPMN8	14,77384868	14,77384868	14,77384868	14,77384868	15,78895968	14,77384868
TMPMN9	15,48297491	15,48297491	15,48297491	15,48297491	16,470225	15,48297491
TMPMN10	14,416	14,416	14,416	14,416	15,27634677	14,416
TMPMN11	13,0155477	13,0155477	13,0155477	13,0155477	13,72368	13,0155477
TMPMN12	11,94378109	11,94378109	11,94378109	11,94378109	12,65212908	11,94378109
TMPSTDMX1	3,852427565	3,852427565	3,852427565	3,852427565	4,287855778	3,852427565
TMPSTDMX2	4,038010957	4,038010957	4,038010957	4,038010957	4,6903295	4,038010957
TMPSTDMX3	4,416067799	4,416067799	4,416067799	4,416067799	4,850450064	4,416067799
TMPSTDMX4	3,554610395	3,554610395	3,554610395	3,554610395	4,070980775	3,554610395
TMPSTDMX5	2,419359875	2,419359875	2,419359875	2,419359875	3,193658356	2,419359875
TMPSTDMX6	1,994325757	1,994325757	1,994325757	1,994325757	2,719173048	1,994325757

Continuación apéndice 7.

TMPSTDMX7	1,598865319	1,598865319	1,598865319	1,598865319	2,40417591	1,598865319
TMPSTDMX8	1,730961928	1,730961928	1,730961928	1,730961928	2,318146518	1,730961928
TMPSTDMX9	2,163734672	2,163734672	2,163734672	2,163734672	2,55469036	2,163734672
TMPSTDMX10	2,735430605	2,735430605	2,735430605	2,735430605	3,200308106	2,735430605
TMPSTDMX11	3,151294141	3,151294141	3,151294141	3,151294141	3,833539109	3,151294141
TMPSTDMX12	3,434632333	3,434632333	3,434632333	3,434632333	4,037952883	3,434632333
TMPSTDMN1	2,837916519	2,837916519	2,837916519	2,837916519	2,331259574	2,837916519
TMPSTDMN2	2,610804853	2,610804853	2,610804853	2,610804853	2,290440816	2,610804853
TMPSTDMN3	2,967226184	2,967226184	2,967226184	2,967226184	2,662721729	2,967226184
TMPSTDMN4	2,836885612	2,836885612	2,836885612	2,836885612	2,036674717	2,836885612
TMPSTDMN5	2,396775051	2,396775051	2,396775051	2,396775051	1,532916713	2,396775051
TMPSTDMN6	1,720860586	1,720860586	1,720860586	1,720860586	1,278359926	1,720860586
TMPSTDMN7	1,832268276	1,832268276	1,832268276	1,832268276	1,456105499	1,832268276
TMPSTDMN8	1,676474587	1,676474587	1,676474587	1,676474587	1,451985074	1,676474587
TMPSTDMN9	1,647536795	1,647536795	1,647536795	1,647536795	1,21538132	1,647536795
TMPSTDMN10	2,147137375	2,147137375	2,147137375	2,147137375	1,670183638	2,147137375
TMPSTDMN11	2,477231962	2,477231962	2,477231962	2,477231962	2,005705611	2,477231962
TMPSTDMN12	2,788110787	2,788110787	2,788110787	2,788110787	2,295267577	2,788110787
PCPMM1	111,8	46,28	115,55	84,08	115,6	22,55
PCPMM2	96,1	41,4	97,51	88,18	95,52	12,59
PCPMM3	88,75	38,7	97,07	64,37	82,58	13,4
PCPMM4	122,29	70,71	111,42	106,26	125,02	40,38
PCPMM5	160,13	121,26	163,99	167,75	294,86	119,73
PCPMM6	288,58	297,26	307,07	282,97	540,64	267,19
PCPMM7	234,17	252,4	268,71	220,62	369,19	194,04
PCPMM8	241,56	257,47	266,74	235,02	413,96	201,57
PCPMM9	278,47	292,75	330,58	246,01	527,84	239,62
PCPMM10	255,87	187,86	302,15	239,9	399,66	148,27
PCPMM11	184,85	102,28	219,55	200,68	188,33	64,57
PCPMM12	133,75	59,87	141,53	122,61	150,54	25,64
PCPSTD1	11,9195	5,5237	14,3759	9,5562	6,4749	2,7638
PCPSTD2	12,7262	5,2326	12,378	10,1644	6,8894	1,5884
PCPSTD3	10,9414	5,843	13,7072	7,5281	5,9374	1,6357
PCPSTD4	10,8793	6,6173	9,784	10,0942	8,338	3,5623
PCPSTD5	9,4081	6,9273	9,491	9,6556	14,0706	6,3125
PCPSTD6	10,1921	10,4716	11,0864	10,4699	15,6766	9,0869
PCPSTD7	10,1733	11,5694	12,2859	9,9835	11,7034	8,9955
PCPSTD8	10,1818	11,5323	12,5254	10,6978	14,4706	8,9731

Continuación apéndice 7.

PCPSTD9	10,8977	11,3061	12,7432	10,6998	14,2849	9,3619
PCPSTD10	17,4843	13,2819	23,0681	17,4716	16,9411	10,5297
PCPSTD11	19,1534	11,1249	23,2509	21,9311	9,4593	6,843
PCPSTD12	17,8197	9,5547	21,8378	20,3917	9,6763	4,3257
PCPSKW1	6,736	5,9279	5,9234	6,7668	3,693	5,4268
PCPSKW2	6,3445	5,4118	4,4855	4,7805	3,5043	3,8116
PCPSKW3	6,9268	8,725	7,0481	5,4664	4,8366	4,472
PCPSKW4	4,5222	4,877	3,8791	4,8935	4,1389	5,3851
PCPSKW5	2,7999	3,1808	3,1779	3,098	2,4842	2,0263
PCPSKW6	1,4703	1,3309	1,747	1,3722	2,1466	0,9165
PCPSKW7	2,2128	2,1854	2,2007	2,1857	4,3011	1,7766
PCPSKW8	1,4537	1,5434	1,8645	1,6232	4,4072	1,4327
PCPSKW9	1,6088	1,5986	1,6078	1,8946	2,107	1,4564
PCPSKW10	2,9041	3,2367	4,0568	3,4403	4,7382	2,8882
PCPSKW11	4,5059	5,031	5,2861	4,8717	3,0937	4,4681
PCPSKW12	8,7764	9,8441	10,0692	10,5181	6,3518	7,3953
PR_W1_1	0,1571	0,1183	0,1109	0,1657	0,527	0,0941
PR_W1_2	0,1239	0,1168	0,0929	0,1342	0,4911	0,0812
PR_W1_3	0,1264	0,0954	0,0886	0,1084	0,3088	0,0761
PR_W1_4	0,1652	0,1635	0,1635	0,1607	0,2881	0,161
PR_W1_5	0,2392	0,2412	0,2412	0,263	0,4737	0,2601
PR_W1_6	0,4921	0,5155	0,5025	0,4615	0,7	0,4619
PR_W1_7	0,4432	0,3816	0,3779	0,4102	0,5	0,3765
PR_W1_8	0,3898	0,3482	0,3304	0,313	1	0,317
PR_W1_9	0,4626	0,4557	0,4599	0,4324	1	0,4331
PR_W1_10	0,1924	0,1854	0,1872	0,1953	0,6364	0,1826
PR_W1_11	0,1324	0,1388	0,142	0,1377	0,4878	0,1124
PR_W1_12	0,1301	0,0927	0,0802	0,1056	0,5606	0,0568
PR_W2_1	0,3162	0,1899	0,1286	0,2478	0,8919	0,0526
PR_W2_2	0,2921	0,2338	0,1864	0,25	0,8433	0,125
PR_W2_3	0,2755	0,28	0,2537	0,2941	0,799	0,2182
PR_W2_4	0,3955	0,3798	0,3798	0,3701	0,844	0,3672
PR_W2_5	0,6129	0,6255	0,6255	0,5922	0,8914	0,583
PR_W2_6	0,7359	0,7217	0,7143	0,7194	0,9542	0,7154
PR_W2_7	0,6081	0,5886	0,5847	0,5877	0,966	0,5278
PR_W2_8	0,57	0,5528	0,5658	0,5782	0,9644	0,5604
PR_W2_9	0,6836	0,6667	0,6639	0,6334	0,9667	0,6416
PR_W2_10	0,5226	0,4809	0,4725	0,4789	0,9557	0,4

Continuación apéndice 7.

PR_W2_11	0,3853	0,3204	0,3271	0,3396	0,9302	0,2857
PR_W2_12	0,2952	0,2	0,1695	0,225	0,9007	0,0769
PCPD1	5,85	3,95	3,5	5,65	27,3	2,85
PCPD2	4,45	3,85	2,95	4,4	22,65	2,4
PCPD3	4,9	3,75	3,35	4,25	20,15	2,75
PCPD4	6,7	6,45	6,45	6,35	21,15	6,4
PCPD5	12,4	12,55	12,55	12,75	26,25	12,35
PCPD6	20,45	20,3	19,95	19,6	29,5	19,5
PCPD7	17,35	15,8	15,65	16,25	30,9	14,4
PCPD8	15,35	14,2	14,05	13,75	30,9	13,65
PCPD9	18,65	18,15	18,15	17,05	30	17,3
PCPD10	9,95	9,15	9,1	9,5	30,45	8
PCPD11	5,45	5,15	5,35	5,3	27,95	4,2
PCPD12	5,25	3,5	2,95	4	27,7	1,95
RAINHHMX1	55,9	23,14	57,775	42,04	57,8	11,275
RAINHHMX2	48,05	20,7	48,755	44,09	47,76	6,295
RAINHHMX3	44,375	19,35	48,535	32,185	41,29	6,7
RAINHHMX4	61,145	35,355	55,71	53,13	62,51	20,19
RAINHHMX5	80,065	60,63	81,995	83,875	147,43	59,865
RAINHHMX6	144,29	148,63	153,535	141,485	270,32	133,595
RAINHHMX7	117,085	126,2	134,355	110,31	184,595	97,02
RAINHHMX8	120,78	128,735	133,37	117,51	206,98	100,785
RAINHHMX9	139,235	146,375	165,29	123,005	263,92	119,81
RAINHHMX10	127,935	93,93	151,075	119,95	199,83	74,135
RAINHHMX11	92,425	51,14	109,775	100,34	94,165	32,285
RAINHHMX12	66,875	29,935	70,765	61,305	75,27	12,82
SOLARAV1	15,937	15,937	15,937	15,937	15,09292258	15,937
SOLARAV2	18,74651128	18,74651128	18,74651128	18,74651128	18,0306	18,74651128
SOLARAV3	19,69250362	19,69250362	19,69250362	19,69250362	21,58949032	19,69250362
SOLARAV4	20,35704693	20,35704693	20,35704693	20,35704693	22,24885	20,35704693
SOLARAV5	19,22506803	19,22506803	19,22506803	19,22506803	22,23023263	19,22506803
SOLARAV6	19,05539365	19,05539365	19,05539365	19,05539365	19,61494833	19,05539365
SOLARAV7	19,45805296	19,45805296	19,45805296	19,45805296	19,95738387	19,45805296
SOLARAV8	18,33045682	18,33045682	18,33045682	18,33045682	20,84566613	18,33045682
SOLARAV9	18,25843109	18,25843109	18,25843109	18,25843109	18,54429333	18,25843109
SOLARAV10	17,93929932	17,93929932	17,93929932	17,93929932	15,75487581	17,93929932
SOLARAV11	16,01349077	16,01349077	16,01349077	16,01349077	14,32808	16,01349077
SOLARAV12	16,9387884	16,9387884	16,9387884	16,9387884	13,36147549	16,9387884

Continuación apéndice 7.

DEWPT1	14,84	14,53	13,99	14,84	15,05	12,33
DEWPT2	15,37	14,69	13,6	15,37	15,27	12,4
DEWPT3	15,45	15,36	13,97	15,45	15,62	13,31
DEWPT4	15,67	16,89	14,77	15,67	17,05	14,82
DEWPT5	18,12	17,91	15,07	18,12	18,04	15,78
DEWPT6	18,27	18,4	15,65	18,27	19,96	16,95
DEWPT7	16,42	17,88	14,79	16,42	19,5	15,9
DEWPT8	16,42	17,76	14,72	16,42	19,73	16,11
DEWPT9	11,82	18,45	14,89	11,82	19,69	16,67
DEWPT10	5,11	17,43	14,37	5,11	18,21	15,76
DEWPT11	10,61	16,41	13,95	10,61	16,66	13,43
DEWPT12	13,66	15,33	14,28	13,66	14,15	13,12
WNDVAV1	0,87894717	0,87894717	0,87894717	0,87894717	2,01381129	0,87894717
WNDVAV2	1,265866397	1,265866397	1,265866397	1,265866397	2,091315044	1,265866397
WNDVAV3	1,397665441	1,397665441	1,397665441	1,397665441	2,158985484	1,397665441
WNDVAV4	1,246076487	1,246076487	1,246076487	1,246076487	2,083541667	1,246076487
WNDVAV5	1,212364341	1,212364341	1,212364341	1,212364341	1,896211632	1,212364341
WNDVAV6	1,215336927	1,215336927	1,215336927	1,215336927	1,586075	1,215336927
WNDVAV7	1,290047619	1,290047619	1,290047619	1,290047619	1,629514516	1,290047619
WNDVAV8	1,166210938	1,166210938	1,166210938	1,166210938	1,632301613	1,166210938
WNDVAV9	1,053452532	1,053452532	1,053452532	1,053452532	1,554625	1,053452532
WNDVAV10	0,945197026	0,945197026	0,945197026	0,945197026	1,805156452	0,945197026
WNDVAV11	0,981571429	0,981571429	0,981571429	0,981571429	1,969891667	0,981571429
WNDVAV12	0,998601286	0,998601286	0,998601286	0,998601286	1,939375817	0,998601286

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Datos mensuales de T_{mean}, p y ETo para la estación Cobán**

Mes	T_{mean}	P	E_{t_o}
Enero	16,186	0,259	4,001
Febrero	17,151	0,260	4,131
Marzo	18,641	0,270	4,475
Abril	20,324	0,280	4,858
Mayo	20,849	0,290	5,101
Junio	20,780	0,291	5,108
Julio	20,227	0,291	5,034
Agosto	20,035	0,281	4,837
Septiembre	20,233	0,280	4,846
Octubre	19,149	0,269	4,523
Noviembre	17,424	0,259	4,149
Diciembre	16,726	0,250	3,923

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Datos mensuales de T_{mean}, p y ETo para la estación Las Vegas**

Mes	T_{mean}	P	E_{t_o}
Enero	24,913	0,259	5,036
Febrero	25,972	0,260	5,186
Marzo	27,320	0,270	5,553
Abril	29,270	0,280	6,010
Mayo	29,664	0,290	6,277
Junio	29,467	0,291	6,277
Julio	28,809	0,291	6,189
Agosto	29,155	0,281	6,021
Septiembre	29,297	0,280	6,013
Octubre	28,174	0,269	5,634
Noviembre	26,077	0,259	5,175
Diciembre	24,402	0,250	4,806

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Datos mensuales de T_{mean}, p y E_{To} para la estación Cubulco**

Mes	T_{mean}	P	E_{To}
Enero	19,788	0,260	4,443
Febrero	21,202	0,260	4,616
Marzo	22,851	0,270	4,998
Abril	24,512	0,280	5,397
Mayo	24,591	0,290	5,600
Junio	23,554	0,290	5,466
Julio	23,228	0,290	5,423
Agosto	23,106	0,280	5,220
Septiembre	22,916	0,280	5,192
Octubre	22,142	0,270	4,906
Noviembre	20,832	0,260	4,568
Diciembre	20,268	0,250	4,331

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Datos mensuales de T_{mean}, p y E_{To} para la estación Nebaj**

Mes	T_{mean}	P	E_{To}
Enero	14,111	0,259	3,756
Febrero	14,968	0,260	3,870
Marzo	16,504	0,270	4,210
Abril	18,092	0,280	4,570
Mayo	18,394	0,290	4,774
Junio	18,130	0,291	4,752
Julio	17,188	0,291	4,626
Agosto	17,277	0,281	4,478
Septiembre	17,484	0,280	4,492
Octubre	16,589	0,269	4,208
Noviembre	15,389	0,259	3,908
Diciembre	14,611	0,250	3,680

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Datos mensuales de T_{mean}, p y ETo para la estación Panzos**

Mes	T_{mean}	P	E_{t_o}
Enero	23,892	0,259	4,922
Febrero	24,964	0,260	5,066
Marzo	26,230	0,270	5,418
Abril	28,145	0,280	5,865
Mayo	28,618	0,290	6,138
Junio	28,188	0,291	6,097
Julio	27,540	0,291	6,010
Agosto	27,803	0,281	5,838
Septiembre	27,676	0,280	5,805
Octubre	26,559	0,269	5,443
Noviembre	25,143	0,259	5,072
Diciembre	24,365	0,250	4,802

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Datos mensuales de T_{mean}, p y ETo para la estación Pasabién**

Mes	T_{mean}	P	E_{t_o}
Enero	24,925	0,260	5,060
Febrero	26,138	0,260	5,206
Marzo	27,914	0,270	5,627
Abril	29,428	0,280	6,030
Mayo	29,564	0,290	6,264
Junio	28,484	0,290	6,121
Julio	27,958	0,290	6,051
Agosto	28,194	0,280	5,873
Septiembre	27,894	0,280	5,833
Octubre	26,795	0,270	5,487
Noviembre	25,624	0,260	5,143
Diciembre	24,974	0,250	4,872

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Datos mensuales de T_{mean}, p y ETo para la estación Quiché Chixoy**

Mes	T_{mean}	P	E_{to}
Enero	23,265	0,259	4,849
Febrero	23,917	0,260	4,941
Marzo	25,191	0,270	5,289
Abril	26,935	0,280	5,709
Mayo	27,165	0,290	5,944
Junio	26,395	0,291	5,855
Julio	25,686	0,291	5,761
Agosto	26,324	0,281	5,645
Septiembre	26,159	0,280	5,609
Octubre	25,118	0,269	5,266
Noviembre	23,748	0,259	4,907
Diciembre	23,124	0,250	4,659

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Datos mensuales de T_{mean}, p y ETo para la estación Sacapulas**

Mes	T_{mean}	P	E_{to}
Enero	20,866	0,259	4,565
Febrero	21,857	0,260	4,694
Marzo	23,279	0,270	5,051
Abril	24,494	0,280	5,395
Mayo	24,659	0,290	5,609
Junio	23,503	0,291	5,466
Julio	22,993	0,291	5,398
Agosto	23,326	0,281	5,255
Septiembre	23,042	0,280	5,208
Octubre	22,492	0,269	4,943
Noviembre	21,441	0,259	4,634
Diciembre	20,818	0,250	4,394

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Datos mensuales de T_{mean} , p y ET_o para la estación San Agustín Chixoy**

Mes	T_{mean}	P	Et_o
Enero	19,264	0,258	4,348
Febrero	22,825	0,260	4,810
Marzo	24,854	0,270	5,247
Abril	22,679	0,280	5,161
Mayo	20,768	0,290	5,091
Junio	19,387	0,292	4,942
Julio	22,667	0,292	5,383
Agosto	22,944	0,282	5,235
Septiembre	15,900	0,280	4,288
Octubre	18,796	0,268	4,459
Noviembre	13,871	0,258	3,708
Diciembre	13,718	0,250	3,578

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Datos mensuales de T_{mean} , p y ET_o para la estación San Jerónimo**

Mes	T_{mean}	P	Et_o
Enero	19,247	0,260	4,380
Febrero	20,457	0,260	4,527
Marzo	21,582	0,270	4,841
Abril	22,941	0,280	5,195
Mayo	23,161	0,290	5,410
Junio	22,366	0,290	5,306
Julio	21,841	0,290	5,236
Agosto	21,777	0,280	5,047
Septiembre	21,774	0,280	5,044
Octubre	21,088	0,270	4,777
Noviembre	19,982	0,260	4,468
Diciembre	19,017	0,250	4,187

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Datos mensuales de T_{mean} , p y E_{t_0} para la estación Santa María Cahabón**

Mes	T_{mean}	P	E_{t_0}
Enero	22,651	0,259	4,767
Febrero	23,790	0,260	4,925
Marzo	25,480	0,270	5,325
Abril	27,387	0,280	5,767
Mayo	27,928	0,290	6,046
Junio	27,306	0,291	5,988
Julio	26,331	0,291	5,857
Agosto	26,466	0,281	5,673
Septiembre	26,561	0,280	5,661
Octubre	25,626	0,269	5,319
Noviembre	24,050	0,259	4,933
Diciembre	22,984	0,250	4,643

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla con datos del porcentaje medio diario (p) de horas diarias anuales para diferentes latitudes

Latitude	North	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
	South	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June
60°		0,15	0,2	0,26	0,32	0,38	0,41	0,4	0,34	0,28	0,22	0,17	0,13
55		0,17	0,21	0,26	0,32	0,36	0,39	0,38	0,33	0,28	0,23	0,18	0,16
50		0,19	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,2	0,18
45		0,2	0,23	0,27	0,3	0,34	0,35	0,34	0,32	0,28	0,24	0,21	0,2
40		0,22	0,24	0,27	0,3	0,32	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21
35		0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,32	0,3	0,28	0,25	0,23	0,22
30		0,24	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,31	0,3	0,28	0,26	0,24	0,23
25		0,24	0,26	0,27	0,29	0,3	0,31	0,31	0,29	0,28	0,26	0,25	0,24
20		0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3	0,3	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25
15		0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25
10		0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26
5		0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27
0		0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *Blaney-Criddle Method*. <http://www.fao.org/3/S2022E/s2022e07.htm#3.1.3> %20blaney %20criddle %20method. Consulta: 4 de abril de 2020.

Anexo 2. **Tabla con los valores del coeficiente único (promedio temporal) del cultivo, Kc y alturas medias máximas de las plantas para cultivos no estresados y bien manejados en climas sub-húmedos**

Cultivo		Kc ini	Kc med	Kc fin	Altura Máx, Cultivo (h) (m)
Café	-con malezas	1,05	1,10	1,10	2-3
Maíz	-con malezas		1,20	0,60-0,35	2

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *Evapotranspiración del cultivo*. <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>. Consulta: 4 de abril de 2020.

Anexo 3. **Tabla con el coeficiente de cultivo para el cardamomo**

Cultivo	Kc
Cardamomo	0,7

Fuente: BARRILLAS, Edy. *CONSULTORÍA: Dinámica poblacional y demandas de agua para consumo humano y agrícola a nivel nacional (de Guatemala)*.

http://desastres.usac.edu.gt/documentos/trabajar/Producto5_Informe_Final_FAO_v1.pdf.

Consulta: 4 de abril de 2020.

Anexo 4. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo cesm1_cam5 para la estación Cerro La Laguna**

Mes	RCP2.6				RCP4.5				RCP6.0				RCP8.0			
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099
	59	46	47	47	74	63	71	73	67	62	61	64	64	66	66	64
1	59	59	68	68	74	63	71	73	67	62	61	64	64	66	66	64
2	46	50	46	40	47	41	43	46	47	47	44	43	43	45	45	38
3	47	44	47	47	46	44	48	48	53	44	41	48	48	40	44	50
4	73	73	68	70	75	67	68	68	68	60	69	73	73	75	73	72
5	157	157	151	149	152	136	138	155	180	145	154	164	164	158	152	154
6	287	271	278	287	293	265	246	242	297	226	249	246	246	300	249	226
7	267	240	252	261	240	228	219	237	261	237	231	228	228	246	204	180
8	251	238	241	238	249	233	228	233	231	241	228	225	225	231	233	225
9	279	257	248	251	262	246	248	259	248	237	240	237	237	237	212	218
10	224	214	214	224	228	224	245	249	212	235	228	219	219	233	233	231
11	163	158	179	177	157	149	156	167	157	165	175	170	170	188	168	153
12	88	82	81	82	76	77	78	84	84	80	77	78	78	74	78	74
1	20.10	20.60	20.60	20.6	20.40	20.80	21.7	21.70	20.10	20.50	21.50	22.00	22.00	21.20	22.60	23.50
2	21.50	21.70	22.30	21.9	21.40	22.60	23	23.20	21.00	21.70	22.90	23.50	23.50	23.00	24.70	25.60
3	22.30	22.80	23.30	23.4	23.50	24.00	24.3	24.30	22.50	23.40	24.30	24.60	24.60	24.00	26.00	26.60
4	23.30	23.70	24.20	24.2	23.90	24.70	25	25.40	23.40	24.50	25.40	25.70	25.70	25.00	26.60	27.30
5	23.30	23.90	24.20	24.1	23.80	24.80	25	24.90	23.00	24.20	24.60	25.00	25.00	25.00	26.30	27.00
6	22.40	22.70	23.00	23.2	22.70	23.60	24.1	24.10	22.50	23.30	23.80	24.30	24.30	24.00	25.70	26.40
7	21.80	22.20	22.30	22.2	22.30	23.20	23.6	23.40	22.00	22.80	23.40	23.80	23.80	23.50	25.40	26.30
8	22.30	22.50	22.60	22.6	22.70	23.30	23.7	23.70	22.40	22.90	23.70	24.20	24.20	23.90	25.20	25.90
9	22.00	22.30	22.40	22.4	22.40	23.10	23.6	23.60	22.30	22.80	23.40	23.90	23.90	23.70	25.00	25.50
10	20.90	21.20	21.40	21.4	21.40	22.00	22.3	22.30	21.3	21.6	22.2	22.7	22.70	22.60	23.60	24.10
11	20.80	21.20	21.20	21.2	21.00	21.90	22.1	22.20	21	21.3	22.2	22.6	22.60	22.40	23.50	24.00
12	21.20	21.30	21.40	21.3	21.30	22.00	22.1	22.30	20.9	21.4	22.3	22.6	22.60	22.20	23.60	24.10
1	9.50	9.90	10.10	9.90	10.1	10.30	11.00	11.00	9.60	9.20	9.80	10.40	10.40	10.70	11.60	12.20
2	10.00	10.20	10.20	9.90	10.1	10.60	11.00	11.30	9.70	9.50	10.00	10.60	10.60	11.20	12.30	12.90
3	10.40	10.80	11.00	11.00	11.3	11.50	11.90	12.00	10.50	10.20	10.60	11.30	11.30	11.70	13.00	13.70
4	11.30	11.60	11.90	11.90	11.9	12.50	13.00	13.30	11.40	11.20	11.80	12.20	12.20	12.90	14.10	14.60
5	12.70	13.00	13.30	13.30	13.1	13.70	14.00	14.10	12.70	12.70	13.10	13.50	13.50	14.10	15.00	15.50
6	13.50	13.70	13.80	13.80	13.7	14.30	14.70	14.80	13.40	13.40	13.90	14.30	14.30	14.80	15.70	16.20
7	12.80	13.00	13.10	13.10	13	13.60	14.00	14.10	12.80	12.80	13.20	13.70	13.70	14.10	15.10	15.60
8	12.50	12.70	12.80	12.80	12.8	13.30	13.60	13.70	12.50	12.60	13.00	13.50	13.50	13.80	14.70	15.20
9	12.70	12.80	12.90	12.90	12.8	13.40	13.80	13.80	12.70	12.70	13.10	13.60	13.60	13.80	14.70	15.10
10	12.30	12.50	12.70	12.70	12.6	13.10	13.50	13.50	12.30	12.40	12.80	13.20	13.20	13.70	14.50	14.90
11	11.20	11.40	11.60	11.60	11.3	12.00	12.20	12.40	11.20	11.10	11.80	12.20	12.20	12.70	13.40	13.70
12	10.70	10.80	10.80	10.70	10.8	11.40	11.60	11.80	10.40	10.20	10.80	11.20	11.20	11.60	12.60	12.90

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 5. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo cesm1_cam5 para la estación Cobán**

Mes	RCP2.6				RCP4.5				RCP6.0				RCP8.0			
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099
1	81	80	83	92	100	86	97	98	91	84	82	86	86	90	89	86
2	77	83	77	69	79	69	72	78	257	276	271	259	71	76	70	62
3	83	79	85	84	79	78	86	86	227	238	244	238	86	73	77	88
4	97	99	90	91	100	89	90	90	133	126	123	125	97	100	95	94
5	171	171	161	161	164	147	148	169	80	80	74	71	177	171	166	166
6	265	250	256	262	273	244	229	226	93	78	72	86	226	273	226	203
7	233	212	223	233	212	201	196	209	90	82	91	97	201	217	178	156
8	226	214	219	216	223	212	204	212	196	155	166	177	202	209	209	202
9	299	278	269	275	287	266	269	281	270	206	229	226	257	257	233	239
10	268	259	257	265	274	262	290	299	228	209	204	201	259	274	276	276
11	233	225	252	250	223	211	221	235	207	216	204	202	238	264	235	215
12	140	131	127	130	123	124	124	133	269	257	263	257	125	117	120	116
1	22.90	23.40	23.30	23.40	23.10	23.60	24.4	24.50	22.90	23.30	24.30	24.80	24.80	24.00	25.40	26.30
2	25.00	25.20	25.80	25.40	25.00	26.10	26.5	26.70	24.50	25.30	26.40	27.00	27.00	26.50	28.20	29.10
3	25.60	26.10	26.60	26.70	26.90	27.30	27.6	27.60	25.90	26.70	26.70	27.90	27.90	27.30	29.30	29.90
4	26.50	27.00	27.40	27.40	27.20	27.90	28.3	28.60	26.60	27.60	28.60	28.90	28.90	28.20	29.80	30.50
5	26.80	27.30	27.70	27.60	27.30	28.20	28.4	28.30	26.40	27.60	28.10	28.40	28.40	28.40	29.80	30.40
6	25.70	26.00	26.30	26.50	26.00	26.90	27.4	27.40	25.80	26.70	27.10	27.60	27.60	27.30	29.00	29.80
7	24.90	25.20	25.40	25.30	25.40	26.20	26.6	26.40	25.1	25.8	26.4	26.8	26.80	26.60	28.50	29.40
8	25.50	25.70	25.80	25.80	25.90	26.50	26.8	26.80	25.6	26.1	26.9	27.4	27.40	27.10	28.30	29.00
9	25.10	25.40	25.50	25.50	25.50	26.20	26.7	26.70	25.4	25.9	26.5	27	27.00	26.80	28.00	28.60
10	24.30	24.60	24.80	24.80	24.80	25.40	25.7	25.70	24.70	25.00	25.60	26.10	26.10	26.00	27.00	27.50
11	23.50	23.80	23.80	23.80	23.60	24.50	24.7	24.80	23.60	23.90	24.80	25.20	25.20	25.10	26.10	26.60
12	23.40	23.50	23.60	23.40	23.50	24.20	24.3	24.50	23.10	23.60	24.50	24.80	24.80	24.40	25.80	26.30
1	11.10	11.50	11.70	11.50	11.7	11.90	12.60	12.60	11.00	10.90	11.40	12.00	12.00	12.30	13.20	13.80
2	15.20	15.40	15.60	15.60	12.5	12.90	13.30	13.60	14.20	11.80	12.20	12.80	12.80	13.50	14.60	15.10
3	14.10	14.30	14.50	14.40	13.6	13.80	14.10	14.30	14.80	12.60	12.80	13.50	13.50	13.90	15.30	15.90
4	13.20	13.30	13.30	13.20	14.9	15.50	15.90	16.30	14.60	14.20	14.70	15.20	15.20	15.80	17.00	17.50
5	12.30	12.40	12.40	12.20	16.4	16.90	17.30	17.30	14.50	15.90	16.30	16.70	16.70	17.30	18.20	18.70
6	12.70	13.10	13.20	13.30	16.9	17.60	17.90	18.00	14.40	16.70	17.10	17.50	17.50	18.00	18.90	19.40
7	14.30	14.50	14.80	14.90	16.7	17.20	17.60	17.70	14.00	16.40	16.80	17.30	17.30	17.70	18.60	19.10
8	15.90	16.20	16.50	16.50	16.4	16.90	17.20	17.40	12.80	16.20	16.60	17.10	17.10	17.40	18.30	18.70
9	16.70	16.90	17.00	17.10	16.2	16.80	17.20	17.30	11.60	16.10	16.50	17.00	17.00	17.20	18.10	18.50
10	16.40	16.60	16.70	16.70	15.6	16.00	16.40	16.40	11.30	15.30	15.70	16.10	16.10	16.60	17.40	17.80
11	16.10	16.30	16.40	16.40	14.3	14.90	15.10	15.30	12.10	14.00	14.60	15.10	15.10	15.60	16.20	16.60
12	16.10	16.20	16.30	16.40	13.3	13.90	14.10	14.30	13.10	12.70	13.20	13.70	13.70	14.10	15.10	15.40

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 6. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo cesm1_cam5 para la estación Purulhá**

Mes	RCP2.6				RCP4.5				RCP6.0				RCP8.0			
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099
1	67	65	76	76	82	71	79	80	73	69	68	71	71	75	75	71
2	49	53	48	42	50	43	44	48	51	50	47	45	45	49	45	39
3	58	54	59	58	56	53	58	60	66	56	50	59	59	50	55	63
4	75	75	71	72	78	69	70	70	68	62	72	78	78	77	76	76
5	173	176	168	166	173	147	155	174	199	163	170	181	181	176	168	171
6	271	259	265	271	278	250	235	229	290	214	235	235	235	290	238	220
7	264	236	248	258	236	221	215	233	258	236	233	227	227	245	203	179
8	219	207	207	203	214	203	198	203	203	210	200	196	196	200	203	196
9	253	235	227	230	243	227	227	240	230	219	222	219	219	219	195	198
10	194	183	183	187	196	185	204	210	181	204	198	187	187	198	198	194
11	147	142	159	157	141	133	137	149	141	149	154	147	147	166	147	133
12	82	77	75	77	74	73	74	79	81	77	74	76	76	71	72	70
1	19.90	20.40	20.30	20.40	20.10	20.60	21.5	21.50	20.00	20.30	21.30	21.90	21.90	21.00	22.50	23.40
2	21.70	22.00	22.60	22.30	21.60	22.90	23.3	23.50	21.20	22.10	23.20	23.80	23.80	23.30	25.00	26.10
3	22.70	23.20	23.70	23.90	23.70	24.40	24.6	24.60	22.90	23.70	24.50	25.00	25.00	24.30	26.50	27.10
4	23.50	24.10	24.40	24.40	24.20	25.00	25.3	25.70	23.70	24.60	25.50	25.80	25.80	25.20	26.80	27.40
5	23.80	24.30	24.60	24.60	24.20	25.30	25.5	25.30	23.50	24.70	25.10	25.50	25.50	25.30	26.70	27.40
6	23.00	23.40	23.70	23.90	23.30	24.40	24.9	24.90	23.20	24.10	24.60	25.20	25.20	24.70	26.40	27.20
7	22.30	22.80	22.90	22.80	22.80	23.80	24.2	24.00	22.50	23.40	24.00	24.50	24.50	24.00	26.00	26.90
8	22.80	23.20	23.30	23.30	23.30	23.90	24.3	24.30	23.00	23.60	24.40	24.80	24.90	24.50	25.80	26.60
9	22.70	23.10	23.10	23.10	23.10	23.80	24.3	24.40	23.00	23.60	24.20	24.80	24.80	24.40	25.70	26.30
10	21.70	22.00	22.20	22.20	22.10	22.80	23.1	23.00	22.1	22.4	23.1	23.6	23.60	23.40	24.40	24.90
11	21.00	21.30	21.40	21.30	21.10	22.10	22.2	22.30	21.2	21.5	22.5	22.9	22.90	22.60	23.70	24.20
12	21.10	21.20	21.30	21.10	21.20	21.90	22	22.20	20.8	21.3	22.3	22.6	22.60	22.10	23.50	24.00
1	10.80	11.30	11.40	11.20	11.3	11.60	12.30	12.30	11.00	10.80	11.30	11.90	11.90	12.00	13.00	13.60
2	11.50	11.70	11.70	11.40	11.6	12.10	12.40	12.70	11.30	11.30	11.70	12.30	12.30	12.80	13.90	14.40
3	12.00	12.40	12.60	12.60	12.7	13.00	13.40	13.50	12.10	12.10	12.30	13.10	13.10	13.30	14.70	15.40
4	13.00	13.30	13.60	13.60	13.5	14.20	14.60	14.90	13.10	13.10	13.60	14.10	14.10	14.60	15.80	16.40
5	14.10	14.40	14.60	14.60	14.4	15.00	15.40	15.40	14.20	14.30	14.60	15.10	15.10	15.50	16.30	16.80
6	14.80	14.90	15.00	15.00	14.8	15.60	16.00	16.00	14.80	14.90	15.30	15.80	15.80	16.10	17.00	17.50
7	14.50	14.70	14.80	14.80	14.7	15.30	15.70	15.80	14.60	14.70	15.10	15.60	15.60	15.80	16.90	17.40
8	14.50	14.70	14.70	14.70	14.7	15.20	15.50	15.60	14.50	14.70	15.10	15.60	15.60	15.80	16.70	17.20
9	14.40	14.50	14.60	14.60	14.5	15.00	15.40	15.50	14.40	14.60	15.00	15.40	15.40	15.60	16.40	16.90
10	14.00	14.10	14.30	14.30	14.2	14.70	15.10	15.10	14.00	14.20	14.60	15.00	15.00	15.30	16.20	16.60
11	12.80	13.00	13.20	13.10	12.9	13.50	13.80	14.00	12.80	12.90	13.50	14.00	14.00	14.30	15.00	15.40
12	11.90	12.00	12.00	11.90	12	12.60	12.70	12.90	11.60	11.60	12.10	12.60	12.60	12.80	13.80	14.20

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 7. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo cesm1_cam5 para la estación San Cristóbal**

Mes	RCP2.6				RCP4.5				RCP6.0				RCP8.0			
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099
1	56	55	64	64	69	60	67	68	62	58	57	60	60	62	62	60
2	45	49	45	41	46	41	41	45	46	46	43	42	42	44	44	36
3	57	53	58	57	56	53	58	59	64	54	50	59	59	49	53	61
4	66	67	63	63	68	61	62	61	61	55	63	67	67	68	66	65
5	149	150	145	143	146	129	132	149	172	138	146	156	156	150	146	147
6	267	255	261	267	276	249	231	228	234	213	234	231	231	282	234	213
7	238	216	224	235	216	203	197	211	232	213	208	203	203	221	184	162
8	228	217	219	217	226	214	207	212	209	219	207	205	205	209	214	207
9	287	267	255	261	273	252	258	270	258	247	249	244	244	244	220	226
10	232	222	222	232	239	232	251	259	222	244	239	227	227	242	242	239
11	176	171	194	194	169	159	167	179	168	179	188	182	182	201	180	164
12	93	87	85	87	81	82	83	88	89	85	82	84	84	79	82	79
1	22.90	23.40	23.40	23.40	23.20	23.60	24.5	24.50	22.90	23.30	24.30	24.80	24.80	24.00	25.40	26.30
2	25.00	25.20	25.80	25.40	24.90	26.10	26.5	26.70	24.50	25.30	26.40	27.00	27.00	26.50	28.20	29.20
3	25.90	26.50	26.90	27.10	27.10	27.60	27.9	27.90	26.20	27.00	27.90	28.30	28.30	27.60	29.60	30.30
4	26.80	27.30	27.70	27.70	27.40	28.30	28.6	28.90	26.90	28.00	28.90	29.10	29.10	28.50	30.10	30.80
5	25.50	25.80	26.10	26.30	25.70	28.20	28.4	28.30	26.40	27.60	28.00	28.40	28.40	28.40	29.70	30.40
6	24.90	25.30	25.40	25.30	25.40	26.30	26.7	26.50	25.10	25.90	26.50	26.90	26.90	26.60	28.50	29.40
7	25.30	25.50	25.60	25.70	25.70	26.30	26.7	26.70	25.50	25.90	26.70	27.20	27.20	26.90	28.20	28.90
8	24.90	25.20	25.30	25.30	25.30	26.00	26.5	26.60	25.20	25.70	26.30	26.90	26.90	26.60	27.90	28.50
9	24.10	24.40	24.60	24.60	24.60	25.20	25.5	25.50	24.5	24.8	25.4	25.9	25.90	25.80	26.80	27.30
10	23.30	23.70	23.70	23.70	23.50	24.40	24.6	24.60	23.5	23.8	24.7	25.1	25.10	24.90	26.00	26.50
11	11.20	11.60	11.70	11.60	11.8	12.00	12.70	12.70	11.30	11.00	11.50	12.10	12.10	12.40	13.30	13.90
12	12.30	12.50	12.40	12.20	12.4	12.90	13.30	13.50	12.00	11.80	12.30	12.90	12.90	13.50	14.60	15.20
1	12.70	13.10	13.30	13.30	13.5	13.80	14.10	14.30	12.80	12.60	12.90	13.60	13.60	14.00	15.30	16.00
2	14.10	14.40	14.70	14.70	14.7	15.30	15.70	16.10	14.20	14.00	14.60	15.10	15.10	15.70	16.90	17.40
3	15.40	15.70	15.90	15.90	15.8	16.40	16.70	16.80	15.40	15.40	15.80	16.20	16.20	16.80	17.70	18.20
4	16.20	16.30	16.40	16.30	16.3	17.00	17.40	17.50	16.10	16.20	16.60	17.00	17.00	17.50	18.40	18.90
5	15.80	16.00	16.10	16.10	16	16.60	17.00	17.10	15.80	15.80	16.20	16.70	16.70	17.10	18.10	18.60
6	15.50	15.70	15.80	15.80	15.8	16.30	16.60	16.70	15.50	15.50	16.00	16.50	16.50	16.80	17.70	18.20
7	15.50	15.60	15.70	15.70	15.6	16.10	16.50	16.60	15.50	15.50	15.90	16.40	16.40	16.60	17.50	17.90
8	14.80	15.00	15.20	15.20	15.1	15.60	15.90	16.00	14.80	14.90	15.30	15.70	15.70	16.20	17.00	17.40
9	13.80	14.00	14.10	14.10	13.9	14.50	14.80	15.00	13.80	13.70	14.40	14.80	14.80	15.30	16.30	16.30
10	13.10	13.20	13.20	13.10	13.2	13.80	13.90	14.20	12.80	12.60	13.20	13.60	13.60	14.00	15.00	15.30

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 8. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo cesm1_cam5 para la estación Santa Margarita**

Mes	RCP2.6				RCP4.5				RCP6.0				RCP8.0			
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099
1	74	73	86	86	92	79	89	90	83	77	76	80	80	83	83	79
2	238	228	226	233	56	49	51	54	57	57	52	51	51	54	50	44
3	181	175	197	193	56	54	59	60	65	55	50	59	59	50	54	62
4	106	99	96	99	80	72	72	72	72	65	74	79	79	80	77	77
5	55	59	55	48	158	138	143	161	185	149	158	169	169	163	157	158
6	57	54	59	58	287	259	240	237	290	218	243	240	240	293	240	222
7	77	79	72	74	244	232	226	241	266	241	238	232	232	250	207	182
8	161	163	155	154	246	233	225	233	231	238	228	223	223	231	233	225
9	278	265	271	278	271	251	253	265	253	245	248	242	242	242	219	222
10	272	244	256	269	243	233	256	264	226	248	241	231	231	243	246	243
11	249	238	238	236	173	164	170	183	175	184	190	184	184	206	183	165
12	282	262	253	256	93	94	95	101	102	97	94	95	95	89	93	89
1	20.00	20.50	20.40	20.50	20.20	20.70	21.60	21.60	20.00	20.40	21.40	21.90	21.90	21.10	22.50	23.40
2	21.70	21.90	22.50	22.10	21.60	22.80	23.20	23.30	21.20	22.00	23.10	23.70	23.70	23.20	24.90	25.90
3	22.30	22.90	23.30	23.50	23.50	24.00	24.30	24.30	22.60	23.40	24.20	24.60	24.60	24.00	26.00	26.70
4	23.30	23.80	24.20	24.20	24.00	24.70	25.10	25.40	23.40	24.40	25.40	25.60	25.60	25.00	26.60	27.20
5	23.60	24.10	24.50	24.40	24.10	25.10	25.30	25.10	23.30	24.50	25.00	25.30	25.30	25.20	26.60	27.30
6	22.80	23.10	23.40	23.60	23.10	24.10	24.50	24.50	22.90	23.80	24.20	24.80	24.80	24.40	26.10	26.90
7	22.10	22.50	22.60	22.50	22.60	23.50	23.80	23.70	22.30	23.10	23.70	24.10	24.10	23.80	25.70	26.60
8	22.60	22.90	23.00	23.00	23.00	23.60	24.00	24.00	22.80	23.30	24.00	24.50	24.50	24.20	25.50	26.20
9	22.40	22.70	22.80	22.80	22.80	23.50	24.00	24.10	22.70	23.20	23.80	24.40	24.40	24.10	25.40	25.90
10	21.40	21.70	21.90	21.90	21.90	22.50	22.80	22.80	21.8	22.1	22.7	23.2	23.2	23.10	24.10	24.60
11	21.10	21.40	21.40	21.40	21.20	22.10	22.30	22.30	21.2	21.5	22.5	22.8	22.80	22.70	23.70	24.20
12	21.40	21.50	21.60	21.40	21.50	22.20	22.30	22.50	21.1	21.6	22.5	22.8	22.80	22.40	23.80	24.30
1	10.10	10.50	10.60	10.50	10.7	10.9	11.50	11.60	10.30	9.90	10.40	11.00	11.00	11.30	12.20	12.80
2	10.90	11.00	11.00	10.80	11	11.5	11.80	12.10	10.60	10.50	10.80	11.50	11.50	12.10	13.70	14.40
3	11.10	11.50	11.60	11.70	11.9	12.2	12.50	12.70	11.20	11.00	11.30	12.00	12.00	12.30	13.70	14.40
4	12.10	12.40	12.70	12.70	12.7	13.3	13.70	14.00	12.20	12.00	12.60	13.00	13.00	13.60	14.90	15.40
5	13.40	13.70	13.90	13.90	13.8	14.4	14.70	14.80	13.40	13.40	13.80	14.20	14.20	14.80	15.70	16.10
6	14.20	14.30	14.40	14.50	14.3	15	15.40	15.40	14.10	14.20	14.60	15.00	15.00	15.50	16.40	16.90
7	13.80	13.90	14.00	14.10	14	14.6	15.00	15.10	13.80	13.80	14.20	14.70	14.70	15.10	16.00	16.50
8	13.60	13.80	13.90	13.90	13.9	14.4	14.60	14.80	13.60	13.70	14.10	14.60	14.60	14.90	15.80	16.20
9	13.60	13.70	13.70	13.80	13.7	14.2	14.60	14.70	13.60	13.60	14.00	14.50	14.50	14.70	15.60	16.00
10	13.20	13.40	13.60	13.60	13.5	14	14.30	14.40	13.30	13.30	13.70	14.10	14.10	14.60	15.40	15.80
11	12.20	12.40	12.50	12.50	12.3	12.9	13.20	13.30	12.20	12.10	12.80	13.20	13.20	13.70	14.30	14.70
12	11.50	11.60	11.60	11.50	11.6	12.2	12.30	12.50	11.20	11.10	11.50	12.00	12.00	12.40	13.30	13.70

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 9. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo cesm1_cam5 para la estación SWAT**

Mes	RCP2.6				RCP4.5				RCP6.0				RCP8.0			
	2040-2049	2060-2069	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	
1	94	93	109	107	118	101	113	114	106	99	96	100	100	105	104	
2	78	83	77	70	80	70	73	78	81	81	74	72	72	77	71	
3	89	85	91	90	84	84	92	93	100	84	78	92	92	79	83	
4	99	101	92	93	103	92	92	93	92	84	94	100	100	101	98	
5	167	169	157	157	159	142	145	165	192	151	161	173	173	167	162	
6	254	240	243	248	262	234	220	217	262	197	220	217	217	262	214	
7	222	202	209	219	199	189	184	199	217	199	194	189	189	207	169	
8	233	223	225	223	230	221	213	218	216	223	213	208	208	216	208	
9	297	273	267	273	285	264	267	279	267	255	258	255	255	255	228	
10	287	275	272	281	293	278	305	314	272	293	287	275	275	287	293	
11	236	226	253	250	226	213	224	238	230	240	244	236	236	265	236	
12	151	141	137	141	133	133	133	143	145	137	133	136	136	125	129	
1	21.90	22.40	22.30	22.30	22.10	22.50	23.4	23.50	21.90	22.30	23.30	23.70	23.70	23.00	24.40	
2	24.00	24.20	24.80	24.40	24.00	25.10	25.5	25.60	23.50	24.30	25.40	26.00	26.00	25.50	27.20	
3	24.50	25.00	25.50	25.60	25.80	26.20	26.5	26.50	24.80	25.60	26.40	26.80	26.80	26.20	28.80	
4	25.30	25.80	26.20	26.20	26.00	26.70	27.1	27.40	25.40	26.40	27.40	27.70	27.70	27.00	28.60	
5	25.80	26.20	26.70	26.60	26.30	27.20	27.4	27.30	25.40	26.70	27.10	27.50	27.50	27.40	28.70	
6	24.70	25.00	25.40	25.60	25.00	26.00	26.4	26.40	24.80	25.70	26.10	26.60	26.60	26.30	28.80	
7	23.90	24.20	24.40	24.30	24.40	25.20	25.6	25.40	24.1	24.8	25.4	25.8	25.80	25.60	28.30	
8	24.50	24.70	24.80	24.80	24.90	25.50	25.8	25.80	24.6	25.1	25.9	26.4	26.40	26.10	27.30	
9	24.20	24.50	24.60	24.60	24.60	25.30	25.8	25.80	24.5	25	25.6	26.1	26.10	25.90	27.10	
10	23.50	23.80	24.00	24.00	24.00	24.60	24.9	24.90	23.90	24.20	24.80	25.30	25.30	25.20	26.70	
11	22.80	23.10	23.10	23.10	22.90	23.80	24	24.10	22.90	23.20	24.20	24.50	24.50	24.40	25.90	
12	22.70	22.80	22.90	22.70	22.80	23.50	23.6	23.80	22.40	22.90	23.80	24.10	24.10	23.70	25.00	
1	11.00	11.40	11.60	11.40	11.6	11.80	12.50	12.50	11.20	10.80	11.30	11.90	11.90	12.20	13.70	
2	15.00	15.20	15.40	15.40	12.2	12.70	13.10	13.30	11.80	11.60	12.00	12.60	12.60	13.20	14.80	
3	14.00	14.20	14.40	14.30	13.4	13.60	13.90	14.10	12.70	12.40	12.60	13.30	13.30	13.70	15.70	
4	13.00	13.10	13.10	13.00	14.5	15.10	15.50	15.80	14.00	13.80	14.30	14.80	14.80	15.40	17.10	
5	12.10	12.20	12.20	12.00	16.1	16.60	16.90	17.00	15.70	15.70	16.00	16.40	16.40	17.00	18.30	
6	12.50	12.90	13.00	13.10	16.5	17.10	17.50	17.60	16.30	16.30	16.70	17.10	17.10	17.60	18.90	
7	13.90	14.10	14.40	14.50	16.2	16.80	17.20	17.30	16.00	16.00	16.40	16.90	16.90	17.30	18.70	
8	15.60	15.90	16.20	16.20	16	16.50	16.80	16.90	15.70	15.80	16.20	16.60	16.60	17.00	18.30	
9	16.30	16.50	16.60	16.60	15.9	16.50	16.90	16.90	15.80	15.80	16.20	16.70	16.70	17.00	18.20	
10	16.00	16.10	16.30	16.30	15.4	15.80	16.10	16.20	15.10	15.20	15.50	15.90	15.90	16.40	17.20	
11	15.70	15.90	16.00	16.00	14.1	14.80	15.00	15.20	14.00	13.90	14.50	15.00	15.00	15.50	16.50	
12	15.80	15.90	16.00	16.10	13.1	13.70	13.80	14.00	12.70	12.60	13.00	13.50	13.50	13.90	14.80	

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 10. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo cnrm_cm5 para la estación Cerro La Laguna**

Mes	RCP2.6				RCP4.5				RCP8.0			
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099
1	62	65	65	63	65	57	64	60	64	66	66	64
2	45	48	48	53	58	50	47	50	43	45	42	38
3	44	44	53	53	53	48	46	48	48	40	44	50
4	63	64	68	65	70	68	68	71	73	75	73	72
5	152	160	132	120	145	128	162	149	164	158	152	154
6	242	262	284	287	262	230	274	287	246	300	249	226
7	225	243	291	285	189	219	201	192	228	246	204	180
8	308	277	308	298	243	215	256	236	225	231	233	225
9	329	321	324	282	220	226	223	240	237	237	212	218
10	268	217	228	235	259	270	284	270	219	233	233	231
11	150	135	138	138	185	129	135	157	170	188	168	153
12	83	84	76	77	67	64	74	81	78	74	78	74
1	19.7	19.80	19.90	20.10	19.90	20.60	20.9	20.80	21.90	21.00	22.50	23.40
2	20.5	21.00	20.90	20.80	20.50	21.20	21.2	21.20	23.80	23.30	25.00	26.10
3	22.4	23.00	22.50	22.40	22.40	23.00	23.6	23.70	25.00	24.30	26.50	27.10
4	23.5	23.70	23.30	23.30	23.00	23.60	23.9	23.90	25.80	25.20	26.80	27.40
5	23	23.20	23.30	23.40	23.10	23.80	23.4	23.90	25.50	25.30	26.70	27.40
6	22.9	22.80	22.60	22.60	22.30	23.40	23.2	23.30	25.20	24.70	26.40	27.20
7	22.3	22.20	22.00	22.20	22.30	22.80	22.8	23.00	24.50	24.00	26.00	26.90
8	22.4	22.60	22.30	22.30	22.60	23.20	23.1	23.30	24.90	24.50	25.80	26.60
9	22.2	22.20	22.00	22.20	22.70	23.30	23.4	23.50	24.80	24.40	25.70	26.30
10	20.6	21.20	20.90	20.90	21.10	21.50	21.7	21.90	23.60	23.40	24.40	24.90
11	20.3	20.70	20.80	20.70	20.70	21.00	21.3	21.40	22.90	22.60	23.70	24.20
12	20.1	20.40	20.50	20.40	20.60	21.00	21.1	21.10	22.60	22.10	23.50	24.00
1	9.40	9.70	9.80	9.70	9.7	10.60	10.70	10.20	11.90	12.00	13.00	13.60
2	9.70	10.10	9.90	10.00	10	10.60	10.50	10.40	12.30	12.80	13.90	14.40
3	10.90	11.30	11.30	11.20	11.1	12.10	12.00	11.50	13.10	13.30	14.70	15.40
4	11.90	12.20	12.10	12.00	11.8	13.00	12.80	12.30	14.10	14.60	15.80	16.40
5	12.70	13.00	13.20	13.00	12.7	13.90	13.80	13.20	15.10	15.50	16.30	16.80
6	13.70	14.10	14.20	14.20	14	14.70	14.60	14.30	15.80	16.10	17.00	17.50
7	13.00	13.10	13.30	13.20	12.9	13.80	13.70	13.50	15.60	15.80	16.90	17.40
8	13.00	13.00	13.10	13.10	12.8	13.50	13.40	13.10	15.60	15.80	16.70	17.20
9	13.10	13.30	13.20	13.10	12.8	13.70	13.60	13.30	15.40	15.60	16.40	16.90
10	12.70	12.90	12.90	12.80	12.9	13.80	13.80	13.40	15.00	15.30	16.20	16.60
11	11.10	11.40	11.50	11.50	11.7	12.20	12.00	11.70	14.00	14.30	15.00	15.40
12	10.30	10.80	10.90	10.90	10.4	11.50	11.40	10.80	12.60	12.80	13.80	14.20

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 11. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo cnrm_cm5 para la estación Cobán**

Mes	RCP2.6						RCP4.5						RCP8.0					
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099		
	81	85	88	85	85	77	86	82	86	86	90	86	82	86	90	86		
1	81	85	88	85	85	77	86	82	86	90	86	82	86	90	86	86		
2	80	84	84	84	99	87	82	87	76	71	76	70	62	62	62	62		
3	76	76	94	95	94	86	81	85	86	73	77	77	88	88	88	88		
4	83	85	90	86	95	92	90	95	97	100	95	94	94	94	94	94		
5	169	177	145	130	159	138	180	164	177	171	166	166	166	166	166	166		
6	221	235	259	262	241	209	253	265	226	273	226	203	203	203	203	203		
7	196	215	262	260	164	193	178	172	201	217	178	156	156	156	156	156		
8	287	256	284	275	221	195	235	216	202	209	202	202	202	202	202	202		
9	362	350	350	308	236	242	239	257	257	257	233	239	239	239	239	239		
10	324	259	274	285	310	327	347	330	259	274	276	276	276	276	276	276		
11	221	197	201	203	272	191	201	235	238	264	235	215	215	215	215	215		
12	132	135	122	123	106	103	118	130	125	117	120	116	116	116	116	116		
1	22.50	22.60	22.70	22.90	22.80	23.50	23.7	23.70	24.80	24.00	25.40	26.30	26.30	26.30	26.30	26.30		
2	24.10	24.60	24.40	24.40	24.10	24.70	24.8	24.70	27.00	26.50	28.20	29.10	29.10	29.10	29.10	29.10		
3	25.80	26.40	25.90	25.80	25.80	26.40	27	27.10	27.90	27.30	29.30	29.90	29.90	29.90	29.90	29.90		
4	26.70	27.00	26.60	26.60	26.30	26.80	27.1	27.20	28.90	28.20	29.80	30.50	30.50	30.50	30.50	30.50		
5	26.40	26.60	26.80	26.80	26.50	27.20	26.8	27.40	28.40	28.40	29.80	30.40	30.40	30.40	30.40	30.40		
6	26.20	26.20	25.90	25.90	25.60	26.80	26.6	26.60	27.60	27.30	29.00	29.80	29.80	29.80	29.80	29.80		
7	25.40	25.30	25.10	25.20	25.30	25.90	25.9	26.00	26.80	26.60	28.50	29.40	29.40	29.40	29.40	29.40		
8	25.70	25.80	25.50	25.50	25.80	26.40	26.2	26.40	27.40	27.10	28.30	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00		
9	25.30	25.30	25.10	25.30	25.80	26.40	26.5	26.60	27.00	26.80	28.00	28.60	28.60	28.60	28.60	28.60		
10	24.00	24.70	24.30	24.30	24.60	25.00	25.1	25.40	26.10	26.00	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50		
11	22.80	23.20	23.40	23.30	23.30	23.60	23.9	24.00	25.20	25.10	26.10	26.60	26.60	26.60	26.60	26.60		
12	22.20	22.60	22.70	22.60	22.80	23.20	23.3	23.30	24.80	24.40	25.80	26.30	26.30	26.30	26.30	26.30		
1	11.00	11.20	11.30	11.30	11.3	11.80	12.30	12.20	12.00	12.30	13.20	13.80	13.80	13.80	13.80	13.80		
2	12.00	12.40	12.20	12.30	12.3	12.70	12.80	12.80	12.80	13.50	14.60	15.10	15.10	15.10	15.10	15.10		
3	13.20	13.60	13.60	13.50	13.4	13.90	14.30	14.40	13.50	13.90	15.30	15.90	15.90	15.90	15.90	15.90		
4	14.90	15.20	15.10	15.00	14.8	15.30	15.80	16.00	15.20	15.80	17.00	17.50	17.50	17.50	17.50	17.50		
5	15.90	16.20	16.40	16.20	15.9	16.40	17.00	17.10	16.70	17.30	18.20	18.70	18.70	18.70	18.70	18.70		
6	16.90	17.30	17.40	17.40	17.2	17.60	17.80	17.90	17.50	18.00	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40		
7	16.60	16.80	16.90	16.80	16.5	17.20	17.30	17.40	17.30	17.70	18.60	19.10	19.10	19.10	19.10	19.10		
8	16.60	16.70	16.70	16.70	16.4	16.80	17.00	17.10	17.10	17.40	18.30	18.70	18.70	18.70	18.70	18.70		
9	16.60	16.70	16.60	16.50	16.2	16.80	17.00	17.10	17.00	17.20	18.10	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50		
10	15.60	15.80	15.80	15.70	15.8	16.30	16.70	16.80	16.10	16.60	17.40	17.80	17.80	17.80	17.80	17.80		
11	13.90	14.20	14.40	14.40	14.6	14.60	14.80	15.10	15.10	15.60	16.20	16.60	16.60	16.60	16.60	16.60		
12	12.70	13.30	13.30	13.40	12.9	13.30	13.80	14.00	13.70	14.10	15.10	15.40	15.40	15.40	15.40	15.40		

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 12. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo cnrm_cm5 para la estación Purulhá**

Mes	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.0					
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099
1	65	70	68	66	68	59	66	62	71	75	71	71
2	49	52	51	52	63	53	51	54	45	45	39	39
3	56	55	67	66	67	60	57	60	59	55	63	63
4	64	65	70	67	71	71	69	72	78	76	76	76
5	179	181	148	137	165	147	192	174	181	168	171	171
6	238	247	275	278	250	220	265	281	235	238	220	220
7	227	245	294	288	194	227	209	203	227	203	179	179
8	280	252	275	268	224	198	235	219	196	203	196	196
9	298	293	296	264	209	216	211	219	219	195	198	198
10	239	196	204	208	227	241	255	241	187	198	194	194
11	141	128	131	132	173	122	124	146	147	147	133	133
12	80	81	73	75	63	62	72	79	76	72	70	70
1	19.50	19.60	19.70	19.90	19.80	20.50	20.7	20.60	21.90	21.00	22.50	23.40
2	20.70	21.20	21.10	21.00	20.70	21.40	21.4	21.30	23.80	23.30	25.00	26.10
3	22.50	23.00	22.60	22.50	22.50	23.00	23.6	23.70	25.00	24.30	26.50	27.10
4	23.50	23.80	23.40	23.40	23.10	23.60	24	24.00	25.80	25.20	26.80	27.40
5	23.40	23.60	23.80	23.90	23.60	24.20	23.9	24.40	25.50	25.30	26.70	27.40
6	23.50	23.50	23.20	23.30	22.90	24.10	23.9	23.90	25.20	24.70	26.40	27.20
7	22.80	22.70	22.50	22.60	22.70	23.20	23.3	23.40	24.50	24.00	26.00	26.90
8	22.90	23.10	22.80	22.80	23.10	23.60	23.5	23.70	24.90	24.50	25.80	26.60
9	22.90	22.90	22.70	22.90	23.30	23.90	24.1	24.10	24.80	24.40	25.70	26.30
10	21.40	22.00	21.80	21.70	21.90	22.30	22.5	22.70	23.60	23.40	24.40	24.90
11	20.50	20.80	21.00	20.90	20.90	21.20	21.5	21.60	22.90	22.60	23.70	24.20
12	20.00	20.30	20.40	20.30	20.50	20.90	21	21.00	22.60	22.10	23.50	24.00
1	10.90	11.10	11.20	11.10	11.1	11.60	12.10	12.00	11.90	12.00	13.00	13.60
2	11.30	11.70	11.50	11.60	11.6	12.00	12.10	12.20	12.30	12.80	13.90	14.40
3	12.50	12.80	12.90	12.80	12.7	13.10	13.50	13.60	13.10	13.30	14.70	15.40
4	13.60	13.90	13.80	13.70	13.6	14.00	14.50	14.70	14.10	14.60	15.80	16.40
5	14.20	14.50	14.70	14.50	14.2	14.80	15.40	15.40	15.10	15.50	16.30	16.80
6	15.10	15.50	15.60	15.60	15.4	15.70	16.00	16.10	15.80	16.10	17.00	17.50
7	14.80	14.90	15.10	15.00	14.7	15.40	15.60	15.60	15.60	15.80	16.90	17.40
8	15.00	15.10	15.10	15.10	14.8	15.20	15.50	15.60	15.60	15.80	16.70	17.20
9	14.90	15.10	15.00	14.90	14.6	15.10	15.40	15.50	15.40	15.60	16.40	16.90
10	14.40	14.60	14.60	14.50	14.5	15.10	15.50	15.50	15.00	15.30	16.20	16.60
11	12.80	13.10	13.20	13.20	13.4	13.50	13.70	13.90	14.00	14.30	15.00	15.40
12	11.60	12.10	12.20	12.20	11.7	12.10	12.70	12.90	12.60	12.80	13.80	14.20

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 13. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo cnrm_cm5 para la estación San Cristóbal**

Mes	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.0		
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2020-2049	2040-2069	2060-2089
1	57	60	59	60	53	59	55	60	62
2	45	48	47	57	49	46	49	42	44
3	53	53	64	64	59	56	58	59	53
4	57	58	61	64	62	61	64	67	66
5	147	153	126	139	122	157	143	156	146
6	228	243	267	246	216	258	273	231	282
7	203	219	262	170	197	181	175	203	221
8	286	257	283	224	198	236	219	205	209
9	339	334	334	229	235	232	249	244	244
10	281	227	239	246	283	300	283	227	242
11	162	146	150	200	140	146	169	182	201
12	88	90	81	82	69	79	87	84	79
1	22.50	22.60	22.70	22.70	23.40	23.7	23.60	21.90	21.00
2	24.00	24.50	24.40	24.30	24.70	24.7	24.70	23.80	23.30
3	26.00	26.60	26.10	26.00	26.60	27.2	27.30	25.00	24.30
4	27.00	27.20	26.80	26.50	27.10	27.4	27.40	25.80	25.20
5	26.40	26.60	26.70	26.80	27.10	26.8	27.30	25.50	25.30
6	26.00	25.90	25.70	25.70	26.50	26.3	26.30	25.20	24.70
7	25.40	25.30	25.10	25.20	25.90	25.9	26.10	24.50	24.00
8	25.40	25.60	25.30	25.60	26.20	26.1	26.30	24.90	24.50
9	25.10	25.10	24.90	25.10	26.20	26.3	26.40	24.80	24.40
10	23.80	24.40	24.10	24.30	24.70	24.9	25.10	23.60	23.40
11	22.80	23.20	23.30	23.20	23.50	23.8	23.90	22.90	22.60
12	22.60	22.90	23.00	22.90	23.50	23.6	23.60	22.60	22.10
1	11.20	11.40	11.50	11.40	11.90	12.40	12.30	11.90	12.00
2	12.00	12.40	12.20	12.30	12.70	12.80	12.90	12.30	12.80
3	13.20	13.60	13.60	13.50	13.80	14.30	14.40	13.10	13.30
4	14.70	15.00	14.90	14.80	15.10	15.60	15.80	14.10	14.60
5	15.40	15.70	15.90	15.70	15.40	15.90	16.60	15.10	15.50
6	16.40	16.80	16.90	16.90	17.00	17.30	17.40	15.80	16.10
7	16.00	16.10	16.30	16.20	16.50	16.70	16.80	15.60	15.80
8	16.00	16.00	16.10	16.10	16.10	16.40	16.50	15.60	15.80
9	15.90	16.10	16.00	15.90	16.10	16.40	16.50	15.40	15.60
10	15.20	15.40	15.40	15.30	15.40	15.90	16.30	15.00	15.30
11	13.70	14.00	14.10	14.10	14.30	14.60	14.80	14.00	14.30
12	12.70	13.20	13.30	13.30	13.20	13.80	13.90	12.60	12.80

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 14. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo cnrm_cm5 para la estación Santa Margarita**

Mes	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.0					
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099
1	74	79	79	77	78	69	77	73	80	83	83	79
2	56	59	58	59	70	60	57	61	51	54	50	44
3	54	54	66	66	66	60	57	59	59	50	54	62
4	66	68	72	69	75	73	72	75	79	80	77	77
5	163	167	138	125	152	134	173	158	169	163	157	158
6	237	253	278	281	256	222	268	284	240	293	240	222
7	229	250	303	297	195	229	210	201	232	250	207	182
8	317	286	314	304	249	220	262	244	223	231	233	225
9	337	328	331	291	228	233	228	245	242	242	219	222
10	289	233	246	254	276	291	309	294	231	243	246	243
11	170	153	158	158	209	147	153	179	184	206	183	165
12	101	103	93	94	80	78	90	99	95	89	93	89
1	19.60	19.70	19.80	20.00	19.90	20.6	20.8	20.70	21.90	21.00	22.50	23.40
2	20.70	21.20	21.10	21.00	20.70	21.4	21.4	21.30	23.80	23.30	25.00	26.10
3	22.40	22.90	22.50	22.40	22.40	23	23.6	23.70	25.00	24.30	26.50	27.10
4	23.40	23.70	23.30	23.30	23.00	23.5	23.9	23.90	25.80	25.20	26.80	27.40
5	23.20	23.50	23.60	23.70	23.40	24	23.7	24.20	25.50	25.30	26.70	27.40
6	23.30	23.20	23.00	23.00	22.70	23.8	23.6	23.60	25.20	24.70	26.40	27.20
7	22.60	22.50	22.30	22.40	22.50	23	23.1	23.20	24.50	24.00	26.00	26.90
8	22.70	22.90	22.60	22.60	22.90	23.5	23.3	23.50	24.90	24.50	25.80	26.60
9	22.60	22.60	22.40	22.60	23.10	23.6	23.8	23.90	24.80	24.40	25.70	26.30
10	21.10	21.80	21.40	21.40	21.60	22.1	22.2	22.40	23.60	23.40	24.40	24.90
11	20.50	20.80	21.00	20.90	20.90	21.2	21.5	21.60	22.90	22.60	23.70	24.20
12	20.30	20.60	20.70	20.60	20.80	21.2	21.3	21.30	22.60	22.10	23.50	24.00
1	10.10	10.30	10.40	10.30	10.3	10.80	11.30	11.20	11.90	12.00	13.00	13.60
2	10.60	11.00	10.80	10.90	10.9	11.30	11.40	11.50	12.30	12.80	13.90	14.40
3	11.60	12.00	12.00	11.90	11.8	12.20	12.70	12.80	13.10	13.30	14.70	15.40
4	12.70	13.00	12.90	12.80	12.6	13.10	13.60	13.80	14.10	14.60	15.80	16.40
5	13.40	13.70	13.90	13.70	13.4	13.90	14.50	14.60	15.10	15.50	16.30	16.80
6	14.40	14.80	14.90	14.90	14.7	15.00	15.30	15.40	15.80	16.10	17.00	17.50
7	14.00	14.20	14.30	14.20	13.9	14.60	14.70	14.80	15.60	15.80	16.90	17.40
8	14.10	14.20	14.20	14.20	13.9	14.30	14.50	14.60	15.60	15.80	16.70	17.20
9	14.00	14.20	14.10	14.00	13.7	14.30	14.50	14.60	15.40	15.60	16.40	16.90
10	13.60	13.80	13.80	13.70	13.8	14.30	14.70	14.70	15.00	15.30	16.20	16.60
11	12.10	12.40	12.50	12.50	12.7	12.70	13.00	13.20	14.00	14.30	15.00	15.40
12	11.10	11.60	11.70	11.70	11.2	11.60	12.20	12.30	12.60	12.80	13.80	14.20

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 15. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo cnrm_cm5 para la estación SWAT**

Mes	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.0				
	2020-2049	2040-2069	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2070-2099		
1	93	99	103	98	97	89	94	100	105	104	99
2	81	86	86	87	101	88	84	72	77	71	62
3	81	81	102	103	101	93	87	90	92	79	83
4	85	87	93	89	97	94	93	100	101	98	96
5	169	175	143	127	157	137	181	164	173	167	162
6	212	226	248	251	231	200	243	257	217	262	214
7	184	204	252	247	156	186	171	166	189	207	169
8	301	270	299	289	233	203	247	228	208	216	208
9	357	345	348	306	234	243	234	252	255	228	234
10	347	278	296	305	332	350	374	353	275	287	293
11	228	205	207	209	279	197	207	244	236	265	213
12	143	146	132	133	114	111	128	141	136	125	124
1	21.50	21.60	21.80	22	21.80	22.50	22.7	22.70	23.70	23.00	24.40
2	23.10	23.60	23.40	23.4	23.10	23.70	23.7	23.70	26.00	25.50	27.20
3	24.70	25.30	24.80	24.7	24.70	25.30	25.9	25.90	26.80	26.20	28.20
4	25.50	25.80	25.40	25.4	25.10	25.60	25.9	26.00	27.70	27.00	29.30
5	25.30	25.60	25.80	25.8	25.50	26.10	25.8	26.30	27.50	27.40	29.40
6	25.20	25.20	24.90	24.9	24.60	25.80	25.6	25.50	26.60	26.30	28.80
7	24.40	24.30	24.10	24.2	24.30	24.80	24.9	24.90	25.80	25.60	28.30
8	24.60	24.80	24.50	24.5	24.80	25.40	25.2	25.40	26.40	26.10	27.30
9	24.40	24.40	24.20	24.4	24.90	25.50	25.6	25.70	26.10	25.90	27.70
10	23.20	23.90	23.60	23.5	23.80	24.20	24.3	24.60	25.30	25.20	26.70
11	22.10	22.50	22.70	22.6	22.60	22.90	23.2	23.30	24.50	24.40	25.90
12	21.50	21.90	22.00	21.9	22.10	22.50	22.6	22.60	24.10	23.70	25.60
1	10.90	11.1	11.20	11.20	11.2	11.70	12.20	12.10	11.90	12.20	13.70
2	11.80	12.2	12.00	12.10	12.1	12.50	12.60	12.60	12.60	13.20	14.80
3	13.00	13.4	13.40	13.30	13.2	13.60	14.10	14.20	13.30	13.70	15.70
4	14.50	14.8	14.70	14.60	14.4	14.90	15.40	15.60	14.80	15.40	16.60
5	15.60	15.9	16.10	15.90	15.6	16.10	16.70	16.80	16.40	17.00	18.30
6	16.50	17	17.00	17.00	16.8	17.20	17.40	17.50	17.10	17.60	18.90
7	16.20	16.4	16.50	16.40	16.1	16.80	16.90	17.00	16.90	17.30	18.70
8	16.20	16.3	16.30	16.30	16	16.40	16.60	16.70	16.60	17.00	18.30
9	16.30	16.4	16.30	16.20	15.9	16.50	16.70	16.90	16.70	16.90	18.20
10	15.40	15.6	15.60	15.50	15.6	16.10	16.50	16.60	15.90	16.40	17.60
11	13.80	14.1	14.30	14.30	14.5	14.50	14.80	15.00	15.00	15.50	16.50
12	12.50	13.1	13.10	13.20	12.7	13.10	13.60	13.80	13.50	13.90	14.80

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP.*

http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 16. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo ncar_ccsm4 para la estación Cerro La Laguna**

Mes	RCP2.6				RCP4.5				RCP6.0				RCP8.0			
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099
1	68	67	71	73	75	71	65	65	75	70	75	68	69	63	62	62
2	43	40	40	42	43	40	39	39	41	39	41	38	39	37	35	34
3	48	46	47	49	45	42	44	44	45	43	44	43	49	41	38	35
4	60	55	53	54	66	57	51	51	59	53	52	53	56	43	35	44
5	157	158	155	152	145	157	149	149	136	115	122	129	157	152	136	113
6	262	239	281	281	236	233	268	268	226	211	242	214	233	230	175	185
7	270	270	300	291	246	204	240	240	240	222	228	225	222	210	171	162
8	220	228	254	262	228	249	186	186	228	192	236	176	212	163	142	135
9	257	262	282	268	232	204	204	204	232	212	232	201	234	234	173	151
10	270	310	289	256	226	233	240	240	242	233	266	210	268	259	249	240
11	129	125	124	126	136	136	140	140	128	135	138	129	106	121	124	121
12	72	73	74	76	74	68	67	67	72	72	72	68	72	67	64	64
1	20.20	20.60	20.20	20.10	20.20	20.70	21.1	21.20	20.00	20.40	21.00	21.30	20.60	21.40	22.30	22.80
2	21.30	21.30	20.90	20.80	21.20	22.00	22.3	22.30	21.20	21.60	22.40	22.70	21.80	22.50	23.40	24.50
3	22.60	23.30	23.00	22.70	23.20	23.70	23.8	23.90	22.90	23.60	24.70	25.20	23.50	24.80	25.80	26.40
4	24.00	24.40	24.30	23.80	24.00	24.50	25.4	25.70	24.00	24.80	25.40	26.10	24.80	26.10	26.80	27.40
5	23.40	23.50	23.50	23.30	23.80	24.00	24.4	24.50	23.50	24.20	24.70	25.30	23.70	25.20	26.00	26.50
6	22.50	22.70	22.50	22.50	23.40	23.80	23.8	23.90	23.00	23.70	24.50	24.90	23.10	24.10	25.50	26.20
7	22.20	22.50	22.10	22.10	22.60	23.00	23.1	23.30	22.80	23.50	24.00	24.20	23.20	23.70	25.00	25.50
8	22.70	22.70	22.40	22.40	22.80	23.20	23.4	23.50	23.00	23.40	24.00	24.30	23.50	24.40	25.40	25.80
9	22.30	22.50	22.10	22.20	22.80	23.30	23.4	23.60	22.70	23.00	23.80	24.20	23.10	23.90	25.10	25.80
10	21.20	21.20	21.10	21.10	21.60	22.10	22.3	22.30	21.4	21.8	22.6	23	21.80	22.60	23.60	24.40
11	21.10	21.20	21.00	20.70	21.30	21.90	21.9	22.00	21.1	21.3	22.1	22.7	21.50	22.10	23.20	23.80
12	20.90	20.90	20.70	20.50	20.70	21.50	21.8	21.70	20.9	21.3	21.8	22.1	21.30	22.10	22.80	23.20
1	9.70	10.00	9.70	9.70	10	10.30	10.50	10.40	9.80	10.10	10.20	10.40	10.10	10.70	11.30	11.70
2	9.80	9.60	9.30	9.30	9.9	10.30	10.20	10.30	9.50	9.80	10.20	10.20	10.10	10.50	11.10	11.70
3	10.70	10.90	10.80	10.70	11.1	11.40	11.50	11.60	10.80	11.00	11.40	11.80	11.30	11.80	12.60	13.00
4	11.70	11.80	11.70	11.50	11.7	12.10	12.40	12.30	11.70	11.90	12.20	12.60	11.90	12.70	13.40	14.00
5	12.70	12.80	12.80	12.60	12.7	13.10	13.50	13.50	12.90	12.90	13.30	13.70	13.10	14.10	14.90	15.20
6	13.60	13.70	13.60	13.50	13.8	14.20	14.40	14.40	13.70	14.00	14.30	14.60	14.00	14.80	15.60	16.10
7	12.80	13.00	12.80	12.80	13	13.40	13.60	13.60	12.90	13.20	13.50	13.80	13.30	13.90	14.60	15.00
8	12.70	12.80	12.70	12.60	12.7	13.10	13.30	13.30	12.70	13.00	13.30	13.50	13.00	13.70	14.50	14.90
9	12.80	12.90	12.80	12.70	12.9	13.30	13.50	13.50	12.80	13.10	13.40	13.70	13.10	13.80	14.60	15.10
10	12.40	12.50	12.40	12.40	12.6	13.00	13.20	13.20	12.50	12.70	13.10	13.30	12.90	13.60	14.40	14.90
11	11.20	11.30	11.20	10.90	11.3	11.70	11.80	11.90	11.10	11.30	11.70	12.00	11.50	12.10	12.90	13.30
12	10.50	10.50	10.30	10.20	10.3	10.90	11.10	11.00	10.40	10.70	11.10	11.20	10.70	11.50	12.00	12.40

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 17. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo ncar_ccsm4 para la estación Cobán**

Mes	RCP2.6						RCP4.5						RCP6.0						RCP8.0					
	2020-2049		2040-2069		2060-2089		2070-2099		2020-2049		2040-2069		2060-2089		2070-2099		2020-2049		2040-2069		2060-2089		2070-2099	
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099
Precipitación (mm)	91	90	90	97	101	96	88	87	100	101	93	93	68	93	84	82	82	82	82	84	84	82	82	82
	72	67	66	70	71	67	62	66	69	68	66	38	66	61	59	56	66	62	62	66	66	66	66	62
	86	80	85	86	79	75	77	77	80	78	76	43	76	71	66	62	71	66	62	71	71	66	66	62
	80	71	71	72	87	75	67	66	77	66	71	53	74	57	46	56	57	46	56	57	46	57	46	56
	177	179	169	169	161	175	184	164	151	135	129	129	174	166	148	122	174	166	148	166	166	148	122	
	238	218	259	259	212	209	244	241	203	221	188	214	209	203	153	162	209	203	153	203	203	153	162	
	239	241	262	254	215	180	204	212	212	201	193	225	196	186	154	143	196	186	154	186	186	154	143	
	202	207	230	237	207	223	183	169	204	212	174	176	190	148	132	122	190	148	132	148	148	132	122	
	278	281	302	290	251	220	220	220	251	254	233	201	251	248	187	160	251	248	187	248	248	187	160	
	319	367	344	305	265	274	288	282	288	316	274	210	319	305	296	285	319	305	296	305	305	296	285	
	187	183	181	185	195	191	199	187	197	197	189	129	154	175	177	173	154	175	177	175	177	173	173	
	114	116	118	122	118	107	105	106	113	114	113	68	114	104	101	100	113	104	101	104	104	101	100	
Temperatura máxima (C)	23	23.3	22.9	22.9	23.00	23.40	23.9	24.00	22.80	23.20	23.80	21.30	23.40	24.10	25.10	25.60	23.40	24.10	25.10	24.10	24.10	25.10	25.60	
	24.8	24.9	24.5	24.4	24.80	25.50	25.8	25.90	24.80	25.20	25.90	22.70	25.90	26.00	27.00	28.00	25.20	26.00	27.00	26.00	26.00	27.00	28.00	
	26	26.7	26.4	26.1	26.60	27.10	27.2	27.30	26.20	27.00	28.10	25.20	27.00	28.20	29.30	29.80	26.20	27.00	28.20	27.00	27.00	28.20	29.30	
	27.3	27.8	27.6	27.1	27.30	27.80	28.9	28.60	27.30	28.20	28.80	26.10	28.20	29.50	30.10	30.90	28.20	29.50	30.10	29.50	29.50	30.10	30.90	
	26.9	26.9	27	26.7	27.20	27.40	27.9	27.90	27.00	27.60	28.10	25.30	27.00	28.70	29.50	29.90	27.00	28.70	29.50	28.70	28.70	29.50	29.90	
	25.8	26	25.8	25.8	26.70	27.00	27.1	27.20	26.30	27.00	27.80	24.90	26.40	27.40	28.80	29.50	26.40	27.40	28.80	27.40	27.40	28.80	29.50	
	25.3	25.6	25.1	25.2	25.70	26.10	26.2	26.40	25.9	26.5	27.1	24.2	26.30	26.80	28.10	28.50	26.30	26.80	28.10	26.80	26.80	28.10	28.50	
	25.9	25.9	25.6	25.6	26.00	26.40	26.6	26.70	26.1	26.6	27.2	24.3	26.60	27.50	28.90	29.50	26.60	27.50	28.90	27.50	27.50	28.90	29.50	
	25.4	25.6	25.2	25.3	25.90	26.30	26.5	26.60	25.8	26.1	26.9	24.2	26.20	27.00	28.80	29.50	26.20	27.00	28.80	27.00	27.00	28.80	29.50	
	24.6	24.6	24.5	24.5	25.00	25.50	25.7	25.70	24.80	25.20	26.00	23.00	26.00	26.00	27.80	28.80	25.20	26.00	27.00	26.00	26.00	27.80	28.80	
	23.7	23.8	23.6	23.3	23.90	24.40	24.5	24.60	23.60	23.90	24.70	22.70	24.10	24.70	25.70	26.30	24.10	24.70	25.70	24.70	24.70	25.70	26.30	
	23	23.1	22.9	22.7	22.80	23.70	24	23.90	23.10	23.50	24.00	22.10	23.40	24.30	24.90	25.40	23.40	24.30	24.90	24.30	24.30	24.90	25.40	
Temperatura mínima (C)	11.30	11.60	11.3	11.3	11.6	11.90	12.10	12.00	11.40	11.70	11.8	10.40	11.70	12.30	12.90	13.30	11.40	12.30	12.90	12.30	12.30	12.90	13.30	
	12.00	11.90	11.6	11.6	12.2	12.60	12.50	12.60	11.80	12.10	12.4	10.20	12.40	12.80	13.30	13.90	12.40	12.80	13.30	12.80	12.80	13.30	13.90	
	13.00	13.20	13.1	13	13.4	13.70	13.70	13.90	13.10	13.30	13.7	11.80	13.50	14.10	14.90	15.30	13.50	14.10	14.90	14.10	14.10	14.90	15.30	
	14.60	14.70	14.7	14.5	14.7	15.10	15.40	15.30	14.60	14.90	15.2	12.60	14.90	15.70	16.40	17.00	14.90	15.70	16.40	15.70	15.70	16.40	17.00	
	15.90	16.00	16	15.8	15.9	16.30	16.70	16.70	16.00	16.10	16.5	13.70	16.30	17.20	18.00	18.30	16.30	17.20	18.00	17.20	17.20	18.00	18.30	
	16.80	16.90	16.8	16.7	17	17.30	17.60	17.60	16.90	17.20	17.5	14.60	17.20	18.00	18.70	19.20	17.20	18.00	18.70	18.00	18.00	18.70	19.20	
	16.40	16.50	16.4	16.4	16.6	17.00	17.20	17.20	16.50	16.80	17.1	13.80	16.80	17.40	18.10	18.60	16.80	17.40	18.10	17.40	17.40	18.10	18.60	
	16.30	16.30	16.2	16.2	16.3	16.70	16.90	16.90	16.30	16.50	16.8	13.50	16.50	17.20	18.00	18.40	16.50	17.20	18.00	17.20	17.20	18.00	18.40	
	16.10	16.30	16.1	16.1	16.3	16.70	16.90	16.90	16.20	16.50	16.8	13.30	16.50	17.20	18.00	18.40	16.50	17.20	18.00	17.20	17.20	18.00	18.40	
	15.30	15.40	15.3	15.3	15.5	15.90	16.10	16.10	15.40	15.60	16	13.30	15.80	16.50	17.20	17.70	15.80	16.50	17.20	16.50	16.50	17.20	17.70	
	14.10	14.20	14	13.8	14.2	14.60	14.70	14.70	14.00	14.20	14.6	12.00	14.40	15.00	15.70	16.20	14.40	15.00	15.70	15.00	15.00	15.70	16.20	
	13.00	13.00	12.8	12.6	12.8	13.40	13.60	13.50	12.80	13.20	13.6	11.20	13.20	14.00	14.40	14.80	13.20	14.00	14.40	14.00	14.00	14.40	14.80	

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 18. Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo ncar_ccsm4 para la estación Purulhá

Mes	RCP2.6				RCP4.5				RCP6.0				RCP8.0			
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099
1	76	74	80	80	84	80	74	72	84	84	84	77	75	70	69	68
2	46	43	43	46	46	44	40	41	44	44	44	44	41	42	39	36
3	61	57	60	61	56	52	55	56	58	58	56	54	53	60	51	45
4	59	54	54	56	67	56	51	50	59	52	52	53	53	55	42	34
5	184	187	179	176	170	183	187	166	160	143	143	132	148	179	173	156
6	253	226	265	268	223	217	256	253	210	229	198	198	198	217	217	171
7	270	276	303	288	242	203	233	242	236	221	215	218	218	206	170	161
8	198	203	221	226	203	217	184	170	200	203	168	154	186	144	126	117
9	238	238	259	246	211	185	185	187	209	209	193	182	211	209	158	135
10	229	262	245	216	200	198	206	204	210	225	196	181	229	220	210	200
11	116	117	114	114	118	118	123	124	118	124	121	113	94	107	107	105
12	70	70	72	75	72	65	65	65	70	70	69	66	69	64	62	62
1	20.10	20.40	20.00	19.90	20.00	20.50	21	21.10	19.80	20.20	20.90	21.10	20.50	21.20	22.10	22.60
2	21.50	21.50	21.10	21.00	21.50	22.20	22.5	22.50	21.40	21.70	22.50	22.80	22.00	22.70	23.60	24.60
3	22.70	23.30	23.00	22.80	23.30	23.90	24	24.10	22.90	23.60	24.70	25.10	23.60	24.80	25.80	26.30
4	24.00	24.50	24.40	23.90	24.10	24.70	25.6	25.40	24.10	24.90	25.50	26.20	24.90	26.10	26.80	27.50
5	24.00	24.00	24.10	23.80	24.30	24.60	25	25.10	24.10	24.80	25.30	25.90	24.30	25.70	26.50	27.10
6	23.20	23.50	23.30	23.30	24.20	24.60	24.6	24.60	23.80	24.40	25.30	25.70	23.90	24.90	26.30	27.00
7	22.80	23.10	22.50	22.60	23.10	23.60	23.7	23.90	23.30	23.90	24.50	24.70	23.80	24.30	25.50	26.00
8	23.20	23.30	22.90	22.90	23.30	23.70	23.9	24.10	23.50	23.90	24.60	24.90	24.00	25.00	25.90	26.40
9	23.10	23.20	22.90	22.90	23.50	24.00	24.2	24.30	23.40	23.80	24.60	25.00	23.80	24.60	25.90	26.60
10	22.00	22.10	21.90	22.00	22.40	22.90	23.1	23.20	22.2	22.7	23.5	23.8	22.70	23.40	24.50	25.30
11	21.40	21.40	21.20	21.00	21.60	22.10	22.2	22.20	21.3	21.5	22.4	22.9	21.70	22.40	23.50	24.10
12	20.80	20.90	20.60	20.40	20.60	21.50	21.8	21.60	20.9	21.2	21.8	22.1	21.20	22.10	22.80	23.20
1	11.20	11.40	11.20	11.10	11.4	11.80	11.90	11.90	11.20	11.50	11.70	11.90	11.50	12.10	12.70	13.10
2	11.40	11.30	11.00	11.00	11.5	11.90	11.80	11.90	11.20	11.50	11.80	11.80	11.80	12.20	12.70	13.30
3	12.40	12.60	12.40	12.40	12.7	13.00	13.10	13.20	12.40	12.60	13.10	13.40	12.90	13.50	14.30	14.70
4	13.40	13.50	13.40	13.20	13.5	13.80	14.10	14.10	13.40	13.60	13.90	14.30	13.70	14.50	15.10	15.70
5	14.20	14.30	14.30	14.10	14.1	14.50	15.00	15.00	14.40	14.50	14.90	15.30	14.70	15.60	16.40	16.80
6	15.10	15.20	15.10	14.90	15.2	15.60	15.80	15.80	15.20	15.60	15.90	16.20	15.50	16.30	17.10	17.60
7	14.70	14.80	14.70	14.60	14.9	15.20	15.40	15.50	14.80	14.80	15.10	15.50	15.20	15.80	16.50	17.00
8	14.70	14.80	14.70	14.60	14.7	15.10	15.30	15.30	14.70	15.00	15.30	15.60	15.10	15.70	16.50	17.00
9	14.60	14.70	14.60	14.50	14.7	15.10	15.30	15.30	14.60	14.90	15.30	15.50	15.00	15.70	16.50	16.90
10	14.10	14.30	14.10	14.10	14.3	14.70	14.90	14.90	14.20	14.40	14.80	15.10	14.60	15.30	16.10	16.60
11	12.90	13.00	12.80	12.60	13	13.40	13.50	13.50	12.80	13.00	13.40	13.80	13.20	13.80	14.60	15.10
12	11.80	11.90	11.60	11.40	11.6	12.10	12.30	12.30	11.70	12.00	12.40	12.50	12.00	12.80	13.30	13.70

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. Base de datos RCP.

http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de

2019.

Anexo 19. Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo ncar_ccsm4 para la estación San Cristóbal

Mes	RCP2.6				RCP4.5				RCP6.0				RCP8.0				
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	
1	64	63	67	68	71	67	62	61	71	71	71	65	63	64	59	58	57
2	42	39	39	41	42	40	36	38	40	40	40	38	37	38	36	35	33
3	60	56	58	59	55	51	53	54	55	53	53	52	51	60	50	45	43
4	54	49	48	49	60	51	47	46	53	47	48	48	48	50	38	32	40
5	152	153	149	147	140	150	158	143	132	118	110	110	125	150	146	131	108
6	246	225	264	264	222	216	255	252	210	225	198	198	219	216	162	171	171
7	243	243	270	259	219	184	208	216	216	205	197	203	200	189	154	146	146
8	202	209	231	238	209	226	186	171	207	214	176	159	195	150	131	121	121
9	264	270	290	276	241	209	209	212	238	241	220	206	241	241	180	154	154
10	281	320	300	266	237	242	254	249	251	276	242	220	278	268	259	249	249
11	140	137	135	137	146	146	152	152	138	147	144	138	113	131	132	129	129
12	77	78	79	81	79	73	71	72	77	77	77	73	77	77	70	69	68
1	23.00	23.40	23.00	22.90	23.00	23.50	23.9	24.00	22.80	23.20	23.80	24.10	23.40	24.20	25.10	25.60	27.90
2	24.80	24.80	24.40	24.30	24.70	25.50	25.8	25.80	24.70	25.10	25.80	26.20	25.30	26.00	26.90	27.90	27.90
3	26.20	26.90	26.60	26.30	26.80	27.30	27.4	27.50	26.40	27.20	28.30	28.80	27.10	28.40	29.40	29.90	29.90
4	27.50	27.90	27.80	27.30	27.50	28.00	29	28.70	27.50	28.30	28.90	29.60	28.30	29.60	30.20	30.90	30.90
5	26.90	26.90	26.90	26.70	27.20	27.50	27.8	27.90	27.00	27.60	28.10	28.70	27.20	28.60	29.40	29.90	29.90
6	25.60	25.80	25.60	25.60	26.50	26.90	26.9	27.00	26.10	26.80	27.60	28.00	26.30	27.20	28.60	29.30	29.30
7	25.30	25.60	25.20	25.20	25.70	26.10	26.2	26.40	25.90	26.50	26.50	27.10	27.30	26.30	26.80	28.10	28.60
8	25.70	25.70	25.40	25.40	25.80	26.20	26.4	26.50	26.00	26.40	27.00	27.40	26.50	27.40	28.40	28.90	28.90
9	25.20	25.40	25.00	25.10	25.70	26.20	26.3	26.50	25.60	25.90	26.70	27.10	26.00	26.80	28.00	28.70	28.70
10	24.40	24.40	24.30	24.40	24.80	25.30	25.5	25.50	24.6	25	25.8	26.2	25.00	25.80	26.80	27.60	27.60
11	23.60	23.70	23.50	23.20	23.80	24.40	24.4	24.50	23.6	23.8	24.6	25.2	24.00	24.60	25.70	26.30	26.30
12	23.40	23.40	23.20	23.00	23.20	24.00	24.3	24.20	23.4	23.8	24.3	24.6	23.80	24.60	25.30	25.70	25.70
1	11.40	11.70	11.40	11.40	11.7	12.10	12.20	12.10	11.50	11.80	11.90	12.10	11.80	12.40	13.00	13.40	13.40
2	12.10	12.00	11.60	11.60	12.2	12.60	12.50	12.60	11.80	12.10	12.50	12.50	12.40	12.80	13.40	14.00	14.00
3	13.00	13.20	13.10	13.00	13.4	13.70	13.80	13.90	13.10	13.30	13.70	14.10	13.60	14.10	14.90	15.30	15.30
4	14.50	14.60	14.50	14.30	14.5	14.90	15.20	15.20	14.50	14.70	15.00	15.40	14.80	15.50	16.20	16.80	16.80
5	15.40	15.50	15.50	15.30	15.4	15.80	16.20	16.20	15.60	15.60	16.00	16.40	15.90	16.80	17.60	17.90	17.90
6	16.30	16.40	16.30	16.20	16.5	16.90	17.10	17.10	16.40	16.70	17.00	17.30	16.70	17.50	18.30	18.80	18.80
7	15.80	16.00	15.80	15.80	16	16.40	16.60	16.70	16.00	16.20	16.60	16.80	16.30	16.90	17.60	18.10	18.10
8	15.70	15.80	15.70	15.60	15.7	16.10	16.30	16.30	15.70	16.00	16.30	16.50	16.00	16.70	17.50	17.90	17.90
9	15.60	15.70	15.60	15.50	15.7	16.10	16.30	16.30	15.60	15.90	16.20	16.50	15.90	16.60	17.40	17.90	17.90
10	14.90	15.00	14.90	14.90	15.1	15.50	15.70	15.70	15.00	15.20	15.60	15.80	15.40	16.10	16.90	17.40	17.40
11	13.80	13.90	13.80	13.50	13.9	14.30	14.40	14.50	13.70	13.90	14.30	14.60	14.10	14.70	15.50	15.90	15.90
12	12.90	12.90	12.70	12.60	12.7	13.30	13.50	13.40	12.80	13.10	13.50	13.60	13.10	13.90	14.40	14.80	14.80

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. Base de datos RCP. http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 20. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo ncar_ccsm4 para la estación Purulhá**

Mes	RCP2.6				RCP4.5				RCP6.0				RCP8.0				
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	
Precipitación (mm)	85	84	89	90	94	89	83	81	81	94	94	86	84	86	78	76	76
1	51	48	47	50	51	48	44	46	46	49	49	47	45	47	43	42	40
3	60	56	59	60	56	52	54	55	55	56	54	53	52	60	50	46	43
4	63	57	57	58	70	59	54	52	62	62	54	56	55	59	45	37	45
5	169	170	163	161	154	167	173	155	144	129	122	137	166	158	141	117	117
6	256	234	275	275	228	222	262	259	218	234	203	203	225	222	162	175	175
7	278	281	309	297	250	210	238	247	244	232	222	229	226	213	176	167	167
8	223	231	254	259	231	246	204	189	228	233	191	176	212	165	144	134	134
9	262	265	285	274	236	207	207	207	236	236	216	204	236	233	176	153	153
10	284	324	304	269	241	243	256	251	256	279	243	223	284	271	261	251	251
11	144	142	140	140	148	147	153	153	144	151	147	140	117	134	134	133	133
12	88	89	91	93	91	83	81	82	87	87	87	86	83	87	80	78	77
Temperatura máxima (C)	20.10	20.50	20.10	20.00	20.10	20.60	21	21.1	19.90	20.30	20.90	21.20	20.50	21.30	22.20	22.70	22.70
1	21.50	21.50	21.00	21.00	21.40	22.20	22.5	22.5	21.40	21.80	22.50	22.80	21.90	22.60	23.60	24.60	24.60
2	22.60	23.30	23.00	22.70	23.20	23.80	23.9	24	22.80	23.60	24.60	25.10	23.50	24.80	25.80	26.30	26.30
3	24.00	24.40	24.30	23.80	24.00	24.50	25.5	25.3	23.00	24.90	25.90	26.20	24.90	26.10	26.80	27.50	27.50
4	23.80	23.80	23.90	23.60	24.10	24.40	24.8	24.8	24.8	24.50	24.50	25.00	25.60	24.10	25.60	26.30	26.80
5	22.90	23.10	22.90	22.90	23.90	24.20	24.2	24.3	23.40	24.10	24.90	25.30	23.60	24.50	25.90	26.60	26.60
6	22.50	22.80	22.30	22.40	22.90	23.30	23.4	23.6	23.10	23.70	24.30	24.50	23.50	24.00	25.30	25.70	25.70
7	23.00	23.00	22.70	22.70	23.10	23.50	23.7	23.8	23.30	23.40	24.30	24.60	23.80	24.70	25.70	26.10	26.10
8	22.80	22.90	22.50	22.60	23.20	23.70	23.8	23.9	23.10	23.40	24.20	24.60	23.50	24.30	25.50	26.20	26.20
9	21.70	21.70	21.60	21.70	22.10	22.60	22.8	22.8	21.9	22.3	23.1	23.5	22.40	23.10	24.10	24.90	24.90
10	21.30	21.40	21.20	20.90	21.50	22.10	22.1	22.2	21.3	21.5	22.3	22.9	21.70	22.30	23.40	24.00	24.00
11	21.10	21.10	20.90	20.70	20.90	21.70	22	21.9	21.1	21.5	22	22.3	21.50	22.30	23.00	23.40	23.40
12	10.30	10.60	10.30	10.30	10.6	10.90	11.10	11.00	10.40	10.70	10.80	11.00	10.70	11.30	11.90	12.30	12.30
Temperatura mínima (C)	10.70	10.60	10.20	10.20	10.8	11.20	11.10	11.20	10.40	10.70	11.10	11.10	11.00	11.40	12.00	12.60	12.60
1	11.40	11.60	11.50	11.40	11.8	12.10	12.20	12.30	11.50	11.70	12.10	12.50	12.00	12.50	13.30	13.70	13.70
2	12.50	12.60	12.50	12.30	12.5	12.90	13.20	13.20	12.50	12.70	13.00	13.40	12.70	13.50	14.20	14.80	14.80
3	13.40	13.50	13.50	13.30	13.4	13.80	14.20	14.20	13.60	13.60	14.00	14.40	13.90	14.80	15.60	15.90	15.90
4	14.30	14.40	14.30	14.20	14.5	14.80	15.10	15.10	14.40	14.70	15.00	15.30	14.70	15.50	16.30	16.80	16.80
5	13.80	14.00	13.80	13.80	14	14.40	14.60	14.60	14.00	14.20	14.60	14.80	14.30	14.90	15.60	16.00	16.00
6	13.80	13.90	13.80	13.70	13.8	14.20	14.40	14.40	13.80	14.10	14.40	14.60	14.10	14.80	15.60	16.00	16.00
7	13.70	13.80	13.70	13.60	13.8	14.20	14.40	14.40	13.70	14.00	14.30	14.60	14.00	14.70	15.50	16.00	16.00
8	13.30	13.40	13.30	13.30	13.5	13.90	14.10	14.10	13.40	13.60	14.00	14.20	13.80	14.50	15.30	15.80	15.80
9	12.20	12.30	12.10	11.90	12.3	12.70	12.80	12.80	12.10	12.30	12.70	13.00	12.50	13.10	13.90	14.30	14.30
10	11.30	11.30	11.10	10.90	11.1	11.70	11.90	11.80	11.20	11.50	11.90	12.00	11.50	12.30	12.80	13.20	13.20

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 21. **Tabla con datos de los escenarios climáticos del modelo ncar_ccsm4 para la estación SWAT**

Mes	RCP2.6				RCP4.5				RCP6.0				RCP8.0			
	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099	2020-2049	2040-2069	2060-2089	2070-2099
1	106	105	113	114	118	112	104	100	117	118	109	105	109	97	96	94
2	73	68	67	71	72	68	62	66	70	69	66	64	66	61	59	57
3	93	85	91	93	85	80	82	82	86	83	81	81	81	76	70	67
4	82	73	72	75	89	76	68	67	79	68	71	70	75	58	48	55
5	176	180	167	167	161	175	181	161	149	134	129	143	172	162	145	119
6	228	209	248	245	200	197	234	228	195	212	178	197	197	192	141	152
7	224	229	249	239	202	171	194	202	199	189	181	186	184	176	146	136
8	211	216	240	245	216	230	191	176	213	218	181	167	198	154	135	127
9	273	276	300	285	246	219	219	219	249	249	228	216	246	243	183	159
10	335	387	362	323	284	290	302	299	305	335	290	263	335	323	311	299
11	188	186	184	188	195	190	197	199	190	199	199	182	157	176	176	174
12	124	125	128	132	128	116	114	115	123	123	122	115	123	113	110	110
1	22.00	22.3	21.90	21.90	22.00	22.40	22.9	23.00	21.8	22.20	22.80	23.10	22.40	23.10	24.00	24.60
2	23.80	23.9	23.50	23.30	23.80	24.50	24.8	24.90	23.8	24.10	24.90	25.20	24.30	25.00	26.00	27.00
3	24.90	25.6	25.30	24.90	25.50	26.00	26.2	26.30	25.1	25.80	27.00	27.50	25.80	27.10	28.10	28.70
4	26.10	26.6	26.40	25.90	26.10	26.60	27.7	27.40	26.1	27.00	27.60	28.30	27.00	28.30	28.90	29.70
5	25.90	26	26.00	25.80	26.20	26.50	26.9	26.90	26	26.60	27.10	27.80	26.20	27.80	28.50	28.90
6	24.80	25	24.80	24.80	25.70	26.00	26.1	26.20	25.3	25.90	26.80	27.20	25.50	26.40	27.80	28.50
7	24.30	24.6	24.10	24.20	24.70	25.10	25.2	25.40	24.8	25.5	26.1	26.2	25.30	25.80	27.00	27.40
8	24.90	24.9	24.60	24.60	25.00	25.40	25.6	25.70	25.1	25.6	26.2	26.5	25.60	26.50	27.50	27.90
9	24.50	24.7	24.30	24.40	25.00	25.40	25.6	25.70	24.9	25.2	26	26.3	25.30	26.10	27.20	27.90
10	23.80	23.8	23.70	23.70	24.20	24.70	24.9	24.90	24	24.40	25.20	25.60	24.50	25.20	26.20	27.00
11	23.00	23.1	22.90	22.60	23.20	23.70	23.8	23.90	22.9	23.20	24.00	24.50	23.40	24.00	25.10	25.60
12	22.30	22.4	22.20	22.00	22.10	23.00	23.3	23.70	22.4	22.80	23.30	23.60	22.70	23.60	24.20	24.70
1	11.20	11.50	11.20	11.20	11.5	11.80	12.00	11.90	11.30	11.60	11.70	11.90	11.60	12.20	12.80	13.20
2	11.80	11.70	11.40	11.40	12	12.40	12.30	12.40	11.60	11.90	12.20	12.30	12.20	12.60	13.10	13.70
3	12.80	13.00	12.90	12.80	13.2	13.50	13.50	13.70	12.90	13.10	13.50	13.80	13.30	13.80	14.60	15.10
4	14.20	14.30	14.30	14.10	14.3	14.70	15.00	14.90	14.30	14.50	14.80	15.20	14.50	15.30	15.90	16.50
5	15.60	15.70	15.70	15.50	15.6	16.00	16.40	16.40	15.80	15.80	16.20	16.60	16.10	16.90	17.70	18.00
6	16.40	16.50	16.40	16.30	16.6	16.90	17.20	17.20	16.50	16.80	17.10	17.40	16.80	17.60	18.30	18.80
7	16.00	16.10	16.00	16.00	16.2	16.60	16.80	16.80	16.10	16.40	16.70	17.00	16.50	17.00	17.70	18.20
8	15.90	15.90	15.80	15.80	15.9	16.30	16.50	16.50	15.90	16.10	16.40	16.70	16.20	16.80	17.60	18.00
9	15.80	16.00	15.80	15.80	16	16.40	16.60	16.60	15.90	16.20	16.50	16.80	16.20	16.90	17.70	18.10
10	15.10	15.20	15.10	15.10	15.3	15.70	15.90	15.90	15.20	15.40	15.80	16.00	15.60	16.30	17.00	17.50
11	14.00	14.10	13.90	13.70	14.1	14.50	14.60	14.60	13.90	14.10	14.50	14.80	14.30	14.90	15.60	16.10
12	12.80	12.80	12.60	12.40	12.6	13.10	13.40	13.30	12.60	13.00	13.40	13.50	12.90	13.80	14.20	14.60

Fuente: Grupo Consultivo de Investigación Agrícola Internacional. *Base de datos RCP*.
http://www.ccafs-climate.org/statistical_downscaling_delta_cmip5/. Consulta: 24 de julio de 2019.

Anexo 22. **Matriz de capacidad de uso de la tierra para la región Tierras Calizas Altas del Norte**

PENDIENTES (%)					
PROFUNDIDAD DEL SUELO (cm)	< 8	8 - 16	16 - 32	32 - 55	> 55
>90	A	A/Am	A m	Ap	F/Fp
50-90	A	A/Am	Am/Aa	Ap/F	F/Fp
20-50	Am/Aa	Am/Aa	Ss/Ap	F	Fp
<20	Aa/Ss	Ss/Ap	Ss/F	Fp	Fp

Fuente: INAB. *Clasificación de tierras por capacidad de uso.*

http://portal.inab.gob.gt/images/centro_descargas/manuales/Clasificaci%C3%B3n%20de%20tierras%20por%20capacidad%20de%20uso.pdf. Consulta: 4 de enero de 2020.

Anexo 23. Características generales de la población, Censo 2002

POBLACIÓN

A.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA POBLACIÓN. CENSO 2002.

Cuadro A1- Población total, sexo, grupos de edad y área urbana y rural, según departamento y municipio.

Departamento y municipio	Población total	Sexo		Grupos de edad (en años cumplidos)						Área	
		Hombres	Mujeres	De 0 a 6	De 7 a 14	De 15 a 17	De 18 a 29	De 30 a 59	De 60 a 64	De 65 y más	Urbana
Quiché	655,510	317,096	338,414	161,804	157,160	43,166	259,669	11,186	22,525	161,591	493,919
Santa Cruz del Quiché	62,369	29,881	32,488	12,952	13,642	3,980	27,868	1,176	2,751	20,870	41,499
Chiché	19,762	9,158	10,604	5,028	4,808	1,169	7,630	380	747	2,167	17,595
Chinique	8,009	3,744	4,265	1,833	1,951	540	3,143	145	397	2,290	5,719
Zacualpa	22,846	10,791	12,055	5,588	5,796	1,516	8,744	414	788	6,615	16,231
Chajul	31,780	15,737	16,043	8,614	7,744	2,027	11,991	494	910	10,085	21,685
Chichicastenango	107,193	51,108	56,085	25,546	24,720	7,137	44,187	1,769	3,834	45,549	61,644
Patzún	4,695	2,190	2,505	1,050	1,112	322	1,934	92	185	853	3,842
San Antonio Itotenango	17,204	7,825	9,379	4,524	4,265	1,066	6,489	234	626	1,762	15,442
San Pedro Jocopilas	21,782	10,461	11,321	5,396	5,349	1,402	8,459	410	766	948	20,834
Cunén	25,595	12,068	13,527	7,112	6,455	1,629	9,169	422	808	6,198	19,397
San Juan Cotzal	20,050	9,611	10,439	5,168	4,493	1,307	7,948	431	703	9,037	11,013
Joyabaj	52,498	24,985	27,513	12,721	13,184	3,445	20,500	934	1,714	9,752	42,746
Nejeb	53,617	26,059	27,558	14,344	13,141	3,145	20,383	897	1,707	18,484	35,133
San Andrés Sajcabajá	19,035	9,356	9,679	4,355	4,526	1,264	7,890	343	657	1,875	17,160
Uspantán	41,892	21,236	20,656	10,525	9,927	2,897	16,477	681	1,385	4,198	37,694
Sacapulas	35,706	17,278	18,428	8,610	8,882	2,450	13,793	620	1,351	8,148	27,558
San Bartolomé Jocotenango	8,639	4,124	4,515	2,317	2,061	522	3,326	157	296	1,312	7,327
Canillá	9,073	4,352	4,721	2,013	2,212	598	3,571	215	464	1,498	7,575
Chicamán	25,280	12,443	12,837	6,491	5,836	1,722	9,927	434	870	1,893	23,387
Ixcán	61,448	31,318	30,130	16,190	15,389	4,512	23,299	795	1,263	6,005	55,443
Pochamán	7,037	3,371	3,666	1,427	1,667	516	2,941	143	343	2,042	4,995
Baja Verapaz	215,915	105,187	110,728	48,991	49,453	15,219	88,686	3,791	9,775	58,962	156,953
Salamá	47,274	23,149	24,125	9,805	10,384	3,354	20,613	824	2,294	18,080	29,194
San Miguel Chicaj	23,201	11,194	12,007	5,273	5,543	1,689	9,367	360	969	9,439	13,762
Rabinal	31,168	14,634	16,534	6,995	7,404	2,139	12,139	663	1,828	9,446	21,722
Cubulco	43,639	21,356	22,283	10,306	10,009	3,103	17,696	769	1,756	8,025	35,614
Granados	11,338	5,573	5,765	2,269	2,538	802	4,816	284	629	847	10,491
El Chol	8,460	4,110	4,350	1,779	1,947	594	3,459	183	498	1,999	6,461
San Jerónimo	17,469	8,617	8,852	3,634	3,823	1,247	7,660	299	806	6,504	10,965
Purullán	33,366	16,554	16,812	8,930	7,805	2,291	12,936	409	995	4,622	28,744
Alta Verapaz	776,246	387,219	389,027	190,234	172,655	54,483	320,570	11,765	26,539	163,012	613,234
Cobán	144,461	71,678	72,783	32,610	31,162	10,295	63,572	2,173	4,649	47,202	97,259
Santa Cruz Verapaz	19,012	9,386	9,626	4,728	4,174	1,269	7,910	287	644	5,004	14,008
San Cristóbal Verapaz	43,336	21,352	21,984	10,315	9,660	2,885	18,155	740	1,581	16,445	26,891
Tactic	24,535	11,852	12,683	5,549	5,408	1,608	10,652	385	933	7,852	16,683
Tamahú	12,685	6,315	6,370	3,280	2,948	914	4,920	180	443	918	11,767
Tucurú	28,421	14,348	14,073	7,376	6,540	1,971	11,056	433	1,045	3,314	25,107
Panzós	44,770	22,593	22,177	11,967	10,399	3,035	17,234	715	1,420	16,005	28,765
Senahú	54,471	27,455	27,016	14,178	11,927	3,705	21,997	801	1,863	4,399	50,072
San Pedro Carchá	148,344	73,571	74,773	34,339	31,968	11,104	62,942	2,255	6,036	11,941	136,403
San Juan Chamelco	38,973	19,138	19,835	8,819	8,174	2,643	16,929	754	1,654	9,626	29,347
Langún	16,546	8,237	8,309	4,235	3,730	1,204	6,634	235	508	1,714	14,832
Cahabón	42,949	21,613	21,336	11,373	9,621	2,856	17,274	588	1,237	4,254	38,695
Chisec	69,325	35,335	33,990	19,018	16,667	4,810	26,318	866	1,746	12,775	56,550
Chahal	16,853	8,459	8,394	4,310	3,967	1,178	6,704	250	444	3,894	12,959
Fray Bartolomé de Las Casas	44,538	22,357	22,181	11,305	10,195	3,150	17,791	690	1,407	5,947	38,591
Santa Catalina La Tinta	27,027	13,530	13,497	6,832	6,215	1,856	10,782	413	929	11,722	15,305
Petén	366,735	187,228	179,507	88,726	87,342	25,351	148,959	5,381	10,976	110,399	256,336
Flores	30,897	16,118	14,779	6,150	6,454	2,092	14,572	486	1,143	16,122	14,775
San José	3,584	1,855	1,729	828	837	229	1,505	51	134	1,133	2,451
San Benito	29,926	14,889	15,037	6,389	6,530	1,990	13,537	432	1,048	24,792	5,134
San Andrés	20,295	10,619	9,676	5,005	4,943	1,376	8,132	283	556	5,740	14,555
La Libertad	67,252	34,828	32,324	17,253	16,888	4,575	25,851	966	1,699	7,112	60,140
San Francisco	8,917	4,589	4,328	2,074	2,083	562	3,713	158	327	3,485	5,432
Santa Ana	14,602	7,473	7,129	3,610	3,690	1,036	5,574	223	469	6,215	8,387
Dolores	32,404	16,328	16,076	7,979	8,141	2,276	12,540	488	980	8,016	24,388
San Luis	48,745	24,614	24,131	12,199	11,954	3,516	19,074	670	1,332	5,721	43,024
Sayaxché	55,578	28,521	27,057	14,619	13,401	3,884	21,864	713	1,297	7,322	48,256
Melchor de Mencos	18,872	9,436	9,436	4,032	4,393	1,367	8,018	334	728	10,299	8,573
Poptún	35,663	17,858	17,805	8,588	8,028	2,448	14,779	557	1,263	14,442	21,221

Guatemala, INE, Censos 2002: XI de Población y VI de Habitación.

Fuente: INE. Censo 2002: XI de Población y VI de Habitación. p. 72.

Anexo 24. **Características generales de la población para Alta Verapaz, Censo 2018**

Población		Población total por grupos de edad. Datos del departamento de Alta Verapaz																	10 o más	Urbana	Rural											
		0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40-44	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-74	75-79	80-84				85-89	90-94	95-99								
Municipio	total	Hombres	Mujeres	212421	103927	108494	75253	26567	24311	25230	21176	17677	15250	13059	10416	8018	6384	5492	4605	3669	2337	1552	919	501	157	38	10	212047	374			
1601	Cobán	103927	108494	75253	26567	24311	25230	21176	17677	15250	13059	10416	8018	6384	5492	4605	3669	2337	1552	919	501	157	38	10	212047	374						
1602	Sanja	15722	16320	4118	4047	3961	3878	3336	2625	2118	1957	1503	1084	800	736	602	492	310	225	143	76	24	7	0	8630	23412						
1603	San																															
1604	Cristóbal	34072	34747	9628	9339	8568	8002	6632	5510	4419	3923	2850	2209	1724	1737	1434	1049	701	533	327	177	43	13	1	20961	47858						
1604	Tactic	18331	19721	4796	4658	4341	3870	3191	2675	2346	1800	1427	1122	878	739	594	392	275	183	113	28	10	1	15213	22839							
1605	Tamahú	9990	10054	2777	2725	2544	2410	2061	1590	1323	1066	834	648	530	413	347	290	177	104	90	53	8	3	1	3910	16074						
1606	Tucurú	43473	21736	21737	6233	6136	5438	5178	4223	3393	2725	2325	1820	1344	1099	911	785	603	416	259	175	84	28	8	0	4064	39409					
1607	Panós	71846	36243	35603	11090	10704	8882	8600	6954	5306	4379	3727	2952	2205	1833	1509	1220	997	582	448	273	140	35	10	0	22068	49778					
1608	Senahú	91974	46017	45957	13560	12604	10997	11340	8952	6867	5904	5366	3925	3003	2310	2151	1667	1370	900	527	378	202	58	10	3	12084	79890					
1609	San																															
	Pedro Carchá	235275	116267	119008	31805	30472	27424	27004	22728	18702	17131	15261	10688	7692	6181	5272	4685	4020	2562	1570	1226	598	195	54	5	16353	218922					
1610	San Juan																															
	Chamelco	57456	28008	29408	7508	6759	6367	5613	4617	3986	3643	2894	1978	1518	1429	1208	1033	704	485	305	159	58	9	0	13264	44192						
1611	Lanquín	24099	12172	11927	3167	3238	2773	3013	2423	1923	1659	1483	1077	773	606	572	477	352	237	145	104	67	9	0	1	2969	21130					
1612		64911	32516	32395	8405	8325	7868	8469	6714	5135	4205	3971	2983	2164	1714	1500	1192	889	593	360	270	105	42	4	3	3492	61419					
1613	Chisec	84553	43042	41511	12438	12180	11104	10625	8566	6587	5497	4394	3332	2471	1818	1617	1368	1069	647	392	270	142	28	5	3	9884	74669					
1614	Chahal	26644	13270	13374	3722	3574	3004	3232	2816	2127	1763	1549	1154	886	761	640	470	344	251	175	102	60	9	5	0	4244	22400					
1615	Fray																															
	Barro Colorado	66141	32975	33166	9164	9093	8294	7720	6473	4953	4380	3779	3137	2289	1624	1369	1191	1067	682	420	310	135	50	11	0	3935	62206					
1616	Sanja																															
	Catalina	40516	20135	20381	5661	5482	5096	4854	3868	3185	2713	2417	1768	1322	1008	906	742	610	393	252	185	77	24	9	4	20552	19964					
1617	Raxruhá	36832	18475	18357	5170	5068	4593	4610	3775	2753	2359	2088	1571	1206	877	725	635	523	343	242	179	79	20	6	0	6038	30794					

Fuente: INE, Censos 2018: XII de Población y VII de Vivienda

Fuente: INE. *Censo 2018: XII de Población y VII de Habitación.*
<https://www.censopoblacion.gt/explorador>. [Consulta: 20 de mayo de 2020.]

Anexo 25. **Características generales de la población para Purulhá, Baja Verapaz, Censo 2018**

Características generales de la población																										
Población total por grupos de edad. Datos del municipio de Purulhá, Baja Verapaz																										
Municipio	Población total	Hombres	Mujeres	0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40-44	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-74	75-79	80-84	85-89	90-94	95-99	100 o más	Urbana	Rural
1508-Purulhá	56822	28250	28572	8913	8441	7083	6813	5715	4292	3532	2933	2241	1647	1303	1112	974	783	474	272	186	98	31	9	0	7901	48921

Fuente: INE, Censos 2018: XII de Población y VII de Vivienda

Fuente: INE. *Censo 2018: XII de Población y VII de Habitación.*

<https://www.censopoblacion.gt/explorador>. [Consulta: 20 de mayo de 2020.]

Anexo 26. Datos de generación Hidroeléctrica RENACE

	RENAICE	RENAICE 2	RENAICE 3	RENAICE 4
Caudal a Turbinar (Caudal de diseño)	36	40	48	13
Potencia Efectiva	66.53	113.96	66	56.54

Año	Planta	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE		OCTUBRE		NOVIEMBRE		DICIEMBRE		TOTAL		
		ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH
	19	16.33	8.98	6.58	6.53	8.20	13.16	12.41	7.83	17.86	26.41	24.83	18.39	167.51														
	18	25.11	22.98	10.7	8.65	10.35	28.15	23.23	13.61	19.65	26.65	19	17.4	225.49														
	17	21.66	11.39	13.44	7.58	7.61	34.01	32.91	31.78	35.86	43.73	36.63	25.75	302.31														
	16	20.88	21.68	12.56	10.21	7.57	20.55	20.87	31.60	36.09	28.28	31.29	18.88	260.5														
	15	26.70	19.74	11.56	6.65	7.41	14.18	15.11	8.94	11.65	26.17	34.14	36.04	218.3														
	14	22.83	13.87	17.83	9.29	34.88	38.22	20.45	18.76	38.00	44.17	36.92	36.31	331.33														
	13	25.491	16.973	12.093	9.309	12.889	33.540	26.77	21.93	42.69	32.83	36.30	34.90	305.72														
	12	24.253	20.545	16.413	13.187	14.973	25.745	21.57	29.60	22.61	35.68	21.95	17.60	264.12														
	11	15.586	14.283	10.251	5.196	6.935	15.738	32.18	33.97	43.78	44.59	30.56	23.53	276.61														
	Promedio	22.09	16.72	12.38	8.51	12.31	24.81	22.83	22.00	29.80	34.28	30.18	25.42	261.34														
	Tiempo de operación promedio al mes (horas)	332.09	251.26	186.08	127.89	185.07	372.91	343.19	330.72	447.91	515.24	453.63	382.09	3928.09														

Año	Planta	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE		OCTUBRE		NOVIEMBRE		DICIEMBRE		TOTAL		
		ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH
	19	31.50	16.74	12.07	10.09	19.57	24.72	24.59	14.15	37.20	52.80	50.23	38.28	331.94														
	18	44.98	38.62	19.47	11.86	20.81	50.7	49.52	26.99	39.03	59.15	35.99	32.44	429.53														
	17	39.62	21.51	22.39	14.01	18.97	56.52	61.85	60.91	62.61	77.30	64.95	46.32	546.95														
	16	38.70	25.62	17.98	12.99	18.16	42.66	44.00	39.33	50.62	60.27	52.20	38.21	440.75														
	Promedio	38.70	25.62	17.98	12.99	18.16	42.66	44.00	39.33	50.62	60.27	52.20	38.21	440.75														
	Tiempo de operación promedio al mes (horas)	339.61	224.84	157.76	113.97	159.40	374.37	386.07	345.16	444.19	528.85	458.06	335.32	3867.59														

Año	Planta	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE		OCTUBRE		NOVIEMBRE		DICIEMBRE		TOTAL		
		ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	ENERGÍA GWH	
	19	16.74	8.58	5.82	5.00	11.53	15.57	15.47	7.96	23.99	31.41	28.37	20.19	190.63														
	18	25.21	23.79	9.72	5.8	11.05	30.18	30.01	17.69	24.5	33.38	21.29	17.27	249.89														
	17	21.29	11.84	14.77	6.84	10.21	34.22	36.44	34.94	33.46	41.67	34.67	24.62	304.98														
	16	21.08	14.74	10.10	5.88	10.93	26.66	27.31	20.19	27.31	35.48	28.11	20.70	248.50														
	Promedio	21.08	14.74	10.10	5.88	10.93	26.66	27.31	20.19	27.31	35.48	28.11	20.70	248.50														
	Tiempo de operación promedio al mes (horas)	319.43	223.32	153.09	89.08	165.63	403.87	413.72	305.97	413.85	537.65	425.93	313.57	3765.11														

Fuente: RENACE. Información hidroeléctrica RENACE. p. 1.

Anexo 27. **Datos de generación Hidroeléctrica RENACE**

	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE		OCTUBRE		NOVIEMBRE		DICIEMBRE		TOTAL	
	ENERGÍA GWH		ENERGÍA GWH		ENERGÍA GWH		ENERGÍA GWH		ENERGÍA GWH		ENERGÍA GWH		ENERGÍA GWH		ENERGÍA GWH		ENERGÍA GWH		ENERGÍA GWH		ENERGÍA GWH		ENERGÍA GWH		ENERGÍA GWH	
19 RENACE 4	7.26		7.11		4.28		3.99		10.47		12.82		9.90		7.22		13.96		18.66		15.90		13.83		125.40	
Promedio	7.26		7.11		4.28		3.99		10.47		12.82		9.90		7.22		13.96		18.66		15.90		13.83		125.40	
Tiempo de operación promedio al mes (horas)	109.98		107.68		64.83		60.42		138.69		194.30		150.04		109.39		211.48		282.76		240.87		209.57		1900.01	

Fuente: RENACE. *Información hidroeléctrica RENACE*. p. 2.

Anexo 28. Datos de caudal turbinado promedio mensual Hidroeléctrica CHICHAIC



FORMA: 74103.03-A

RESOLUCIÓN UIP-R-195-2020

UNIDAD DE INFORMACIÓN PÚBLICA INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACIÓN –INDE- EN EJERCICIO DE LAS FUNCIONES QUE LE CONFIERE EL DECRETO No. 57-2008 “LEY DE ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA”, DEL CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA. En la ciudad de Guatemala el veinticuatro de septiembre del dos mil veinte.

Se tiene por recibida la solicitud enviada vía electrónica el 14 de septiembre 2020, por la señorita Ana Isabel Sánchez Girón, mediante la cual solicita la siguiente información: “de la hidroeléctrica Chichaic, caudal turbinado promedio por mes”. **CONSIDERANDO:** Que la Unidad de Información Pública requirió la información solicitada a la Empresa de Generación de Energía Eléctrica; mediante oficio No. UIP-O-302-443-2020 de fecha 16 de septiembre del 2020 y en atención a la solicitud la División de Programación y Medio Ambiente de la Empresa de Generación de Energía Eléctrica, envía la información solicitada en Providencia No. P-1000-PROG-058-2020 de fecha 23 de septiembre del 2020. **CONSIDERANDO:** Que el Artículo 15 de la Ley de Acceso a la Información Pública establece: “Uso y difusión de la información. Los interesados tendrán responsabilidad, penal y civil por el uso, manejo o difusión de la información pública a la que tengan acceso, de conformidad con esta ley y demás leyes aplicables”. **CONSIDERANDO:** Que el artículo 18 del mismo cuerpo legal establece: Gratuidad. El acceso a la información pública será gratuito, para efectos de análisis y consulta en las oficinas del sujeto obligado. La consulta de la información pública se registrará por el principio de sencillez y gratuidad. Sólo se cobrarán los gastos de reproducción de la información. La reproducción de la información habilitará al Estado a realizar el cobro por un monto que en ningún caso será superior a los costos del mercado y que no podrán exceder de los costos necesarios para la reproducción de la información. **CONSIDERANDO:** Que el Artículo 42 del mismo cuerpo legal establece: Tiempo de Respuesta: Presentada y admitida la solicitud, la Unidad de Información Pública donde se presentó, debe emitir resolución dentro de los diez días siguientes y el Artículo 45 del mismo cuerpo legal establece: A toda solicitud de información Pública deberá recaer una resolución por escrito. (...) La información se proporcionará en el estado en que se encuentre en posesión de los sujetos obligados. La obligación no comprenderá el procesamiento de la misma, ni el presentarla conforme al interés del solicitante. **CITA DE LEYES:** 15, 16, 18, 20, 38, 41, 42 numeral 1 y Artículo 45 de la Ley de Acceso a la Información Pública. **POR TANTO:** Con base en lo considerado y leyes citadas, esta Unidad **RESUELVE:** I) Entregar la información enviada por la División de Programación y Medio Ambiente de la Empresa de Generación de Energía Eléctrica del caudal turbinado promedio mensual (m³/s) de Hidroeléctrica Chichaic contenida en el siguiente cuadro:

ENE	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DIC
2.7	2.4	2	1.6	1.5	2.2	2.4	2.6	2.8	2.8	2.7	2.7

II) NOTIFÍQUESE.

Licda. Blanca Victoria Gómez Pirir
Jefe Interina Unidad de Información Pública

Vo.Bo:
Lic. Mario Enrique Campos Trujillo
GERENTE DE COMUNICACIÓN CORPORATIVA

7a. Avenida 2-29, Zona 9. Edificio La Torre. Guatemala, C. A.
PBX: (502)2422-1800 • www.inde.gob.gt

EGEE ETCEE ECOE

Fuente: Instituto Nacional de Electrificación. *Información de hidroeléctrica CHICHAIC*. p. 1.

Anexo 29. Datos de generación Hidroeléctrica CHICHAIC



EMPRESA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA
I.N.D.E.

Información de hidroeléctrica Chichaic.

- Generación eléctrica mensual promedio (MWh)0

Respuesta:

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PROM.	301	252	228	172	158	204	273	295	312	324	300	305

- Tiempo de operación promedio al mes (horas)

Respuesta:

Normalmente la planta opera todas las horas del mes y del año

- Caudal a turbinar (m3/s)

Respuesta:

Turbinamiento máximo: 4.2 m3/s

- Caída bruta (m)

Respuesta:

25 m

- Potencia efectiva (MW)

Respuesta:

0.5m MW

SUPERINTENDENCIA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS E.G.E.E
7 AVENIDA 2-29 ZONA 9, SOTANO 2 INDE PBX. 2422-1928

Fuente: Instituto Nacional de Electrificación. *Información de hidroeléctrica CHICHAIC*. p. 2.