

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS
MODALIDAD VIRTUAL

**ESTIMACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL
USO DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN LA SUBCUENCA DEL
RÍO TECULUTÁN, ZACAPA, GUATEMALA**

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE LA DIVISIÓN
DE EDUCACIÓN Y LA ESCUELA DE POSGRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
GRADO DE:

MÁSTER EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

GABRIELA MARÍA FRANCO ROSSAL

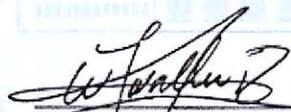
TURRIALBA, COSTA RICA

AÑO
2022

Este trabajo de final de graduación ha sido aceptado en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobado por el Comité Examinador de la estudiante, como requisito para optar por el grado de

MÁSTER EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

FIRMANTES:



William Jefferson Watler Reyes

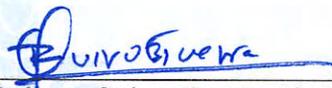
William Watler Reyes, M.Sc.

Asesor Principal del Trabajo de Graduación



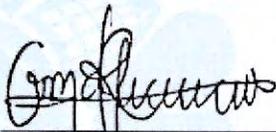
Manuel Basterrechea Díaz, Ph.D.

Miembro del Comité Asesor de Trabajo de Graduación



Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.

Decano de la Escuela de Posgrado



Gabriela María Franco Rossal

Candidata

DEDICATORIA

A Nina, quien deseo que siempre se sienta orgullosa de mí, su mamá.

AGRADECIMIENTO

A:

Dios, por brindarme la vida y llenarla de bendiciones.

Mi familia, por acompañarme en cada paso que doy.

Mi Comité Asesor, por el apoyo constante desde el día en que inicié este estudio; por su entrega y dedicación para ayudarme a resolver cualquier obstáculo que encontré en la realización del mismo, y por las enseñanzas que me ha brindado.

A la Municipalidad de Teculután, especialmente su Unidad de Gestión Ambiental Municipal (UGAM); la Unidad de Cambio Climático del Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH); Fundación Defensores de la Naturaleza y WWF Guatemala por proporcionarme la información que fue fundamental para desarrollar este estudio.

ÍNDICE

RESUMEN.....	XI
ABSTRACT	XII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA	2
1.3 IMPORTANCIA	3
1.4 OBJETIVO GENERAL	4
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
2 MARCO REFERENCIAL.....	5
2.1 HIDROLOGÍA	5
2.2 EL CICLO HIDROLÓGICO	5
2.3 LA CUENCA HIDROGRÁFICA	6
2.3.1 <i>Delimitación de la cuenca hidrográfica</i>	7
2.3.2 <i>Elementos de la cuenca hidrográfica</i>	7
2.3.3 <i>Zonificación de la cuenca hidrográfica por su altitud</i>	7
2.4 EL RECURSO HÍDRICO, UN FACTOR INTEGRADOR	8
2.5 OFERTA HÍDRICA.....	10
2.6 DEMANDA DE AGUA	10
2.6.1 <i>Demanda de agua para consumo humano</i>	11
2.7 VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO CLIMÁTICO	11
2.7.1 <i>Escenarios de cambio climático</i>	12
2.8 EFECTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS.....	12
3 METODOLOGÍA	16
3.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	16
3.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	17
3.2.1 <i>Aspectos biofísicos de la subcuenca</i>	17
3.2.2 <i>Aspectos socioeconómicos de la subcuenca</i>	29
3.3 PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS	32
3.3.1 <i>Fase I: Recopilación de información</i>	33
3.3.2 <i>Fase II: Procesamiento de datos y verificación de información</i>	35
3.3.3 <i>Fase III: Desarrollo de la modelación de la subcuenca</i>	41
4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
4.1 ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA ACTUAL DE LA SUBCUENCA DEL RÍO TECULUTÁN.....	50
4.2 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA ACTUAL DE LA SUBCUENCA DEL RÍO TECULUTÁN.....	51
4.3 ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA FUTURA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO TECULUTÁN	52
4.4 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA FUTURA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO TECULUTÁN	58
4.5 ESTIMACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA SOBRE EL USO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO TECULUTÁN	62
5 CONCLUSIONES	66
6 RECOMENDACIONES	67
7 LITERATURA CITADA.....	68
8 ANEXOS.....	72

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 – Parámetros morfométricos de la subcuenca del río Teculután.....	8
Cuadro 2 – Departamentos y municipios en la subcuenca del río Teculután.	17
Cuadro 3 – Zonas de vida de la subcuenca del río Teculután.	18
Cuadro 4 – Taxonomía de suelos de la subcuenca del río Teculután.....	25
Cuadro 5 – Capacidad de uso de la tierra de la subcuenca del río Teculután.....	27
Cuadro 6 – Cobertura y uso de la tierra de la subcuenca del río Teculután.	28
Cuadro 7 – Población de la subcuenca del río Teculután.....	29
Cuadro 8 – Organizaciones sociales presentes en la subcuenca del río Teculután.....	31
Cuadro 9 – Resumen de información recopilada.	34
Cuadro 10 – Estimación de la dotación de agua para consumo humano en el municipio de Teculután.....	37
Cuadro 11 – Cultivos importantes bajo riego en la subcuenca del río Teculután.	37
Cuadro 12 – Requerimientos de riego y extensión de los principales cultivos en la subcuenca del río Teculután.....	38
Cuadro 13 – Volumen de agua utilizado por cada estanque de peces en la subcuenca del río Teculután.....	39
Cuadro 14 – Trayectorias de concentración representativas (RCP) analizadas	41
Cuadro 15 – Parámetros de uso del suelo del método de humedad del suelo de WEAP.....	42
Cuadro 16 – Parámetros climáticos del método de humedad del suelo de WEAP.....	43
Cuadro 17 – Categorías de suelo original y agrupación utilizada en el modelo de la subcuenca del río Teculután.	43
Cuadro 18 – Comparación entre los caudales modelados y observados del río Teculután, período 2000-2016 (expresados en millones de metros cúbicos).....	47
Cuadro 19 – Extensión y requerimientos de riesgo actuales y futuras de los principales cultivos en la subcuenca del río Teculután.....	48
Cuadro 20 – Cantidad actual y futura de estanque de peces en la subcuenca del río Teculután.....	49
Cuadro 21 – Caudales medios mensuales del río Teculután.....	50
Cuadro 22 – Demanda actual de agua de la subcuenca del río Teculután.....	51
Cuadro 23 – Caudal estimado del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, para el período 2022-2032 (expresado en millones de metros cúbicos).....	54
Cuadro 24 – Caudal estimado del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, para el período 2033-2050 (expresado en millones de metros cúbicos).....	55
Cuadro 25 – Caudales mensuales estimados del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, para el período 2022-2050 (expresado en millones de metros cúbicos).....	57
Cuadro 26 – Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután al 2032.....	59
Cuadro 27 – Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután al 2050.....	60
Cuadro 28 – Demanda de agua para consumo humano no cubierta en la subcuenca del río Teculután, 2022-2050 (expresado en metros cúbicos).	62
Cuadro 29 – Demanda de agua para consumo humano no cubierta a nivel mensual en la subcuenca del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, para el período 2022-2050 (expresado en metros cúbicos).	64
Cuadro 30 – Población desabastecida a nivel mensual en la subcuenca del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, para el período 2022-2050.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Precipitación anual (mm) en la línea base de la subcuenca del río Teculután	13
Figura 2 – Precipitación anual (mm) en escenario RCP 4.5 de la subcuenca del río Teculután	13
Figura 3 – Precipitación anual (mm) en escenario RCP 8.5 de la subcuenca del río Teculután	14
Figura 4 – Temperatura media (°C) en la línea base de la subcuenca del río Teculután.....	14
Figura 5 – Temperatura media (°C) en escenario RCP 4.5 de la subcuenca del río Teculután.....	15
Figura 6 – Temperatura media (°C) en escenario RCP 8.5 de la subcuenca del río Teculután.....	15
Figura 7 – Diagrama metodológico.	33
Figura 8 – Resultado de la calibración del modelo, utilizando los datos climáticos de la estación Pasabien.	45
Figura 9 – Resultado de la calibración del modelo, utilizando los datos climáticos de la estación Los Albores.	46
Figura 10 – Resultado de la calibración del modelo, utilizando los datos climáticos satelitales.	47
Figura 11 – Horizonte de tiempo definido en la herramienta WEAP.	86
Figura 12 – Delineación del cauce del río Teculután en la herramienta WEAP	86
Figura 13 – Ubicación de los sitios de demanda de la subcuenca Teculután en la herramienta WEAP	87
Figura 14 – Ubicación del centroide de la subcuenca Teculután y de la estación Las Minas en la herramienta WEAP	87
Figura 15 – Registro del uso del suelo de la subcuenca Teculután en la herramienta WEAP	88
Figura 16 – Registro de los datos climáticos de la subcuenca Teculután en la herramienta WEAP	88
Figura 17 – Ecuaciones de los índices de calibración Nash y Bias	89

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 – Ubicación geográfica de la subcuenca del río Teculután.	16
Mapa 2 – Zonas de vida de la subcuenca del río Teculután.....	18
Mapa 3 – Red hídrica de la subcuenca del río Teculután.	22
Mapa 4 – Taxonomía de suelos de la subcuenca del río Teculután.	25
Mapa 5 – Capacidad de uso de la tierra de la subcuenca del río Teculután.	27
Mapa 6 – Cobertura y uso de la tierra de la subcuenca del río Teculután.....	29
Mapa 7 – Poblados dentro de la subcuenca del río Teculután	30
Mapa 8 – Ubicación de las estaciones meteorológicas cercanas a la subcuenca del río Teculután	40

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 – Temperatura promedio anual de la subcuenca del río Teculután (1994 a 2021).	19
Gráfica 2 – Temperatura promedio, máxima y mínima mensual de la subcuenca del río Teculután (1994 a 2021).	20
Gráfica 3 – Precipitación acumulada anual de la subcuenca del río Teculután (1994 a 2021).	21
Gráfica 4 – Precipitación promedio, máxima y mínima mensual de la subcuenca del río Teculután (1994 a 2021).	21
Gráfica 5 – Caudal promedio anual por año hidrológico del río Teculután (1994 a 2017).	23
Gráfica 6 – Caudales medios, máximos y mínimos del río Teculután (1994 a 2017).	24
Gráfica 7 – Caudales medios mensuales del río Teculután.	50
Gráfica 8 – Demanda de agua por tipo de la subcuenca del río Teculután.	51
Gráfica 9 – Demanda de agua para riego de cultivos permanentes de la subcuenca del río Teculután.	52
Gráfica 10 – Demanda de agua para riego de cultivos anuales de la subcuenca del río Teculután.	52
Gráfica 11 – Promedio mensual de precipitación proyectada para el período 2022-2050, en los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5 para la subcuenca del río Teculután.	53
Gráfica 12 – Promedio mensual de temperatura proyectada para el período 2022-2050, en los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5 para la subcuenca del río Teculután.	53
Gráfica 13 – Caudal estimado del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, período 2022-2032.	55
Gráfica 14 – Caudal estimado del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, período 2033-2050.	56
Gráfica 15 – Caudal promedio mensual estimado del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, 2022-2050.	58
Gráfica 16 – Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután, 2022 – 2032, escenario RCP 4.5	59
Gráfica 17 – Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután, 2022 – 2032, escenario RCP 8.5	60
Gráfica 18 – Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután, 2033 – 2050, escenario RCP 4.5	61
Gráfica 19 – Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután, 2033 – 2050, escenario RCP 8.5	61
Gráfica 20 – Demanda de agua para consumo humano no cubierta en la subcuenca del río Teculután al año, período 2022 – 2050.	63
Gráfica 21 – Demanda de agua para consumo humano no cubierta a nivel mensual en la subcuenca del río Teculután al año, período 2022 – 2050.	64

LISTA DE ACRÓNIMOS Y SIGLAS

ARTESIM	Asociación Río Teculután Sierra de las Minas
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
DMP	Dirección Municipal de Planificación
FDN	Fundación Defensores de la Naturaleza
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ICC	Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático
IGN	Instituto Geográfico Nacional
INE	Instituto Nacional de Estadística
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
MPSAS	Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social
OMS	Organización Mundial de la Salud
PDM	Plan de Desarrollo Municipal
RCP	Trayectorias de Concentración Representativas
UGAM	Unidad de Gestión Ambiental Municipal

ha hectárea

km² kilómetros cuadrado

mm milímetro

msnm metros sobre el nivel del mar

m² metro cuadrado

RESUMEN

En el presente estudio se estimó el efecto de la variabilidad climática en el uso del agua para consumo humano en la subcuenca del río Teculután, ubicada en el nororiente de la República de Guatemala, aplicando el modelo hidrológico WEAP (*Water Evaluation and Planning System*). La metodología estuvo compuesta por: i) una fase inicial en la que se recopiló la información cartográfica, hidrológica, climática, poblacional y de los principales usuarios del agua de la subcuenca (riego y piscicultura), la cual fue proporcionada por entidades gubernamentales, organizaciones no gubernamentales, información de satélite y estudios previos; ii) una fase media en la que se procesaron los datos obtenidos, consistente en la reproyección de las capas geográficas, cálculo de los datos mensuales de las variables climáticas y los caudales medios diarios; así como la verificación de la información poblacional, los principales usuarios del agua, las dotaciones de agua para consumo humano, los requerimientos de riego de los principales cultivos y la producción de peces con la municipalidad de Teculután y productores locales de la subcuenca; y, iii) una fase final en la que se desarrolló la modelación de la subcuenca para estimar la oferta hídrica y la demanda de agua actuales y la creación de escenarios futuros en función de la proyección de precipitación y temperatura hasta el año 2050 para dos escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5) y considerando un aumento en la demanda total de agua por el incremento de la población y de los requerimientos hídricos de los principales cultivos y de la actividad piscícola. El efecto de la variabilidad climática sobre el uso de agua para consumo humano en la subcuenca se estimó utilizando el parámetro “demanda no cubierta” de WEAP, que se refiere al volumen de agua que no puede ser suministrado para satisfacer el volumen de agua requerido y durante todos los años proyectados existe un déficit en la cobertura de agua para consumo humano que aumenta bajo el escenario de RCP 8.5 y que se intensifica a partir del año 2044, siendo el déficit promedio de 132,698.1 m³ al año bajo un escenario de RCP 4.5 y de 137,536.6 m³ anuales bajo un escenario de RCP 8.5. Al traducir la “demanda no cubierta” en la cantidad de habitantes que serían desabastecidos, se obtuvo que en marzo (mes con el máximo déficit en ambos escenarios de RCP), la población a la que no se le abastecería del vital líquido asciende a 10,634 habitantes en el escenario de RCP 4.5 y 11,411 habitantes en el escenario de RCP 8.5.

ABSTRACT

The study estimated the effect of climate variability on the use of water for human consumption in the sub-basin of the Teculután River, located in the northeast of the Republic of Guatemala, by applying the hydrological model WEAP (*Water Evaluation and Planning System*). The methodology consisted of: i) an initial phase in which cartographic, hydrological, climatic, population and the main water users of the sub-basin (irrigation and fish farming) information was collected, which was provided by government entities, non-governmental organizations, satellite data and previous studies; ii) an intermediate phase in which the data obtained was processed, consisting of the reprojection of the geographical layers, calculation of the monthly data of the climatic variables and the average daily flows; as well as the verification of population information, the main water users, water supplies for human consumption, irrigation requirements of the main crops and fish production with the municipality of Teculután and local producers of the sub-basin; and, iii) a final phase which consisted of the modeling of the sub-basin to estimate the current water supply and water demand and the creation of future scenarios based on the projection of precipitation and temperature until the year 2050 for two climate change scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) and considering an increase in the total water demand due to the population growth and raise of water requirements of the main crops and fish farming activity. The effect of climate variability on water use for human consumption in the sub-basin was estimated using the "unmet demand" parameter of WEAP, which refers to the volume of water that cannot be supplied to meet the volume of water required and during all projected years there is a deficit in water coverage for human consumption that increases under the RCP 8.5 scenario and intensifies from the year 2044, being the average deficit of 132,698.1 m³ per year under a RCP 4.5 scenario and 137,536.6 m³ per year under a RCP 8.5 scenario. When translating the "unmet demand" into the number of inhabitants that would be short of water supply, it was obtained that in March (month with the maximum deficit in both RCP scenarios), the population that would not be supplied increased to 10,634 inhabitants in the RCP 4.5 scenario and 11,411 inhabitants in the RCP 8.5 scenario.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En las últimas décadas, los ciclos naturales de oscilación en la temperatura y la precipitación se han visto caracterizados por fuertes variaciones que conducen a extremos climáticos y meteorológicos en diferentes partes del planeta (IPCC, 2007). El efecto antropogénico, asociado a la contaminación con gases de efecto invernadero (GEI), es uno de los generadores de estas marcadas oscilaciones de la variabilidad climática (INSIVUMEH, 2018).

El presente estudio se realizó en la subcuenca del río Teculután, ubicada en el nor-oriental de la República de Guatemala, donde los posibles impactos del cambio climático sobre las cuencas hidrográficas dependen de múltiples factores, tales como; la orografía de la región, su ubicación (zona costera o valle), sensibilidad climática o respuesta del régimen de temperatura y lluvia, local y regional, ante la emisión de GEI y especialmente por efectos antropogénicos, tales como; la urbanización, la deforestación, la contaminación del agua y la sobreexplotación de acuíferos, entre otros (Davydova, 2010).

Los impactos de la variabilidad climática en las cuencas hidrográficas del país son severos y comprometen las estrategias de subsistencia, seguridad alimentaria, cadenas de suministro, acceso a agua para consumo humano y ecosistemas. Además, es previsible que estos impactos empeoren a medida que el clima siga cambiando (ICC, 2020).

Para una buena gestión del agua y preservación de los recursos ecosistémicos en las cuencas hidrográficas es importante y necesario conocer la sensibilidad climática de la región, es decir, la variabilidad climática natural y las tendencias de temperatura y de precipitación como detonantes del régimen de escurrimientos y de gastos en la cuenca (Davydova, 2010). Particularmente, en la subcuenca del río Teculután, al analizar el comportamiento de variables climáticas como la precipitación y la temperatura frente a los escenarios de cambio climático¹ (IPCC, 2014), la tendencia es que la precipitación disminuirá (109 mm al 2049) y la temperatura aumentará (1.4 °C al 2049) (ICC, 2020).

En la subcuenca del río Teculután, los principales usuarios del agua son los agricultores (principalmente de los cultivos de melón y mango, que representan el 28 y 5% del área bajo riego) y ganaderos (62% del área para riego; corresponde a potreros) (Rosito, 2015), la actividad piscícola (20 estanques de tilapia con un consumo promedio de 3,780 m³ al mes por estanque) y la actividad industrial (tres embotelladoras de gaseosas y cerveza).

En cuanto al agua para consumo humano, según el Censo 2018 (INE, 2019), en el municipio de Teculután el 86% de la población se abastece por medio de conexión intradomiciliar³, el 10% tiene conexión fuera de la vivienda, 1% se abastece directamente de un río o quebrada, 0.45% de un chorro público, 0.34% de un manantial o

¹ RCP 4.5: escenario intermedio; RCP:8.5: escenario pesimista.

² Estimación del presente estudio.

³ A través del servicio municipal y de 8 Comités de Agua. La municipalidad de Teculután cuenta con 6 tanques de distribución y adicionalmente existen 7 tanques manejados por los Comités de Agua.

nacimiento, 0.38% por medio de camión cisterna, 0.20% de un pozo perforado, 0.022% recolecta agua de lluvia y el 1% restante se abastece de otros medios. La dotación media estimada es de 130.1 litros/habitante/día y consumo agua total de estas poblaciones representa el 3.3% de la demanda de agua total de la subcuenca⁴.

En la subcuenca del río Teculután existen conflictos por el uso del recurso hídrico, principalmente porque las comunidades manifiestan que tienen escasez de agua debido a que se le da prioridad al agua para riego, en relación con el agua para consumo humano. Un aspecto importante de resaltar es que el 83% de los agricultores utilizan los métodos de riego por surcos y por inundación, los cuales son ineficientes ya que generan pérdidas de caudal de entre 50 a 70%, además el tiempo de riego es muchas veces superior al necesario y origina desaprovechamiento del líquido (Aquino, 2007).

Por otro lado, la falta de normativa nacional y municipal no permite la regulación del aprovechamiento del recurso hídrico de la subcuenca (UGAM Teculután, 2022). A pesar de que alrededor del 63% del territorio de la subcuenca está conformado por el área protegida Reserva de Biosfera Sierra de las Minas⁵ que cuenta con su respectivo Plan Maestro (Plan Maestro Reserva de Biosfera Sierra de las Minas, Fundación Defensores de la Naturaleza, 2010), y está en un buen estado de conservación, no existen regulaciones ni políticas integrales para una gestión sostenible de la subcuenca; y, debido a la ausencia de instrumentos legales y técnicos no hay vigilancia y control del uso del agua (UGAM Teculután, 2022).

1.2 Justificación del tema

En los últimos 20 años, el cambio climático ha adquirido notable relevancia tanto política como social. Si bien no existe un consenso general sobre las causas, la mayoría de las opiniones indican que ese calentamiento global está provocado por el incremento de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, generada por la quema de los combustibles fósiles (González, 2012).

El ciclo hidrológico está estrechamente vinculado al cambio climático; de tal manera que el incremento de la temperatura y la variación en la precipitación esperados en los escenarios más probables de cambio climático tendrán un impacto importante en la disponibilidad de los recursos hídricos del mundo en general (Martínez & Patiño, 2012).

Las proyecciones climáticas para el siglo XXI auguran fuertes impactos en diferentes sectores básicos. Así, el calentamiento global provocaría, entre otros, impactos hidrológicos, tales como, los cambios en la disponibilidad del agua, que es un factor de producción esencial destinado a diferentes usos, siendo el consumo humano y la agricultura las principales actividades humanas que demandan una mayor cantidad (González, 2012). La gestión eficiente del agua en los países en desarrollo constituye un propósito relevante para el diseño e implementación de políticas públicas, debido al potencial aumento de conflictos por agua que podrían intensificarse por la creciente escasez, su menor calidad, por los potenciales efectos del cambio climático y por el crecimiento de la población (Jiménez, D.F.; Orrego, S.A.; Cossio, D.M.; Vásquez, F.A. & Ponce, R.D., 2017).

⁴ Estimación del presente estudio.

⁵ Decreto No. 49-90 del Congreso de la República de Guatemala.

El clima y sus condiciones cambiantes producen desequilibrios en las precipitaciones, lo cual supone graves consecuencias en la disponibilidad de agua en los territorios. El desafío para los encargados de formular las políticas de adaptación es entender los impactos del cambio climático y desarrollar e implementar acciones que aseguren un óptimo nivel de adaptación. Las estrategias enfocadas en la gestión y la conservación del agua, tierra y recursos biológicos para mantener y restaurar los ecosistemas son una alternativa ante los impactos del cambio climático (González, 2012).

Analizar el efecto de la variabilidad climática sobre el uso del agua para consumo humano en la subcuenca del río Teculután es necesario, ya que el río Teculután es la principal fuente del recurso hídrico para el municipio de Teculután y para otros municipios vecinos, no sólo para consumo humano (10 sistemas de agua potable y más de 20,000 usuarios), sino también para los sistemas de riego de la agricultura y ganadería (20 tomas de riego con un caudal de consumo promedio de 2 m³/segundo), siendo estas las principales actividades productivas del municipio (Teo, 2011).

1.3 Importancia

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) ha manifestado con clara evidencia las afectaciones que los sistemas hidrológicos en distintas regiones del mundo están sufriendo a causa del cambio climático; esto debido a los cambios en la temperatura, la variación en el nivel del mar y la inestabilidad en las precipitaciones, lo cual pone en riesgo la calidad y disponibilidad del recurso hídrico (Ontaneda, 2020).

El ciclo hidrológico está ligado a la temperatura y al balance radiativo, así como las variaciones que en este ciclo se dan y que están relacionadas con factores como; cambios en las intensidades de las precipitaciones, aumento de la evaporación, aumento la humedad del suelo y la escorrentía (Ontaneda, 2020).

También se suman a esta problemática las diferentes actividades de tipo antropogénico como la expansión de la franja agrícola, la ganadería extensiva y el acelerado crecimiento demográfico, que han puesto a los ecosistemas, en general, en una situación de fragilidad, debido a que se encuentran en eminente peligro los diferentes servicios ecosistémicos que estos ofrecen como lo son la biodiversidad, la regulación de agua, la retención de carbono, entre otros (Ontaneda, 2020).

En la subcuenca del río Teculután, modelaciones hidrológicas realizadas por Rosito (2011) evidenciaron que en un plazo de 10 a 15 años se podrán observar caudales muy cercanos a cero en los meses de febrero y marzo, precisamente en la estación seca cuando mayor demanda existe de estos recursos, debido al uso ineficiente para riego, en parte porque el agua no se valora y los regantes no quieren perder el volumen que utilizan desde hace mucho años aunque no lo necesiten para el mejor rendimiento de sus cultivos y pastos, además a las sequías y patrones irregulares de la precipitación, lo cual se considera alarmante para los ecosistemas y los sistemas productivos. Los sectores más afectados podrán ser el sector agrícola y ganadero (60% de consumo de agua superficial anual e importante demandante de mano de obra local) y sector de hogares (más de 20,000 usuarios) (Rosito, 2011 e investigación de campo, 2022).

El presente estudio será un aporte valioso debido a que permitirá estimar la demanda de agua para consumo humano⁶ en la subcuenca del río Teculután y evaluar el efecto que la variabilidad del clima sobre este uso, a fin de generar conocimiento que sirva de base para realizar intervenciones orientadas a gestionar los recursos naturales de la subcuenca con un enfoque de adaptación al cambio climático, para enfrentar el efecto previsto y sobre todo iniciar un proceso de gobernanza entre los vecinos del municipio (población y regantes) y el gobierno municipal, a manera de lograr acuerdos del uso eficiente del recurso hídrico.

1.4 Objetivo general

Evaluar el efecto de la variabilidad climática sobre el uso de agua para consumo humano en la subcuenca del río Teculután.

1.5 Objetivos específicos

- Cuantificar la oferta hídrica de la subcuenca del río Teculután.
- Estimar la demanda de agua para consumo humano, usos agrícolas y piscícolas.
- Evaluar el efecto de la variabilidad climática sobre el uso de agua para consumo humano en la subcuenca del río Teculután.

⁶ Comprendida como el agua que dispone una persona para sus necesidades diarias de consumo, aseo y limpieza del hogar (OMS, 2014).

2 MARCO REFERENCIAL

2.1 Hidrología

Las ciencias hídricas están relacionadas con las aguas de la Tierra: su distribución y circulación, sus propiedades físicas y químicas, su interacción con el ambiente y con los seres vivos y en particular, con los seres humanos. Puede considerarse que la hidrología abarca todas las ciencias hídricas y puede definirse como el estudio del ciclo hidrológico, es decir, la circulación del agua entre la Tierra y la atmósfera (Te Chow, Maidment & Mays, 1994).

La hidrología se puede dividir por estratos horizontales y verticales, como por ejemplo (Birkel, 2020):

- Hidrología superficial: la cual estudia las corrientes de agua que riegan la superficie de la tierra y su almacenamiento en depósitos naturales (lagos, lagunas, ciénagas).
- Hidrología subterránea: en la que se incluyen los estudios del agua subterránea (acuíferos).

2.2 El ciclo hidrológico

Se denomina ciclo hidrológico, al conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido, gaseoso), como en su forma (agua superficial y agua subterránea) (Villón, 2002). El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología (Te Chow, *et al.*, 1994).

Los principales factores que afectan al ciclo hidrológico son los factores climáticos; la altura del territorio, el viento, la radiación solar controlando la temperatura y la presión que influyen en la humedad del aire (Bateman, 2007).

El ciclo hidrológico es completamente irregular y es precisamente contra esas irregularidades que lucha el hombre. Una muestra de ello son los períodos de satisfacción con los requerimientos del agua, para las diferentes actividades (uso poblacional, irrigación, generación de energía eléctrica, uso industrial), otros períodos de sequías y otros, de inundaciones (Villón, 2002).

Como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni un principio ni fin, y su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que escurre sobre la superficie terrestre, ríos, lago y mares, se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor resultante es transportado por las masas de aire en movimiento. En determinadas condiciones, el vapor se condensa formando las nubes, que, a su vez, pueden ocasionar precipitaciones que caen a la tierra (Villón, 2002).

Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede ser interceptada por las plantas o las construcciones; una vez en el suelo, lo humedece y en grandes cantidades escurre sobre la superficie del terreno, o se infiltra. También dependiendo de la humedad del aire, la presión atmosférica y la temperatura, parte del agua puede volver a evaporarse y regresar a la atmósfera (Bateman, 2007).

De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otras formas grandes de masa de agua como los lago. El agua que se infiltra satisface la humedad del suelo y abastece los

depósitos subterráneos, de donde puede fluir hacia las corrientes de los ríos, o bien, descargar en los océanos; la que queda detenida en la capa vegetal del suelo es regresada a la atmósfera por transpiración (Villón, 2002).

El agua es utilizada por los animales y las plantas, la mayor parte del agua utilizada por las especies vivas sólo fluye a través de su cuerpo. Volviendo a la naturaleza en el caso de la vegetación en forma de transpiración. El proceso conjunto se denomina evapotranspiración y consiste en el regreso del agua a la atmósfera en forma de vapor (Bateman, 2007).

En la subcuenca del Río Teculután, el monitoreo hidrológico, climático y ecológico desarrollado por el consorcio WWF-CARE a través del proyecto “Pago Equitativo por Servicios Hidrológicos -PESH-“ entre los años 2009 y 2011 destacó los siguientes factores relacionados con el ciclo hidrológico: a) variabilidad climática interanual, b) cambio climático como un factor crítico en la intensificación del ciclo hidrológico, c) la dinámica de la cobertura vegetal y uso del suelo (como un factor crítico para la regulación del ciclo hidrológico) y, d) características de la demanda hídrica, como un factor en la definición de la problemática y presión sobre los recursos hídricos). La cuantificación y valoración de los servicios hidrológicos que los ecosistemas de la parte alta, media y baja de la subcuenca brindan a los sistemas económicos y sociales, principalmente de la parte baja, están relacionados directamente con la capacidad de estos ecosistemas de regular el ciclo hidrológico. Esto consiste principalmente en la capacidad de los ecosistemas de disminuir el impacto socioeconómico de los caudales máximos y caudales mínimos. Los caudales máximos se derivan de eventos de precipitación extremos y conllevan altas tasas de erosión, inundaciones, daños a infraestructura (especialmente de abastecimiento de agua); entre otros; los caudales mínimos se derivan de sequías climáticas, las cuales se han observado cada vez con mayor frecuencia e impacto social, principalmente porque conllevan desabastecimiento hídrico, especialmente afectando a los sectores de la agricultura excedentaria y de exportación, agricultura de subsistencia y abastecimiento de hogares (Rosito, 2011).

2.3 La cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica es un sistema, es una unidad geográfica e hidrológica, formada por un río principal y todos sus territorios asociados entre el origen del río y su desembocadura. Además, la cuenca hidrográfica incluye el área y los ecosistemas (territorios y ríos menores, aguas subterráneas o acuíferos, zonas costeras y su influencia en el mar), y sus interacciones que inciden en el curso de agua, tanto en su cantidad como en su calidad (UICN-ORMACC, 2018).

Las cuencas hidrográficas constituyen un territorio que dan origen a unidades naturales que se delimitan tomando como base la divisoria de las aguas superficiales que orientan el flujo de agua provenientes de la precipitación y nevados, desde pequeñas corrientes (quebradas) que se van conectando hasta formar un río cada vez mayor, hasta formar una red hídrica con una corriente principal, la cual conduce sus aguas hacia el mar, a un lago o a un manto freático (Bateman, 2007).

Dos tipos de cuenca se pueden reconocer, endorreicas y exorreicas. Las cuencas endorreicas son aquella que terminan en un lago central y cuenca exorreicas aquellas cuencas que drenan fuera de la unidad hidrológica (Bateman, 2007).

2.3.1 Delimitación de la cuenca hidrográfica

La delimitación de una cuenca se hace sobre un plano o un mapa a curvas de nivel (por ejemplo, a una escala 1:20,000), siguiendo las líneas del *divortium acuorum* o las divisorias de agua (parteaguas), el cual es una línea imaginaria, que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación, que en cada sistema de corriente fluye hacia el punto de salida de la cuenca. El parteaguas está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida, llamados estación de aforo (Villón, 2002).

2.3.2 Elementos de la cuenca hidrográfica

Los elementos de la cuenca son (UICN-ORMACC, 2018):

- Río principal: corriente natural de agua que fluye ininterrumpidamente. Posee un caudal variable y desemboca en el mar, en un lago o en otro río.
- Afluentes: pueden presentarse de dos formas:
 - Afluente (tributario): alimenta al río principal de agua. Se une en un lugar llamado confluencia.
 - Efluente (emisario): son ríos que sacan agua de la corriente principal, pero no están presentes en todas las cuencas.
- Divisoria de aguas: límite natural del agua que incluye toda la tierra que desemboca en un arroyo, río, lago o cuerpo de agua.
- Acuífero o aguas subterráneas: formaciones geológicas en las cuales se encuentra el agua y, debido a sus características permeables, permite el almacenamiento de agua en espacios subterráneos.

2.3.3 Zonificación de la cuenca hidrográfica por su altitud

Existe una variabilidad de criterios con relación a esta clasificación, existen cuencas que pueden variar altitudinalmente entre 0 y 5,000 msnm, mientras que otras solo varían entre 0 y 400 msnm. Evidentemente no se pueden distinguir todas las diferentes partes por la altitud de la cuenca, en este caso es posible solo distinguir parte alta y baja o costero marina. La predominancia de relieve y los cambios de altura (puntos de inflexión en un perfil longitudinal será importante para definir cada una de las partes (UICN-ORMACC, 2018):

- Parte alta, corresponde a las áreas más alejadas de la cuenca y que tiene mayor altura sobre el nivel del mar o punto de salida del río principal de la cuenca.
- Parte media, corresponde a las áreas intermedias de la cuenca y que tiene alturas medias. Constituida por las tierras onduladas y valles.
- Parte baja, corresponde a las partes planas de la cuenca y es donde el caudal del río pierde fuerza y los materiales sólidos se sedimentan, formando las llanuras.

El cauce del río Teculután presenta, en la parte media-baja de la subcuenca, una configuración subangular y rectilínea, lo cual es un indicador de una fuerte influencia estructural. En la subcuenca se pueden identificar dos estadios del ciclo erosivos: uno joven para la cabecera de la cuenca, pero que por la pendiente natural y los esquistos ha profundizado en un cañón con paredes laterales muy pronunciadas, que evoluciona rápidamente

en un cauce con condiciones más maduras y en la parte más baja se produce un abanico aluvial, al llegar al valle del Motagua con sus bajas pendientes (Rosito, 2015).

El área total de una cuenca es la que define la capacidad de captación de precipitación, entre más extensa sea la cuenca mayor será la esorrentía para la misma cantidad de lluvia. Asimismo, la longitud y la pendiente de los cauces son importantes para la determinación de la velocidad de flujo, y consecuentemente, los tiempos de concentración. El caudal que puede acumular una cuenca, así como las variaciones de éste en el tiempo dependen directamente de sus características geomorfológicas, así, las pendientes fuertes y las longitudes cortas implican un flujo de agua que llega al punto de desfogue de manera veloz, lo que dificulta la infiltración. Pendientes suaves y longitudes mayores producen todo lo contrario. A nivel de la corriente principal, la longitud del río Teculután, desde la parte más alta de la subcuenca hasta su desembocadura en el río Motagua, es de aproximadamente de 40 km, presentando una pendiente media de 6.4%, la cual se mantiene relativamente constante a lo largo de todo el cauce, exceptuando la parte más baja y cercana a la desembocadura, donde su pendiente se ve reducida (Rosito, 2015). El cuadro 1 resume los parámetros morfométricos de la subcuenca del río Teculután.

Cuadro 1 – Parámetros morfométricos de la subcuenca del río Teculután.

Tributarios	Área (km ²)	Longitud del cauce (km)	Diferencia de elevación (m)	Pendiente (%)	Velocidad (m/s)
Alto Blanco	22.2	5.7	605	15.3	2.4
Alto Teculután	52.5	22.5	1,225	5.2	1.5
Las Vegas/Río Negro	30.5	8.8	1,100	17.1	2.4
Quebrada 1	5.0	2.2	300	23.9	2.4
Quebrada 2	7.5	3.9	528	15.9	2.4
Quebrada 3	8.6	2.9	502	25.7	2.4
Quebrada 4	9.9	4.3	615	34.8	2.4
Quebrada 5	7.6	2.6	595	32.8	2.4
Quebrada 6	8.7	4.3	1,120	22.7	2.4
Quebrada 7	13.9	4.8	850	25.8	2.4
Quebrada 8	11.7	6.3	1,000	22.6	2.4
Quebrada 9	3.3	0.9	80	26.9	2.4
Las Minas	9.1	4.1	155	2.4	1.2
Riachuelo Chiquito	9.9	6.5	360	13.5	2.4
Bajo Teculután	15.4	8.1	118	0.9	1.0
Total	216.1	40.5	2,554	6.4	1.5

Fuente: Rosito, 2015.

2.4 El recurso hídrico, un factor integrador

Las cuencas hidrográficas tienen una dinámica social interna (por las comunidades que las habitan) que puede desarrollar vínculos con territorios vecinos inmediatos y lejanos, algunas veces son compartidos por dos o más municipios, provincias, regiones, departamentos o países; pero siempre el eje social buscará identidades propias que no necesariamente coinciden con las divisorias geográficas (las cuencas), pero si dependen del

funcionamiento de la cuenca. Este funcionamiento se expresa en una dinámica indivisible entre la vegetación, el suelo/geología y el agua (Birkel, 2020).

El agua entonces se denomina el recurso integrador de todas las partes de la cuenca, desde la parte alta, hasta la parte baja e incluso la salida de la cuenca. La vegetación cumple su papel cuando la gota de lluvia cae a la cuenca, el suelo es el siguiente elemento que permitirá su almacenamiento o escurrimiento. Una cuenca bien cubierta de vegetación (bosques, árboles, pastos, cultivos densos permanentes) regulará los caudales aguas abajo, de lo contrario se generarán escurrimientos variados en velocidad y caudales que no podrán soportar los cauces naturales. Es así, como la relación entre agua y vegetación se expresan también en la calidad del agua, si sobre los suelos se aplican o depositan contaminantes el agua los arrastrará y concentrará alterando la calidad del agua. Si una cuenca no tiene vegetación suficiente y permanente el suelo se erosionará, se movilizarán partículas, alterando la calidad del agua y posiblemente generando la sedimentación en las partes medias y bajas de las cuencas (Birkel, 2020).

El movimiento del agua en la cuenca conecta e integra sus partes, presentando a esta unidad natural como un sistema. Es decir, como una entidad en la cual sus componentes están dispuestos en una agrupación de elementos ligados y mutuamente dependientes, de manera que conforman una unidad y actúan como tal (Birkel, 2020).

Bajo este enfoque integral el concepto de cuenca hidrográfica es mucho más complejo y se refiere a la unidad de gestión territorial definida fundamentalmente por la red de drenaje superficial, en la cual interacciona biofísica y socioeconómicamente el ser humano, los recursos naturales, los ecosistemas y el ambiente (Palacios, 2016).

Un manejo integral de la cuenca hidrográfica es aquel que considera que todos los recursos naturales son importantes, igualmente sus aspectos biofísicos como socioeconómicos, así como los sectores que conforman la cuenca hidrográfica. Es un proceso dirigido a lograr el buen uso, aprovechamiento, protección, conservación y rehabilitación de los recursos naturales en beneficio de las poblaciones rurales y urbanas y de los ecosistemas. Este manejo trata de lograr el equilibrio entre la oferta de los recursos naturales y la demanda de parte de los usuarios, de allí la importancia de determinar el inventario de los recursos naturales (oferta) y el crecimiento poblacional (demanda) (Jiménez, 2021).

En el año 2016 WWF Guatemala y Fundación Defensores de la Naturaleza elaboraron una propuesta de plan de manejo integral de la subcuenca del río Teculután cuyo modelo de gestión se fundamenta en el capital natural (recursos naturales que tiene la cuenca), la capacidad de uso de la tierra, las áreas de conservación, las zonas de recarga hídrica, el uso actual de la tierra y los conflictos de usos y zonas vulnerables, así mismo se considera la participación activa de las entidades encargadas del área protegida Reserva de la Biósfera de Sierra de Las Minas (RBSM) (63% del territorio de la subcuenca), como lo son el Consejo Nacional de Áreas Protegidas -CONAP- y la Fundación Defensores de la Naturaleza (FDN-WWF, 2016).

El fin último al que se aspira con la implementación del plan de manejo es lograr la interacción equilibrada entre sociedad y naturaleza en el marco de las condiciones climáticas cambiantes, incorporando el elemento de gestión

de riesgo a la variabilidad y cambio climáticos y al deterioro ambiental. Esto último es considerado como fundamental por las autoridades y diversidad de actores locales (FDN-WWF, 2016).

Es fundamental que los actores locales tengan empoderamiento, organización y formación de capacidades para actuar y hacer frente al riesgo del clima cambiante. Asimismo, las instituciones, como aquellas formas legítimas y legalmente constituidas para la organización social y resolución de conflictos, también deben desarrollar características de liderazgo, capacidades, recursos e iniciativa; de tal manera que puedan garantizar el mantenimiento o restauración del flujo de los servicios ecosistémicos (de regulación, provisión, culturales de soporte), que la subcuenca provee a la población (no sólo del municipio de Teculután sino de municipios vecinos). Esto es posible mediante el conocimiento de los límites y atributos de los sistemas naturales y, basándose en ello, la consecuente generación de normas y políticas locales dotadas de instrumentos técnicos y financieros adecuados (FDN-WWF, 2016).

2.5 Oferta hídrica

La oferta hídrica es aquella porción de agua que después de haberse precipitado sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema suelo – cobertura vegetal, escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales, alimenta lagos, lagunas y reservorios, confluye con otras corrientes y llega directa o indirectamente al mar. Usualmente esta porción de agua que escurre por los ríos es denominada por los hidrólogos como escorrentía superficial y su cuantificación conforma el elemento principal de medición en las redes de seguimiento hidrológico existentes en los distintos países (CORPONARIÑO, 2009).

La oferta hídrica de una cuenca corresponde también al volumen disponible de agua para satisfacer la demanda generada por las actividades sociales y económicas del hombre. Al cuantificar la escorrentía superficial a partir del balance hídrico de la cuenca, se está estimando la oferta de agua superficial de la misma. El conocimiento del caudal del río, su confiabilidad y extensión de la serie del registro histórico son variables que pueden influir en la estimación de la oferta hídrica superficial. Cuando existe información histórica confiable de los caudales con series extensas, el caudal medio anual del río es la oferta hídrica de esa cuenca (CORPONARIÑO, 2009).

Según Rosito (2010), la disponibilidad de agua de la subcuenca del río Teculután es de 174 millones de m³ anuales, siendo uno de los mayores caudales que drenan hacia el valle del Motagua desde la RBSM. El caudal promedio anual es de 4.9 m³/s y es una de las cuencas con mayor proporción de la disponibilidad del agua en caudal superficial (90%), es decir que únicamente cuenta con un aporte subterráneo de aproximadamente 11%.

2.6 Demanda de agua

La demanda hídrica se define como la extracción del agua del sistema natural destinada a suplir las necesidades o requerimientos del consumo humano, la producción sectorial y las demandas esenciales de los ecosistemas no antrópicos (González, Saldarriaga & Jaramillo, 2010).

La extracción y, por ende, la utilización del recurso implica la sustracción, alteración, desviación o retención temporal del recurso hídrico, incluidos en estos los sistemas de almacenamiento que limitan el aprovechamiento para usos compartidos u otros usos excluyentes (González, *et al.*, 2010).

2.6.1 Demanda de agua para consumo humano

Se refiere al agua que es utilizada en actividades, tales como; bebida directa y preparación de alimentos para consumo inmediato para satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como; higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios y para la preparación de alimentos en general (González, *et al.*, 2010).

El 28 de julio de 2010, a través de la Resolución 64/292, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció explícitamente el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que un agua potable limpia y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos. La Resolución exhorta a los Estados y organizaciones internacionales a proporcionar recursos financieros, a propiciar la capacitación y la transferencia de tecnología para ayudar a los países, en particular a los países en vías de desarrollo, a proporcionar un suministro de agua potable y saneamiento saludable, limpio, accesible y asequible para todos (ONU-AGUA, 2014).

La Organización Mundial de la Salud -OMS- (2018) recomienda una cantidad media óptima de agua para consumo humano (beber, cocinar, higiene personal y limpieza del hogar) de 100 litros/habitante/día.

Además, el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas denominado “agua limpia y saneamiento” busca “*garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*” y dentro de sus metas está lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos; aumentar el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua.

En Guatemala, el Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social -MSPAS- define al agua para consumo humano como el “agua destinada para bebida, preparación de alimentos e higiene personal”. El Código Civil, en su artículo 78, establece que el Estado, a través del MSPAS en coordinación con otras instituciones del sector, impulsarán una política prioritaria y de necesidad pública, que garantice el acceso y cobertura universal de la población a los servicios de agua potable, con énfasis en la gestión de las propias comunidades, para garantizar el manejo sostenible del recurso.

2.7 Variabilidad climática y cambio climático

La variabilidad del clima se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas y la ocurrencia de fenómenos extremos) del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados (IDEAM, 2018).

La variabilidad se puede deber a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en los forzamientos externos antropogénicos (variabilidad externa) (IDEAM, 2018).

Por su parte, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en su Artículo 1, define al cambio climático como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC distingue entre “cambio climático” atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y “variabilidad climática” atribuida a causas naturales (IDEAM, 2018).

2.7.1 Escenarios de cambio climático

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), ha planteado escenarios que conjugan diferentes condiciones de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), las cuales encierran una serie de factores influyentes (como tamaño de población, actividad económica, estilo de vida, uso de energía, patrones de uso del suelo y política climática), que junto a diferentes niveles de emisiones de contaminantes describen: “Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés)” (IPCC, 2014).

Estos escenarios utilizan el Forzamiento Radiativo (FR) como medida de los RCP, el cual es un proceso que altera el equilibrio de energía en el sistema Tierra–Atmósfera, como efecto del cambio en la concentración de dióxido de carbono o de la energía emitida por el Sol. El FR se expresa en unidades de medida de vatios por metro cuadrado (W/m^2). Los escenarios se definen de la siguiente forma: RCP 2.6 es un escenario de mitigación estricto que tiene por objetivo mantener el calentamiento global a menos de 2 °C por encima de las temperaturas preindustriales. Los siguientes dos escenarios intermedios son RCP 4.5 y RCP 6.0 y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero: RCP 8.5 (IPCC, 2014).

2.8 Efecto de la variabilidad climática sobre los recursos hídricos

Las principales variables climáticas que intervienen en el ciclo hidrológico son la precipitación y la temperatura, cuyos cambios condicionan directamente el agua que cae sobre los continentes y los valores de evaporación y evapotranspiración, respectivamente, afectando por lo tanto las características de la escorrentía (González, 2012).

La importancia del estudio del efecto sobre los recursos hídricos radica en conocer cómo pueden repercutir las variaciones climáticas en la escorrentía en régimen natural en los distintos ámbitos territoriales (escala de cuenca hidrográfica, regional o global), de tal manera que permita disponer de series mensuales de aportaciones naturales o recursos hídricos totales de los ríos que introducidas en los modelos de los sistemas de explotación, permitan evaluar de manera aceptable la disponibilidad del agua bajo proyecciones de cambio climático (González, 2012).

El estudio “Resiliencia climática en las cuencas de los ríos Teculután, Pasabien y Madre Vieja, Guatemala” desarrollado en el 2020, comparó el acumulado de la lluvia de la línea base con los escenarios futuros, y su tendencia es a disminuir, como se observa en las figuras 1, 2 y 3 que muestran el comportamiento en el

acumulado de lluvia clasificada en rangos para la línea base, bajo escenario RCP 4.5 y bajo escenario RCP 8.5 (ICC, 2020).

Además, dentro de la subcuenca el comportamiento puede ser diferente, y es la parte alta donde se observa una disminución de lluvia, especialmente en el rango de precipitación menor a 2,700 mm anuales (representado con color morado en las Figuras 1 y 3), que abarcaría menor superficie (reducción del 38 a 9% de superficie en el RCP 8.5) al 2049 (ICC, 2020).

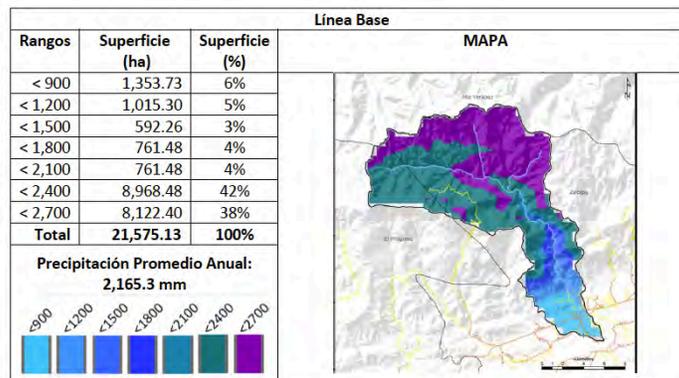


Figura 1 – Precipitación anual (mm) en la línea base de la subcuenca del río Teculután

Fuente: ICC, 2020.

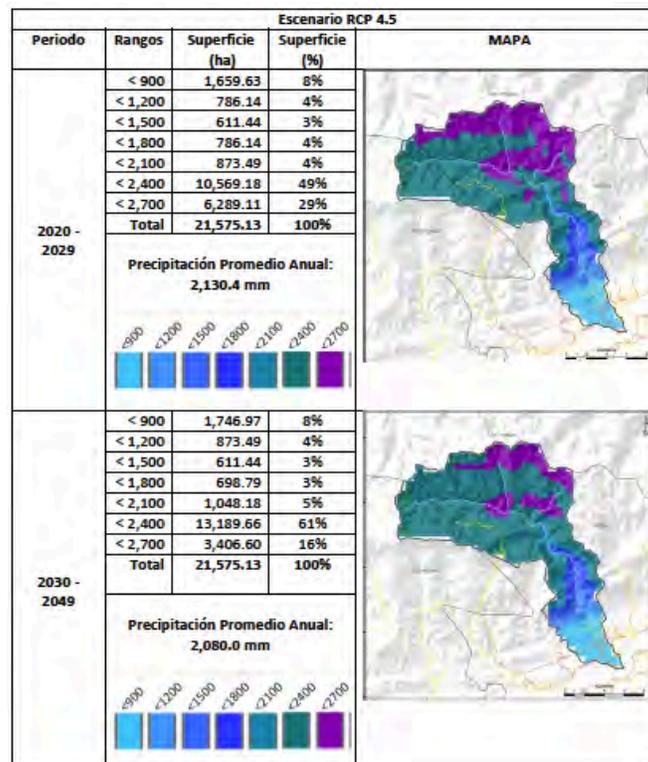


Figura 2 – Precipitación anual (mm) en escenario RCP 4.5 de la subcuenca del río Teculután

Fuente: ICC, 2020.

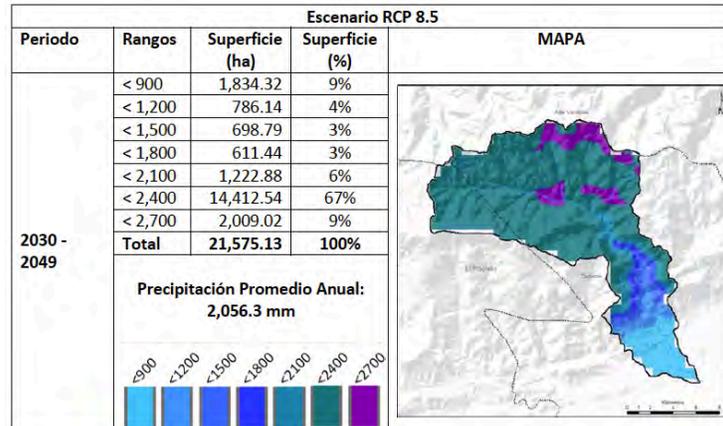


Figura 3 – Precipitación anual (mm) en escenario RCP 8.5 de la subcuenca del río Teculután

Fuente: ICC, 2020.

Por el contrario, al comparar la temperatura media de la línea base (Figura 4) con los escenarios futuros (Figuras 5 y 6), su tendencia es al aumento, donde se muestra el comportamiento en la temperatura media según su clasificación en rangos con la línea base, bajo escenario RCP 4.5 y escenario RCP 8.5 (ICC, 2020).

Al igual que la precipitación, el comportamiento de la temperatura dentro de la subcuenca es diferente de una zona a otra, ya que en las partes media y baja de la subcuenca se observa un evidente aumento en la temperatura (2% en el escenario de RCP 8.5). Notando que el rango más cálido, que va de 27 a 30° C, podría abarcar una mayor superficie (aumento de 8 a 11% de superficie en el RCP 8.5) al 2049, mientras que el rango más frío, que va de 8 a 12° C, podría desaparecer (ver Figura 6) (ICC, 2020).

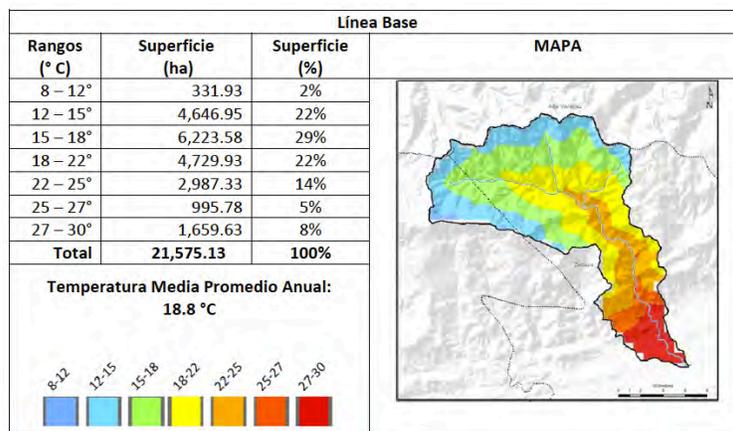


Figura 4 – Temperatura media (°C) en la línea base de la subcuenca del río Teculután

Fuente: ICC, 2020.

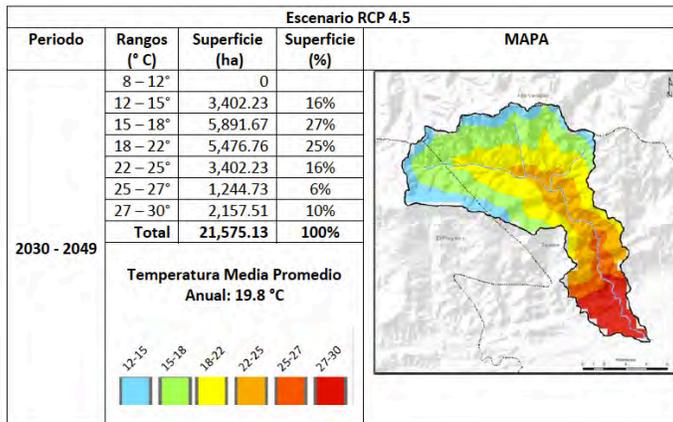
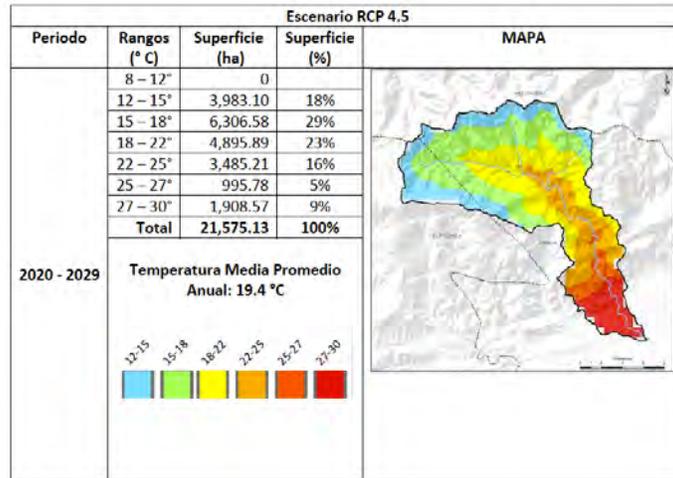


Figura 5 – Temperatura media (°C) en escenario RCP 4.5 de la subcuenca del río Teculután

Fuente: ICC, 2020.

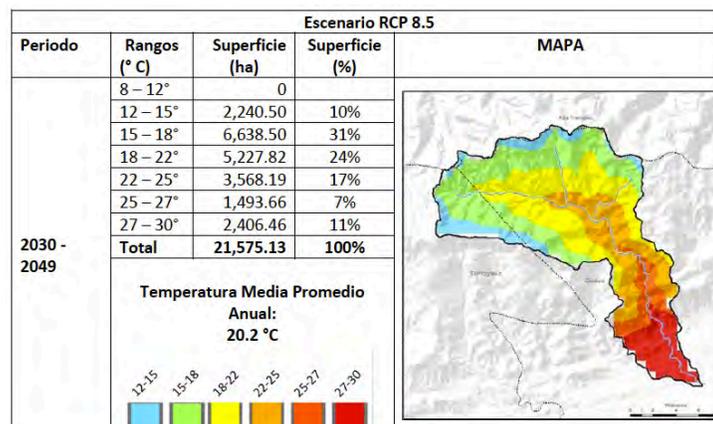


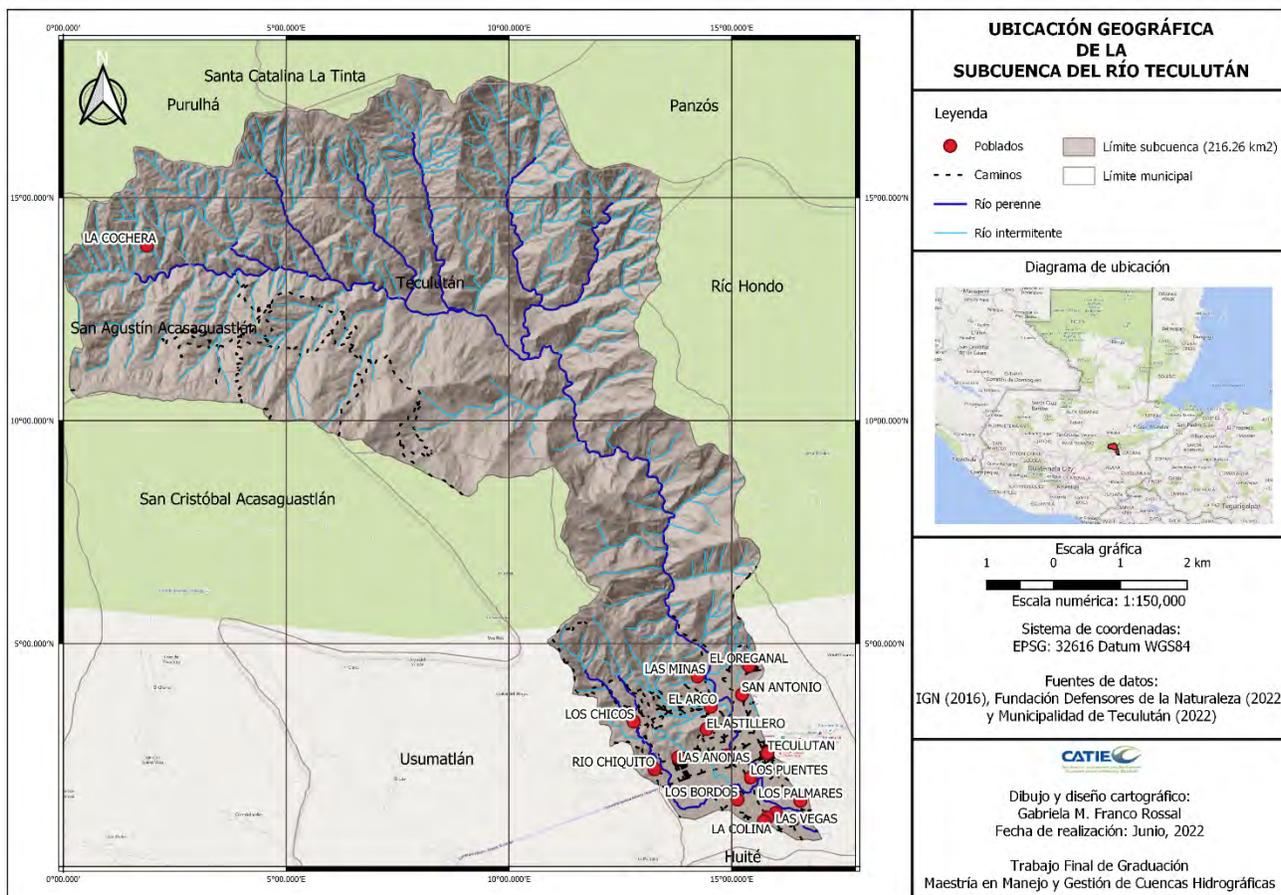
Figura 6 – Temperatura media (°C) en escenario RCP 8.5 de la subcuenca del río Teculután

Fuente: ICC, 2020.

3 METODOLOGÍA

3.1 Ubicación del área de estudio

La subcuenca del río Teculután forma parte de la vertiente del Caribe y se localiza en las coordenadas geográficas 14° 58' 10" Norte y 89° 41' 30" Oeste. La mayor parte del territorio de la subcuenca (82%) se encuentra dentro de los límites del municipio de Teculután del departamento de Zacapa (Mapa 1 y Cuadro 2).



Mapa 1 – Ubicación geográfica de la subcuenca del río Teculután.

Cuadro 2 – Departamentos y municipios en la subcuenca del río Teculután.

Departamentos	Municipios	Superficie		Porcentaje del municipio (%)
		Hectáreas (ha)	Porcentaje (%)	
Zacapa	Teculután	17,701.46	82	84
	Usumatlán	976.63	5	9
	Río Hondo	152.36	1	0
El Progreso	San Agustín Acasaguastlán	2,206.80	10	5
	San Cristóbal Acasaguastlán	459.50	2	3
Alta Verapaz	Santa Catalina La Tinta	45.61	0	0
	Panzós	25.92	0	0
Baja Verapaz	Purulhá	58.13	0	0
Total		21,626.41	100	0

Fuente: ICC, 2020.

3.2 Descripción del área de estudio

La subcuenca del río Teculután tiene una extensión superficial de 21,626.41 hectáreas, con una longitud total de su red hídrica de 41 km y una densidad hídrica de 0.21 km/km². Su rango altitudinal varía de los 197 a los 2,945 msnm, siendo su parte alta la Reserva de Biósfera de la Sierra de las Minas (RBSM), la cual abarca el 63% de la subcuenca (desde los 1,500 a 2,945 msnm). La parte más poblada de la subcuenca (cabecera del municipio de Teculután) se ubica entre los 200 y 300 msnm, representando el 9% de la subcuenca, en donde se localiza la carretera centroamericana CA-9, como la principal vía de acceso (ICC, 2020).

3.2.1 Aspectos biofísicos de la subcuenca

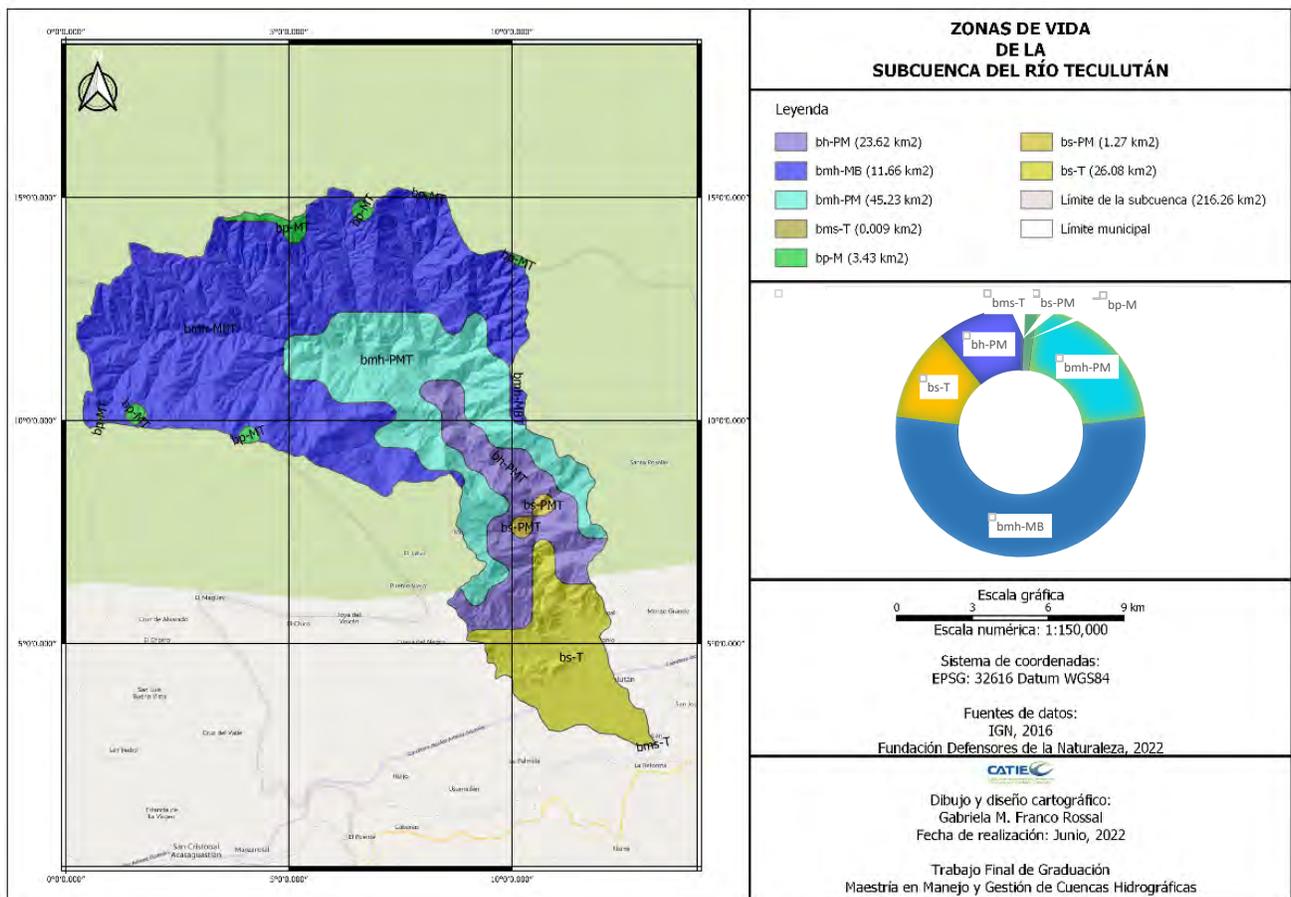
3.2.1.1 Zonas de vida

El área de la subcuenca pertenece a las zonas de vida bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB) que comprende el 53.9% de la superficie total, seguido del bosque muy húmedo premontano (bmh-PM, 20.9%), bosque seco tropical (bs-T, 12.1%), bosque húmedo premontano (bh-PM, 10.9%), bosque pluvial montano (pb-M, 1.6%), bosque seco premontano (bs-PM, 0.6%) y bosque muy seco tropical (bms-T, 0.004%) (Fundación Defensores de la Naturaleza, 2022, Cuadro 3 y Mapa 2).

Cuadro 3 – Zonas de vida de la subcuenca del río Teculután.

Nombre de la Zona de Vida	Abreviatura	Área (ha)	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Bosque seco premontano	bs-PM	126.9	1.3	0.6
Bosque muy seco tropical	bms-T	0.9	0.009	0.004
Bosque pluvial montano	bp-M	343.2	3.4	1.6
Bosque muy húmedo premontano	bmh-PM	4,522.7	45.2	20.9
Bosque muy húmedo montano bajo	bmh-MB	11,662.9	116.6	53.9
Bosque seco tropical	bs-T	2,607.8	26.1	12.1
Bosque húmedo premontano	bh-PM	2,362.01	23.6	10.9
Total		21,626.4	216.3	100

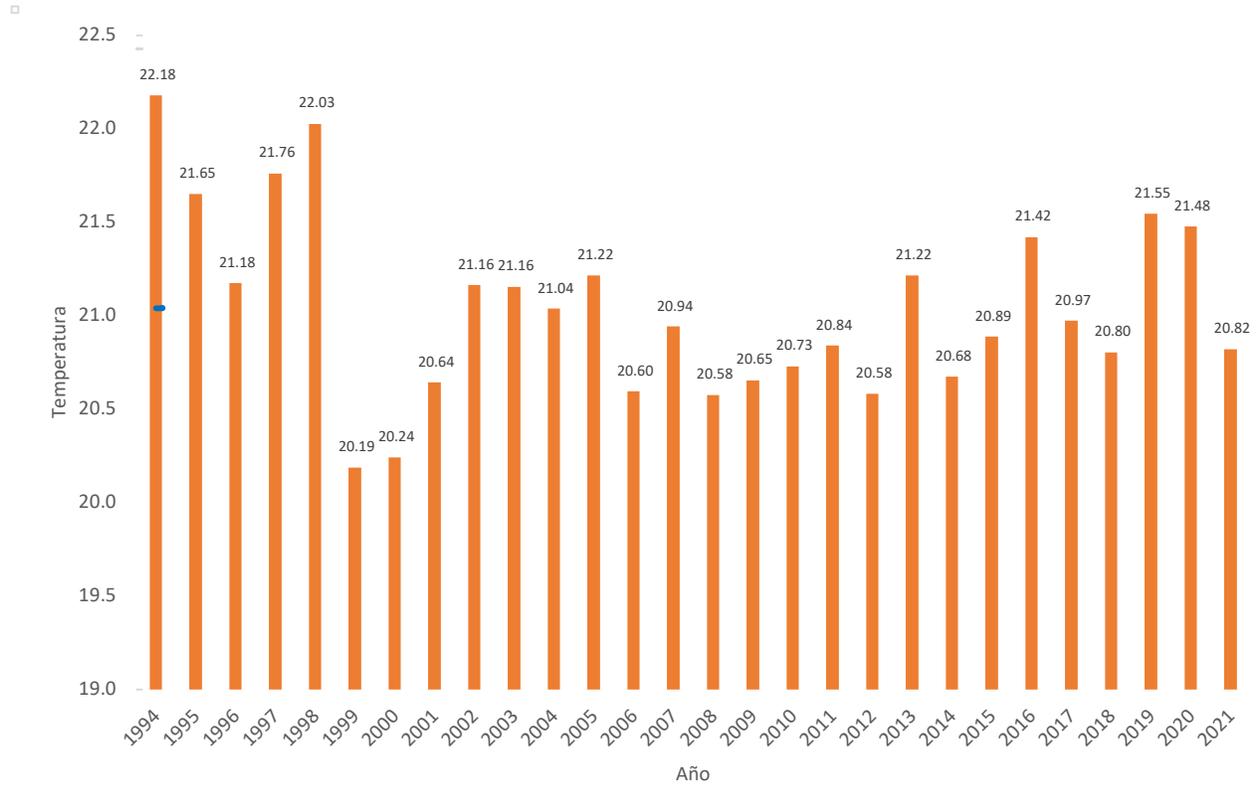
Fuente: Fundación Defensores de la Naturaleza, 2022.



Mapa 2 – Zonas de vida de la subcuenca del río Teculután.

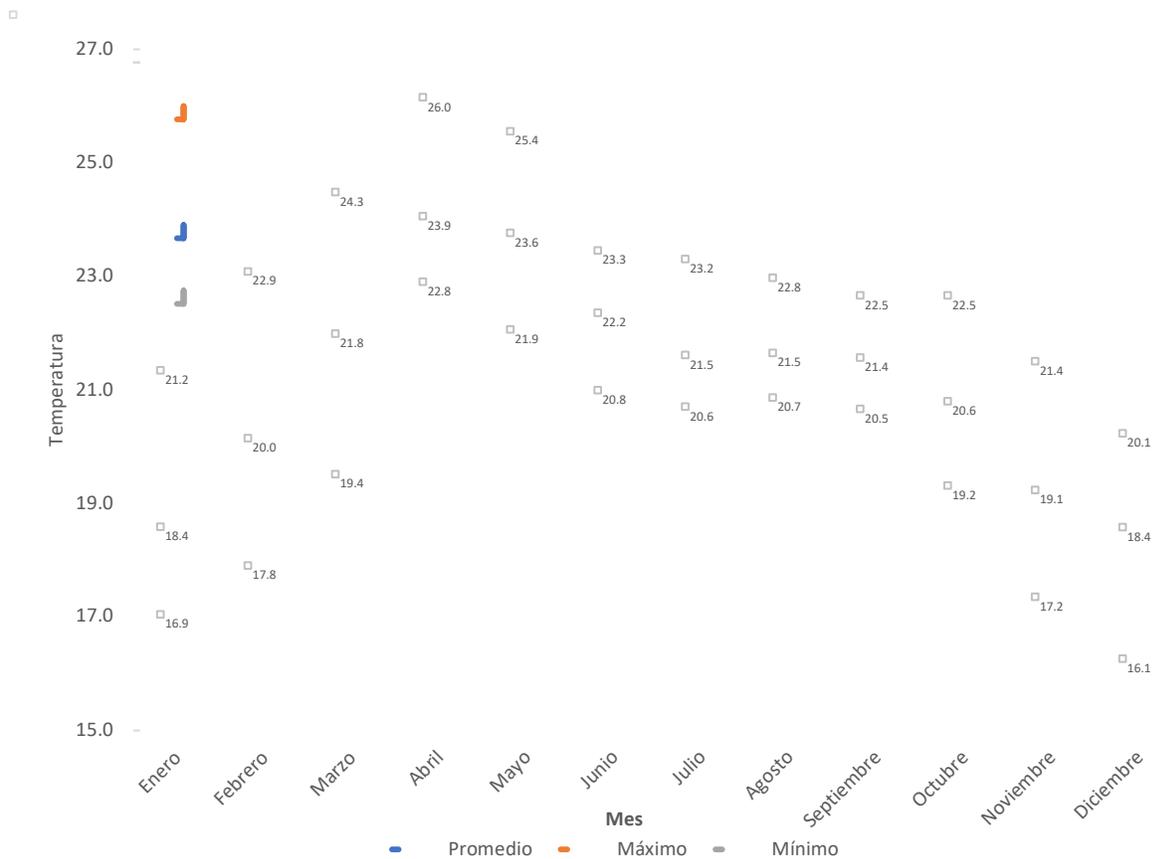
3.2.1.2 Clima

La temperatura en la subcuenca del río Teculután oscila entre los 16 °C (diciembre y enero) y los 26 °C (abril), siendo su temperatura media anual de 21 °C (POWER, 2022). La gráfica 1 muestra la temperatura media anual desde 1994 a 2021 y en la gráfica 2, los valores medios, máximos y mínimos mensuales.



Gráfica 1 – Temperatura promedio anual de la subcuenca del río Teculután (1994 a 2021).

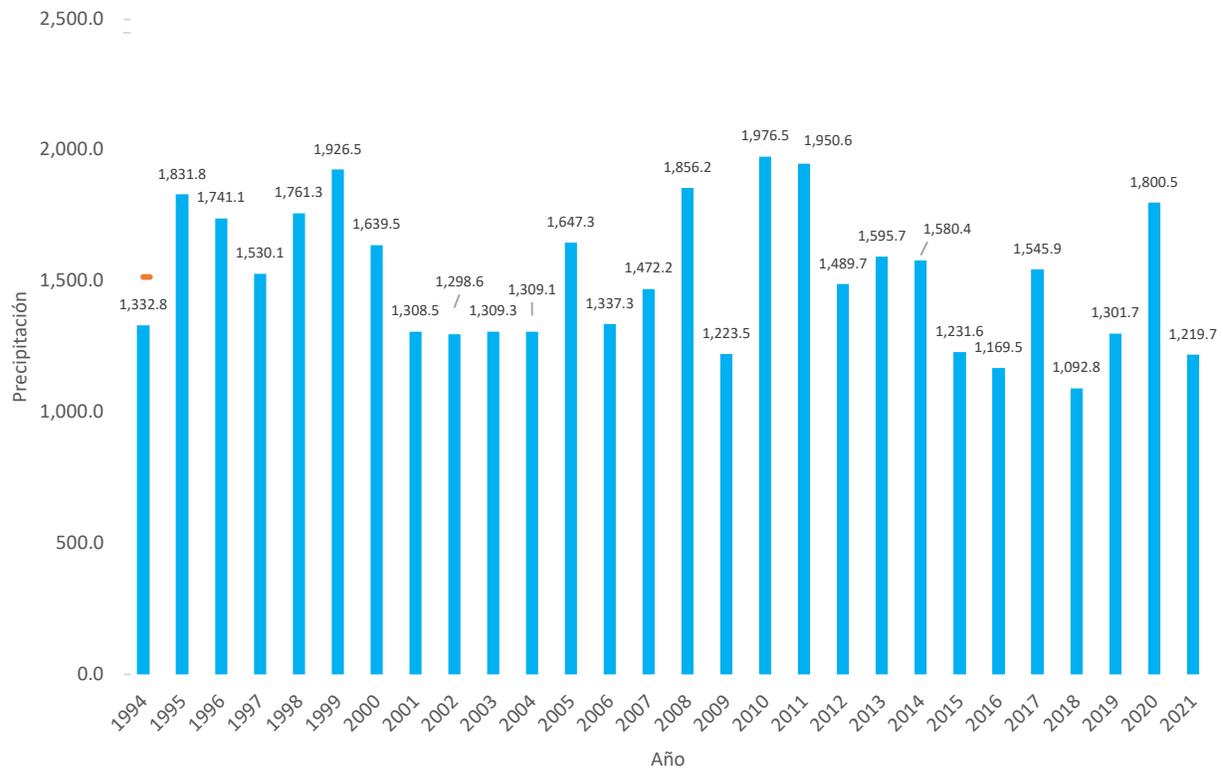
Fuente: POWER, 2022.



Gráfica 2 – Temperatura promedio, máxima y mínima mensual de la subcuenca del río Teculután (1994 a 2021).

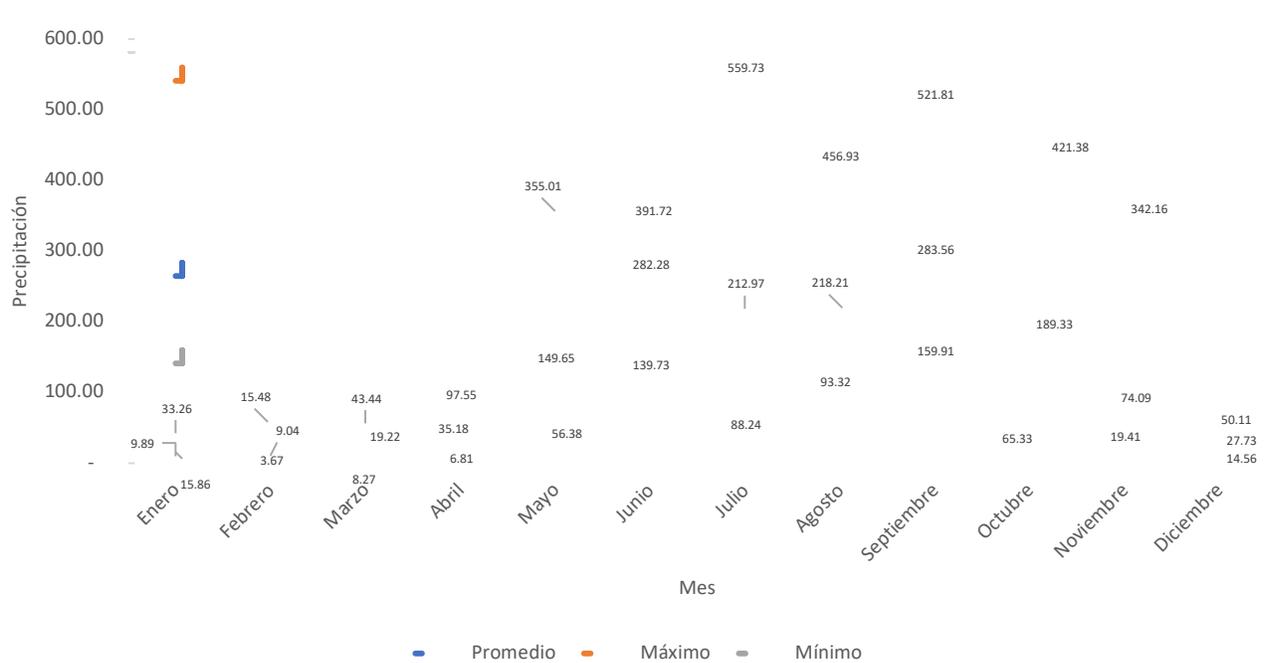
Fuente: POWER, 2022.

La precipitación anual promedio en la subcuenca del río Teculután es de 1,517.1 mm (CHIRPS, 2022) y los meses de mayor precipitación corresponden a septiembre, julio y agosto, con valores medios de precipitación de 559.7 mm, 456.9 mm y 521.81 mm, respectivamente. En la gráfica 3 se observa la precipitación acumulada anual desde 1994 a 2021 y en la gráfica 4, los valores medios, máximos y mínimos mensuales.



Gráfica 3 – Precipitación acumulada anual de la subcuenca del río Teculután (1994 a 2021).

Fuente: CHIRPS, 2022.

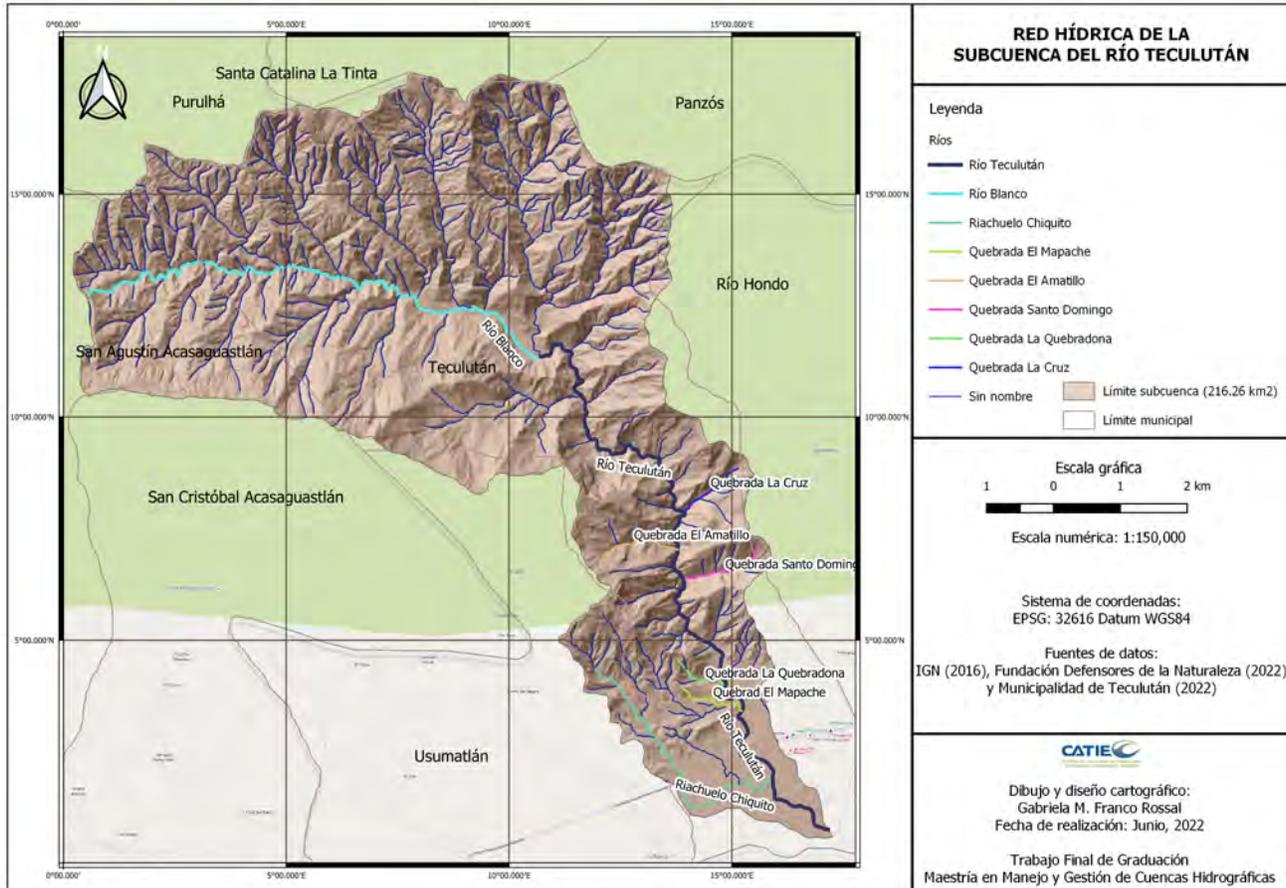


Gráfica 4 – Precipitación promedio, máxima y mínima mensual de la subcuenca del río Teculután (1994 a 2021).

Fuente: CHIRPS, 2022.

3.2.1.3 Recurso hídrico

Como se indicó en el cuadro 1 y puede observarse en el mapa 3, en la subcuenca se puede reconocer una corriente principal, el río Teculután, y tributarias que forman una configuración de drenaje dendrítico (Rosito, 2015).

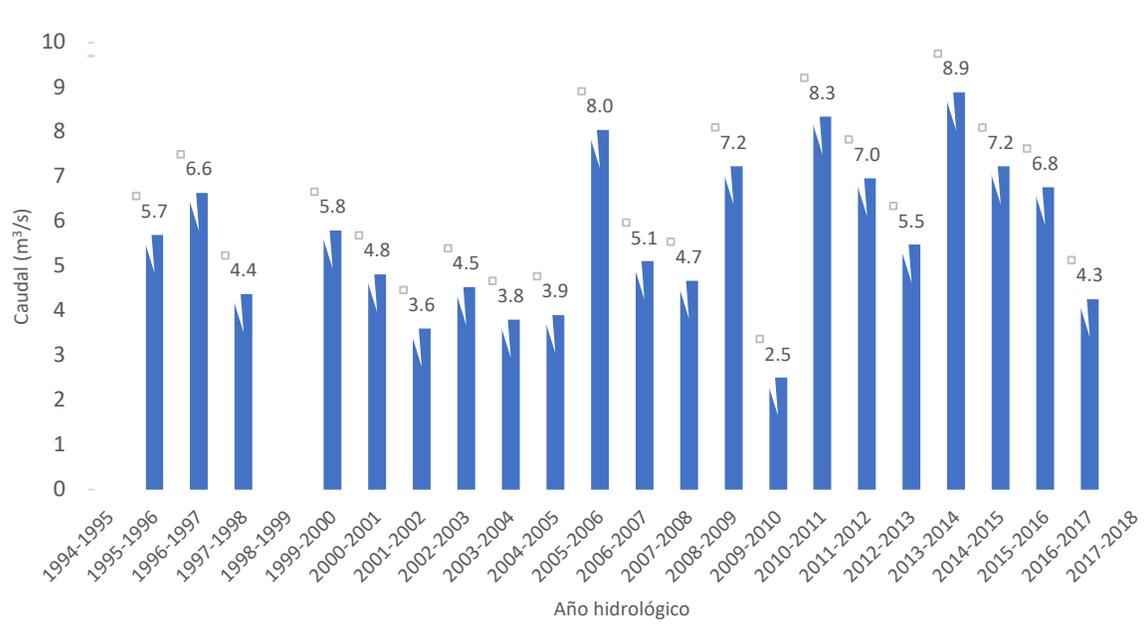


Mapa 3 – Red hídrica de la subcuenca del río Teculután.

Desde septiembre de 1994 a agosto del 2017, en el río Teculután existía una estación hidrológica de tipo limnimétrico denominada Las Minas, operada por el Instituto Nacional de Electrificación -INDE-. La estación estaba ubicada a una altitud de 300 msnm (coordenadas geográficas 15° 1' 12.0" Norte y 89° 44' 24.0" Oeste), lo cual permitía registrar el caudal diario del 86% del área de la subcuenca.

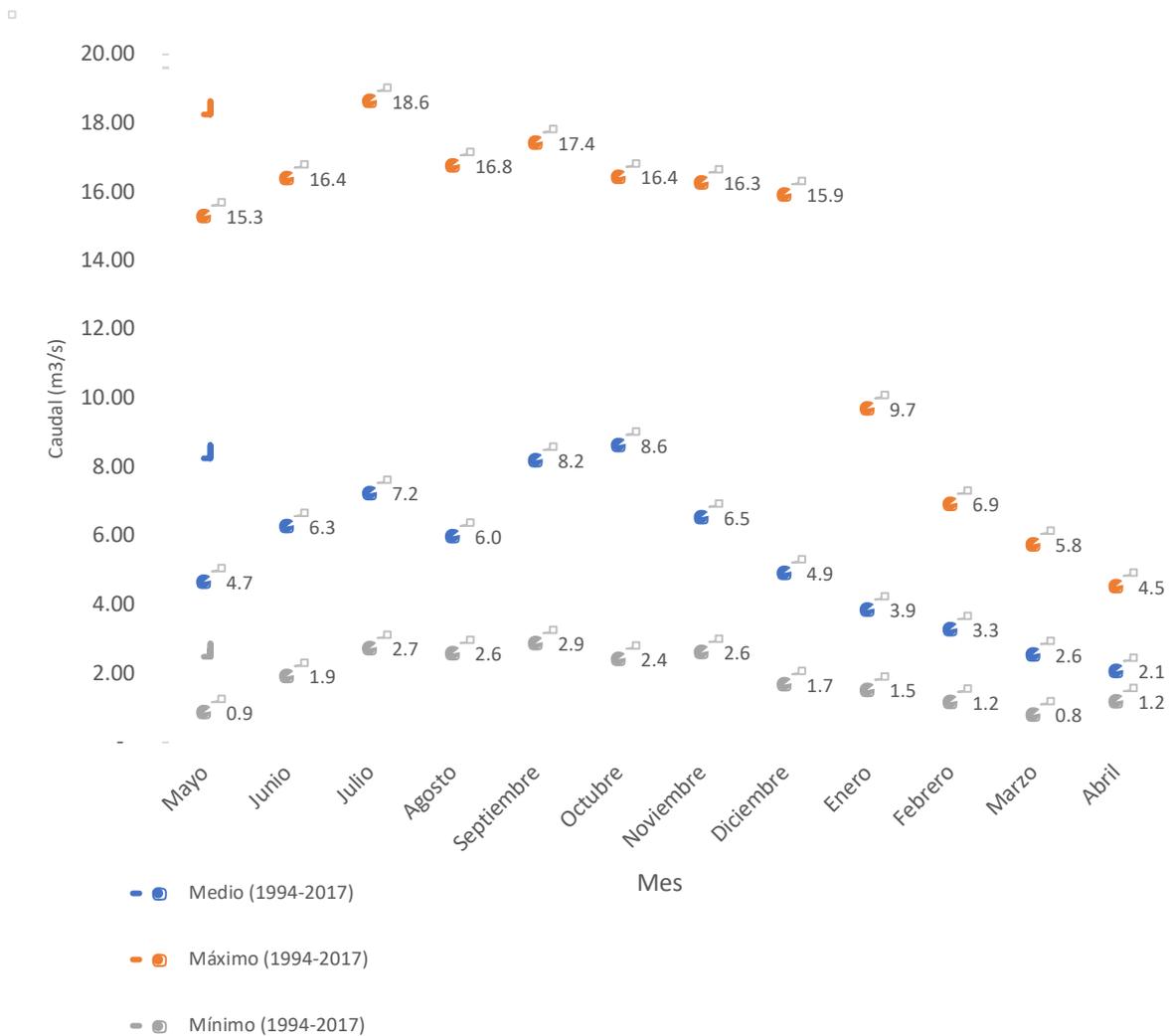
Los registros de 1994 a 2017 muestran un caudal medio anual de 5.4 m³/s con caudales máximos de hasta 18.6 m³/s⁷ para el mes de julio (época lluviosa) y caudales mínimos de hasta 0.80 m³/s en marzo (época seca) (ICC, 2020). En la gráfica 1 se observa el caudal promedio anual por cada año hidrológico y en la gráfica 2, los caudales medios, máximos y mínimos del río Teculután.

⁷ Se tiene un registro de 25 m³/s en noviembre de 1998, pero se debió a las crecidas provocadas por el Huracán Mitch, por lo que se considera un valor anómalo.



Gráfica 5 – Caudal promedio anual por año hidrológico del río Teculután (1994 a 2017).

Fuente: ICC, 2020.



Gráfica 6 – Caudales medios, máximos y mínimos del río Teculután (1994 a 2017).

Fuente: ICC, 2020.

3.2.1.4 Suelos

El 65.7% de los suelos de la subcuenca pertenecen al orden de los inceptisoles y suborden usteps (Ps-Ls) caracterizados por deficiencia de humedad. El orden de los entisoles y su suborden orthents (Eo y Eo-Ps) se encuentra presente en un 27.1% y se caracterizan por ser de poca profundidad y alta pedregosidad. El 5.9% pertenecen al orden de entisoles y suborden psamments (Ep-Ef-Ps-Eo), caracterizados por deficiencia de humedad, baja fertilidad y pedregosidad; mientras que solo el 1.4% es del orden de los ultisoles y suborden udult (Ud-Pd), los cuales se caracterizan por una baja fertilidad y acidez (Fundación Defensores de la Naturaleza, 2022, Cuadro 4 y Mapa 4).

3.2.1.5 Capacidad de uso de la tierra

Como se observa en el cuadro 5 y mapa 5, según la clasificación de capacidad de uso de la tierra del Instituto Nacional de Bosques -INAB-, el 54% de la subcuenca pertenece a tierras forestales para producción y protección (F/Fp), las cuales corresponden a áreas con limitaciones para usos agropecuarios; de pendiente o pedregosidad, con aptitud preferente para realizar un manejo forestal sostenible, tanto del bosque nativo como de plantaciones con fines de aprovechamiento, sin que esto signifique el deterioro de otros recursos naturales (Fundación Defensores de la Naturaleza, 2022).

El 22% de la subcuenca corresponde a tierras forestales de protección (Fp), que se constituyen como áreas con limitaciones severas en cualquiera de los factores limitantes o modificadores; apropiadas para actividades forestales de protección o conservación ambiental exclusiva; son tierras marginales para uso agrícola o pecuario intensivo y tienen como objetivo preservar el ambiente natural, conservar la biodiversidad, así como las fuentes de agua. Estas áreas permiten la investigación científica y el uso ecoturístico en ciertos sitios habilitados para tales fines, sin que esto afecte negativamente el o los ecosistemas presentes en ellas (Fundación Defensores de la Naturaleza, 2022).

El 9% pertenece a la clasificación agroforestería con cultivos permanentes y tierras forestales para producción (Ap/F); son áreas con limitaciones de pendiente y profundidad aptas para el establecimiento de sistemas de cultivos permanentes asociados con árboles (aislados, en bloques o plantaciones, ya sean especies frutales y otras con fines de producción de madera y otros productos forestales) (Fundación Defensores de la Naturaleza, 2022).

El 7% corresponde a la clasificación agricultura con mejoras y agroforestería con cultivos anuales (Am/Aa), las cuales son áreas que presentan limitaciones de uso moderadas con respecto a la pendiente, profundidad, pedregosidad y/o drenaje. Para su cultivo se requieren prácticas de manejo y conservación de suelos, así como medidas agronómicas relativamente intensas y acordes al tipo de cultivo establecido; además, son áreas donde se permite la siembra de cultivos agrícolas asociados con árboles y/o con obras de conservación de suelos y prácticas o técnicas agronómicas de cultivo (Fundación Defensores de la Naturaleza, 2022).

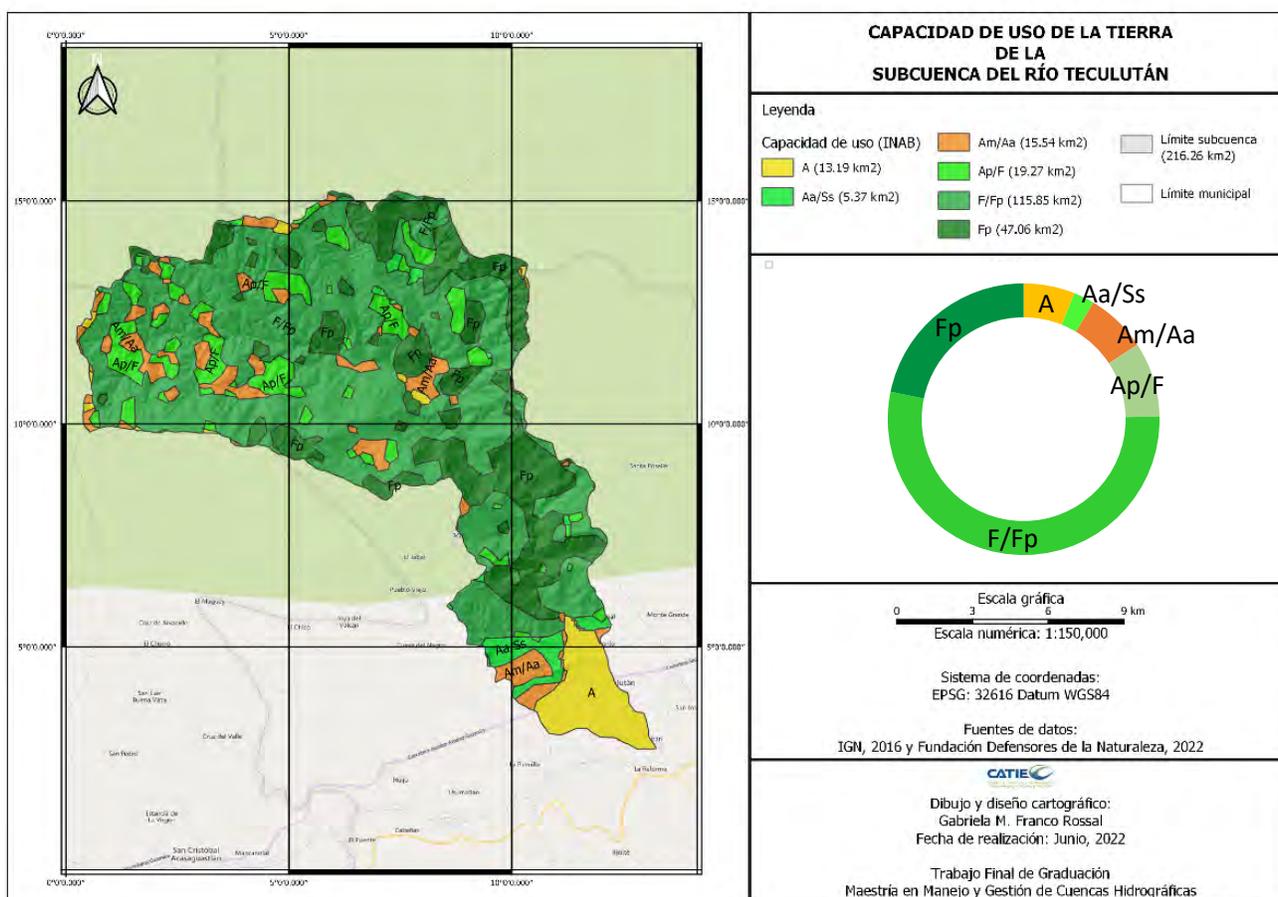
El 6% pertenece a la clasificación de agricultura sin limitaciones (A), que se constituye en áreas con aptitud para cultivos agrícolas sin mayores limitaciones de pendiente, profundidad, pedregosidad o drenaje; permiten cultivos agrícolas en monocultivo o asociados en forma intensiva o extensiva y no requieren o, demandan muy pocas, prácticas intensivas de conservación de suelos (Fundación Defensores de la Naturaleza, 2022).

Finalmente, el 2% corresponde a la categoría agroforestería con cultivos anuales y sistemas silvopastoriles (Aa/Ss) y representan áreas con limitaciones de pendiente y/o profundidad efectiva del suelo, donde se permite la siembra de cultivos agrícolas asociados con árboles y/o con obras de conservación de suelos y prácticas o técnicas agronómicas de cultivo y que permiten el desarrollo de pastos naturales o cultivados y/o asociados con especies arbóreas (Fundación Defensores de la Naturaleza, 2022).

Cuadro 5 – Capacidad de uso de la tierra de la subcuenca del río Teculután.

Categoría	Abreviatura	Área (ha)	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Agricultura sin limitaciones	A	1,319.1	13.2	6%
Agricultura con cultivos anuales/Sistemas silvopastoriles	Aa/Ss	536.5	5.4	2%
Agricultura con mejoras/Agricultura con cultivos anuales	Am/Aa	1,553.7	15.5	7%
Agroforestería con cultivos permanentes/Tierras forestales de producción	Ap/F	1,926.8	19.3	9%
Tierras forestales de producción/Tierras forestales de protección	F/Fp	11,584.8	115.9	54%
Tierras forestales de protección	Fp	4,705.5	47.1	22%
Total		21,626.4	216.3	100%

Fuente: Fundación Defensores de la Naturaleza, 2022.



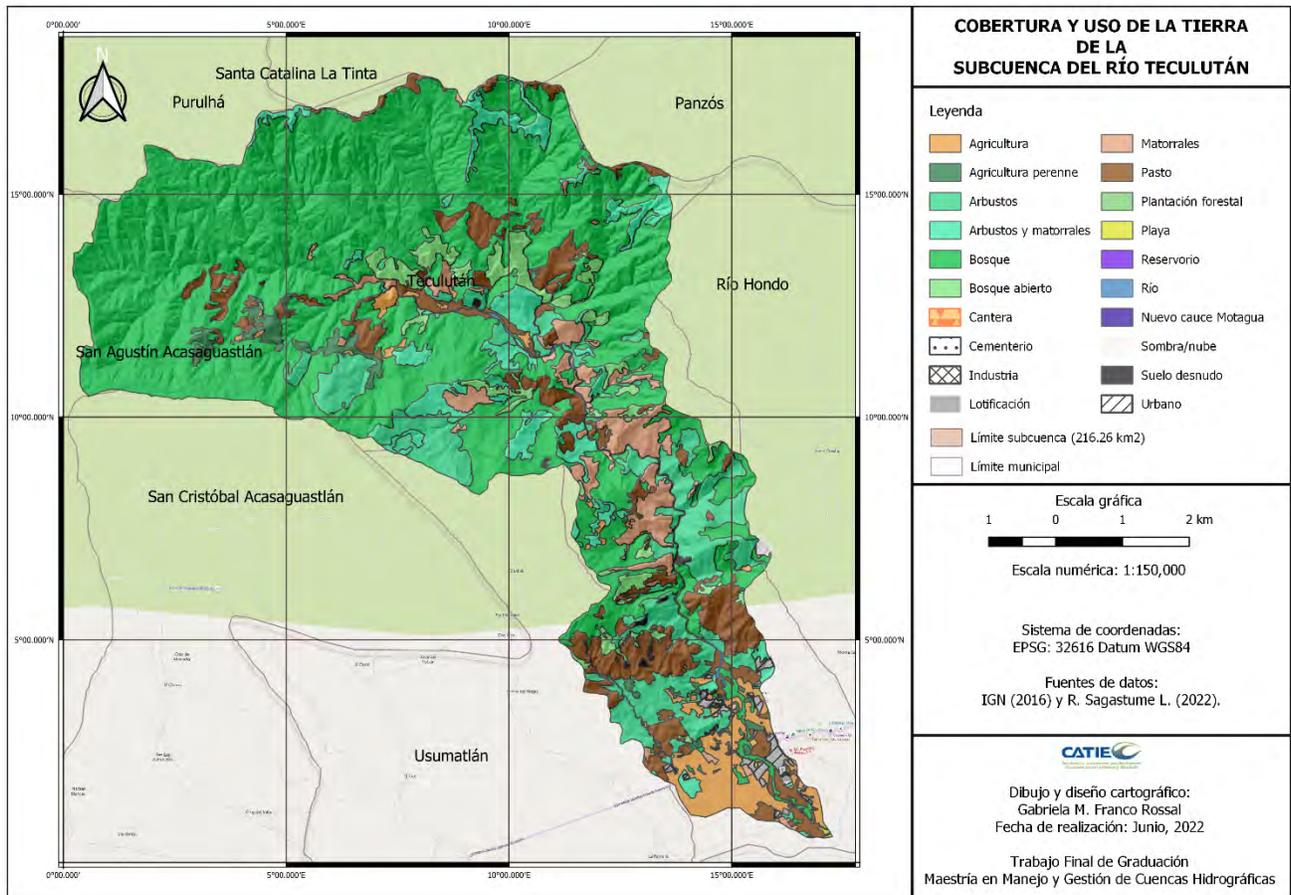
Mapa 5 – Capacidad de uso de la tierra de la subcuenca del río Teculután.

3.2.1.6 Cobertura y uso de la tierra

Las principales categorías de cobertura y uso de la tierra de la subcuenca son bosque con un 59.1% de la superficie, seguido de la categoría de arbustos y matorrales (20.6%), pasto (10.2%), agricultura (3.5%), agricultura perenne (1.4%) y urbano (1.7%). En el cuadro 6 y mapa 6 se detalla la cobertura y uso de la tierra de la subcuenca.

Cuadro 6 – Cobertura y uso de la tierra de la subcuenca del río Teculután.

Categoría	Área (ha)	Área (km²)	Porcentaje (%)
Agricultura	761.6	7.6	3.5
Agricultura perenne	292.8	2.9	1.4
Arbustos	2,309.4	23.1	10.7
Arbustos y matorrales	1,174.1	11.7	5.4
Bosque	12,781.8	127.8	59.1
Bosque abierto	764.4	7.6	3.5
Cantera	3.5	0.03	0.02
Cementerio	1.9	0.02	0.01
Industria	2.7	0.03	0.01
Lotificación	14.7	0.2	0.07
Matorrales	972.5	9.7	4.5
Pasto	2,207.3	22.1	10.2
Plantación forestal	5.8	0.06	0.03
Playa	5.3	0.05	0.02
Reservorio	2.7	0.03	0.01
Río	85.5	0.9	0.40
Río nuevo cauce Motagua	1.1	0.01	0.00
Sombra/nube	18.5	0.2	0.09
Suelo desnudo	48.7	0.5	0.2
Urbano	172.3	1.7	0.8
Total	21,626.4	216.3	100



Mapa 6 – Cobertura y uso de la tierra de la subcuena del río Teculután.

3.2.2 Aspectos socioeconómicos de la subcuena

3.2.2.1 Población

Como puede observarse en el mapa 7, dentro de la subcuena se encuentran 17 poblados, de los cuales 14 pertenecen al municipio de Teculután, 2 al municipio de Usumatlán del departamento de Zacapa y 1 al municipio de San Agustín Acasaguastlán del departamento de El Progreso.

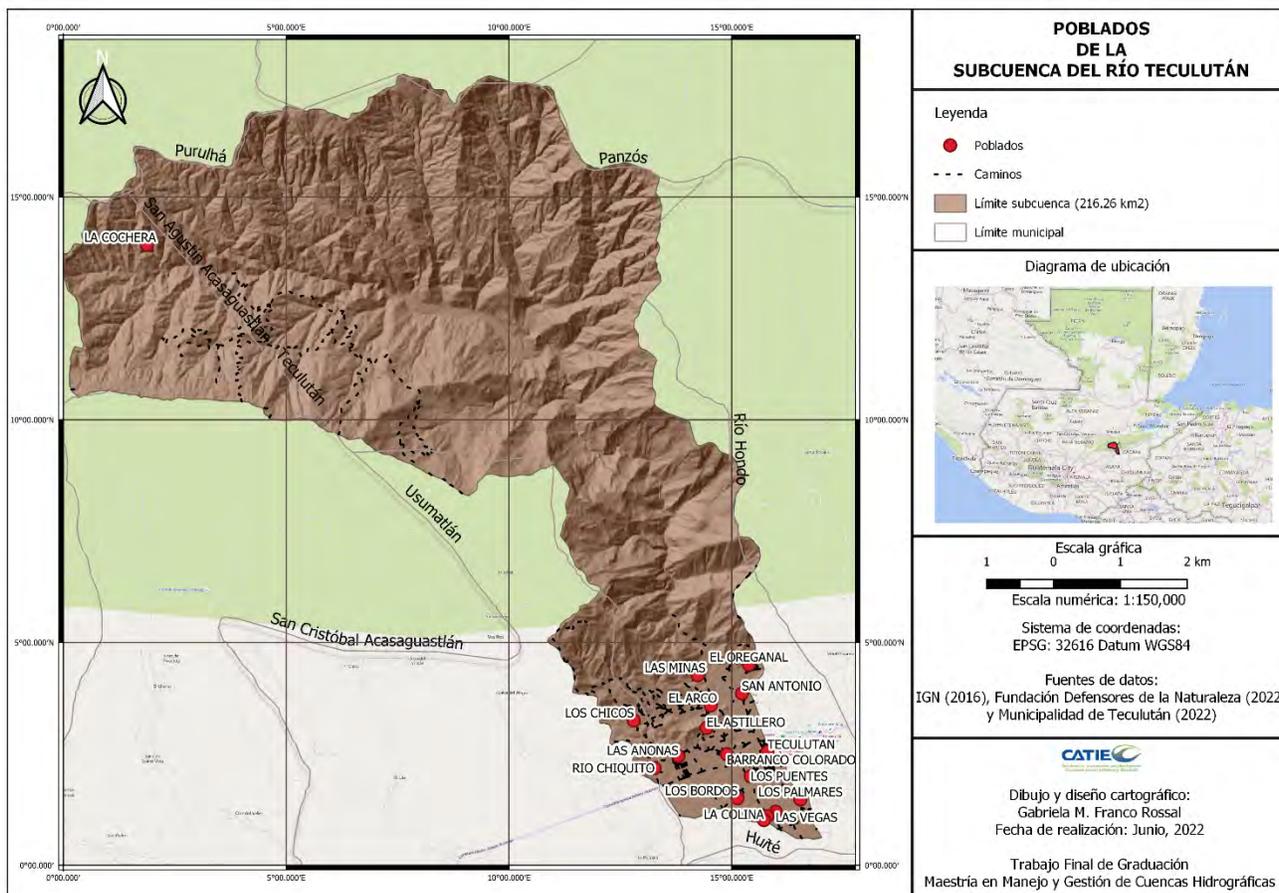
En el cuadro 7 se detalla los poblados de la subcuena y su población que asciende a 16,126 habitantes al año 2022 (INE & Municipalidad de Teculután, 2022).

Cuadro 7 – Población de la subcuena del río Teculután.

Departamento	Municipio	Poblado	Categoría	Población total al 2022 (habitantes)
Zacapa	Teculután	El Oreganal	Caserío	2,159
		Las Minas	Caserío	239
		Los Palmares	Caserío	1,189

Departamento	Municipio	Poblado	Categoría	Población total al 2022 (habitantes)
		Las Anonas	Caserío	467
		Los Bordos	Caserío	584
		Los Puentes	Caserío	1,745
		San Antonio	Aldea	764
		El Arco	Caserío	2,130
		El Astillero	Caserío	557
		Barranco Colorado	Caserío	1,172
		Las Vegas	Lotificación	55
		La Colina	Colonia	372
		Palencia	Caserío	128
	Teculután	Pueblo (cabecera municipal)	3,697	
	Usumatlán	Río Chiquito	Aldea	711
		Los Chicos	Otra	0
El Progreso	San Agustín Acasaguastlán	La Cochera	Otra	0
Población total				16,126

Fuente: INE & Municipalidad de Teculután, 2022



Mapa 7 – Poblados dentro de la subcuenca del río Teculután

3.2.2.2 Organización comunitaria

En el cuadro 8 se indican las principales organizaciones sociales formalmente reconocidas en la subcuenca del río Teculután (Salazar, 2008; Rosito, 2015; UGAM Teculután, 2022).

Cuadro 8 – Organizaciones sociales presentes en la subcuenca del río Teculután.

Nombre de la organización	Actividad principal
Municipalidad de Teculután	Planificación, implementación y administración de la infraestructura y servicios públicos del municipio
COCODES	Desarrollo comunitario
COMUDES	Desarrollo comunitario
COMRED	Emergencia municipal
Damas Teculutecas	Asociación de Desarrollo
Asociación de Deportes	Fomento del deporte
Comité de Feria	Feria municipal
8 Comités de agua	Abastecimiento de agua potable
Comité de usuarios y condueños de tomas	Gestión de las tomas de riego
Comisión Permanente de Protección y Conservación de la Subcuenca del río Teculután Sierra de las Minas	Control de incendios forestales
Asociación Río Teculután Sierra de las Minas	Gobernanza de cuenca
Organizaciones no gubernamentales	Desarrollo comunitario y conservación

Las instituciones gubernamentales que destacan en la subcuenca son la Municipalidad de Teculután, el Ministerio de Educación -MINEDUC-, el Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación -MAGA-, el Centro de Salud, la Secretaría de Obras Sociales de la Esposa del Presidente -SOSEP-, el Tribunal Supremo Electoral -TSE-, el Juzgado de Paz y la Policía Nacional Civil -PNC-.

Además, tienen presencia instituciones, asociaciones y ONGs que se enfocan en la conservación del bosque y el recurso hídrico, como: el Instituto Nacional de Bosques -INAB- a través del Programa de Incentivos Forestales para Poseedores de Extensiones de Tierra de Vocación Forestal o Agroforestal; la Asociación Río Teculután Sierra de Las Minas -ARTESIM-, asociación ambientalista, integrada por Teculutecos⁸ cuyo fin es proteger los recursos naturales de la subcuenca del río Teculután, por medio de programas de reforestación, prevención y control de incendios, protección de la regeneración natural, programa de estufas ahorradoras de leña, bosques energéticos, viveros forestales y frutales, y campañas de educación ambiental; la Fundación Defensores de la Naturaleza, que es la encargada de la coadministración de la Reserva de Biósfera Sierra de las Minas y específicamente en la subcuenca del río Teculután en la que ha desarrollado proyectos para la prevención y control de incendios forestales, así como actividades para promover la educación ambiental y el fortalecimiento de gobernanza; y, WWF Mesoamérica que ha venido realizando investigaciones e iniciativas de desarrollo y conservación en la subcuenca (Salazar, 2008; Rosito, 2015; UGAM Teculután, 2022).

⁸ Teculuteco = Originario de Teculután

La Comisión Permanente y Específica para Conservación y Protección de la Subcuenca del río Teculután y Sierra de las Minas⁹ (constituida en el 2018), tiene el compromiso y voluntad de mejorar la aplicación de las leyes y generar gobernanza en diferentes formas, desde una ordenanza municipal hasta la aplicación de una ley ordinaria con penalidades importantes, para precisamente proteger, conservar y restaurar los recursos naturales de la subcuenca. Lo anterior, mediante la sinergia entre la colaboración, cooperación y coordinación de todos los actores clave: instituciones públicas (gobierno central y municipal), sector privado (hoteles, embotelladoras, agroindustria) y organizaciones no gubernamentales (Defensores de la Naturaleza, WWF) (UGAM Teculután, 2022).

3.2.2.3 Actividades productivas

De acuerdo con López (2009), la actividad agrícola representa el 63% del aporte económico del municipio de Teculután. Entre los cultivos de mayor importancia se encuentra el melón, tabaco, maíz, mango, tomate y chile pimiento. La actividad pecuaria aporta 14% a la economía y está representada, principalmente, por la crianza y engorde de ganado bovino. Por su parte, la actividad artesanal tiene una aportación económica del 9% y está compuesta por herrerías, blockeras y panaderías. La actividad comercial tiene participación económica de 4.3% y está representada en librerías, carnicerías, farmacias, lecherías, ventas de repuestos, refresquerías y casetas. La actividad de servicios tiene una participación económica de 4% y se compone principalmente de comedores, restaurantes, talleres mecánicos, salones de belleza, empresas de transporte, gasolineras, barberías, “café internet”, alquileres y oficinas de servicios públicos. Finalmente, la actividad turística tiene una participación económica del 7%, ya que tiene una amplia oferta de hoteles con servicios de hospedaje, juegos acuáticos y restaurantes.

3.3 Procedimientos metodológicos

Para el presente estudio se desarrollaron las siguientes tres fases, como se muestra en la figura 7: la primera fase, consistió en la recopilación de información secundaria o de gabinete; la segunda, en el procesamiento de los datos y verificación de la información; y la tercera fase, la estimación del efecto de la variabilidad climática en la demanda de agua para consumo humano utilizando WEAP¹⁰, herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas.

⁹ Las noticias y videos publicados por la municipalidad de Teculután y la Comisión permanente están disponibles en: <https://muniteculutan.gob.gt/?s=comisi%C3%B3n+permanente>

¹⁰ <https://www.weap21.org/>

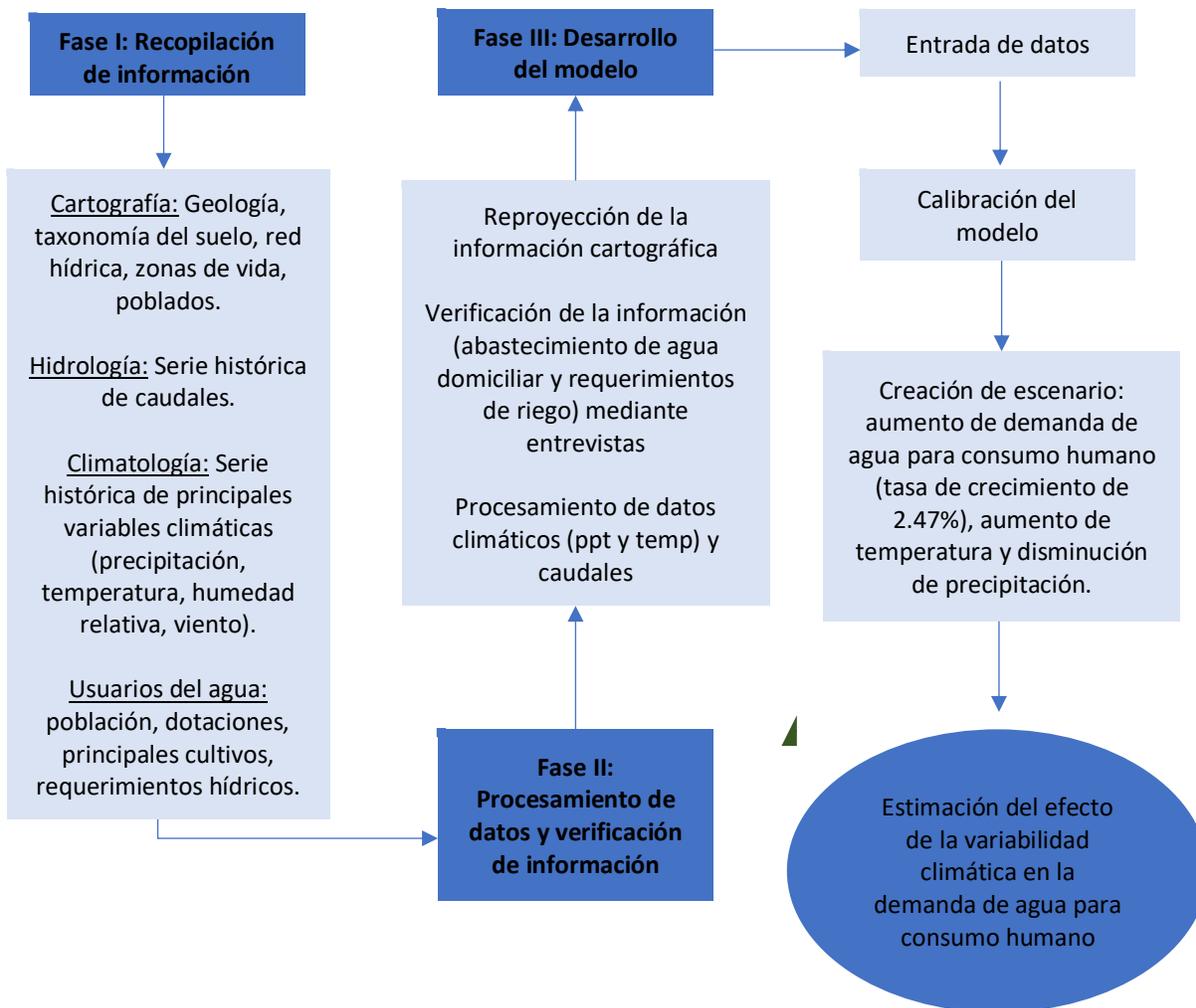


Figura 7 – Diagrama metodológico.

WEAP apoya la planificación de recursos hídricos balanceando la oferta de agua (generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico a escala de subcuenca) con la demanda de agua (caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal con diferencias en las prioridades de demanda y oferta). WEAP emplea una paleta de diferentes objetos y procedimientos accesibles a través de una interfaz gráfica que puede ser usada para analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores de recursos hídricos, incluyendo aquellos relacionados con el clima, condiciones de la cuenca, proyecciones de demanda, condiciones regulatorias, objetivos de operación e infraestructura disponible (Centro de Cambio Global-UC & SEI, 2009).

3.3.1 Fase I: Recopilación de información

Se recopiló información cartográfica, hidrológica, climática, poblacional y de los principales usuarios del agua de la subcuenca, la cual fue proporcionada por entidades gubernamentales, organizaciones no gubernamentales, información de satélite e información publicada en estudios previos. En el cuadro 9 se presenta el listado de los datos que se obtuvieron y la fuente de datos (entidad que los proporcionó).

Cuadro 9 – Resumen de información recopilada.

Información recopilada	Formato	Fuente de datos
Cartografía de la subcuenca		
• DEM (Modelo de Elevación Digital)	GIS	Fundación Defensores de la Naturaleza
• Límite de la subcuenca	GIS	
• Geología	GIS	
• Taxonomía de suelos	GIS	
• Zonas de vida	GIS	
• Capacidad de uso de la tierra	GIS	
• Amenaza por deslizamiento	GIS	
• Amenaza por inundación	GIS	
• Red hídrica	GIS	
• Caminos	GIS	
• Poblados	GIS	
Información climática		
• Precipitación (serie de datos históricas y proyección al 2100)	Excel	CHIRPS POWER INSIVUMEH
• Temperatura (serie de datos históricas y proyección al 2100)	Excel	
• Humedad relativa (serie de datos históricas)	Excel	
• Velocidad del viento (serie de datos históricas)	Excel	
• Latitud	Excel	
Hidrología		
• Serie histórica de caudales del río Teculután	Excel	WWF Guatemala
Usuarios del agua		
• Población de la subcuenca al 2021	Excel Texto	INE Municipalidad de Teculután
• Consumo per cápita	Texto	Municipalidad de Teculután
• Principales cultivos de la subcuenca	Texto	Municipalidad de Teculután ARTESIM
• Requerimiento hídrico de cultivos	Texto	Estudio previo Agricultores de la subcuenca

En esta fase también se elaboró el mapa de uso y cobertura vegetal del suelo de la subcuenca a escala 1:25,000, analizando la imagen satelital de la plataforma Google Earth Pro del año 2022 (Sagastume, 2022); se realizó una clasificación supervisada por medio del software ArcGIS¹¹ utilizando la herramienta de análisis espacial *multivariate* y se delimitaron 20 clases de uso y cobertura. Las categorías de uso y cobertura asignadas corresponden al orden de la adaptación de CORINE Landcover para Guatemala utilizada por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA, 2020).

¹¹ <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

3.3.2 Fase II: Procesamiento de datos y verificación de información

Una vez obtenida la información cartográfica, hidrológica, climática y poblacional de la subcuenca, se procedió a su procesamiento y verificación, para posteriormente ingresar los datos procesados a la herramienta de modelación WEAP. El procesamiento consistió en reproyectar las capas geográficas, calcular los datos mensuales de las variables climáticas y los caudales medios diarios. La información poblacional, los principales usuarios del agua, las dotaciones de agua para consumo humano, los requerimientos de riego de los principales cultivos y para la producción de peces fue verificada con la municipalidad de Teculután y productores locales de la subcuenca.

3.3.2.1 Cartografía

Todas las capas cartográficas se reproyectaron al datum WGS84, ya que es el sistema de referencia de coordenadas geográficas es la requerida por la herramienta de modelación WEAP.

3.3.2.2 Información poblacional

Inicialmente, se obtuvieron los datos a nivel de poblado del XII Censo Nacional de Población y VII de Vivienda del 2018 (Centro Nacional de Información Estadística, 2022) de los municipios de la subcuenca (Teculután, Usumatlán y San Agustín Acasaguastlán). Seguidamente, se realizó una verificación de los poblados del municipio de Teculután y su población, con el apoyo de la Dirección Municipal de Planificación -DMP- de la Municipalidad de Teculután¹²; con esta verificación se constató que, para el 2022, los habitantes que vivían en fincas y en una colonia fueron absorbidos por el caserío o la aldea más cercanos o la cabecera municipal, respectivamente, como se detalla a continuación

- Las fincas El Chupadero y El Manantial, ahora pertenecen al caserío Las Anonas;
- La finca San Antonio pertenece a la aldea San Antonio;
- La finca Las Minas pertenece al caserío Las Minas;
- La finca El Limo pertenece al caserío Los Bordos;
- Tierra Blanca pertenece al caserío El Arco;
- Finca El Pastoral pertenece al caserío Los Palmares;
- Fincas El Zarzal y San Rita pertenecen al caserío El Remolino (fuera de los límites de la subcuenca);
- Finca Aurora pertenece a la aldea Vega del Cobán (fuera de los límites de la subcuenca); y,
- Colonia G&T pertenece a la cabecera municipal de Teculután.

Además, se constató la ubicación de tres nuevos asentamientos dentro de la subcuenca, que no habían sido ubicados anteriormente: sectores Las Vegas, Palencia y La Colina, pertenecientes a la aldea Vega del Cobán. Así como, del traslado de los pocos habitantes de Los Chicos y La Cochera del municipio de San Agustín Acasaguastlán a otras aldeas del municipio.

¹² En el año 2022, la DMP realizó una conformación de nuevas microrregiones y un levantamiento de la población del municipio como parte de la actualización de su Plan de Desarrollo Municipal (PDM).

Para estimar la población actual de Río Chiquito del municipio de Usumatlán, se utilizó el dato del XII Censo Nacional de Población y VII de Vivienda del 2018 y se hizo una proyección de la población al 2022 utilizando la tasa de crecimiento geométrico.

Primero, se estimó la tasa de crecimiento anual de cada uno de los tres poblados mencionados con la siguiente ecuación:

$$i = (s/p)^{\frac{1}{8}} - 1$$

Donde:

i = tasa de crecimiento anual entre los censos 2018 y 2002

s = población del censo 2018

p = población del censo 2002

Seguidamente, se calculó la población al 2022, siguiendo la ecuación:

$$S = P (1 + i)^n$$

Donde:

S = población al 2022

P = población del censo 2018

i = tasa de crecimiento anual entre los censos 2018 y 2002

n = cantidad de años entre el 2022 y el 2018 (4 años)

Poblado	Población al 2022 (habitantes)
Río Chiquito	711

No fue posible validar la información con la municipalidad de Usumatlán.

3.3.2.3 Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután

Consumo humano

El río Teculután abastece al 100% de la población del municipio de Teculután (23,818 habitantes) (UGAM Teculután, 2022); para estimar la demanda de agua para consumo humano¹³¹⁴, se calculó la dotación per cápita, utilizando los resultados de los aforos realizados por la Oficina Municipal de Servicios Públicos de la Municipalidad de Teculután en cinco de los seis tanques de distribución de agua domiciliar en julio del presente año, como se detalla en el cuadro 10, las dotaciones estimadas se promediaron, dando como resultado 130.1 litros/habitante/día.

¹³ En el municipio de Teculután y, en general, en la República de Guatemala, no existe una reglamentación que defina la dotación de agua para consumo humano (comunicación personal con el Ing. Ever Sánchez de León, Departamento de Regulación de los Programas de Salud y Ambiente del MSPAS).

¹⁴ Se excluyó de este análisis a la población del aldea Río Chiquito, del municipio de Usumatlán ya que se abastece del riachuelo Chiquito.

Cuadro 10 – Estimación de la dotación de agua para consumo humano en el municipio de Teculután

No.	Nombre del tanque	Aforo (litros/segundo)	Caudal (litros/día)	Población a la que abastece	Dotación (litros/hab/día)
1	El Manantial	4.1	35,5104	6,196	111
2	Pueblo	3.9	33,2640		
3	San José	3.1	26,9568	2,070	130.2
4	El Mitch	3.4	29,5488	1,983	149

Fuente: Oficina Municipal de Servicios Públicos, Municipalidad de Teculután, 2022.

Con el fin de afinar el modelo hidrológico lo mejor posible, se realizó una estimación de la demanda de agua para riego y la producción de peces; no se incluyó la demanda de agua de la industria (embotelladoras de cerveza y gaseosas) ya que no se abastecen directamente del río Teculután, sino por medio de pozos mecánicos y no se tuvo acceso a los registros de consumo porque son de carácter privado¹⁵.

Riego

Los beneficiarios de riego en la subcuenca hacen uso del agua del río Teculután ya que de su cauce se derivan los 20 canales (localmente llamados tomas) que llevan el agua hacia todas las áreas de riego (Castañeda, 2022). Según Rosito (2015), con relación a los métodos de riego utilizados en la subcuenca, el 75% de los agricultores utilizaban el método de riego por surcos, el 17% por goteo y el 8% restante por inundación (especialmente en los potreros) y Castañeda (2022) considera que, en la actualidad, la proporción se mantiene igual.

Cabe mencionar que la longitud de algunas de las tomas rebasa los límites de la subcuenca, tal es el caso de las tomas “Las Marías” y “Esmeralda” que se extienden hasta la aldea La Palmilla del municipio de Usumatlán y son utilizadas para el riego del cultivo de melón y la “Ordoñez” que se extiende hasta la aldea Pasabien del municipio de Río Hondo, donde se utiliza para el riego del cultivo de melón y plantaciones de stevia (Paz y Castañeda, 2022).

Rosito (2015) contabilizó 2,053 hectáreas bajo riego e identificó alrededor de 1,386 hectáreas más con potencial de riego, conllevando un área potencial total de 3,439 hectáreas. Del área total bajo riego actual (2,053 ha), la principal demanda de agua es de pastos (1,275 ha); melón (583.7 ha) y mango (92.6 ha), ya que representan el 95% del área total bajo riego. En el cuadro 11 se presenta el detalle.

Cuadro 11 – Cultivos importantes bajo riego en la subcuenca del río Teculután.

Uso	Área (ha)	% del área regada	Método de riego
Melón	583.7	28.4	Goteo
Tomate y chile pimiento	14.8	0.7	Goteo
Pasto	1,275	62.1	Superficie
Mango	92.6	4.5	Superficie
Limón	10.2	0.5	Superficie
Maíz	60	2.9	Superficie

¹⁵ En general, en la República de Guatemala no se cuenta con información pública sobre el volumen de agua existente en el manto freático.

Uso	Área (ha)	% del área regada	Método de riego
Caña de azúcar	6.5	0.3	Superficie
Tillandsias bajo sarán	10.4	0.5	Microaspersión
	2,053.2	100	

Fuente: Rosito, 2015.

Debido a que las derivaciones de las tomas sobre el cauce principal no cuentan con estructuras de medición y control de flujo, se desconoce los caudales medios que cada sistema extrae del río Teculután. La única estimación que existe es la realizada por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos -USACE- en marzo del año 2000, en la cual se efectuaron mediciones de caudal en cinco tomas de riego (Toma Nueva, Castañeda, San Antonio, Cordoneña y Paiceña), determinando valores medios de 224, 135, 56, 140 y 56 litros/segundo, respectivamente. En su estudio, USACE estimó una extracción promedio de las tomas de alrededor de 2,000 litros/segundo (2 m³/segundo) (Rosito, 2015), dato que sigue siendo utilizado por la Municipalidad de Teculután como un indicativo de la cantidad total de agua captada por los sistemas de riego (UGAM Teculután, 2022).

La estimación de la demanda de agua para riego fue realizada con base a los requerimientos de riego de los principales cultivos bajo riego en la subcuenca (Cuadro 11). Calculados por el Ingeniero Edgar Juárez (Juárez, 2008)¹⁶ según el área que cubren, la cual, de acuerdo con los agricultores entrevistados¹⁷, su patrón se ha mantenido prácticamente constante para la mayoría de los cultivos, con excepción del melón y los pastizales que en los últimos cinco años el área se ha extendido un 10%, y actualmente existen alrededor de 35 hectáreas con caña de azúcar. Los requerimientos de riego y la extensión de los cultivos se muestran en el cuadro 12.

Cuadro 12 – Requerimientos de riego y extensión de los principales cultivos en la subcuenca del río Teculután.

Cultivo	ET total (mm)	RR bruto (mm)	Vol. bruto riego por hectárea (m ³ /ha)	Área (ha)	Volumen total (m ³)
Tomate y chile	245.2	445.9	4,458.9	15	66,884
Pasto	116.7	1,910	19,100	1,403	26,797,300
Limón	1,195.8	2,128.7	21,286.7	10	212,867
Mango	1,317.3	2,446.7	24,466.7	93	2,275,403
Caña de azúcar	1,250.5	2,180	21,800	35	763,000
Maíz	256.9	856.2	8,561.7	60	513,702
Melón	162	294.6	2,945.5	642	1,890,978

Notas: Et = Evapotranspiración real; RR = requerimiento de riego; Vol = volumen.

Fuente: Juárez, 2008.

¹⁶ El consumo de agua de los cultivos fueron calculados con datos climáticos de temperatura, viento, radiación y humedad relativa de la estación Pasabien, Zacapa, los que alimentaron la ecuación de Penman Monteith para estimar la evapotranspiración de referencia mensual (Eto). Los valores climáticos usados fueron el promedio mensual de 13 años de registros (1990-2002). Los estimados de Eto fueron multiplicados por valores de kc recomendados por FAO, obteniendo la evapotranspiración máxima por ciclo de cultivo. Los requerimientos de agua para riego mensuales (RR) fueron estimados restando la precipitación efectiva de la evapotranspiración máxima mensual, definiendo como precipitación efectiva el 70% de la precipitación media mensual registrada; los requerimientos de agua para riego por ciclo de cultivo se determinaron como la sumatoria de los requerimientos mensuales.

¹⁷ Héctor G. Castañeda (agricultor y condueño de toma), Allan Trujillo (Jefe riegos de melonera Classic), Luis Pallais (agricultor y condueño de toma).

Producción de peces

No existen registros oficiales sobre la producción de peces en la subcuenca; sin embargo, los productores entrevistados¹⁸, así como la UGAM Teculután estima que existen alrededor de 20 estanques para la producción de tilapia, que se abastecen de las tomas o canales de riego del río Teculután.

La estimación de la demanda de agua de los estanques fue realizada con base a las dimensiones típicas que utilizan los productores (70 m de largo x 30 m de ancho x 1.5 m de profundidad) y consideran una tasa de recambio de agua por estanque del 30% a la semana. En el cuadro 13 se detallan los valores para el cálculo.

Cuadro 13 – Volumen de agua utilizado por cada estanque de peces en la subcuenca del río Teculután.

Total, de estanques	Volumen por estanque (m ³)	Volumen de recambio por estanque (m ³ /semana)
20	3,150	945

3.3.2.4 Línea base de datos climáticos

Debido a que no existe una estación meteorológica dentro de la subcuenca del río Teculután, se utilizaron los registros de precipitación del sistema Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS¹⁹) desarrollado por el Climate Hazards Center de la Universidad de Santa Bárbara (California, Estados Unidos) y los registros de temperatura media, humedad relativa y velocidad del viento del Prediction Of WorldWide Energy Resource (POWER²⁰) desarrollado por la NASA, para las coordenadas 15° 1' 12.000" Norte y 89° 44' 24.000" Oeste que corresponden a la ubicación de la estación hidrométrica Las Minas.

Asimismo, se utilizaron los datos mensuales de los años 1994 a 2021 (período que se estableció como la línea base del estudio) de las siguientes variables climáticas: precipitación acumulada, temperatura media, velocidad del viento media y humedad relativa media. En Anexo se muestran las series de datos utilizadas.

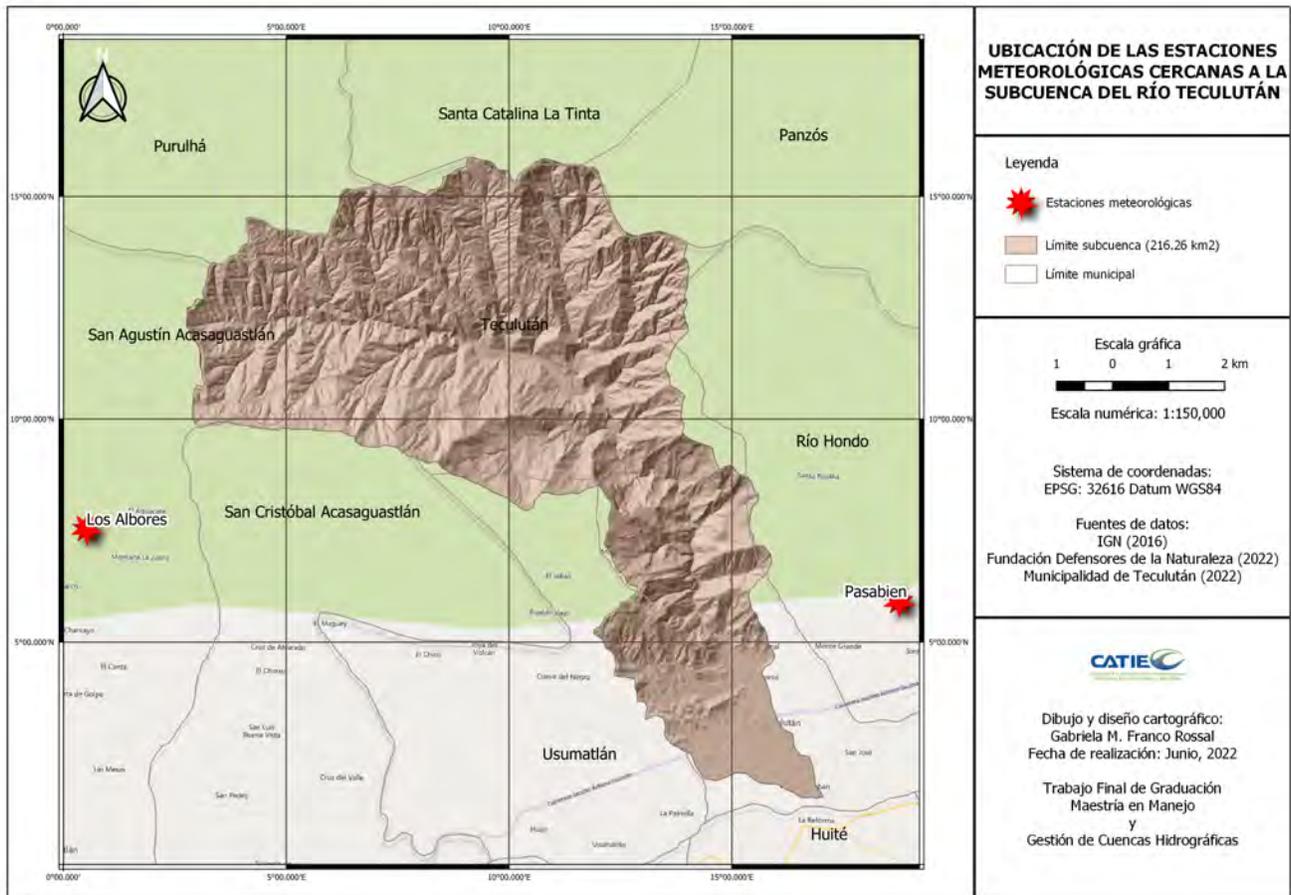
Inicialmente para el estudio se utilizaron los registros de las estaciones meteorológicas²¹ más cercanas a la subcuenca, siendo estas las estaciones Pasabien (ubicada en el municipio de Río Hondo, departamento de Zacapa en las coordenadas 15° 1' 48.0" Norte y 89° 40' 48.0" Oeste) y Los Albores (ubicada en el municipio de San Agustín Acasaguastlán, departamento de El Progreso en las coordenadas 15° 3' 0.0" Norte y 89° 57' 0.0" Oeste) (Mapa 8); sin embargo, al momento de calibrar el modelo hidrológico de WEAP con la información hidrológica y climática, las diferencias eran significativamente mayores si se utilizaba la información de las estaciones meteorológicas que con los datos satelitales, es por ello que se toma la decisión de utilizar los datos satelitales, lo cual se explicará con mayor detalle en el inciso 3.3.3.3.

¹⁸ Gustavo A. Pérez (piscicultor y condueño de toma) y German Orellana (piscicultor y condueño de toma).

¹⁹ Disponible en: <https://climateserv.servirglobal.net/map>

²⁰ Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/>

²¹ Base de datos proporcionada por el Departamento de Investigación y Servicios Climatológicos del Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH-.



Mapa 8 – Ubicación de las estaciones meteorológicas cercanas a la subcuenca del río Teculután

3.3.2.5 Caudales del río Teculután

Los datos de caudal medio diario (m^3/s) del río Teculután registrados por la estación hidrométrica Las Minas desde septiembre del año 1994 hasta agosto del año 2017, corresponden a la base de datos del Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF por sus siglas en inglés) de Guatemala y para efectos del estudio, se calcularon los caudales medios mensuales; en Anexo se muestra la serie de datos utilizada.

3.3.2.6 Escenarios de cambio climático

Se utilizaron dos de los escenarios de Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) (IPCC, 2014): a) el primero correspondió al RCP 4.5 el cual es un escenario intermedio (escenario de estabilización), identificado como al que se inclinan las tendencias climáticas actuales en algunas regiones de Guatemala (ICC, 2020); y, b) el RCP 8.5 que es el escenario más pesimista, con el cual se puede tener una idea de las peores condiciones a las que se podría llegar (Cuadro 14).

Cuadro 14 – Trayectorias de concentración representativas (RCP) analizadas

Escenario	FR (W/m ²)	Tendencia del FR	CO ₂ en 2,100 (ppm)
RCP 4.5	4.5	Estable en 2,100	538
RCP 8.5	8.5	Creciente	936

*Nota: Escenario = Trayectoria o camino representativo de concentración. FR (W/m²) = forzamiento radiativo en watts por metro cuadrado de la superficie del planeta. Tendencia del FR = Tendencia que se espera que tenga el forzamiento radiativo en 2,100. CO₂ en 2100 (ppm) = cantidad de dióxido de carbono en partes por millón proyectadas para el año 2100.

Fuente: IPCC, 2014.

Para ello, se utilizaron las proyecciones de precipitación acumulada mensual y temperatura media mensual proporcionadas por la Unidad de Cambio Climático del INSIVUMEH, la cual cuenta con una resolución temporal de seis horas y resolución espacial a 25 kilómetros, y que inicia desde el año 2006 hasta el 2100.

3.3.3 Fase III: Desarrollo de la modelación de la subcuenca

El procedimiento de la modelación se detalla, a continuación. En Anexo se muestran las figuras de cada paso.

3.3.3.1 Entrada de datos

- 1. Horizonte de tiempo.** Se definió la línea base (horizonte de tiempo) para el modelo hidrológico desde el año 1994 hasta el 2021, de acuerdo con la información climática e hidrológica disponible para la subcuenca.
- 2. Ubicación del río Teculután.** Se cargaron los archivos tipo *shapefiles (.shp)* del límite de la subcuenca y de su red hídrica, delineado con el cauce del río Teculután.
- 3. Sitios de demanda.** Se registraron los datos correspondientes a tipos de demanda de agua de la subcuenca (consumo humano, riego y piscicultura), denominados como “sitios de demanda”.
 - Demanda de agua para consumo humano: se registró el dato de la población actual del municipio (23,818 habitantes) y la dotación promedio (130.1 litros/habitante/día). Se establece una variación mensual proporcional al número de días de cada mes²², y se define un porcentaje de consumo del 60% ya que el 40% corresponde a pérdidas en el sistema de abastecimiento (UGAM Teculután, 2022).
 - Demanda de agua para riego: se dividió en dos categorías en función de los tipos de cultivos presentes en la subcuenca: permanente y anual.
 - i. Riego permanente: en esta categoría se registra la cobertura y requerimiento de riego del pasto y de los cultivos de limón, mango y caña de azúcar. Se establece una variación mensual proporcional al número de días de cada mes, y se define un porcentaje de consumo del 60% (UGAM Teculután, 2022).
 - ii. Riego anual: en esta categoría se registra la cobertura y requerimiento de riego de los cultivos de melón, maíz, tomate y chile. A partir del cultivo dominante (melón) se define

²² Enero, Marzo, Mayo, Julio, Agosto, Octubre y Diciembre = 31 días; Abril, Junio, Septiembre y Noviembre = 30 días; Febrero = 28 días.

la variación mensual, siendo proporcional durante los meses de septiembre a marzo. Se define un porcentaje de consumo del 60% (UGAM Teculután, 2022).

- iii. Demanda de agua para piscicultura: se ingresó el total de estanques de peces en la subcuenca (20) y se utilizó el dato de consumo según el volumen de recambio de agua. Se establece una variación mensual proporcional al número de días de cada mes. Se define un porcentaje de consumo del 60% (UGAM Teculután, 2022).

3.3.3.2 Construcción del modelo de la subcuenca

La “modelación” consiste en simular los procesos hidrológicos y climáticos que ocurren dentro de la subcuenca y para realizarla se utilizó el método de humedad del suelo (*The Soil Moisture Method*) de WEAP, el cual representa a la subcuenca (*catchment*) con dos capas de suelo: en la capa superior se simula la evapotranspiración considerando la irrigación tanto en sectores agrícolas como en los no agrícolas, el escurrimiento y el interflujo poco profundo; mientras que en la capa profunda se simula el flujo base del río y los cambios de humedad en la tierra (SEI, 2015). Este método requiere de los parámetros de uso del suelo y de clima que se listan en el cuadro 15 y cuadro 16.

Cuadro 15 – Parámetros de uso del suelo del método de humedad del suelo de WEAP.

Parámetro	Descripción
Área	Área de tierra para el tipo de cobertura vegetal dentro de la subcuenca (<i>catchment</i>)
Kc	Coeficiente de cultivo, relativo al cultivo referencial, para un tipo de tierra.
Capacidad de agua en la zona de raíz (Sw)	El agua efectiva manteniendo la capacidad de la capa superficial de suelo, representado en milímetros.
Capacidad de agua profunda (Dw)	Agua efectiva manteniendo la capacidad de la capa profunda del suelo. Es n valor singular para el <i>catchment</i> y no varía según el tipo de uso.
Conductividad profunda (Kd)	La tasa de conductividad (longitud/tiempo) de la capa profunda saturada (cuando hay un almacenaje relativo, Z2 =1), que controla la transformación del caudal base. Es un valor singular para el <i>catchment</i> y no varía según el tipo de uso. El caudal base se incrementa si este parámetro incrementa.
Factor de resistencia al escurrimiento (RRF)	Usado para controlar la respuesta del escurrimiento superficial. El escurrimiento tendrá a decrecer con altos valores de este índice (rango 0.1 a 10). Este parámetro puede varias entre el tipo de uso.
Conductividad en la zona de raíz (Ks)	Tasa de conductividad en la zona de raíz a la saturación (cuando hay una almacenaje relativo Z1=1), que será repartida, de acuerdo con la preferencia de la dirección del flujo, entre el caudal poco profundo y caudal hacia la capa profunda de suelo.
Dirección de flujo preferente (PFD)	1= 100% horizontal, 0 = 100% vertical caudal. Usado para repartir el caudal fuera de la capa de la zona de raíz entre el caudal poco profundo y caudal hacia la capa profunda de suelo o agua subterránea.
Z1 inicial	El valor inicial Z1 al inicio de la simulación. Es el almacenaje relativo dado como porcentaje del almacenamiento total efectivo de la capacidad de agua en la zona de raíz.
Z2 inicial	El valor inicial Z2 al inicio de la simulación. Es el almacenaje relativo dado como porcentaje del almacenamiento total efectivo de la capacidad de agua profunda.

Fuente: SEI, 2015.

Cuadro 16 – Parámetros climáticos del método de humedad del suelo de WEAP.

Parámetro	Descripción
Precipitación	Series de precipitación mensual acumulada (expresada en milímetros)
Temperatura	Series de temperatura mensual promedio (expresada en grados centígrados)
Humedad	Promedio mensual de la humedad relativa (expresado en porcentaje)
Viento	Promedio mensual de la velocidad del viento (expresado en milímetros/segundo)
Latitud	Latitud en grados

Fuente: SEI, 2015.

1. **Delimitación de la subcuenca.** Se delimitó la subcuenca (*catchment* como se denomina en WEAP) en función del punto de interés donde se deseaba simular el valor del caudal del río, para lo cual fueron utilizadas las coordenadas geográficas de la estación Las Minas (15° 1' 12.0" Norte y 89° 44' 24.0" Oeste).
2. **Caracterización de la cobertura vegetal y uso del suelo.** A partir de la información obtenida de la cobertura vegetal y uso del suelo de la subcuenca (Sagastume, 2022), se redujo el número de categorías para simplificar el esfuerzo en el desarrollo y la calibración del modelo (Centro de Cambio Global-UC & SEI, 2009) y se registró el área que cubren; en el cuadro 17 se muestra la equivalencia entre las categorías originales y finales usadas en el modelo.

Cuadro 17 – Categorías de suelo original y agrupación utilizada en el modelo de la subcuenca del río Teculután.

Categoría original (Sagastume, 2022)	Categoría utilizada en WEAP
Agricultura	Agricultura
Agricultura perenne	Agricultura perenne
Arbustos Arbustos y matorrales Matorrales	Arbustos y matorrales
Bosque	Bosque
Bosque abierto	Bosque abierto
Pasto	Pasto
Plantación forestal	Plantación forestal
Reservorio	Reservorio
Río Río nuevo cauce Motagua	Río
Cantera Cementerio Industria Lotificación Urbano	Urbano
Playa	Playa
Sombra/nube	Sombra
Suelo desnudo	Suelo desnudo

3. **Datos climáticos.** Se registraron los datos de precipitación acumulada mensual (CHIRPS, 2022) y los promedios mensuales de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento (POWER, 2022) de los años 1994 a 2021.

3.3.3.3 Calibración del modelo de la subcuenca

En la etapa de “calibración” del modelo se pretende lograr una representación de los caudales que asemeje los datos históricos de la forma más cercana posible y para ello se realizan comparaciones entre las series de datos de caudales en puntos específicos de la subcuenca (estación Las Minas) versus los caudales simulados por WEAP (Lozano, M.A. & Valeriano, K, 2022). Con base en estas comparaciones WEAP analiza medidas estadísticas para estimar la precisión del modelo y de esta manera ajustar los parámetros hasta lograr la mejor respuesta de dichas medidas estadísticas (Centro de Cambio Global-UC & SEI, 2009).

1. **Parámetros de uso del suelo.** Se registraron los coeficientes de cultivo, diferenciando las coberturas agrícolas ($k_c = 0.8$) de las no agrícolas ($k_c = 1$) (Juárez, 2008). El método de humedad del suelo de WEAP también considera los parámetros de capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (S_w), capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (D_w), factor de resistencia a la escorrentía (RRF), conductividad de zona de raíces (K_s), conductividad de zona profunda (K_d), dirección preferencial de flujo (f), nivel de humedad en la zona de raíces (Z_1) y nivel de humedad en la zona profunda (Z_2); sin embargo, no se cuenta con información de la subcuenca a ese detalle, por tal motivo, se utilizaron los rangos que WEAP establece por defecto.
2. **Período de calibración.** Se definió el horizonte de calibración en los años 2000 a 2016, ya que corresponde a los años en que los registros de la estación hidrométrica Las Minas están completos para todos los meses. Seguidamente, se ingresaron los valores de los caudales medios mensuales.
3. **Análisis estadístico.** Para estimar la precisión del modelo, es decir, el grado de correspondencia entre los caudales observados y modelados, WEAP analiza dos índices/métricas utilizadas normalmente en la calibración de modelos hidrológicos: el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el sesgo (o Bias o desviación relativa de los caudales) (Centro de Cambio Global-UC & SEI, 2009).

Como se indicó en el inciso 3.3.2.5, se utilizaron los registros mensuales de precipitación acumulada, temperatura media, humedad relativa media, velocidad del viento media y fracción de nubosidad de la estación meteorológica Pasabien ($15^\circ 1' 48.0''$ Norte y $89^\circ 40' 48.0''$ Oeste); sin embargo, al correr el modelo, las diferencias entre los caudales simulados y los observados eran significativas y consecuentemente las estadísticas mencionadas se encontraban alejadas de los valores “deseados” (Nash = -4.4 y Bias = -61%), como puede observarse en la figura 8.

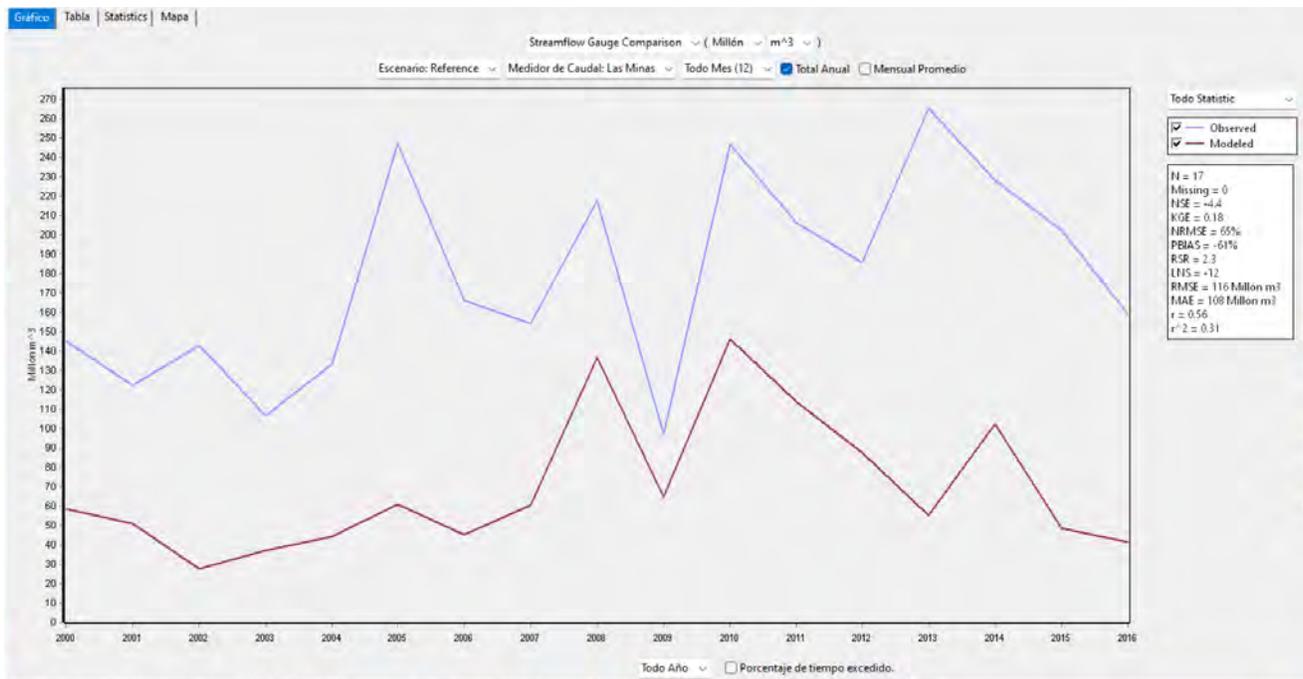


Figura 8 – Resultado de la calibración del modelo, utilizando los datos climáticos de la estación Pasabien.

Con el fin de ajustar el modelo, se procedió a utilizar los registros de la estación meteorológica Los Albores (15° 3' 0.0" Norte y 89° 57' 0.0" Oeste), que comprende a la otra estación más cercana a la subcuenca. Se ingresaron los valores mensuales de las mismas variables climáticas, con excepción de la humedad relativa que no es medida por esta estación. Además, se cambió el horizonte del modelo a los años 2005 a 2016, ya que esta estación no cuenta con registros de las variables climáticas previo al 2005.

Sin embargo, al correr el modelo, las diferencias entre los caudales simulados y los observados eran significativamente mayores a las obtenidas con los datos climáticos de la estación Pasabien. Además, los resultados de los índices de calibración se encontraron bastante más alejados de los valores "deseados" (Nash = -19 y Bias = 82%), como puede observarse en la figura 9.

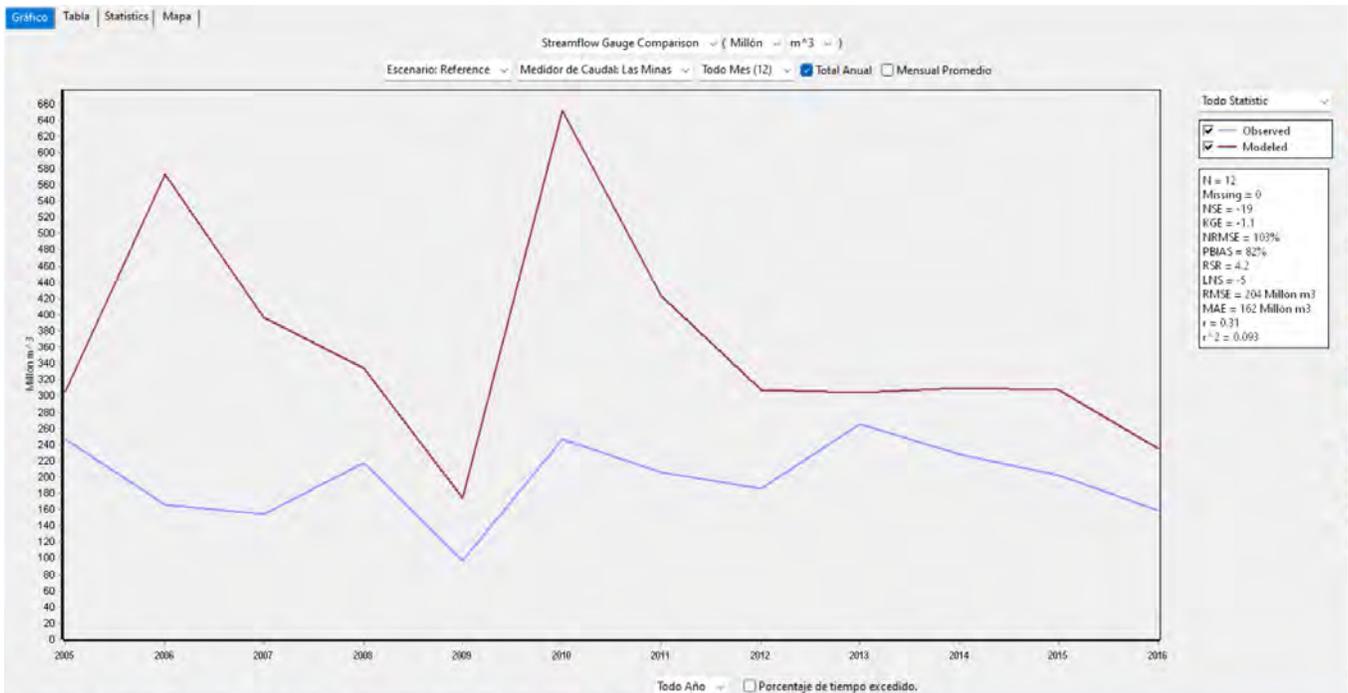


Figura 9 – Resultado de la calibración del modelo, utilizando los datos climáticos de la estación Los Albores.

Por lo anterior, se tomó la decisión de utilizar datos climáticos satelitales para el área de la subcuenca. La precipitación acumulada mensual se obtuvo de los registros del sistema Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS)²³ desarrollado por el Climate Hazards Center de la Universidad de Santa Bárbara (California, Estados Unidos) y los promedios mensuales de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento se obtuvieron del Prediction Of WorldWide Energy Resource (POWER)²⁴ desarrollado por la NASA.

Como se observa en la figura 10, aún se observan diferencias, siendo los caudales modelados mayores que los observados en los años 2001, 2003, 2004, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 y 2012, a diferencia de los años 2000, 2002, 2005, 2006, 2013, 2014, 2015 y 2016, en los que los caudales observados fueron mayores que los modelados (ver detalle en cuadro 18); sin embargo, los resultados de los índices de calibración mejoraron considerablemente, obteniendo un índice Nash de 0.42 y un porcentaje de Bias de 0.67%. Estas diferencias podrían deberse, entre otros factores, a la retención de agua de lluvia y la capacidad de infiltración del suelo de la subcuenca, que, debido a la falta de información, no fueron calculados en el modelo.

²³ CHIRPS ofrece datos diarios de precipitación con una resolución de 0.05 grados (5 x 5 km); por lo que, utilizando el software QGIS, se crearon celdas de 5 x 5 km sobre el archivo tipo *shapefile* (.shp) (12 celdas en total) del área de la subcuenca que cubría la estación hidrométrica Las Minas, a las cuales se calculó su centroide y a partir de las coordenadas de cada centroide se descargaron los datos diarios de CHIRPS. Posteriormente, se calculó la precipitación acumulada mensual de cada centroide y utilizando el promedio ponderado se estimó la precipitación acumulada mensual del área de la subcuenca.

²⁴ De POWER se obtuvieron los datos diarios de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento utilizando las coordenadas 15° 1' 12.0" Norte y 89° 44' 24.0" Oeste, que corresponden a la ubicación de la estación hidrométrica Las Minas. Posteriormente, se calcularon los valores mensuales promedio de cada variable.



Figura 10 – Resultado de la calibración del modelo, utilizando los datos climáticos satelitales.

Cuadro 18 – Comparación entre los caudales modelados y observados del río Teculután, período 2000-2016 (expresados en millones de metros cúbicos).

Año	Caudales (millones de m³)	
	Observados	Modelados
2000	145.3	118.3
2001	122.2	130.0
2002	142.9	132.2
2003	106.5	134.8
2004	133.4	136.6
2005	247.2	216.6
2006	165.9	152.9
2007	154.5	181.0
2008	217.6	266.9
2009	97.3	130.4
2010	246.7	297.4
2011	206.2	279.6
2012	185.9	194.2
2013	265.1	205.5
2014	227.9	208.2
2015	202.6	134.6
2016	158.9	127.1

3.3.3.4 Creación de escenarios futuros

Posterior a obtener los resultados de oferta y demanda de agua en la subcuenca actuales²⁵, se procedió a analizar su comportamiento en función de la proyección de precipitación acumulada mensual y temperatura media mensual hasta el año 2050, para cada uno de los escenarios de cambio climático utilizados (RCP 4.5 y RCP 8.5).

Para cuantificar la demanda de agua para consumo humano, se utilizó la misma dotación estimada para el escenario de línea base y se consideró una tasa de crecimiento anual de la población del municipio de Teculután de 2.47 (DMP, 2022).

En el caso de la demanda de agua para riego, para efectos de evaluar el comportamiento del modelo, se asumió un crecimiento del 2% anual de la superficie irrigada actualmente para los principales cultivos de la subcuenca (Cuadro 19) y se asumió un aumento en el requerimiento de riego del 0.06% anual bajo el escenario RCP 4.5 y 0.2% anual bajo el escenario RCP 8.5, considerando que al año 2050 en los dos escenarios utilizados la precipitación promedio anual disminuye 25.7 y 94.6 mm (1.7 y 6.2%), respectivamente y la temperatura promedio anual aumenta 1.9 °C (9%) respecto de la línea base^{26,27}.

Cuadro 19 –Extensión y requerimientos de riesgo actuales y futuras de los principales cultivos en la subcuenca del río Teculután.

Cultivo	Área actual (ha)	Vol. bruto riego por hectárea actual (m ³ /ha)	Área al 2032 (ha)	Vol. bruto riego por hectárea al 2032 (m ³ /ha)		Área al 2050 (ha)	Vol. bruto riego por hectárea al 2050 (m ³ /ha)	
				RCP 4.5	RCP 8.5		RCP 4.5	RCP 8.5
Tomate y chile	15	4,458.9	18.3	4,488.4	4,557.9	26.12	4,537.2	4,724.9
Pasto	1,403	19,100	1,710.2	19,226.4	19,524.4	2,442.7	19,435.1	20,239.4
Limón	10	21,286.7	12.2	21,427.6	21,759.7	17.4	21,660.2	22,556.5
Mango	93	24,466.7	113.4	24,628.6	25,010.4	161.9	24,895.9	25,926.2
Caña de azúcar	35	21,800	42.7	21,944.3	22,284.4	60.9	22,182.5	23,100.4
Maíz	60	8,561.7	73.1	8,618.3	8,751.9	104.5	8,711.9	9,072.4
Melón	642	2,945.5	782.6	2,964.9	3,010.9	1,117.7	2,997.1	3,121.2
Total	2,258		2,752.5			3,931.2		

²⁵ Considerando los resultados del año 2021 como el escenario actual.

²⁶ La precipitación media de la línea base es de 1,517.1 mm, mientras que la precipitación media al 2050 bajo el RCP 8.5 es de 1,422.5 mm.

²⁷ La temperatura media de la línea base es de 21.0°C mientras que la temperatura media al 2050 bajo el RCP 8.5 es de 22.9 °C.

Para estimar la demanda de agua para piscicultura, también se asumió un crecimiento anual del 2% (Cuadro 20) y se consideró el mismo volumen de agua utilizado por estanque, suponiendo que se seguirían utilizando las dimensiones “estándar” de cada estanque.

Cuadro 20 – Cantidad actual y futura de estanque de peces en la subcuenca del río Teculután.

Número de estanques actualmente	Número de estanques al 2032	Número de estanques al 2050
20	25	36

4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

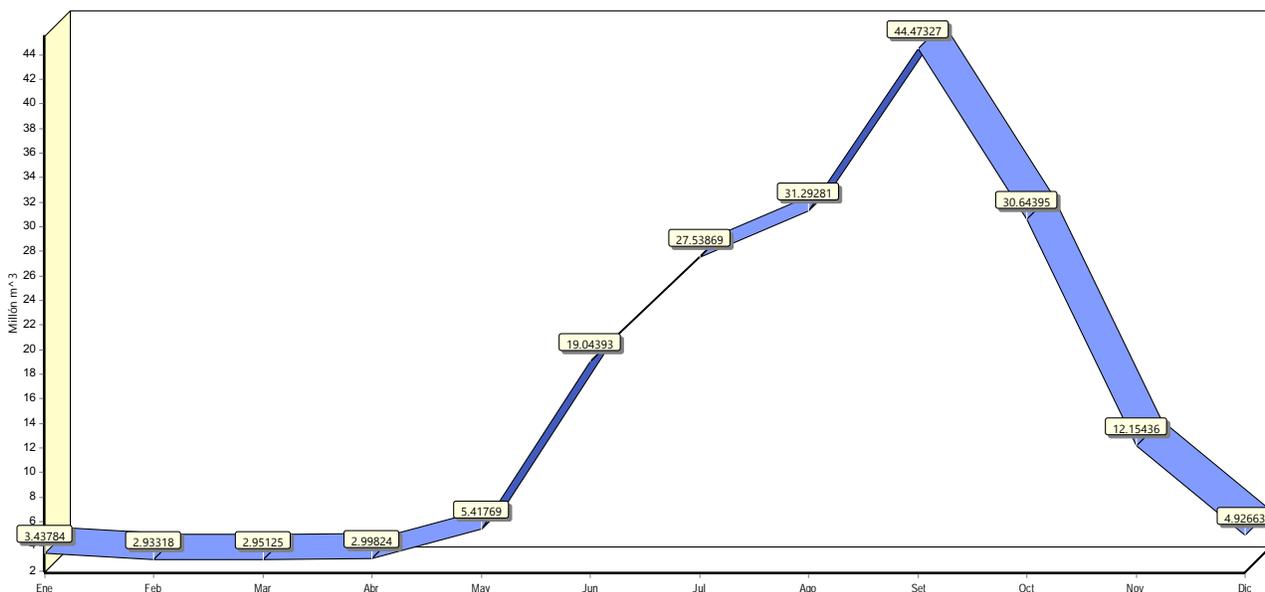
4.1 Estimación de la oferta hídrica actual de la subcuenca del río Teculután

El caudal del río Teculután se estimó en 187.8 millones de metros cúbicos (m³) anuales. Como se observa en el cuadro 21 y en la gráfica 7, los menores caudales ocurren en los meses de febrero y marzo (época seca) y los mayores caudales se presentan en los meses de agosto y septiembre (época lluviosa).

El menor volumen estimado fue de 2.93 millones de m³, en el mes de febrero, lo cual equivale a un caudal de 1.2 m³/s (1,212.5 litros/segundo), mientras que el mayor volumen estimado (septiembre) fue de 44.4 millones de m³, equivalente a 18.4 m³/s (18,383.5 litros/segundo).

Cuadro 21 – Caudales medios mensuales del río Teculután.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Caudal (millones de m ³)	3.44	2.93	2.95	2.99	5.42	19.04	27.54	31.29	44.47	30.64	12.15	4.93	187.8



Gráfica 7 – Caudales medios mensuales del río Teculután.

Rosito (2010) indica que el caudal de río Teculután se estima en 174 millones de m³ anuales, siendo uno de los mayores caudales que drenan hacia el valle del Motagua desde la Sierra de Las Minas. Por otro lado, los registros de 1994 a 2017 de la estación hidrométrica Las Minas reflejan un caudal promedio de 178 millones de m³ anuales; además, muestran caudales máximos de hasta 18.6 m³/s y caudales mínimos de hasta 0.80 m³/s, lo cual coincide con lo obtenido en el presente estudio.

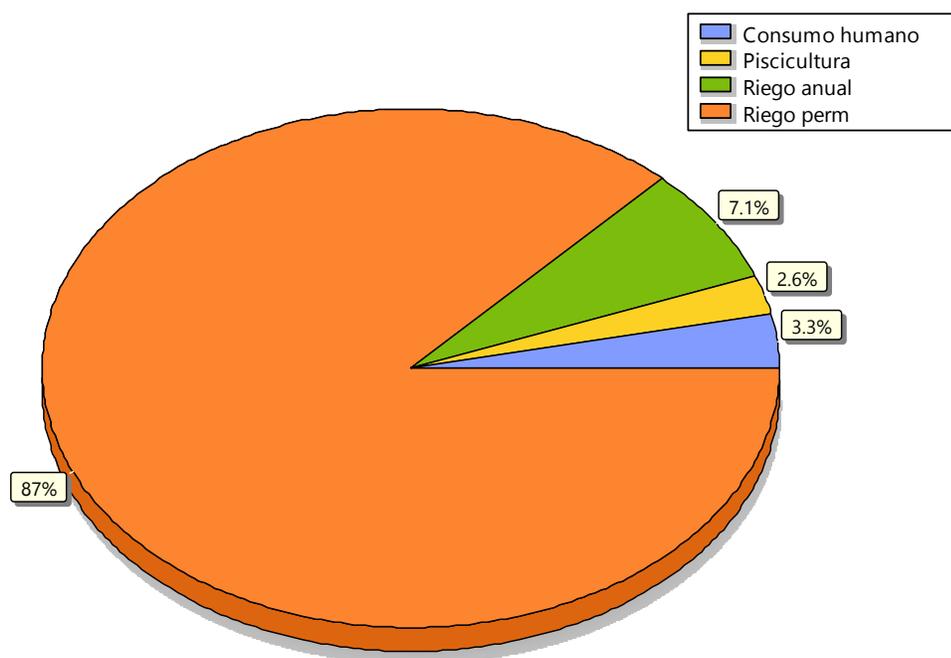
4.2 Estimación de la demanda de agua actual de la subcuenca del río Teculután

La demanda actual de agua en la subcuenca del río Teculután se estimó en 34.5 millones de m³ anuales (1,095.3 litros/segundo), de los cuales el 3.3% corresponde a la demanda para consumo humano equivalente a 1.1 millones de m³ anuales (35.9 litros/segundo) (Cuadro 22 y Gráfica 8).

El riego representa el 94.1% de la demanda actual, equivalente a 32.5 millones de m³ anuales (1,030.7 litros/segundo) y la piscicultura representa el 2.6% con un volumen anual de 907,200 m³ (28.8 litros/segundo).

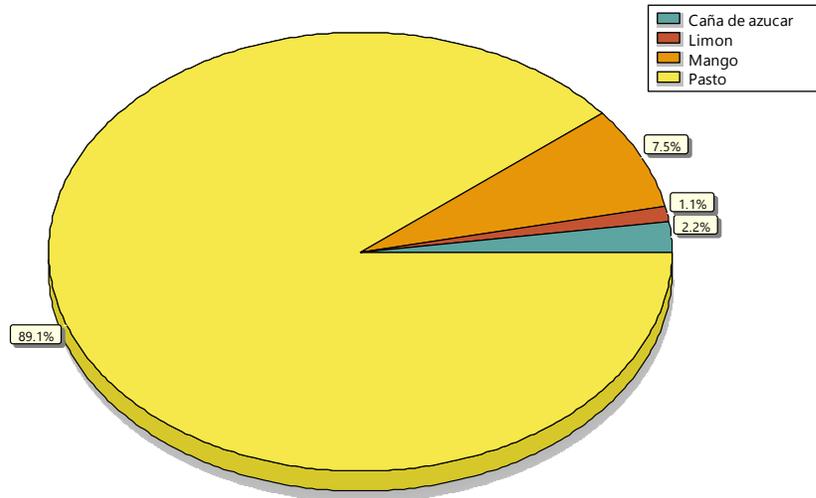
Cuadro 22 – Demanda actual de agua de la subcuenca del río Teculután.

Descripción	Volumen (m ³)	Porcentaje (%)
Piscicultura	907,200	2.6
Consumo humano	1,131,021.5	3.3
Riego de cultivos anuales	2,456,228.2	7.1
Riego de cultivos permanentes	30,046,213.4	87
Total	34,540,663.1	100

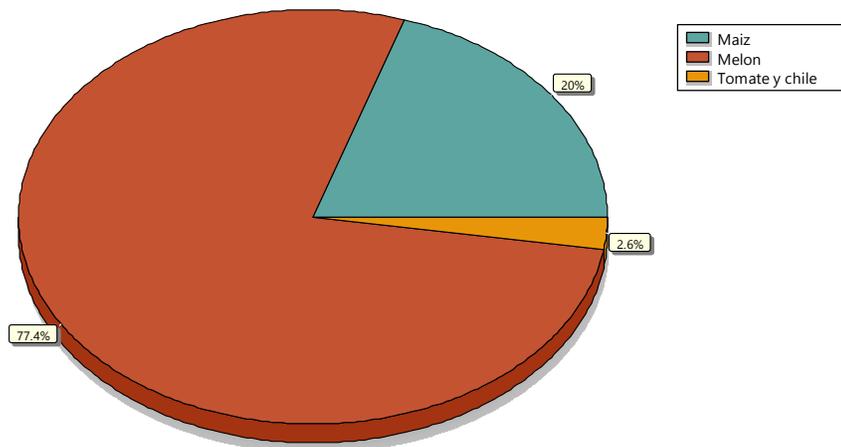


Gráfica 8 – Demanda de agua por tipo de la subcuenca del río Teculután.

Del total de la demanda de agua para riego, el mayor consumo es del pasto, con 26.8 millones de m³ anuales (849.3 litros/segundo), seguido del cultivo de mango con 2.3 millones de m³ anuales (71.7 litros/segundo) y del cultivo de melón con 1.9 millones de m³ anuales (60.3 litros/segundo) (Gráficas 9 y 10).



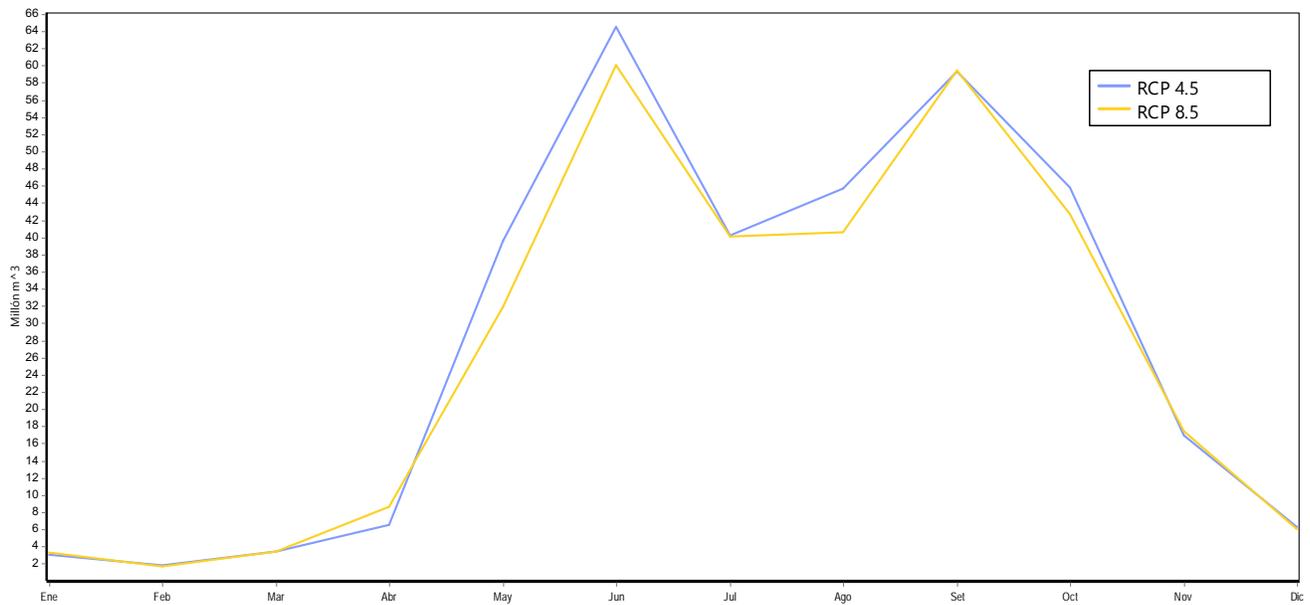
Gráfica 9 – Demanda de agua para riego de cultivos permanentes de la subcuenca del río Teculután.



Gráfica 10 – Demanda de agua para riego de cultivos anuales de la subcuenca del río Teculután.

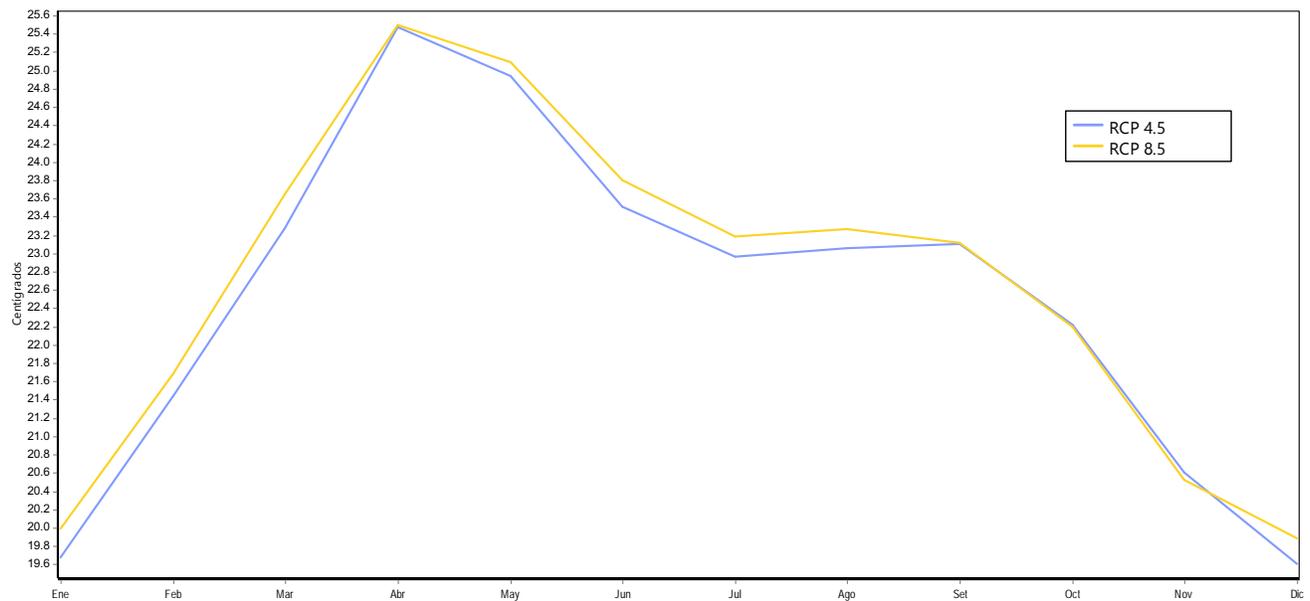
4.3 Estimación de la oferta hídrica futura de la subcuenca del río Teculután

La oferta hídrica futura de la subcuenca se analizó en función del comportamiento de las variables de precipitación acumulada mensual y temperatura media mensual proyectadas según los escenarios de RCP 4.5 y 8.5 (INSIVUMEH, 2022). La gráfica 11 muestra el promedio de precipitación mensual para los 28 años analizados (2022-2050) en ambos escenarios y se observa que mayo, junio y agosto son los meses en los que ocurre una disminución más notable bajo el escenario de RCP 8.5 respecto del RCP 4.5.



Gráfica 11 – Promedio mensual de precipitación proyectada para el período 2022-2050, en los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5 para la subcuenca del río Teculután.

La gráfica 12 muestra el promedio de temperatura mensual para los 28 años analizados (2022-2050) en ambos escenarios y se observa que en todos los meses la temperatura media es mayor bajo el escenario de RCP 8.5 que bajo el escenario de RCP 4.5; también se puede observar que abril y mayo son los meses con la temperatura más alta (25 °C), mientras que enero y diciembre son los meses con la temperatura más baja (19 °C).



Gráfica 12 – Promedio mensual de temperatura proyectada para el período 2022-2050, en los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5 para la subcuenca del río Teculután.

El análisis de los resultados de los caudales del río Teculután se dividió en dos períodos, para cada uno de los escenarios considerados: a) del 2022-2032, considerado como el de mediano plazo, y justificado en que es un período de 10 años que coincide con el horizonte de tiempo que generalmente son planificados el manejo y la gestión de cuencas hidrográficas; y, b) del 2033-2050, considerado como la planificación de largo plazo.

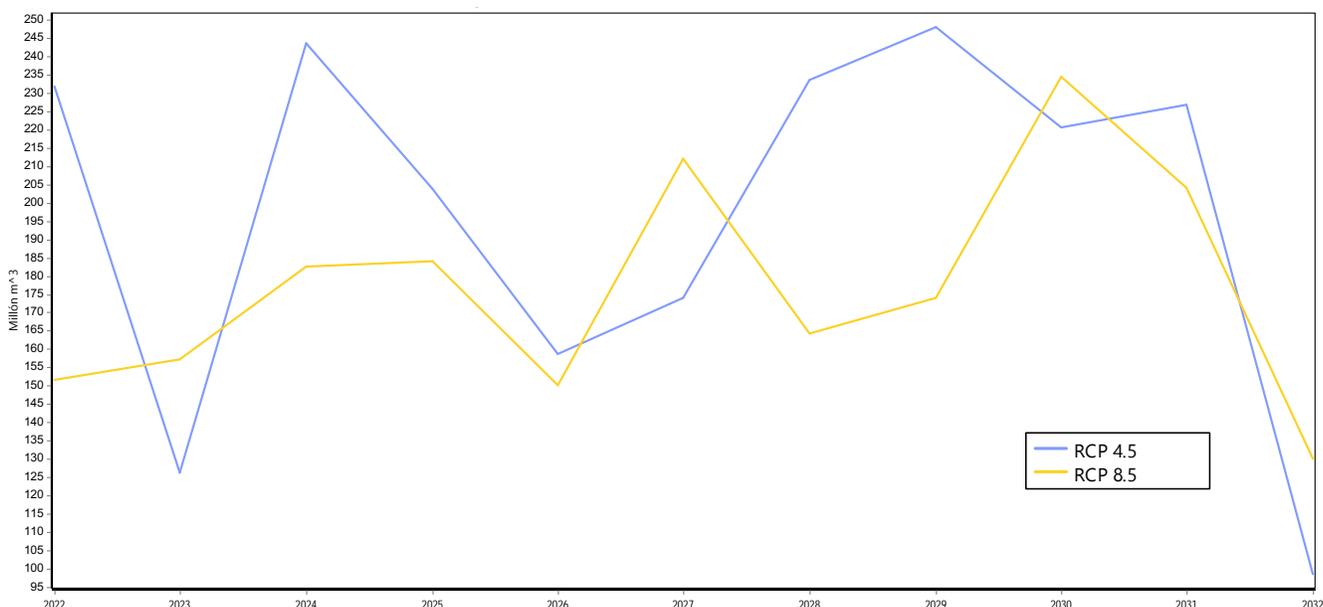
4.3.1.1 Período 2022-2032

Como puede observarse en el cuadro 23 y gráfica 13, durante el período 2022-2032, en el escenario de RCP 4.5 el caudal promedio estimado del río Teculután es de 196.9 millones de m³; el caudal mínimo estimado bajo este escenario es de 98.4 millones de m³ (año 2032), mientras que el caudal máximo estimado es de 248.0 millones de m³ (año 2029). En el escenario de RCP 8.5, el caudal promedio estimado es de 176.8 millones de m³; el caudal mínimo estimado es de 130.1 millones de m³ (año 2032) y el caudal máximo es de 234.4 millones de m³ (año 2030).

Los resultados demuestran una variabilidad significativa entre cada año analizado y entre ambos escenarios, ya que, si bien en 7 de los 11 años de estudio, el caudal estimado del río Teculután es menor bajo el escenario de RCP 8.5 en comparación con el de RCP 4.5, en los años 2023, 2027, 2030 y 2032 ocurre lo contrario. Por otro lado, las diferencias más significativas se observan en los años 2022, 2028 y 2029, donde los caudales son mayores en el escenario de RCP 4.5 respecto del RCP 8.5 en un 53%, 42% y 43%, respectivamente.

Cuadro 23 – Caudal estimado del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, para el período 2022-2032 (expresado en millones de metros cúbicos).

Año	Escenario	
	RCP 4.5	RCP 8.5
2022	231.6	151.7
2023	126.3	157.1
2024	243.7	182.6
2025	203.8	184.1
2026	158.8	150.2
2027	174.1	212.1
2028	233.6	164.1
2029	248	174
2030	220.6	234.4
2031	226.6	204
2032	98.5	130.2
Total	2,165.6	1,944.4
Promedio	196.9	176.8
Máximo	248	234.4
Mínimo	98.5	130.2



Gráfica 13 – Caudal estimado del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, período 2022-2032.

4.3.1.2 Período 2033-2050

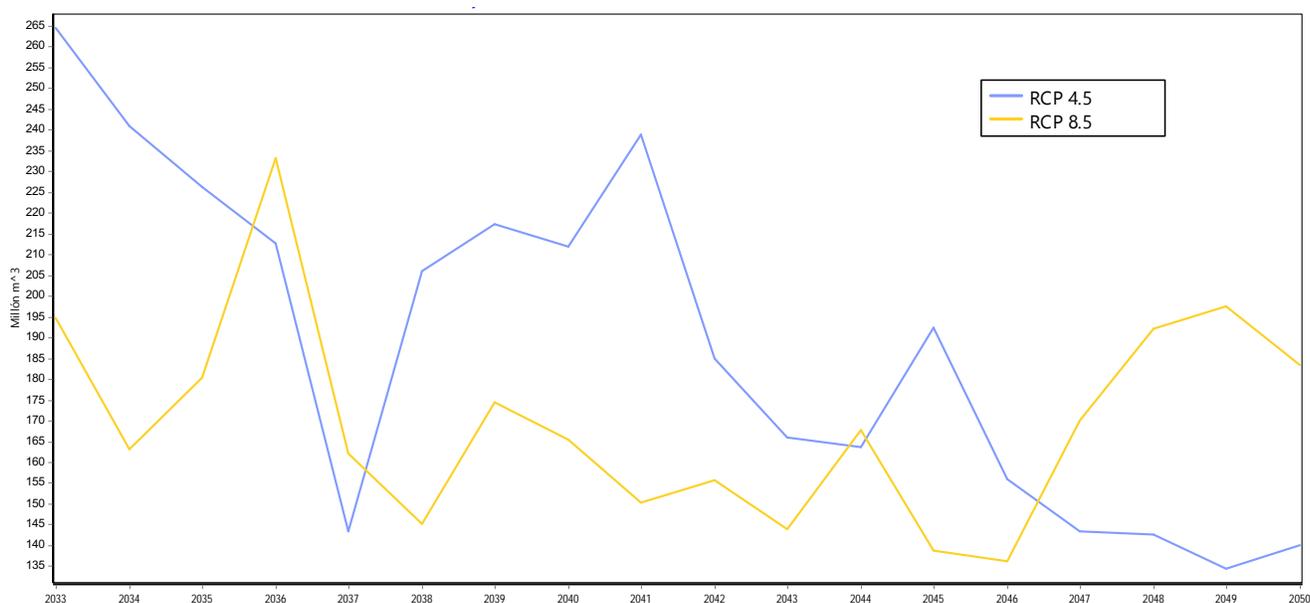
El cuadro 24 y gráfica 14 muestran que durante el período 2033-2050, en el escenario de RCP 4.5 el caudal promedio estimado del río Teculután es de 187.9 millones de m³; el caudal mínimo estimado bajo este escenario es de 134.3 millones de m³ (año 2049), mientras que el caudal máximo estimado es de 264.5 millones de m³ (año 2033). En el escenario de RCP 8.5, el caudal promedio estimado es de 169.6 millones de m³; el caudal mínimo estimado es de 136.3 millones de m³ (año 2046) y el caudal máximo es de 233.2 millones de m³ (año 2036).

Los resultados demuestran una variabilidad significativa entre cada año analizado y entre ambos escenarios. En este caso, en 11 de los 18 años de estudio, el caudal estimado del río Teculután es menor bajo el escenario de RCP 8.5 en comparación con el de RCP 4.5, mientras que en 7 años (2036, 2037, 2044, 2047, 2048, 2049 y 2050) ocurre lo contrario. Además, en este período, las diferencias más significativas se observan en los años 2034, 2038 y 2041 en los que los caudales son mayores en el escenario de RCP 4.5 respecto del RCP 8.5 en un 48%, 42% y 59%, respectivamente.

Cuadro 24 – Caudal estimado del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, para el período 2033-2050 (expresado en millones de metros cúbicos).

Año	Escenario	
	RCP 4.5	RCP 8.5
2033	264.5	194.5
2034	240.9	162.9
2035	226.1	180.2
2036	212.7	233.2
2037	143.3	162.1
2038	205.9	145.1

Año	Escenario	
	RCP 4.5	RCP 8.5
2039	217.3	174.2
2040	211.8	165.4
2041	238.7	150.1
2042	184.9	155.6
2043	165.9	143.8
2044	163.5	167.7
2045	192.3	138.7
2046	155.8	136.3
2047	143.4	170.0
2048	142.7	192.1
2049	134.3	197.5
2050	139.9	183.3
Total	3,383.8	3,053.1
Promedio	187.9	169.6
Máximo	264.5	233.2
Mínimo	134.3	136.3



Gráfica 14 – Caudal estimado del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, período 2033-2050.

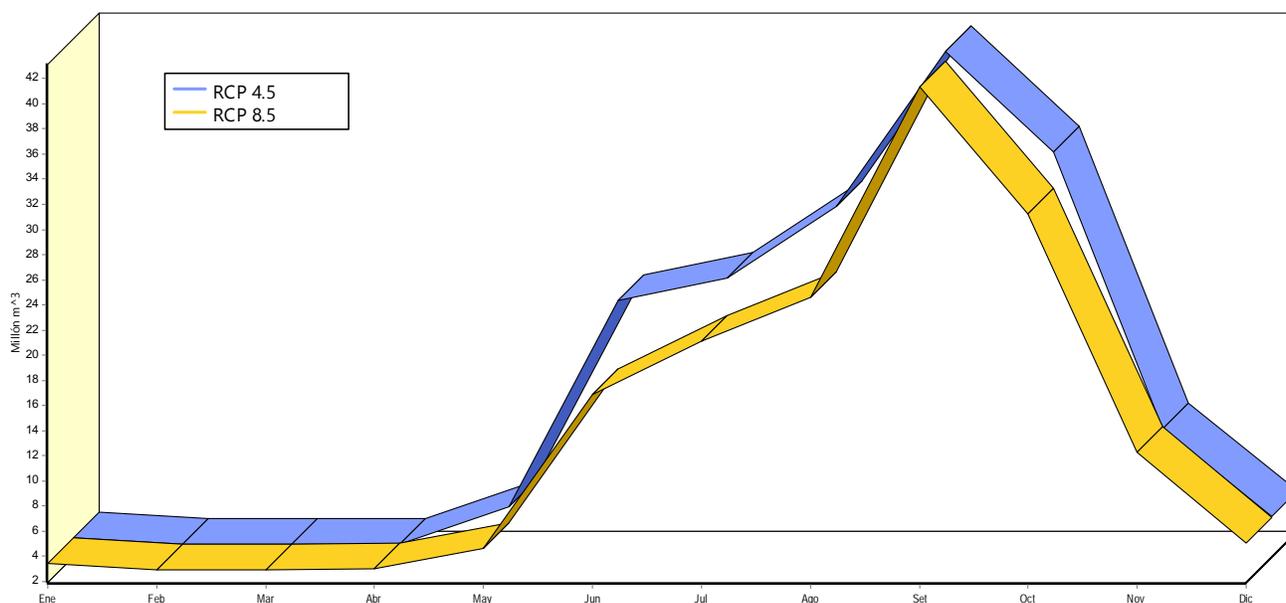
Comparando los caudales proyectados con el caudal actual estimado (187.8 millones de m³), se observa que bajo el escenario de RCP 4.5, de los 29 años analizados en dieciséis años (2022, 2024, 2025, 2028, 2029, 2030, 2031, 2033, 2034, 2035, 2036, 2038, 2039, 2040, 2041 y 2045) el caudal proyectado es mayor que el caudal actual estimado. Bajo el escenario de RCP 8.5, únicamente en siete años el caudal proyectado es mayor que el actual (2027, 2030, 2031, 2033, 2036, 2048 y 2049). Esto es importante ya que, si bien el comportamiento del caudal proyectado varía considerablemente de un año a otro, la tendencia general es a una disminución en ambos escenarios de cambio climático, respecto de la situación actual.

Por otro lado, al analizar el comportamiento del río Teculután a nivel mensual, se observa que los meses con mayor caudal corresponden a septiembre y octubre, en ambos escenarios; en el escenario de RCP 4.5, en septiembre el caudal promedio estimado fue de 42.2 millones de m³ (16,261.8 litros/segundo) y en octubre el caudal promedio estimado fue de 34.1 millones de m³ (13,157.5 litros/segundo). En el escenario RCP 8.5, en septiembre el caudal promedio estimado fue de 41.4 millones de m³ (15,954.4 litros/segundo) y en octubre el caudal promedio estimado fue de 31.2 millones de m³ (12,048.4 litros/segundo) (Cuadro 22 y Gráfica 15).

Por el contrario, los meses con menor caudal corresponden a febrero y marzo. En el escenario de RCP 4.5, en estos meses el caudal promedio estimado fue de 2.97 y 2.93 millones de m³, respectivamente (1,145.0 y 1,129.9 litros/segundo, respectivamente). Mientras que en el escenario RCP 8.5, en estos meses el caudal promedio estimado fue de 2.92 y 2.90 millones de m³ (1,125.2 y 1,117.3 litros/segundo, respectivamente) (Cuadro 25 y Gráfica 15).

Cuadro 25 – Caudales mensuales estimados del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, para el período 2022-2050 (expresado en millones de metros cúbicos).

Mes	Escenario	
	RCP 4.5	RCP 8.5
Enero	3.4	3.4
Febrero	2.9	2.9
Marzo	2.9	2.8
Abril	2.9	3.0
Mayo	5.9	4.7
Junio	22.3	16.9
Julio	24.1	21.1
Agosto	29.8	24.6
Septiembre	42.1	41.4
Octubre	34.1	31.2
Noviembre	12.1	12.3
Diciembre	5.1	5.0
Promedio	15.7	14.1
Máximo	42.1	41.4
Mínimo	2.9	2.9



Gráfica 15 – Caudal promedio mensual estimado del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, 2022-2050.

4.4 Estimación de la demanda de agua futura de la subcuenca del río Teculután

El análisis de los resultados de la demanda de agua futura en la subcuenca se realizó para dos periodos: el primero periodo, al año 2032, que como se indicó anteriormente se ha considerado como el escenario de mediano plazo y justificado en que corresponde a un período de 10 años (a partir del año base) que coincide con el horizonte de tiempo en que generalmente son planificados el manejo y la gestión de cuencas hidrográficas; y el segundo, al año 2050, considerado como el escenario de largo plazo.

4.4.1.1 Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután al 2032

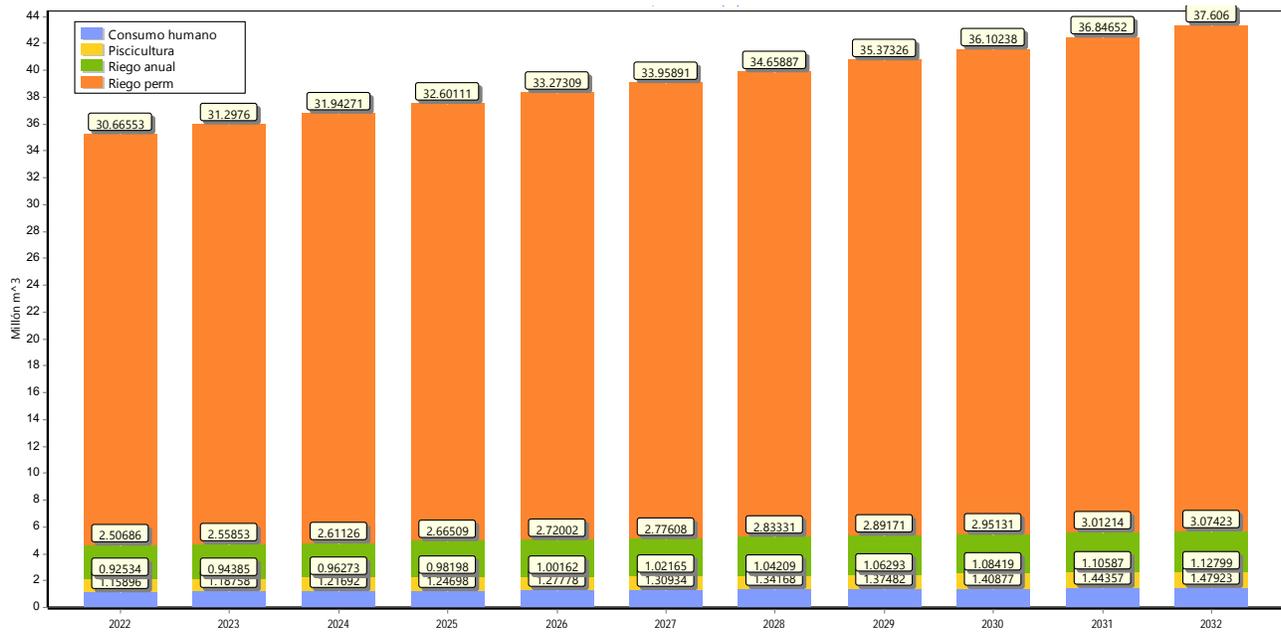
La demanda de agua en la subcuenca del río Teculután al año 2032 se estimó en 43.3 millones de m³ anuales (1,372.6 litros/segundo) bajo el escenario de RCP 4.5 y 43.9 millones de m³ anuales (1,392.6 litros/segundo) bajo el escenario de RCP 8.5, lo cual representa, en un período de 10 años, un aumento del 23 y 25%, respectivamente.

La demanda de agua para consumo humano fue estimada en 1.5 millones de m³ anuales, lo cual representaría un aumento del 36% respecto del año 2021. La demanda de agua para la piscicultura fue estimada en 1.1 millones de m³ anuales, representando un aumento del 24%.

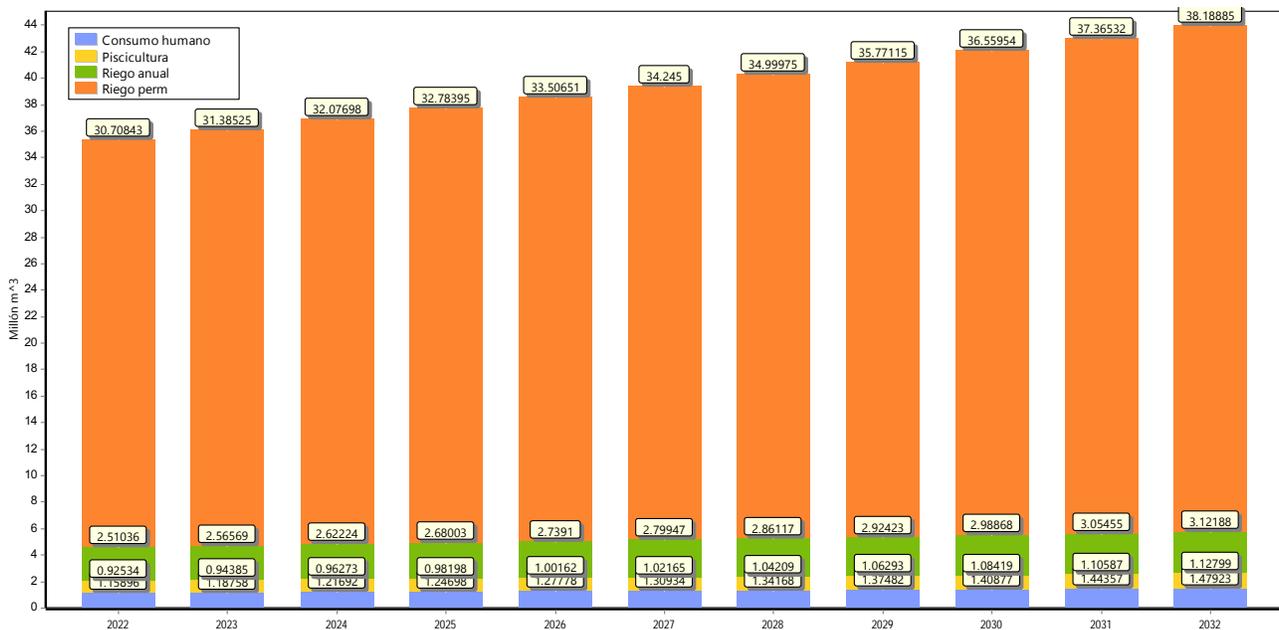
En el caso de la demanda de agua para riego, los resultados muestran un volumen de 40.7 millones de m³ anuales en el escenario de RCP 4.5 y de 41.3 millones de m³ en el escenario de RCP 8.5, esto representaría un aumento del 25 y 27%, respectivamente (Cuadro 26 y Gráficas 16 y 17).

Cuadro 26 – Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután al 2032.

Descripción	Volumen (m ³)	
	RCP 4.5	RCP 8.5
Piscicultura	1,127,989.2	1,127,989.2
Consumo humano	1,479,227.5	1,479,227.5
Riego de cultivos anuales	3,074,228.1	3,121,875.2
Riego de cultivos permanentes	37,605,998.1	38,188,848.8
Total	43,287,442.9	43,917,940.7



Gráfica 16 – Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután, 2022 – 2032, escenario RCP 4.5



Gráfica 17 – Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután, 2022 – 2032, escenario RCP 8.5

4.4.1.2 Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután al 2050

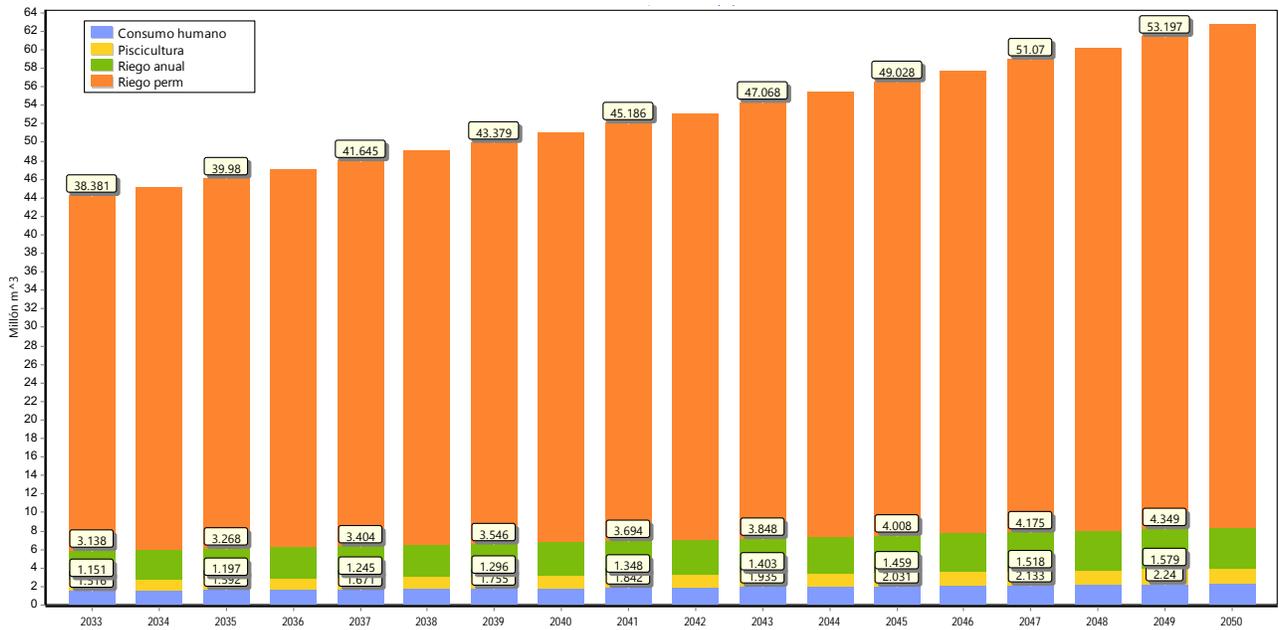
La demanda de agua en la subcuenca del río Teculután al año 2050 se estimó en 62.6 millones de m³ anuales (1,986.2 litros/segundo) bajo el escenario de RCP 4.5 y 65.1 millones de m³ anuales (2,063.3 litros/segundo) bajo el escenario de RCP 8.5, lo cual representa un aumento del 81 y 88%, respectivamente, comparado con el año base (período de 29 años).

La demanda de agua para consumo humano fue estimada en 2.3 millones de m³ anuales, lo cual representaría un aumento del 109% respecto del año 2021. La demanda de agua para la piscicultura fue estimada en 1.6 millones de m³ anuales, representando un aumento del 78%.

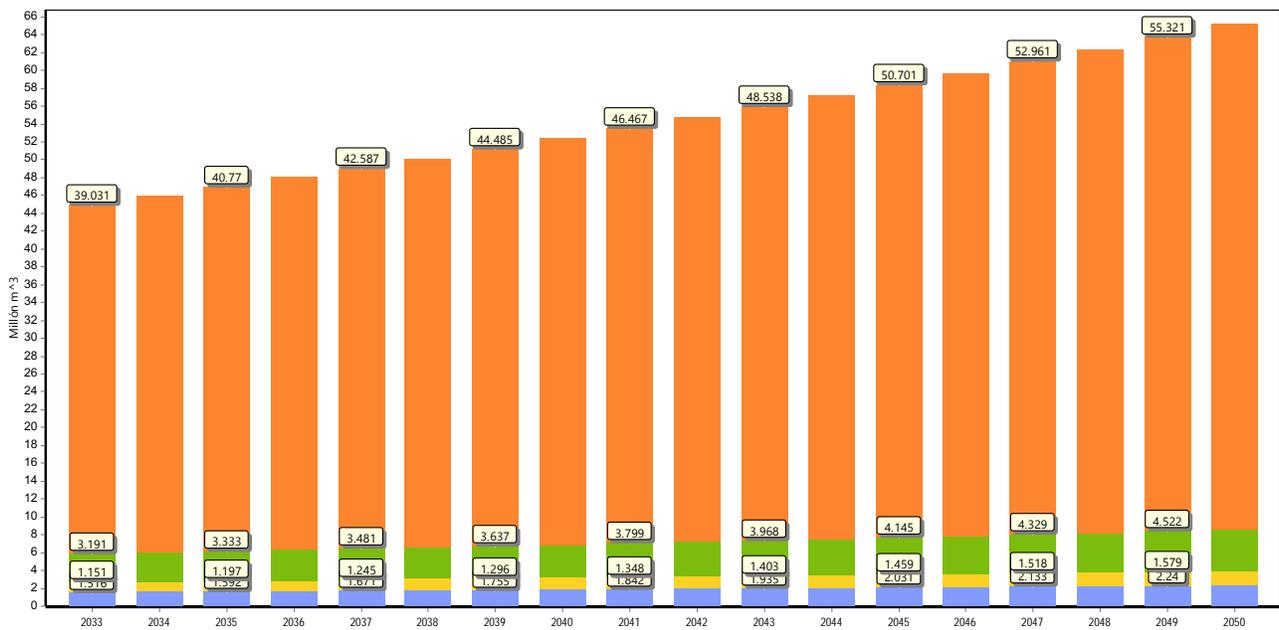
En el caso de la demanda de agua para riego, los resultados muestran un volumen de 58.7 millones de m³ anuales en el escenario de RCP 4.5 y de 61.1 millones de m³ en el escenario de RCP 8.5, esto representaría un aumento del 81 y 88%, respectivamente comparado con el año base (Cuadro 27 y Gráficas 18 y 19).

Cuadro 27 – Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután al 2050.

Descripción	Volumen (m ³)	
	RCP 4.5	RCP 8.5
Piscicultura	1,611,046.3	1,611,046.3
Consumo humano	2,294,965.8	2,294,965.8
Riego de cultivos anuales	4,438,417.4	4,622,081.8
Riego de cultivos permanentes	54,293,667.8	56,540,373.3
Total	62,638,097.4	65,068,466.2



Gráfica 18 – Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután, 2033 – 2050, escenario RCP 4.5



Gráfica 19 – Demanda de agua de la subcuenca del río Teculután, 2033 – 2050, escenario RCP 8.5

4.5 Estimación del efecto de la variabilidad climática sobre el uso de agua para consumo humano en la subcuenca del río Teculután

El efecto de la variabilidad climática sobre el uso de agua para consumo humano en la subcuenca se estimó utilizando el parámetro “demanda no cubierta” de WEAP, que se refiere al volumen de agua que no puede ser suministrado para satisfacer el volumen de agua requerido. Para calcular este parámetro, WEAP toma en cuenta los caudales medios mensuales del río y el requerimiento de agua no sólo para el consumo humano sino para el resto de los sitios de demanda (riego y piscicultura).

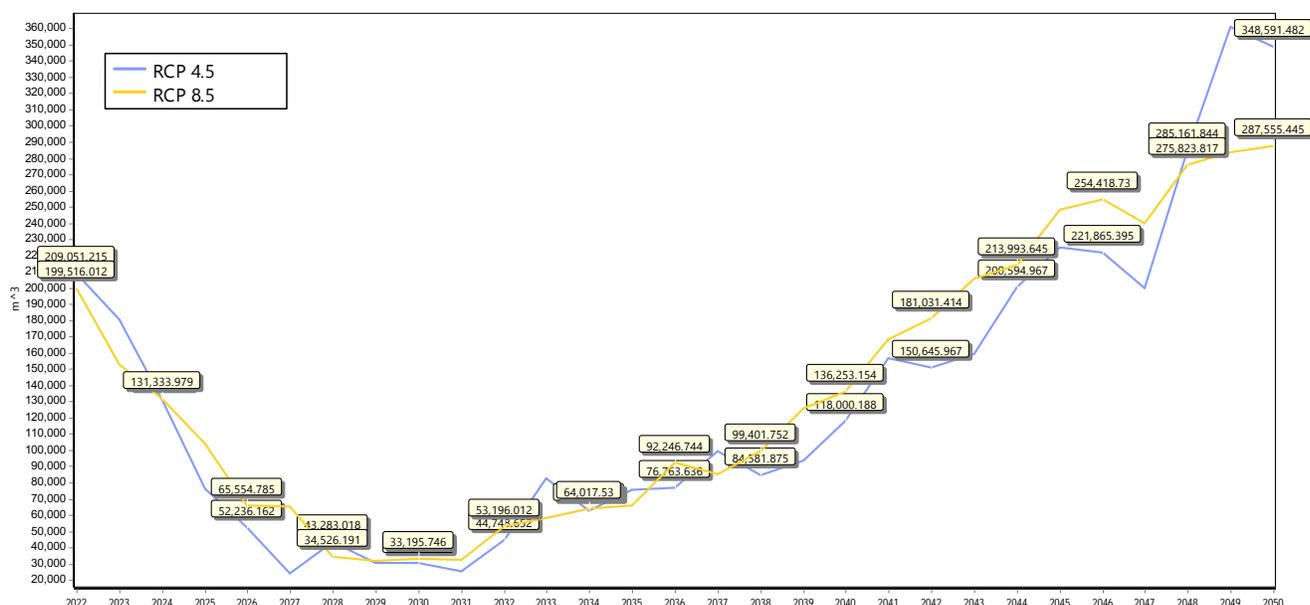
El análisis se realizó para los dos escenarios de cambio climático considerados (RCP 4.5 y RCP 8.5) y como se observa en el cuadro 28 y gráfica 20, durante todos los años proyectados existe un déficit en la cobertura de agua para consumo humano que aumenta bajo un escenario de RCP 8.5 y que se intensifica a partir del año 2044 en ambos escenarios. Puede observarse también que en promedio el déficit es de 132,698.1 m³ al año bajo un escenario de RCP 4.5 y de 137,536.6 m³ anuales bajo un escenario de RCP 8.5, lo cual se traduce en un caudal de 4.2 y 4.4 litros/segundo, respectivamente que no va a ser suministrado.

Bajo el escenario de RCP 4.5, el máximo déficit de cobertura se alcanzaría en el 2049 (360,827.3 m³), mientras que el mínimo déficit se presentaría en 2027 con 24,000 m³. En el escenario de RCP 8.5, el año con mayor déficit sería el 2050 con 287,555.4 m³ y el mínimo, con 31,976.4 m³ en el 2029.

Cuadro 28 – Demanda de agua para consumo humano no cubierta en la subcuenca del río Teculután, 2022-2050 (expresado en metros cúbicos).

Año	Escenario	
	RCP 4.5	RCP 8.5
2022	209,051.2	199,516.0
2023	180,436.3	152,706.7
2024	130,838.9	131,334.0
2025	76,320.4	103,862.8
2026	52,236.2	65,554.8
2027	24,000.0	65,005.9
2028	43,283.0	34,526.2
2029	30,517.9	31,976.4
2030	30,292.5	33,195.7
2031	25,383.1	32,374.8
2032	44,748.7	53,196.0
2033	82,879.9	57,785.5
2034	62,685.6	64,017.5
2035	75,213.1	65,839.5
2036	76,763.6	92,246.7
2037	99,038.6	85,433.0
2038	84,581.9	99,401.8
2039	93,555.9	125,641.1
2040	118,000.2	136,253.2
2041	156,815.2	168,395.7
2042	150,646.0	181,031.4

Año	Escenario	
	RCP 4.5	RCP 8.5
2043	159,200.3	205,896.1
2044	200,595.0	213,993.6
2045	224,910.1	248,035.6
2046	221,865.4	254,418.7
2047	199,806.7	239,723.1
2048	285,161.8	275,823.8
2049	360,827.3	283,819.1
2050	348,591.5	287,555.4
Promedio	132,698.1	137,536.6
Máximo	360,827.3	287,555.4
Mínimo	24,000.0	31,976.4



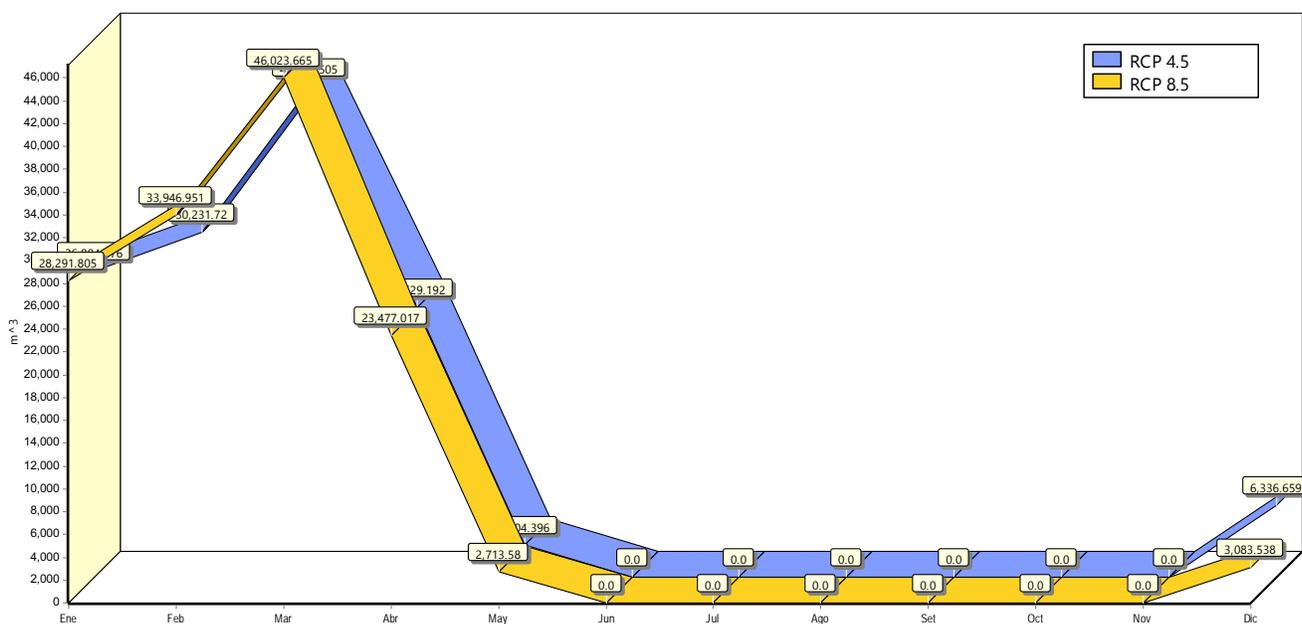
Gráfica 20 – Demanda de agua para consumo humano no cubierta en la subcuenca del río Teculután al año, período 2022 – 2050.

Analizar estos resultados a nivel mensual permite comprender la razón por la cual en todos los años del estudio existe un déficit de cobertura, ya que no significa que la demanda de agua para consumo humano no sea satisfecha en ningún momento, sino que esto ocurre en algunos meses del año durante todos los años de estudio, como puede observarse en el cuadro 29 y gráfica 21. Según el promedio mensual, para los 29 años analizados, bajo ambos escenarios de RCP, durante los meses de junio a noviembre no existe un déficit en la cobertura.

De acuerdo con la media mensual, marzo corresponde al mes con el mayor déficit de cobertura con 42,891.5 m³ bajo el escenario RCP 4.5 y 46,023.7 m³ bajo el escenario RCP 8.5, lo cual coincide con los caudales medios más bajos (1,129.9 litros/segundo y 1,117.3 litros/segundo, respectivamente).

Cuadro 29 – Demanda de agua para consumo humano no cubierta a nivel mensual en la subcuenca del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, para el período 2022-2050 (expresado en metros cúbicos).

Mes	Escenario	
	RCP 4.5	RCP 8.5
Enero	26,804.7	28,291.8
Febrero	30,231.7	33,947.0
Marzo	42,891.5	46,023.7
Abril	23,629.2	23,477.0
Mayo	2,804.4	2,713.6
Junio	0	0
Julio	0	0
Agosto	0	0
Septiembre	0	0
Octubre	0	0
Noviembre	0	0
Diciembre	6,336.7	3,083.5
Máximo	42,891.5	46,023.7



Gráfica 21 – Demanda de agua para consumo humano no cubierta a nivel mensual en la subcuenca del río Teculután al año, período 2022 – 2050.

Al traducir la demanda de agua para consumo humano no cubierta a nivel mensual en la cantidad de habitantes que serían desabastecidos, considerando una dotación media de 130.1 litros/habitante/día, se obtiene que en marzo (mes con el máximo déficit en ambos escenarios de RCP), la población a la que no se le abastecería del vital líquido asciende a 10,634 habitantes en el escenario de RCP 4.5 y 11,411 habitantes en el escenario de RCP 8.5 (Cuadro 30).

Cuadro 30 – Población desabastecida a nivel mensual en la subcuenca del río Teculután bajo los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, para el período 2022-2050.

Mes	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Déficit mensual (litros)	Déficit diario (litros)	Habitantes	Déficit mensual (litros)	Déficit diario (litros)	Habitantes
Enero	26,804,700	864,667.7	6,646	28,291,800	912,638.7	7,015
Febrero	30,231,700	1,079,703.6	8,299	33,947,000	1,212,392.9	9,319
Marzo	42,891,500	1,383,596.8	10,634	46,023,700	1,484,635.5	11,411
Abril	23,629,200	787,640	6,054	23,477,000	782,566.7	6,015
Mayo	2,804,400	90,464.5	695	2,713,600	87,535.5	673
Junio	-	-	-	-	-	-
Julio	-	-	-	-	-	-
Agosto	-	-	-	-	-	-
Septiembre	-	-	-	-	-	-
Octubre	-	-	-	-	-	-
Noviembre	-	-	-	-	-	-
Diciembre	6,336,700	204,409.7	1,571	3,083,500	99,467.7	765

En ambos escenarios considerados, durante seis meses del año habría, en promedio, 2,825 y 2,933 habitantes desabastecidos, lo cual supone un reto para la Municipalidad de Teculután y los ocho Comités de Agua, ya que se estaría negando el acceso al agua para consumo humano, siendo un derecho humano.

5 CONCLUSIONES

- La oferta hídrica actual de la subcuenca del río Teculután se estimó en 187.8 millones de metros cúbicos anuales. Los menores caudales se presentan en los meses de febrero y marzo y los mayores caudales en los meses de agosto y septiembre, lo cual coincide con la época seca y la época lluviosa que se demarca en el país. El menor volumen estimado fue de 2.93 millones de m³, en el mes de febrero, lo cual equivale a un caudal de 1.2 m³/s (1,212.5 litros/segundo), mientras que el mayor volumen estimado (septiembre) fue de 44.4 millones de m³, equivalente a 18.4 m³/s (18,383.5 litros/segundo).
- La demanda actual de agua del río Teculután se estimó en 34.5 millones de m³ anuales (1,095.3 litros/segundo), de los cuales el 94.1% corresponde a riego con 32.5 millones de m³ anuales (1,030.7 litros/segundo); el 3.3% al consumo humano equivalente a 1.1 millones de m³ anuales (35.9 litros/segundo) y la piscicultura representa el 2.6% con un volumen anual de 907,200 m³ (28.8 litros/segundo).
- Al comparar la oferta hídrica actual con la oferta hídrica futura en los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5, se obtuvo que bajo el escenario de RCP 4.5, de los veintinueve años analizados, en dieciséis el caudal proyectado sería mayor que el caudal actual. Bajo el escenario de RCP 8.5, únicamente en siete años los caudales proyectados serían mayores al actual. Esto es importante ya que, si bien el comportamiento del caudal proyectado varía considerablemente de un año a otro, la tendencia general es a una disminución en ambos escenarios de cambio climático.
- Durante todos los años analizados en el estudio existe un déficit en la cobertura de agua para consumo humano que aumenta bajo un escenario de RCP 8.5 y que se intensifica a partir del año 2044 bajo los dos escenarios considerados. Además, el volumen promedio del déficit de cobertura alcanza los 132,698.1 m³ al año (4.2 litros/segundo) bajo un escenario de RCP 4.5 y de 137,536.6 m³ anuales (4.4 litros/segundo) bajo un escenario de RCP 8.5.
- El estudio demostró una evidente a la disminución en la disponibilidad del agua de la subcuenca del río Teculután, que afectará directamente a la demanda de agua para consumo humano; en los dos escenarios considerados (RCP 4.5 y RCP 8.5) el mes más crítico será marzo, donde la demanda no cubierta alcanzaría los 42,891.5 m³ y 46,023.7 m³, respectivamente.
- El agua para consumo humano es prioridad y la demanda actual es baja en comparación con el agua para riego, en ese sentido, será necesario que las entidades involucradas en la gestión del recurso hídrico en la subcuenca tomen acciones para garantizar el abastecimiento a toda la población, reconociendo que la variabilidad climática es inminente y su efecto en la dinámica hidrológica de la subcuenca podría aumentar año con año.

6 RECOMENDACIONES

- Las proyecciones realizadas demuestran un déficit en la cobertura de agua para consumo humano. Es de suma importancia que la Municipalidad de Teculután desarrolle una política pública municipal para la gestión integrada del recurso hídrico en la que se consideren acciones de mitigación ante esta inminente realidad que se irá incrementando año con año y que conllevará repercusiones negativas a los habitantes de la subcuenca.
- Durante la elaboración del presente estudio se evidenció que la información técnica sobre la subcuenca está dispersa entre diferentes entidades, por lo que se recomienda que la municipalidad de Teculután, a través de la Unidad de Gestión Ambiental, con el apoyo de organizaciones como WWF Guatemala y Fundación Defensores de la Naturaleza, centralice los datos a través de una base de datos robusta y actualizada de manera que sea un aporte para la generación de instrumentos técnicos respecto a la dinámica hidrológica de la subcuenca tales como recarga hídrica, caudales y calidad del agua, que puedan servir para la planificación y la toma de decisiones.
- Es recomendable que organizaciones como WWF Guatemala y Fundación Defensores de la Naturaleza comparen los resultados obtenidos en el presente estudio con la aplicación de otros modelos hidrológicos, utilizando datos más detallados para variables como la cobertura y uso del suelo y su dinámica a través del tiempo, análisis de requerimientos hídricos en campo y realización de aforos en tiempo real, a manera de validar la información estimada a través de la herramienta de modelación WEAP.
- A la municipalidad de Teculután se recomienda que, con el apoyo de organizaciones como WWF Guatemala y Fundación Defensores de la Naturaleza, con las cuales ya se obtiene acompañamiento (Comisión Permanente de la subcuenca del río Teculután) instale una estación meteorológica y una estación hidrométrica en la subcuenca para obtener datos reales sobre el comportamiento climático e hidrológico en su territorio.
- A la municipalidad de Teculután se recomienda realizar acciones en el corto plazo como aforar el agua que se deriva para abastecimiento humano, promover el uso de contadores y socializar los resultados del presente estudio con los usuarios del agua, principalmente los regantes, para sensibilizarlos sobre la importancia de realizar una gestión integral del agua, dada la escasez que ya existe.

7 LITERATURA CITADA

- Aquino, J. (2007). *Análisis de los sistemas de vida: microcuencas de los ríos Cucanjá, Pueblo Viejo, Teculután y Pasabien*. Compensación Equitativa por Servicios Hidrológicos. Consultoría para WWF Centroamérica. Guatemala. 140 p.
- Bateman, A. (2007). *Hidrología básica y aplicada*. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos. Universidad Politécnica de Cartagena. Colombia. Disponible en: <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>
- Birkel, C. (2020). *Conceptos básicos de hidrología*. Documento base del curso “Hidrología para el manejo de cuencas hidrográficas”. Maestría de Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 35 p.
- CARE. (2009). *Informe Final Del Proyecto “Fortalecimiento Del Actual Modelo De Negocios Del Esquema De Pago Por Servicios Ambientales (Hidrológicos) De La Subcuenca Del Río Teculután, Guatemala”*. Programa de USAID para la Conservación de Cuencas Centroamericanas (CCAW). 29 P.
- Cartaya Ríos, S., Zurita Alfaro, S., Rodríguez Ríos, E., & Montalvo Párraga, V. (2014). Comparación de técnicas para determinar cobertura vegetal y usos de la tierra en áreas de interés ecológico, Manabí, Ecuador. *UD y la Geomática*, (9), pp. 5-17. DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.udgeo.2014.9.a01>
- Centro de Cambio Global-UC & SEI. (2009). *Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP*. Centro de Cambio Global de la Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute. Santiago de Chile. 86 p.
- Centro Nacional de Información Estadística. (2022). *Resultados del XII Censo Nacional de Población y VII de Vivienda del 2018 a nivel de poblado de los municipios de Teculután, Usumatlán y San Agustín Acasaguastlán*. [Base de datos]
- CORPONARIÑO. (2009). *Oferta y demanda hídrica*. Ordenamiento del recurso hídrico, Quebrada Miraflores. Corporación Autónoma Regional de Nariño. Disponible en: <https://www.corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhmirafloresp3.pdf>
- Davydova, V. (2010). *Variabilidad climática y sus efectos sobre las cuencas de México*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Gobierno de México. Disponible en: <https://micrositios.inecc.gob.mx/cuenca/diagnostico/07-variabilidad-climatica.pdf>
- DMP. (2022). *Población del municipio de Teculután, departamento de Zacapa*. Plan de Desarrollo Municipal y Ordenamiento Territorial. Dirección Municipal de Planificación. Municipalidad de Teculután [Base de datos digital].

- Fundación Defensores de la Naturaleza (2013). *Ficha técnica Subcuenca del río Teculután*. Disponible en: <http://cuidemosteculután.blogspot.com/2013/06/ficha-tecnica-sub-cuenca-rio-teculutan.html>
- FDN-WWF. (2016). *Propuesta de Plan de Manejo de la Subcuenca del Río Teculután, Reserva de la Biosfera Sierra de Las Minas, Guatemala*. Fundación Defensores de la Naturaleza y WWF Guatemala. 98 p.
- Fundación Defensores de la Naturaleza (2022). *Información cartográfica de la subcuenca del río Teculután* [Base de datos digital].
- González, M.; Saldarriaga, G.; Jaramillo, O. (2010). *Estimación de la demanda de agua: Conceptualización y dimensionamiento de la demanda hídrica sectorial*. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP5.pdf>
- González, D. (2012). *Impacto del cambio climático sobre los usos del agua en Europa*. Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética. Universidad Politécnica de Madrid. España. 289 p.
- IARNA. (2017). *Índice socioecológico del municipio de Teculután*. Disponible en: <http://www.infoiarna.org.gt/ISEM/Indicadores/F1905%20-%20Zacapa%20-%20Teculut%C3%A1n.pdf>
- ICC. (2020). *Memoria técnica de los mapas y escenarios climáticos. Proyecto: Resiliencia climática en las cuencas de los ríos Teculután, Pasabién y Madre Vieja, Guatemala*. Consultoría para WWF. Guatemala. 108 p.
- ICC. (2020). Registros de la estación hidrométrica Las Minas y de las estaciones meteorológicas de Pasabien y Albores. [Base de datos].
- IDEAM. (2018). *La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. MinAmbiente. Gobierno de Colombia. 28 p.
- IGN. (2016). *Límites municipales de la República de Guatemala*. Guatemala. [Mapa digital]
- INE. (2022). Censo de población y vivienda: Guatemala 2019. [Base de datos]
- INSIVUMEH. (2018). *Variabilidad y cambio climático en Guatemala*. Departamento de Investigación y Servicios Climáticos. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. Gobierno de Guatemala. 165 p.
- IPCC. (2007). *Cambio Climático 2007: Informe de síntesis*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 112 p.
- IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014: Informe de síntesis*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 176 p.

- Jiménez, D.F.; Orrego, S.A; Cossio, D.M.; Vásquez, F.A. & Ponce, R.D. (2017). Efecto de la variabilidad climática sobre la demanda de agua para uso residencial urbano: el caso de la ciudad de Manizales, Colombia. *Revista Desarrollo y Sociedad No. 79*. 91-124. ISSN 0120-3584, E-ISSN 1900-7760, DOI: 10.13043/dys.79.3
- Jiménez, F. (2021) *Bases conceptuales del manejo, gestión y cogestión de cuencas hidrográficas*. Documento base del curso “Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas I”. Maestría de Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 18 p.
- Juárez, E. (2008). *Determinación de la demanda actual y futura del agua de riego en la subcuenca del río Teculután, Zacapa, Guatemala*. . Consultoría para WWF. Guatemala. 57 p.
- López, M. (2009). *Diagnóstico socioeconómico, potencialidades productivas y propuestas de inversión del municipio de Teculután, departamento de Zacapa*. Tesis de la Facultad de Ciencias Económicas. Universidad de San Carlos de Guatemala. 190 p.
- Lozano, M.A. & Valeriano, K. (2022). Calibración y validación de un modelo hidrológico mediante el WEAP método humedad del suelo, para la cuenca alta del Río Guadalquivir. *Ciencia Sur 7 (8)*. 72-88. ISSN: 2789-4738. Disponible en: <https://dicyt.uajms.edu.bo/revistas/index.php/ciencia-sur/article/view/1317/1320>
- MAGA. (2020). *Determinación de la cobertura vegetal y uso de la tierra a escala 1:50,000 de la República de Guatemala, año 2020*. Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. Gobierno de Guatemala. 260 p.
- Martínez-Austria & Patiño-Gómez. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua 3 (1)*. 5-20.
- MSPAS. (2011). *Guía de normas sanitarias para el diseño de sistemas rurales de abastecimiento de agua para consumo humano*. Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. Gobierno de Guatemala. 64 p.
- Ordoñez, J. (2011). *Balance hídrico superficial: Contribuyendo al desarrollo de una cultura del agua y la gestión integral del recurso hídrico*. Sociedad Geográfica de Lima. Global Water Partnership. Lima, Perú. 44 p.
Disponible en: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf
- Ontaneda, D. (2020). *Efectos de la variabilidad climática sobre los caudales aportantes al embalse Salve Faccha perteneciente a la red de agua potable Papallacta*. Maestría Profesional en Cambio Climático y Negociación Ambiental. Universidad Andina Simón Bolívar. Quito, Ecuador. 81 p.
- Palacios, E. (2016). *Gestión integral de cuencas hidrográficas*. Facultad Regional Multidisciplinaria de Estelí. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. 40 p.
- Rosito, J.C. (2010). *Sistematización de información ecohidrológica de la Reserva de la Biosfera Sierra de Las Minas*. Fondo del Agua. Fundación Defensores de La Naturaleza. 120 p.

- Rosito, J.C. (2011). *Integración y análisis de información biofísica con énfasis en la relacionada con los recursos, erosión e impacto del proyecto PESH en la cuenca Teculután*. Proyecto PESH WWF-CARE. 47 p.
- Rosito, J.C. (2015). *Diagnóstico biofísico, socioeconómico y de elementos de gestión de la subcuenca Teculután, Reserva de la biosfera Sierra de las Minas, Guatemala*. Consultoría para WWF. Guatemala. 105 p.
- Sagastume, R. (2022). *Mapa de cobertura y uso de la tierra de la subcuenca del río Teculután con base en el análisis de la imagen satelital de Google Earth 2022*. Guatemala. [Mapa digital]
- SEI. (2015). *WEAP User Guide*. Water Evaluation and Planning System. Stockholm Environment Institute. Estados Unidos. 400 p.
- SEGEPLAN. (2006). *Política nacional de gestión integrada de los recursos hídricos y de la estrategia nacional de gestión integrada de los recursos hídricos*. Guatemala. Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia. Guatemala. Disponible en: http://cebem.org/revistaredesma/vol11/pdf/legislacion/engirh_guatemala.pdf
- Teo, J. (2011). *Trabajo de graduación realizado en: El municipio de Teculután, Zacapa, con el consorcio CARE-WWF en el proyecto de compensación equitativa por servicios Hidrológicos, subcuenca del río Teculután, en apoyo a la Asociación de desarrollo integral agropecuario de las Comunidades de Teculután*. Facultad de Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala. 192 p.
- UICN-ORMACC. (2018). *La cuenca hidrográfica: Infografía*. Oficina Regional para México, América Central y Caribe de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Disponible en: https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/cuenca_hidrografica.pdf
- Villón, M. (2002). *Hidrología*. Segunda edición. Editorial Villón. Lima, Perú. 216 p.

8 ANEXOS

Fotografías



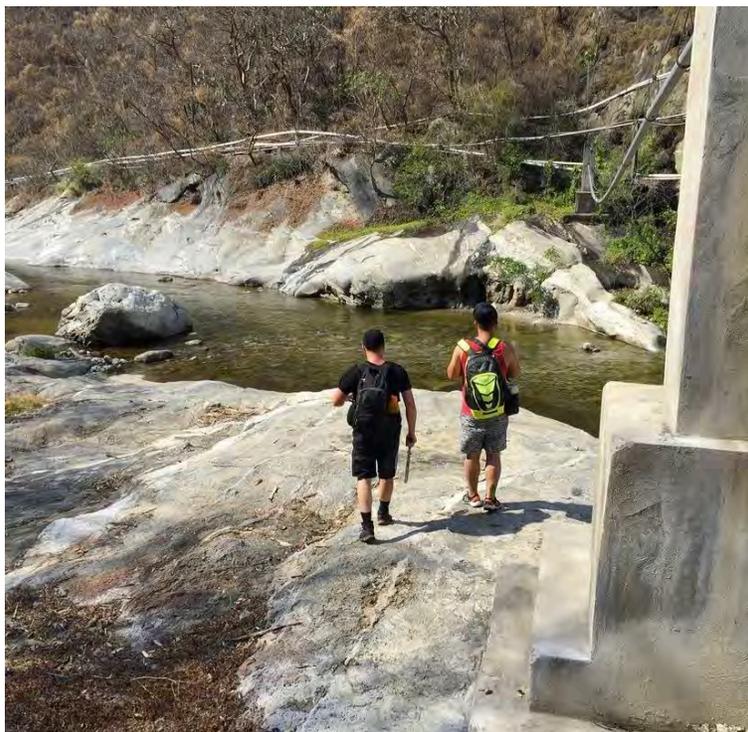
Fotografía 1 – Vista del cauce del río Teculután y a un costado, las tuberías de agua para abastecimiento domiciliar



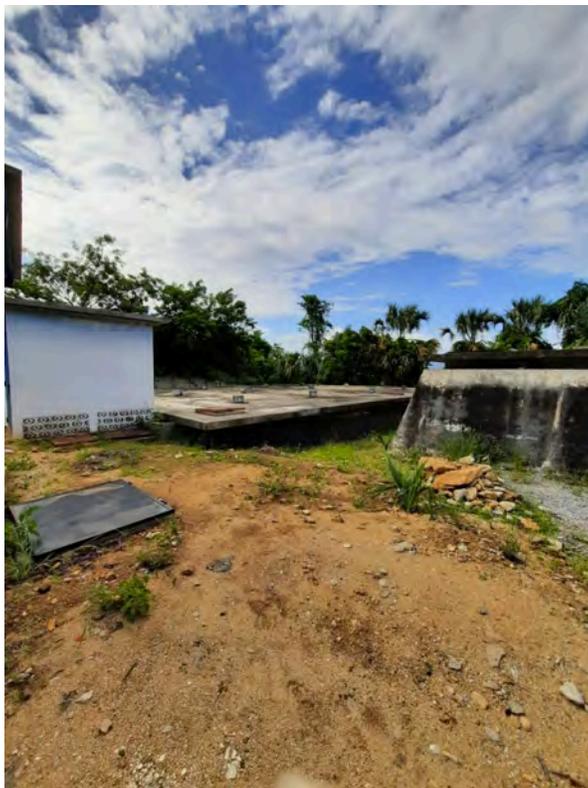
Fotografía 2 – Vista de las tuberías de agua para abastecimiento domiciliar y una toma de riego



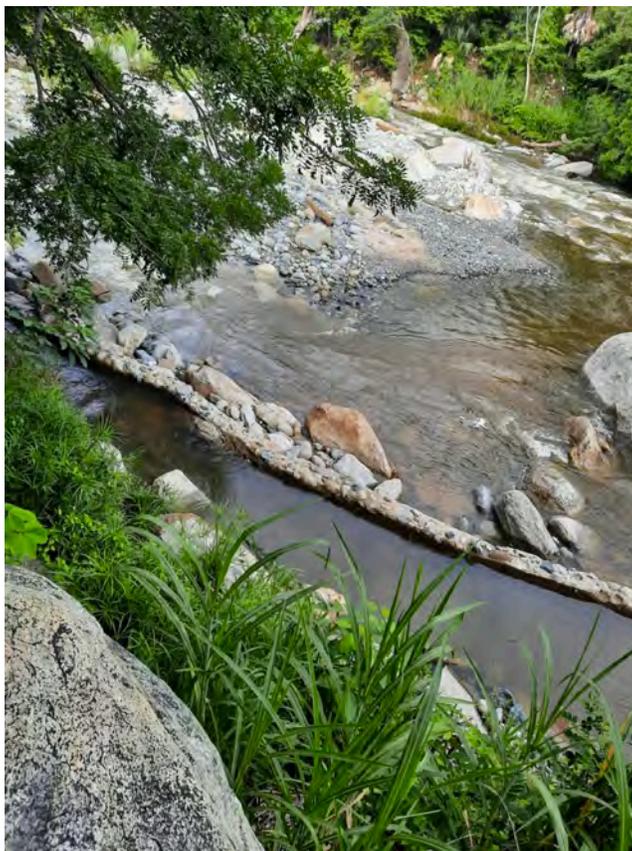
Fotografía 3 – Presa de captación del río Teculután



Fotografía 4 – Vista del cauce del río Teculután



Fotografía 5 – Tanques municipales de distribución del agua domiciliar



Fotografía 6 – Toma "Castañeda"



Fotografía 7 – Toma “San Antonio”



Fotografía 8 – Fincas con ganado



Fotografía 9 – Siembra de maíz a la orilla del río Teculután



Fotografía 10 – Cultivo de mango en la parte baja de la subcuenca



Fotografía 11 – Deforestación en la parte media de la subcuenca.

Series de datos utilizadas en el presente estudio

Caudales mensuales promedio, estación Las Minas, período 1994-2017. Fuente de datos: WWF Guatemala, 2020.

Año hidrológico	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril
1994-1995					5.9	4.0	3.4	2.5	1.5	2.2	1.3	3.3
1995-1996	1.6	3.4	4.3	16.8	15.2	8.9	5.5	4.0	2.8	3.3	1.2	1.5
1996-1997	2.6	3.1	16.2	7.6	4.3	13.0	16.3	4.8	3.1	4.8	2.3	1.5
1997-1998	1.6	11.5	5.0	3.9	8.3	9.0	5.3	2.5	1.7	1.2	0.8	1.7
1998-1999	0.9	1.9		4.2	4.8	9.0					2.2	2.7
1999-2000	1.5	3.8	7.1	5.0	16.6	11.1	11.7	4.3	2.8	2.4	1.7	1.5
2000-2001	3.6	5.4	3.4	5.7	9.4	10.9	4.7	3.4	4.1	3.3	2.6	1.3
2001-2002	2.5	3.6	2.7	3.3	6.4	7.9	5.0	3.8	2.3	2.5	2.0	1.3
2002-2003	2.5	3.5	5.8	4.5	12.0	7.9	6.9	3.3	3.7	1.9	1.2	1.3
2003-2004	2.8	5.2	5.8	2.6	2.9	4.8	2.6	5.6	4.2	2.5	4.9	1.6
2004-2005	3.4	6.7	5.8	4.6	5.8	4.8	3.0	3.0	3.2	1.6	3.8	1.2
2005-2006	15.3	16.4	18.6	3.2	4.0	7.9	5.5	3.0	3.7	3.6	2.0	3.3
2006-2007	7.5	9.6	6.1	3.6	4.5	7.7	4.3	6.9	3.9	2.8	2.8	1.4
2007-2008	7.3	2.9	6.3	6.4	7.6	8.2	6.2	2.8	3.1	1.8	2.1	1.5
2008-2009	7.2	7.7	15.3	7.4	11.9	16.4	4.3	3.4	5.5	4.6	1.8	1.3
2009-2010	2.6	3.1	4.2	3.2	3.1	2.4	3.5	1.7	2.4	1.2	1.1	1.5
2010-2011	15.0	9.5	10.1	15.4	16.8	8.2	5.9	6.4	3.7	3.8	3.3	2.1
2011-2012	2.1	5.3	9.7	9.0	11.2	15.4	6.4	5.9	6.6	4.9	4.5	2.5
2012-2013	2.3	5.0	6.6	8.1	10.5	8.0	5.4	6.0	4.5	2.7	2.0	4.5
2013-2014	2.4	9.1	8.0	5.5	17.4	14.6	13.9	15.9	5.7	6.9	3.9	3.2
2014-2015	6.0	9.5	6.8	5.4	7.3	12.3	11.3	8.4	6.7	5.2	4.6	3.3
2015-2016	3.3	4.1	2.9	2.8	6.0	7.1	15.4	11.8	9.7	6.0	5.8	2.4
2016-2017	1.3	3.6	4.3	5.1	4.5	6.3	5.0	6.2	3.5	5.2	3.6	2.5
2017-2018	6.8	6.2	7.4	6.9								

Precipitación total mensual, período 1994-2021. Fuente de datos: CHIRPS, 2022

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1994	15.4	10.3	9.3	41.8	127.0	273.8	132.2	246.4	247.6	140.4	63.7	24.8
1995	13.7	9.4	11.8	92.8	84.3	295.2	231.3	456.9	386.2	173.8	36.9	39.4
1996	9.9	9.4	9.4	97.5	226.7	228.7	376.6	205.4	258.8	133.4	160.6	24.6
1997	14.0	10.1	33.4	22.0	114.5	356.9	241.2	176.2	270.5	164.6	101.5	25.2
1998	14.2	3.7	12.9	9.9	91.6	282.5	249.5	202.6	233.6	421.4	214.4	25.0
1999	11.8	11.9	20.4	45.7	78.4	329.1	273.6	241.8	521.8	305.5	59.7	26.9
2000	15.2	7.8	11.6	13.8	355.0	240.7	144.7	277.2	368.5	141.7	36.2	27.1
2001	12.4	12.1	20.5	10.3	149.6	139.7	198.0	194.9	344.5	161.4	30.5	34.6
2002	13.2	12.2	12.3	6.8	118.9	257.4	203.5	139.6	311.7	158.7	43.4	20.7
2003	13.4	8.2	36.6	11.7	128.0	317.3	191.5	128.4	247.4	131.3	76.6	18.9
2004	12.5	6.4	20.8	31.1	123.7	262.1	209.8	104.6	204.5	215.7	102.4	15.6
2005	16.6	6.0	43.4	10.3	120.7	370.3	275.8	262.8	273.6	208.7	40.3	18.8
2006	33.3	12.8	18.3	38.7	150.3	373.1	171.9	135.8	181.8	152.4	43.7	25.3
2007	16.3	6.4	20.7	17.9	88.9	293.9	194.2	275.4	287.9	198.4	57.5	14.6
2008	13.4	10.2	18.9	29.7	108.2	237.0	559.7	224.3	375.1	235.1	19.4	25.1
2009	19.7	11.7	8.3	18.2	176.5	247.2	182.4	151.7	182.7	102.1	76.8	46.3
2010	11.3	7.9	10.9	55.7	245.4	316.4	350.5	449.6	408.9	65.3	35.1	19.5
2011	15.8	9.3	22.3	51.6	131.1	320.6	377.0	286.8	316.7	330.7	63.9	24.8
2012	22.0	15.5	19.6	46.7	175.4	336.1	151.1	304.4	210.0	154.5	32.1	22.4
2013	11.8	7.8	39.0	39.7	153.0	230.1	206.8	195.6	374.2	237.4	78.7	21.5
2014	15.9	6.4	27.4	28.6	237.0	345.3	98.1	197.3	266.8	290.9	38.5	28.2
2015	11.6	9.2	15.2	45.2	56.4	239.2	130.2	93.3	320.5	158.0	134.0	18.8
2016	15.4	9.9	15.1	41.1	61.7	292.0	142.3	203.3	236.0	72.2	39.4	41.1
2017	11.5	6.0	25.0	36.3	178.9	391.7	157.5	177.5	286.6	212.4	37.3	25.1
2018	26.6	7.8	10.8	42.5	107.8	273.9	88.2	176.6	159.9	140.9	34.3	23.6
2019	14.2	8.6	8.9	36.5	227.5	221.5	95.2	127.0	219.2	254.1	43.2	45.7
2020	20.6	11.6	23.5	24.7	263.8	183.9	171.4	229.8	279.5	206.7	342.2	42.8
2021	22.6	4.5	11.9	38.1	110.1	248.3	159.0	244.6	165.1	133.4	32.0	50.1

Temperatura media mensual, período 1994-2021. Fuente de datos: POWER, 2022

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1994	18.6	20.1	22.8	24.5	24.8	23.1	23.2	22.8	22.5	22.5	21.4	19.9
1995	20.0	20.8	23.6	24.5	24.5	23.1	21.5	21.6	21.0	20.5	19.6	19.3
1996	17.5	19.6	21.5	23.7	22.8	22.7	22.0	21.5	21.9	21.5	20.2	19.2
1997	19.8	20.7	23.1	24.9	23.9	22.4	21.5	21.7	21.6	21.1	20.9	19.8
1998	21.2	22.9	23.2	25.8	25.4	23.3	21.3	21.5	21.8	21.1	19.3	17.8
1999	17.9	18.4	20.6	23.6	23.8	21.7	20.8	21.1	20.5	19.4	17.2	17.2
2000	17.3	19.0	21.7	23.2	21.9	20.8	20.6	20.7	21.1	19.7	19.7	17.3
2001	17.6	19.2	21.6	23.0	23.3	21.6	21.4	21.3	20.9	20.3	18.6	18.9
2002	18.8	20.0	22.2	23.3	23.7	22.8	21.7	21.6	21.6	20.7	18.9	18.8
2003	17.1	20.5	23.2	23.7	24.4	22.4	21.5	21.2	21.8	21.0	19.6	17.5
2004	19.1	21.2	21.4	23.4	22.9	22.1	21.2	21.8	21.7	20.8	18.9	18.0
2005	17.7	20.0	24.3	24.6	23.5	22.8	21.7	21.6	21.2	20.1	18.5	18.6
2006	18.2	18.5	21.1	23.0	23.2	21.2	21.1	21.2	21.2	21.2	18.4	18.8
2007	19.0	20.3	21.1	23.9	24.5	22.1	21.9	21.2	20.9	20.0	18.2	18.1
2008	18.0	20.1	21.6	23.2	24.3	21.4	21.0	21.4	21.4	19.8	17.5	17.3
2009	17.3	17.8	19.4	23.4	22.8	22.7	21.6	21.2	21.8	21.5	19.2	19.4
2010	18.1	20.7	22.4	24.2	23.6	22.2	21.6	21.4	21.2	19.2	18.2	16.1
2011	19.4	20.3	21.3	24.0	23.5	22.2	21.2	21.7	21.2	19.4	18.4	17.6
2012	18.2	19.3	20.4	22.8	23.3	22.4	21.1	21.5	21.0	20.4	17.8	18.9
2013	19.2	21.3	20.9	24.8	23.5	22.2	21.1	21.2	21.4	21.0	19.3	18.7
2014	17.4	20.3	22.2	23.6	22.6	21.8	21.3	21.2	21.0	20.5	18.5	17.6
2015	17.6	18.3	20.3	23.4	22.6	21.6	21.7	22.1	21.5	21.3	20.3	20.1
2016	18.7	18.5	23.2	24.4	25.0	22.8	21.7	21.8	21.4	20.6	19.3	19.7
2017	19.2	21.1	20.7	23.8	23.4	22.1	21.3	21.7	21.8	20.3	18.8	17.7
2018	16.9	19.6	22.2	23.1	23.3	21.7	21.3	21.2	21.3	20.6	20.1	18.5
2019	18.7	21.7	22.2	24.4	23.6	22.8	21.8	22.1	21.7	21.5	19.5	18.6
2020	19.2	20.7	22.3	26.0	23.9	22.0	21.7	21.4	21.7	21.0	19.8	18.0
2021	18.6	19.1	20.9	23.3	23.2	22.0	21.4	21.5	21.6	21.3	18.4	18.7

Humedad relativa media mensual, período 1994-2021. Fuente de datos: POWER, 2022

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1994	80.1	71.2	59.4	59.1	62.1	72.1	69.2	73.6	75.8	72.8	73.2	74.3
1995	68.6	65.7	55.1	63.3	68.1	78.5	84.4	85.8	89.4	88.3	86.8	85.8
1996	79.1	72.6	61.8	66.2	75.0	77.7	79.3	81.1	83.5	81.7	79.1	77.8
1997	72.9	71.1	61.8	57.8	66.1	82.3	86.3	84.1	86.4	85.4	83.7	75.9
1998	72.0	55.2	60.9	53.1	55.4	80.3	87.6	88.1	87.8	89.6	91.1	89.3
1999	87.3	80.4	72.1	65.9	68.0	82.4	85.3	86.0	90.1	88.7	87.6	86.1
2000	80.6	74.5	67.4	62.4	81.8	87.7	86.8	88.1	88.6	89.1	87.9	87.3
2001	81.0	80.3	63.6	67.3	72.3	82.3	84.7	88.0	88.5	89.8	87.6	86.7
2002	79.9	74.7	65.3	63.3	72.1	80.2	84.6	84.0	87.1	89.1	88.1	87.9
2003	85.4	74.3	62.8	62.6	68.6	83.3	86.9	86.9	86.9	87.6	87.1	82.6
2004	77.6	69.3	71.6	64.0	75.6	83.6	86.9	84.4	84.3	88.7	88.3	85.3
2005	79.5	70.3	63.9	62.6	74.5	84.0	88.1	88.6	89.4	88.8	88.3	86.6
2006	84.5	79.4	68.1	67.3	74.4	87.8	89.0	88.3	87.4	88.9	87.9	87.6
2007	84.8	74.3	72.7	64.8	63.8	82.7	84.3	87.3	88.4	88.5	89.8	86.9
2008	84.1	78.2	68.9	66.3	68.5	85.8	87.7	87.0	87.6	90.7	87.7	88.3
2009	86.9	84.2	74.6	65.3	77.3	79.7	85.8	87.7	86.2	84.9	86.6	80.3
2010	79.8	72.7	62.6	68.3	75.7	85.0	86.6	88.3	89.1	88.0	87.0	83.5
2011	77.8	73.5	64.1	62.3	73.9	80.8	88.1	86.4	87.3	89.9	88.5	89.0
2012	85.8	83.1	74.6	67.5	75.7	82.0	86.3	86.1	86.8	87.7	86.8	81.2
2013	80.8	72.3	67.3	63.3	71.1	83.3	87.3	87.1	87.1	89.3	88.9	87.4
2014	85.1	79.6	72.3	66.3	79.6	86.9	87.6	86.6	88.3	89.1	89.1	88.9
2015	87.6	82.9	78.0	73.4	76.7	86.4	84.2	82.1	87.8	87.7	89.8	87.9
2016	82.6	79.3	71.6	66.7	68.3	79.7	84.7	85.8	87.3	86.0	86.7	84.8
2017	76.9	72.3	72.6	65.3	78.6	85.7	88.0	86.4	87.3	89.6	88.3	86.9
2018	83.1	78.0	66.9	69.1	76.2	86.1	85.3	87.5	88.3	88.5	86.8	83.5
2019	80.3	71.0	65.3	61.4	78.1	84.3	84.3	86.1	86.9	88.5	89.1	88.0
2020	83.7	76.1	69.9	59.6	74.6	85.8	85.8	87.8	87.7	89.3	90.6	89.3
2021	88.4	81.6	75.9	72.6	76.9	86.9	87.9	88.2	88.3	88.0	89.1	87.9

Velocidad del viento media mensual, período 1994-2021. Fuente de datos: POWER, 2022

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1994	1.9	1.8	1.9	1.9	1.9	1.5	2.1	1.6	1.7	1.4	1.9	1.9
1995	1.9	2.1	1.9	1.5	1.3	1.2	1.4	1.1	1.0	1.4	1.8	1.5
1996	1.9	1.9	2.0	1.7	1.7	1.5	1.7	1.5	1.1	1.4	2.5	2.1
1997	1.7	2.0	2.0	1.9	1.8	1.2	1.7	1.6	1.2	1.4	1.6	1.7
1998	1.8	1.7	2.2	2.0	1.8	1.4	1.4	1.2	1.2	1.4	1.7	1.9
1999	1.9	1.8	2.0	1.9	1.6	1.1	1.5	1.2	1.0	1.3	2.1	1.8
2000	2.0	2.0	1.6	2.0	1.1	1.3	1.6	1.4	1.0	1.6	1.6	2.1
2001	1.9	2.2	1.8	2.2	1.6	1.6	1.4	1.4	1.0	1.7	1.7	1.6
2002	1.9	2.1	2.1	2.3	1.9	1.3	1.5	1.6	1.1	1.3	1.8	1.7
2003	2.3	1.7	1.8	1.7	1.5	1.1	1.6	1.3	0.9	1.3	1.8	2.2
2004	2.0	2.1	2.6	1.9	1.8	1.4	1.3	1.4	1.0	1.1	1.8	2.0
2005	2.2	1.9	1.6	2.1	1.4	1.0	1.1	1.3	1.3	1.6	2.0	1.5
2006	2.0	2.1	1.9	1.8	1.3	1.3	1.4	1.2	1.1	1.2	1.8	1.9
2007	1.9	1.6	2.2	1.7	1.6	1.2	1.2	1.2	1.1	1.3	2.0	1.5
2008	1.9	1.5	1.9	1.8	1.4	1.4	1.2	1.0	1.0	1.6	1.9	1.7
2009	1.6	2.1	2.0	1.9	1.1	1.0	1.4	1.4	1.1	1.2	1.6	1.5
2010	2.0	1.7	2.0	1.4	1.7	1.4	1.2	1.0	1.3	1.6	1.6	1.9
2011	1.7	1.7	1.9	1.7	1.4	1.3	1.1	1.0	1.1	1.4	1.7	1.8
2012	1.7	1.7	1.9	1.4	1.2	1.1	1.5	1.1	1.1	1.3	1.9	1.7
2013	1.9	1.7	2.3	1.6	1.4	1.3	1.3	1.3	0.9	1.1	1.7	1.6
2014	1.9	1.6	1.7	1.9	1.5	1.1	1.5	1.3	1.0	1.3	1.9	1.7
2015	2.0	1.8	1.8	1.7	1.7	1.5	1.5	1.5	1.0	1.2	1.5	1.5
2016	1.6	2.4	1.6	1.9	1.6	1.3	1.5	1.3	1.1	1.5	1.9	1.9
2017	1.9	1.7	2.2	1.8	1.2	1.0	1.5	1.1	1.0	1.4	1.7	1.9
2018	2.2	1.8	1.8	1.6	1.2	1.1	1.6	1.3	1.2	1.3	1.5	1.7
2019	1.7	1.6	2.0	2.0	1.3	1.2	1.4	1.1	1.1	1.0	1.6	1.5
2020	1.7	2.0	2.0	1.6	1.4	1.6	1.2	1.2	1.0	1.1	1.8	1.6
2021	1.6	1.6	1.9	1.7	1.6	1.0	1.4	1.1	1.1	1.1	1.8	1.4

**Pasos para la construcción del modelo hidrológico de la subcuenca del río Teculután
utilizando la herramienta WEAP**

Entrada de datos

1. Definición del horizonte de tiempo.

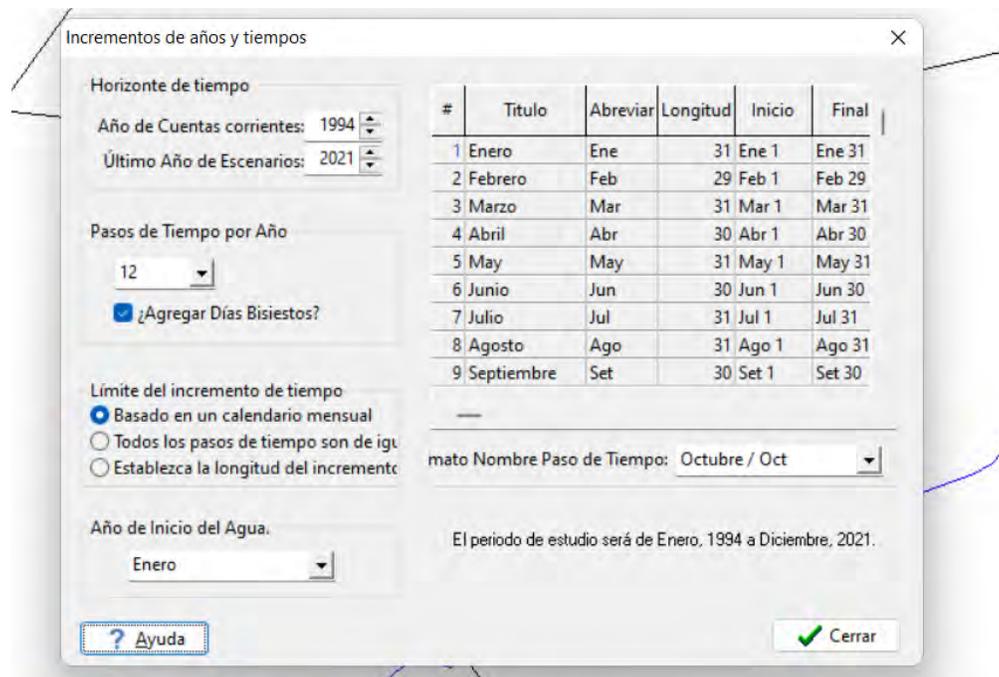


Figura 11 – Horizonte de tiempo definido en la herramienta WEAP.

2. Delineación del cauce del río Teculután.



Figura 12 – Delineación del cauce del río Teculután en la herramienta WEAP

3. Registro de los sitios de demanda.

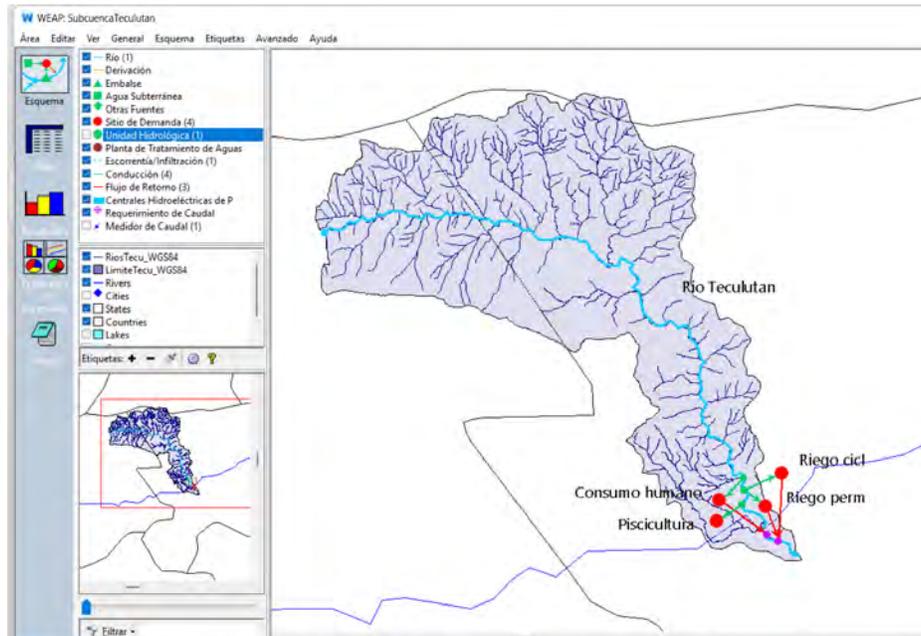


Figura 13 – Ubicación de los sitios de demanda de la subcuenca Teculután en la herramienta WEAP

Modelación de la subcuenca

1. Ubicación del centroide de la subcuenca y de la ubicación de la estación Las Minas.



Figura 14 – Ubicación del centroide de la subcuenca Teculután y de la estación Las Minas en la herramienta WEAP

2. Registro de las categorías de cobertura vegetal y uso del suelo y su extensión.

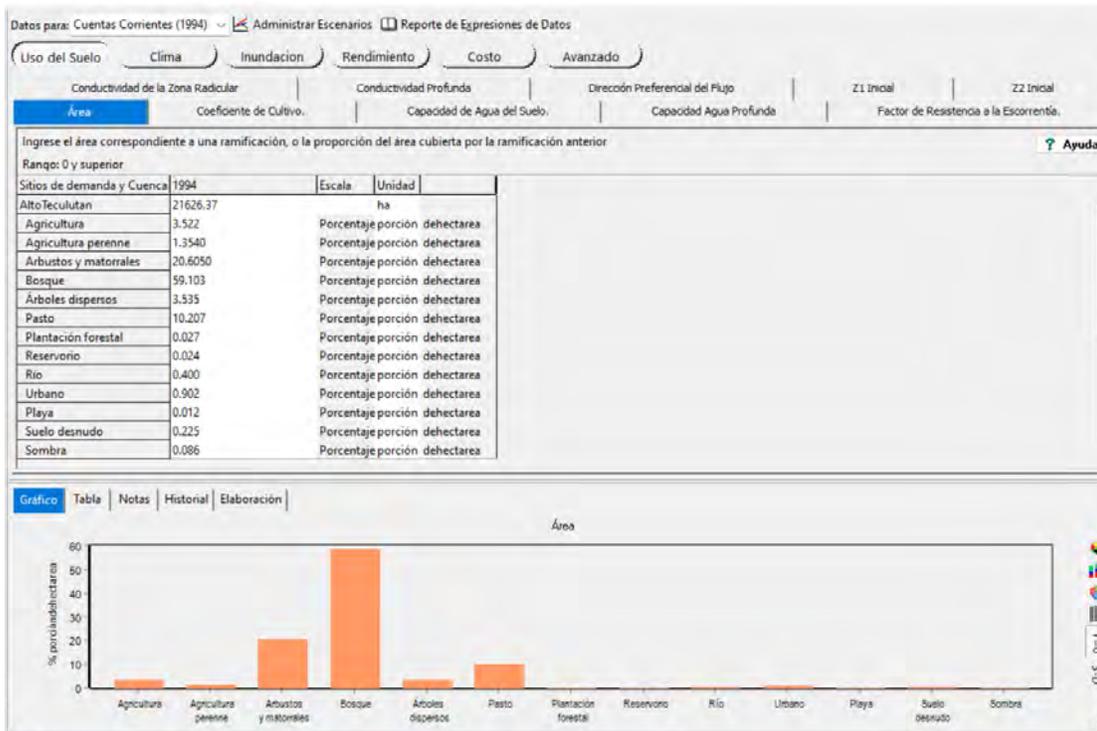


Figura 15 – Registro del uso del suelo de la subcuenca Teculután en la herramienta WEAP

3. Registro de datos climáticos.

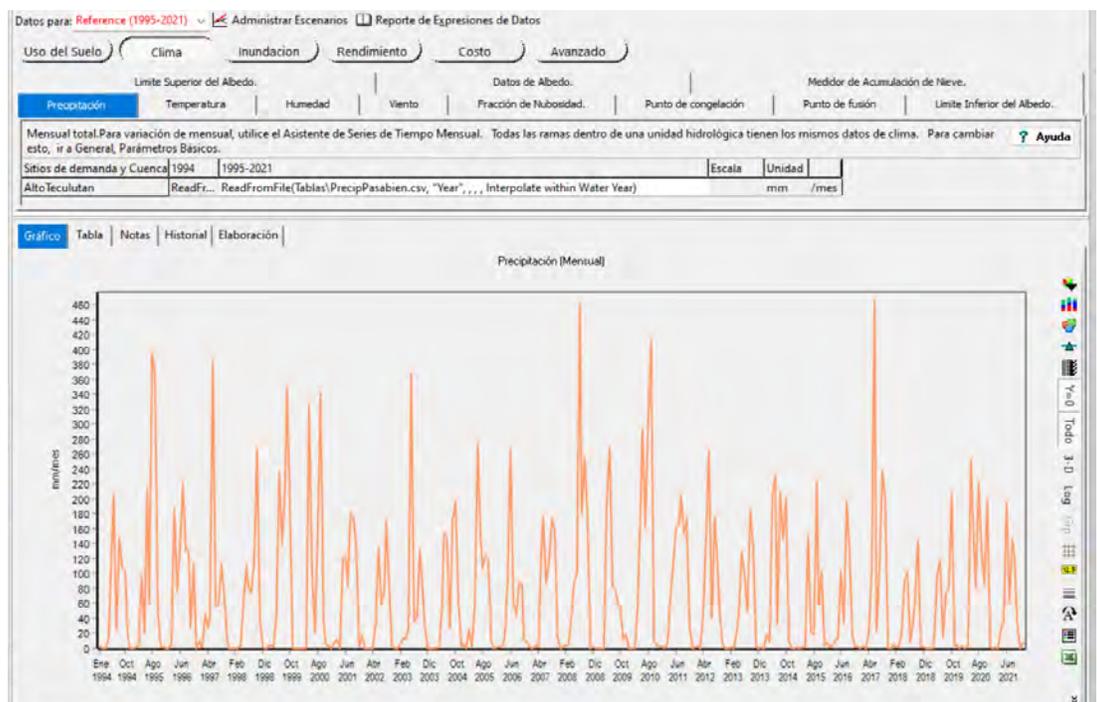


Figura 16 – Registro de los datos climáticos de la subcuenca Teculután en la herramienta WEAP

Calibración del modelo

Para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los valores modelados se utilizaron dos índices/métricas utilizadas normalmente en la calibración de modelos hidrológicos: el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el sesgo (o Bias o desviación relativa de los caudales) (Centro de Cambio Global-UC & SEI, 2009).

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}, y$$

$$Bias = 100 * [(\bar{Q}_s - \bar{Q}_o) / \bar{Q}_o]$$

Figura 17 – Ecuaciones de los índices de calibración Nash y Bias

Fuente: Centro de Cambio Global-UC & SEI, 2009.

Donde $Q_{s,i}$ y $Q_{o,i}$ corresponden a caudales simulados y observados para cada paso de tiempo i , y n corresponde al número total de pasos de tiempo (Centro de Cambio Global-UC & SEI, 2009).

En general, el criterio para interpretar las estadísticas es el siguiente (Centro de Cambio Global-UC & SEI, 2009):

- Nash-Sutcliffe: entre más cerca de 1 mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados.
- Bias: entre menor el porcentaje de Bias, mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados. Un Bias positivo indica sobre estimación y un Bias negativo indica subestimación de caudales.