



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS
NATURALES

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque

Producto 4

Balance hídrico integral de la cuenca
del lago de Coatepeque



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS
NATURALES

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque

Producto 4 Balance hídrico integral de la cuenca del lago de Coatepeque

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)
El Salvador, Centroamérica.

Fernando Andrés López Larreynaga
Ministro

Alexander Francisco Gil
Director de Seguridad Hídrica

Administradores de contrato

Hernán Romero, Gerente de Gestión Hídrica
Sol María Muñoz Aguilón, Técnico en Suelos y Recursos Hídricos

Elaboración

José Mario Guevara Retana, Hidrólogo
Marcia de Calderón, Coordinadora, Hidrogeóloga y Especialista en Recursos Hídricos
Vera Campos, Socióloga

El documento fue financiado por AECID y elaborado en el marco del Proyecto Integrado de Agua, Saneamiento y Medio Ambiente *SLV-056-B*.

Este documento puede ser reproducido todo o en parte, reconociendo los derechos del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)
Kilómetro 5 ½ carretera a Santa Tecla, calle y colonia Las Mercedes, Edificios MARN, instalaciones ISTA, San Salvador, El Salvador, Centroamérica.
Teléfono: (503) 2132-6276
Sitio web: www.marn.gob.sv
Correo electrónico: medioambiente@marn.gob.sv
Facebook: [/MedioAmbienteSLV/](https://www.facebook.com/MedioAmbienteSLV/)
Twitter: [@MedioAmbienteSV](https://twitter.com/MedioAmbienteSV)
Youtube: [youtube/MARNsv](https://www.youtube.com/MARNsv)
Instagram: [@medioambientesv](https://www.instagram.com/medioambientesv)

Contenido

Introducción.....	1
Objetivo General	2
Objetivos específicos.....	2
Objetivos para el Producto 3.....	3
Capítulo I. Síntesis de la caracterización de la cuenca del lago de Coatepeque.....	4
1.1. Características biofísicas más relevantes para el Balance Hídrico	5
1.1.1. Delimitación de la cuenca del lago de Coatepeque y red hidrográfica.....	6
1.1.2. Topografía de la cuenca del lago de Coatepeque	6
1.1.3. Cobertura de uso actual de la tierra.....	6
1.1.4. Delimitación espacial y temporal de la zona de estudio.....	10
1.2. Aspectos socioeconómicos relevantes del producto 2.....	11
1.2.1 Diagnóstico integral de la cuenca del lago de Coatepeque	12
1.3. Conexiones hidráulicas con acuíferos vecinos, hidrogeoquímica e isótopos estables	12
Capítulo II. Balance hídrico actual de la cuenca del lago de Coatepeque.....	14
2.1 Características climáticas principales de la cuenca del lago de Coatepeque.....	15
2.2 Balance hidrológico del lago de Coatepeque.....	17
2.2.1 Modelo de Temez.....	17
2.2.2 Ecuación de balance hídrico y conceptualización de flujos.....	20
2.2.3 Metodología para determinación de parámetros de entrada al modelo 22	
2.2.4 Balance hidrológico preliminar: datos de entrada al modelo.....	40
2.2.5 Modelación hidrológica.....	42
2.2.6 Calibración del modelo para balance en condiciones actuales.....	56
2.2.7 Caudales en régimen alterado	68
Capítulo III. Balance hídrico de la cuenca del lago de Coatepeque bajo escenarios climáticos.....	74
3.1 Selección de escenarios climáticos y períodos de análisis.....	76

3.1.1	Promedio de ensamble de confiabilidad ponderado de variables climáticas para los escenarios de CC utilizado en el balance hídrico.....	77
3.2	Metodología utilizada para la elaboración de los balances bajo escenarios climáticos.....	78
3.3	Resultados de los balances hídricos proyectados bajo escenarios climáticos.....	79
3.3.1	Influencia de las estaciones con datos de Cambio Climático en la cuenca del lago de Coatepeque.....	80
3.3.2	Balance hídrico para el escenario RCP4.5 en el período 2046-2075. Proceso metodológico utilizado en escenarios climáticos.....	82
3.3.3	Modelación hidrológica para RCP4.5 y RCP 8.5 en los períodos 2046-2075 y 2071-2100.	93
Capítulo IV.	Balance hídrico del lago de Coatepeque en un sistema de soporte de decisión	95
4.1	Conceptualización del modelo de gestión del lago de Coatepeque.....	97
4.1.1	Configuración del funcionamiento del embalse.....	98
4.1.2	Resultados de la simulación del balance hídrico del lago de Coatepeque.....	102
4.1.3	Salidas de agua desde el lago de Coatepeque hacia cuencas vecinas.....	105
Capítulo V.	Conclusiones.....	108
Capítulo VI.	Recomendaciones.....	112
	Referencias.....	114
	Anexos	

Listado de Figuras

Figura 1. Contexto territorial de la cuenca del lago de Coatepeque mostrando municipios y cantones.	5
Figura 2. Cuadrante cartográfico del sector oeste de la cuenca, mostrando los drenajes principales que descargan al lago.	8
Figura 3. Distribución de pendientes en la cuenca del lago de Coatepeque.....	9
Figura 4. Mapa de uso de suelos de la cuenca del lago de Coatepeque y su entorno.....	10
Figura 5. Cuenca/subcuencas incorporadas en el estudio para evaluar interrelación con descargas subterráneas del lago de Coatepeque.....	11
Figura 6. Variación de la lluvia media anual para el período 1990-2019 en la cuenca del lago de Coatepeque, mostrando estaciones de análisis.	15
Figura 7. Variación de la temperatura mínima media anual en la cuenca del lago de Coatepeque y localización de estaciones utilizadas en la interpolación.....	16
Figura 8. Esquema conceptual del Modelo de Temez.....	17
Figura 9. Diagrama conceptual del balance hídrico en la cuenca del Lago de Coatepeque.....	21
Figura 10. Mapa de regiones hidrográficas homogéneas, y ubicación del área del Proyecto.....	23
Figura 11. Mapa de Polígonos de Thiessen de la Cuenca del Lago Coatepeque. Parámetro Precipitación	26
Figura 12. Mapa de Polígonos de Thiessen de la Cuenca del Lago Coatepeque. Parámetro evapotranspiración potencial	31
Figura 13. Mapa de tipos de suelos de la cuenca del lago de Coatepeque.....	39
Figura 14. Distribución mensual de los componentes del balance hídrico preliminar en la cuenca del lago de Coatepeque, determinados mediante el Método Thornthwaite y L. Serra.....	41

Figura 15. Variación de niveles medios, máximos y mínimos mensuales en el Lago Coatepeque.....	45
Figura 16. Mapa de isobatas presentado en el levantamiento batimétrico del lago de Coatepeque.....	47
Figura 17. Serie de precipitación de la estación pluviométrica A-18, del período 1991-2020.....	51
Figura 18. Serie de precipitación de la estación pluviométrica A-19, del período 1991-2020.....	52
Figura 19. Serie de precipitación de la estación pluviométrica A-21, del período 1991-2020.....	53
Figura 20. Serie de evapotranspiración potencial para la estación climatológica A-18, del período 1991-2020.....	54
Figura 21. Caudales descargados por el lago de Coatepeque en el 2012-2018.....	55
Figura 22. Valores iniciales de la calibración del modelo.....	57
Figura 23. Calibración final del modelo.....	58
Figura 24. Caudales registrados y simulados anuales.....	59
Figura 25. Series anuales de caudales simulados y registrados.....	60
Figura 26 Residuos de los caudales mensuales.....	61
Figura 27 Series de P y ETP anuales para el período 1991-2020.....	61
Figura 28 Series de ETP y ETR anuales para el período 1991-2020.....	62
Figura 29 Series simuladas de caudales totales y subterráneos para el período 1991-2020.....	63
Figura 30 Superposición de caudales naturalizados y alterados, m ³ /s, del período 2012-2018.....	73
Figura 31 Mapa de Polígonos de Thiessen del Parámetro Precipitación para Escenarios de Cambio Climático.....	80
Figura 32. Mapa de Polígonos de Thiessen del Parámetro Temperatura (máxima, media y mínima) para Escenarios de Cambio Climático.....	81

Figura 33 Serie de precipitación de la Estación A-18, escenario RCP 4.5, período 2046.2075.....	86
Figura 34 Serie de precipitación de la Estación A-19, escenario RCP 4.5, período 2046.2075.....	87
Figura 35 Hidrograma de año medio en la cuenca del lago de Coatepeque, escenario RCP 4.5, período 2046 -2075.....	89
Figura 36 Hidrograma de año medio en la cuenca del lago de Coatepeque, para condiciones actuales y escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 en los períodos 2046 -2075 y 2071-20100.....	93
Figura 37 Modelo de gestión construido para el lago de Coatepeque utilizando Aquatool.....	97
Figura 38 Relación entre volumen en el embalse y niveles registrados, con valores obtenidos de registro de monitoreo MARN y batimetría del lago de Coatepeque (MZ Consultores S.A. de C.V., 2020).....	99
Figura 39 Relación entre el área del espejo de agua en el embalse y niveles registrados, con valores obtenidos de registro de monitoreo MARN y batimetría del lago de Coatepeque (MZ Consultores S.A. de C.V., 2020).....	99
Figura 40 Esquema conceptual de niveles y funcionamiento del embalse en Aquatool+.....	100
Figura 41 Niveles, áreas y volúmenes utilizados para el modelo de gestión.....	102
Figura 42 Volumen de agua en el lago, las aportaciones y el flujo de salida (demandas no contabilizadas), considerando nivel máximo inicial.....	104
Figura 43 Volumen de agua en el lago, las aportaciones y el flujo de salida (demandas no contabilizadas), considerando nivel mínimo inicial.....	105
Figura 41 Variación media del volúmenes de salida de agua del lago (superan nivel máximo), estas se han contabilizado como salidas de agua subterránea adicionales. Mes inicia en Octubre	106
Figura 45 Valores simulados y observados para niveles de agua en la cuenca del lago de Coatepeque, utilizando el sistema de Soporte a la Decisión Aquatool.....	106

Listado de Tablas

Tabla 1. Distribución superficial de los usos del suelo en la cuenca del lago de Coatepeque.....	9
Tabla 2. Coeficientes de relación escorrentía superficial / precipitación (S/P) por zona hidrográfica homogénea	24
Tabla 3. Textura y propiedades de humedad de suelos.....	24
Tabla 4. Precipitación Mensual y Anual de la Estación A-18, período 1991-2020.....	26
Tabla 5. Precipitación Mensual y Anual de la Estación A-19, período 1991-2020.....	28
Tabla 6. Precipitación Mensual y Anual de la Estación A-21, período 1991-2020.....	29
Tabla 7. Precipitación media ponderada mensual y anual, en mm para la cuenca del lago de Coatepeque.....	30
Tabla 8. Temperatura Promedio Mensual y Anual de la Estación A-18, Período 1991-2020.....	32
Tabla 9. Radiación solar extraterrestre RMM en mm/día.....	32
Tabla 10. Evapotranspiración Potencial Mensual y Anual de la Cuenca, Período 1991-2020.....	35
Tabla 11. Evaporación Potencial Mensual y Anual del Lago, Período 1991-2020.....	36
Tabla 12. Evapotranspiración Potencial Ponderada Mensual y Anual de la Cuenca del Lago de Coatepeque, Período 1991-2020.....	37
Tabla 13. Tipos de suelos de la Cuenca del Lago de Coatepeque y sus características.....	39
Tabla 14. Cálculo de la humedad disponible en suelos.....	39
Tabla 15. Balance hidrológico preliminar de la cuenca Lago Coatepeque, en mm. Método de Thornthwaite y L. Serra.....	40
Tabla 16. Nivel mensual de agua procesado del registro de la Estación Limnimétrica del lago de Coatepeque.....	43

Tabla 17. Cálculo del volúmenes y caudales actuales y naturalizados en el Lago de Coatepeque.....	47
Tabla 18. Caudales naturalizados mensuales descargados desde el lago de Coatepeque.....	50
Tabla 18. Evapotranspiración Real en mm, Cuenca Lago Coatepeque. Período 1991-2020.	64
Tabla 20. Volumen subterráneo en Hm ³ en la cuenca del lago de Coatepeque Período 1991-2020.....	65
Tabla 21. Caudales Subterráneos, en m ³ /s, Cuenca Lago Coatepeque. Período 1991-2020.	66
Tabla 22. Caudales Totales, en m ³ /s, Cuenca Lago Coatepeque. Período 1991-2020.....	67
Tabla 23. Series de extracciones y retornos mensuales en la Cuenca Coatepeque. Período 2012-2018.....	68
Tabla 24. Caudales simulados, m ³ /s, del período 2012-2018.....	71
Tabla 25. Caudales extraídos en m ³ /s, del período 2012-2018.....	71
Tabla 26. Caudales de retorno en m ³ /s, del período 2012-2018.....	71
Tabla 27. Caudales de alterados en m ³ /s, del período 2012-2018.	72
Tabla 28. Estaciones climáticas con datos de parámetros proyectados con cambio climático.....	79
Tabla 29. Temperatura Máxima Mensual y Anual de la Estación A-18. Escenario RCP 4.5, Período 2046-2075.....	83
Tabla 30. Temperatura Mínima Mensual y Anual de la Estación A-18. Escenario RCP 4.5, Período 2046-2075.....	84
Tabla 31. Temperatura Promedio Mensual y Anual de la Estación A-18. Escenario RCP 4.5, Período 2046-2075.....	85
Tabla 32. Precipitación media ponderada mensual y anual en mm en la cuenca del lago de Coatepeque proyectada bajo el escenario RCP 4.5, Período 2046-2075.....	87

Tabla 33. Evapotranspiración potencial mensual y anual en mm de la cuenca del lago de Coatepeque proyectada bajo el escenario RCP 4.5, Período 2046-2075.....	90
Tabla 34. Evapotranspiración potencial mensual y anual en mm del lago de Coatepeque proyectada bajo el escenario RCP 4.5, Período 2046-2075.....	91
Tabla 35. Evapotranspiración potencial ponderada mensual y anual en mm de la cuenca del lago de Coatepeque proyectada bajo el escenario RCP 4.5, Período 2046-2075	92
Tabla 36. Variación de las aportaciones totales a partir de los balances hídricos para los escenarios climáticos RCP4.5 y RCP 8.5 en los periodos 2046-2075 y 2071-2100	94
Tabla 37. Volúmenes utilizados en el modelo de gestión del lago de Coatepeque.....	100
Tabla 38. Demandas de agua configuradas en el modelo inicial de gestión del lago de Coatepeque	103

Introducción

El Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARN) ha requerido de los servicios profesionales de consultores especialistas en recursos hídricos, para desarrollar el levantamiento de demandas y el balance hídrico de la cuenca del Lago Coatepeque, con el propósito identificar la problemática del agua debido a las presiones que los usuarios de dichos recursos ejercen sobre ellos. Para ello, es necesario, en primer lugar, realizar una caracterización de los recursos hídricos de la cuenca, tanto en cantidad como en calidad, para que sobre esa base técnica se pueda proponer los lineamientos y las acciones necesarias para dar solución a los problemas identificados en conjunto con los usuarios mismos. En este documento se detalla el Producto 4 de la consultoría que corresponde al Balance Hídrico Integral de la cuenca del lago de Coatepeque.

En el capítulo I, se presenta de forma sintetizada los aspectos más relevantes para este producto, sobre la caracterización biofísica y socioeconómica de la cuenca. El capítulo II, junto al capítulo III son el centro de este producto. El primero presenta en detalle el cálculo del Balance Hídrico de la Cuenca, el planteamiento de un modelo conceptual y su simulación mediante el uso del modelo hidrológico de Témez, el cual se calibra con datos generados al interior de la cuenca y monitoreados por el MARN.

A partir del modelo calibrado fue posible desarrollar cuatro simulaciones del balance considerando los efectos del cambio climático. Para dicho fin se definieron los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 para los períodos 2046-2075 y 2071-2100, cuyo inicio corresponde a 25 y 50 años a partir de las condiciones actuales. Con los balances climáticos y el balance de condiciones actuales fue posible establecer la reducción esperada en las aportaciones de flujo al interior de la cuenca.

En el capítulo IV se presenta el balance hídrico evaluado en un Sistema de Soporte de Decisión haciendo uso del software Aquatool, con dicho modelo será posible evaluar los impactos de las decisiones de gestión que se evalúen para ser realizadas en la cuenca. Para cerrar este producto, se completa en los capítulos V y VI con las conclusiones y recomendaciones y se adicionan las referencias de respaldo utilizadas para la realización de este trabajo.

Objetivo General

Con los servicios ofertados se pretende desarrollar un levantamiento de información de las demandas de agua en la cuenca del Lago de Coatepeque, que incluya a los usuarios de abastecimiento poblacional, actividades agrícolas, pecuarias, turísticas, acuícolas y otras. Así como formular el Balance Hídrico de la Cuenca y desarrollar a partir de los resultados, los lineamientos técnicos para atender la problemática relativa a los recursos hídricos dicha zona.

Objetivos específicos

- Realizar el levantamiento georreferenciado de todas las demandas de agua ubicadas dentro de la cuenca, por cada sector de abastecimiento poblacional, actividades agrícolas, pecuarias, acuícolas, turismo y otras que se identifiquen en la cuenca.
- Analizar detallada y críticamente la información disponible, considerando calidad y distribución espacial y extensión de los datos hidrometeorológicos e hidrogeológicos existentes, que permitan elaborar el balance hídrico para la cuenca.
- Desarrollar una metodología para la determinación del balance hídrico en la cuenca que a partir de la geografía, condiciones climáticas y datos hidrometeorológicos, permita considerar una ecuación de balance adecuado, para una cuenca endorréica, con aportaciones o trasvases subterráneos hacia otras cuencas. El balance hídrico para la cuenca del Lago de Coatepeque, se elaborará utilizando el Software Aquatool.
- Aforar los ríos y nacimientos de agua que se identifican dentro de la cuenca, y en las cuencas circundantes al Lago de Coatepeque.

Objetivos para el Producto 4

- Elaborar el balance hídrico de la cuenca del lago de Coatepeque para condiciones actuales, considerando como período de análisis 1991-2020 y retomando los resultados obtenidos en los productos 2 y 3.
- Elaborar los balances hídricos proyectados con escenarios climáticos para 25 y 50 a partir de la finalización del período de condiciones actuales y evaluar los impactos que casaría en la disponibilidad desde la cantidad en el lago de Coatepeque.
- Modelar el balance hídrico del lago de Coatepeque haciendo uso del software Aquatool, retomando los resultados de los productos precedentes y este producto para proveer al MARN una herramienta de gestión de esta cuenca endorréica.

Capítulo I. Síntesis de la caracterización de la cuenca del lago de Coatepeque

1.1. Características biofísicas más relevantes para el Balance Hídrico

A partir del trabajo realizado en el producto 2 y producto 3, fue posible caracterizar en los aspectos físicos y socioeconómicos a la cuenca del lago de Coatepeque. La cuenca es endorréica, con una fuerte e importante actividad turística en fines de semana y temporada vacacional. Además de ser una zona de esparcimiento y descanso para propietarios de quintas, principalmente de clase alta. El territorio comprende un área de 68.69 km², distribuido en 13 cantones pertenecientes a cuatro municipios: Santa Ana, El Congo y Coatepeque (del departamento de Santa Ana) y el municipio de Izalco perteneciente al departamento de Sonsonate (Figura 1).

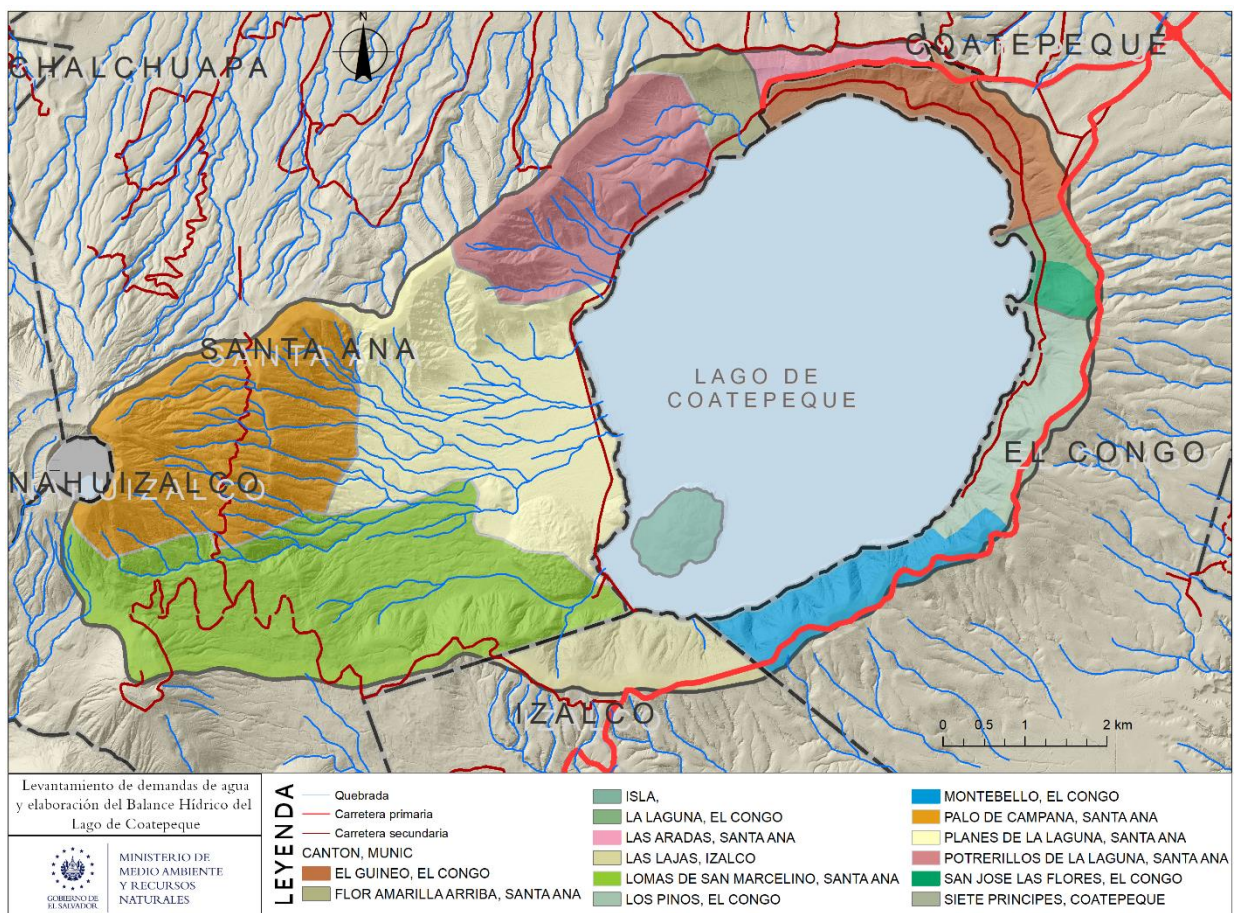


Figura 1. Contexto territorial de la cuenca del lago de Coatepeque mostrando municipios y cantones.

1.1.1. Delimitación de la cuenca del lago de Coatepeque y red hidrográfica

El Lago de Coatepeque, está emplazado en la cuenca que lleva su mismo nombre, es una cuenca endorréica, por lo que toda su descarga superficial se concentra en el lago. En este estudio se ha retomado la delimitación oficial de la cuenca provista por el MARN.

El área de la cuenca del Lago de Coatepeque es de 68.69 km², posee un perímetro de 35.43 km. Por sus elevaciones que descienden desde los 2381.10 msnm en el volcán de Santa Ana hasta el espejo de agua localizado aproximadamente en la cota 736.867 msnm al año 2020, y hasta el fondo del lago localizado a 624.37 msnm (MZ Consultores S.A. de C.V., 2020), posee zonas localizadas en las tres zonas térmicas de El Salvador, definidas por el MARN (<https://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/clima+en+el+salvador/>).

Los drenajes de la cuenca son efímeros y corresponden a quebradas de invierno, principalmente en el costado oeste de la cuenca, destacando en el cuadrante cartográfico de escala 1:25,000, las siguientes quebradas: La Bolsona, El Javillal, La Mina, Las Minas, y la quebrada Mina. Todas ellas descargan el drenaje superficial directamente al lago de Coatepeque (Figura 2).

1.1.2. Topografía de la cuenca del lago de Coatepeque

La cuenca posee una topografía accidentada dominada por accidentes geográficos como el volcán activo de Santa Ana y el cráter generado por los antiguos estratovolcanes que dieron origen al lago. Esto se aprecia en la distribución de sus pendientes, que son predominantemente pronunciadas, dominando las que se encuentran entre 15° y 30° (22.91% del área). Su condición de lago cratérico prevalece en un anillo muy pronunciado en el perímetro que conforma el semicírculo este (desde el noroeste hasta el suroeste), allí se presentan las mayores pendientes. También predominan pendientes entre 7° y 15°, particularmente en el sector suroeste y parte de la desembocadura de las quebradas que descienden del volcán de Santa Ana. Pero también se presentan pendientes superiores a los 30° llegando hasta los 45°, esta superficie representa el 16.5% del área total de la cuenca (Figura 3). Mayores detalles sobre este apartado pueden consultarse en el Producto 2.

1.1.3. Cobertura de uso actual de la tierra

La cuenca del lago de Coatepeque tiene una condición bastante favorable en cuanto al uso del suelo. Según el mapa de uso de suelo del MARN (2018), el 56.96% del área de la cuenca se concentra entre Bosque latifoliado (32.81%) y café bajo sombra (24.15%), el espejo de agua corresponde al 35.51% del área, totalizando 62.47% de la superficie (Tabla 1 y Figura 4). Mientras que los usos urbano/suelos desnudos y granos básicos que suelen ejercer presiones

y acelerar los procesos erosivos solamente representan 2.41% del total del área. Esta condición favorece la significativa transparencia, belleza escénica y estado trófico del lago (Mena et al., 2021).

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
Producto 4 Balance hídrico integral de la cuenca del lago de Coatepeque

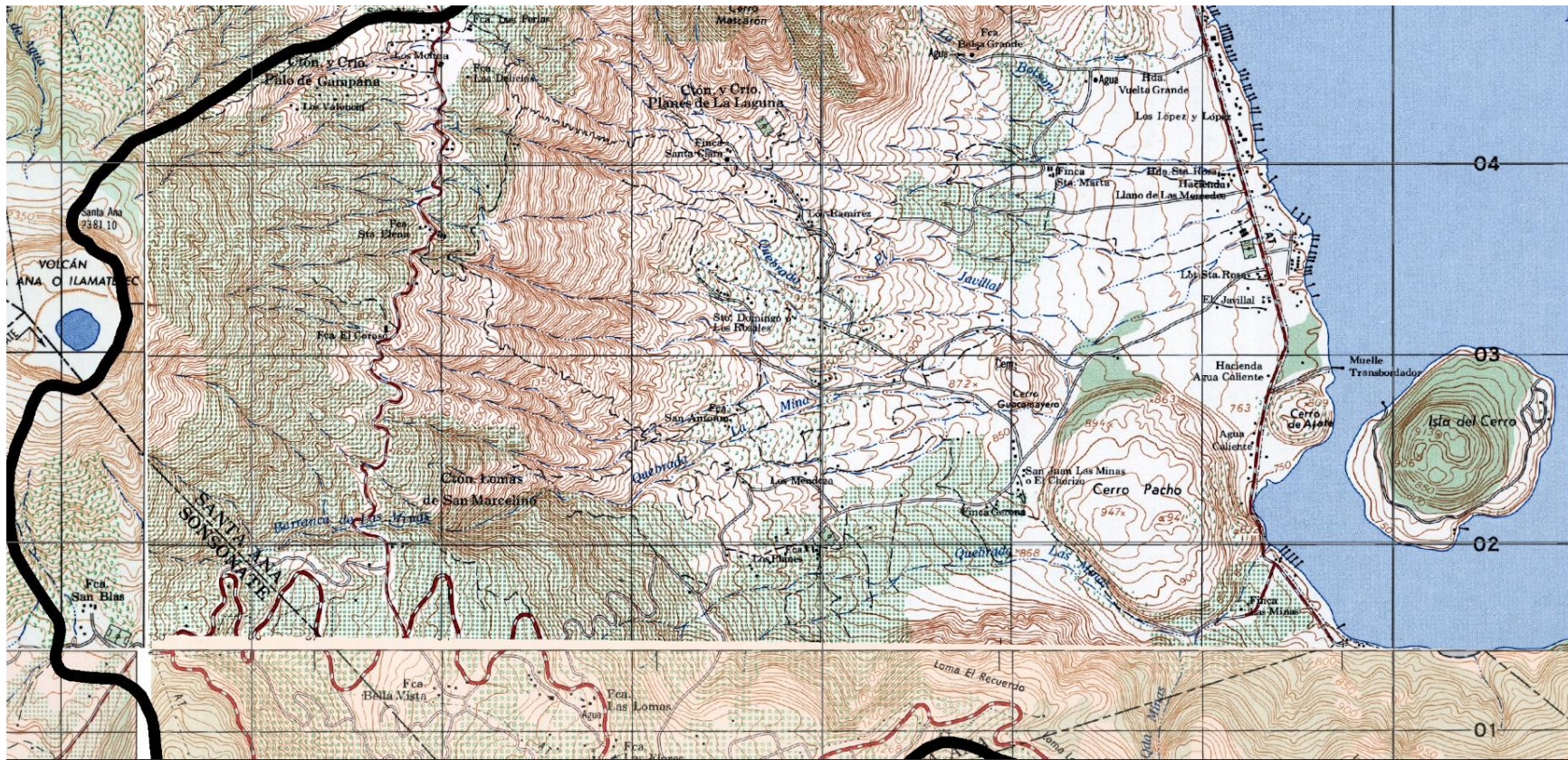


Figura 2. Cuadrante cartográfico del sector oeste de la cuenca, mostrando los drenajes principales que descargan al lago.

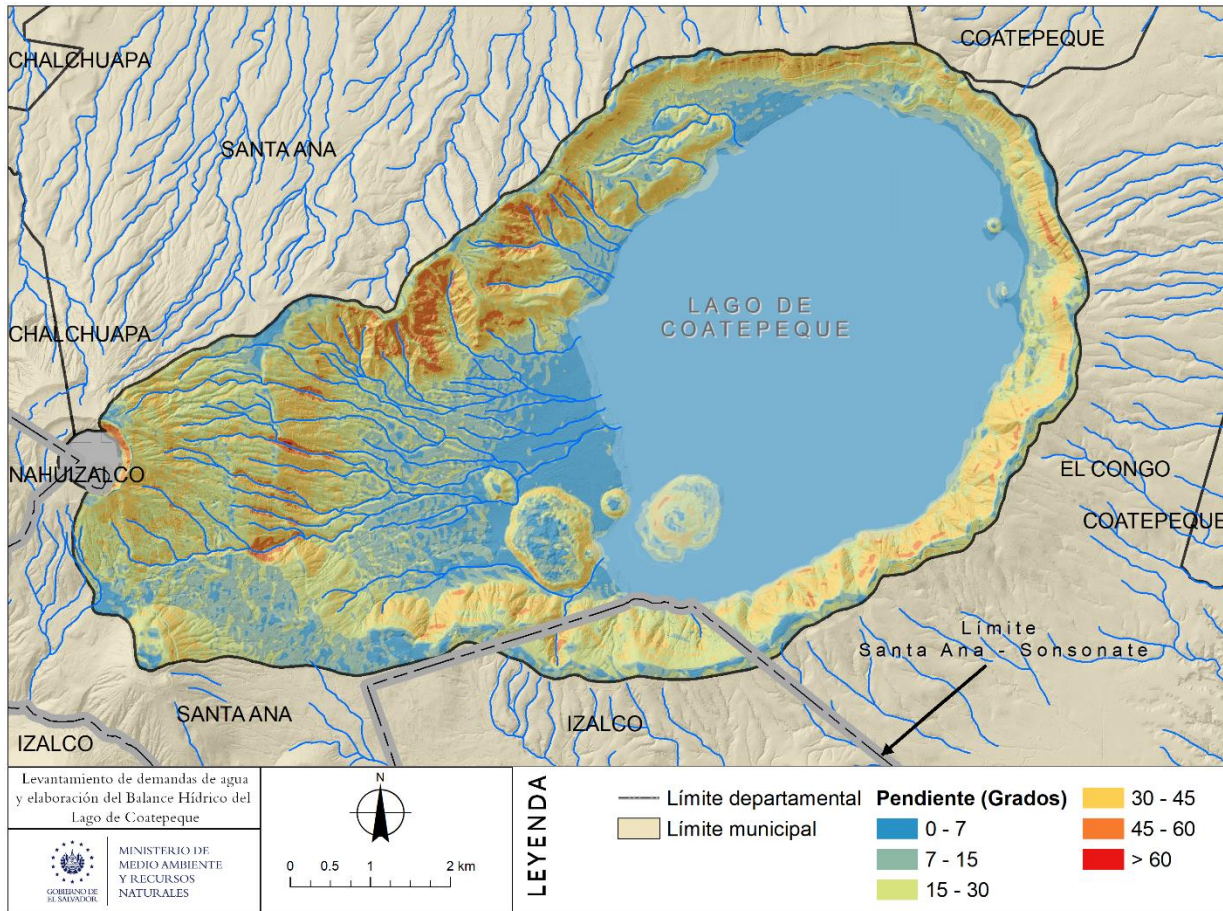


Figura 3. Distribución de pendientes en la cuenca del lago de Coatepeque

Tabla 1.

Distribución superficial de los usos del suelo en la cuenca del lago de Coatepeque

Nombre	Área (km ²)	Porcentaje
Pastos	2.02	2.94%
Granos básicos	1.10	1.60%
Matorral	0.45	0.66%
Urbano/suelos desnudos	0.56	0.81%
Bosque latifoliado	22.54	32.81%
Café bajo sombra	16.59	24.15%
Cultivos frutales	0.07	0.10%
Bosque coníferas	0.38	0.55%
Coladas de lava	0.60	0.87%
Cuerpos de agua	24.39	35.51%
TOTAL	68.69	100.00%

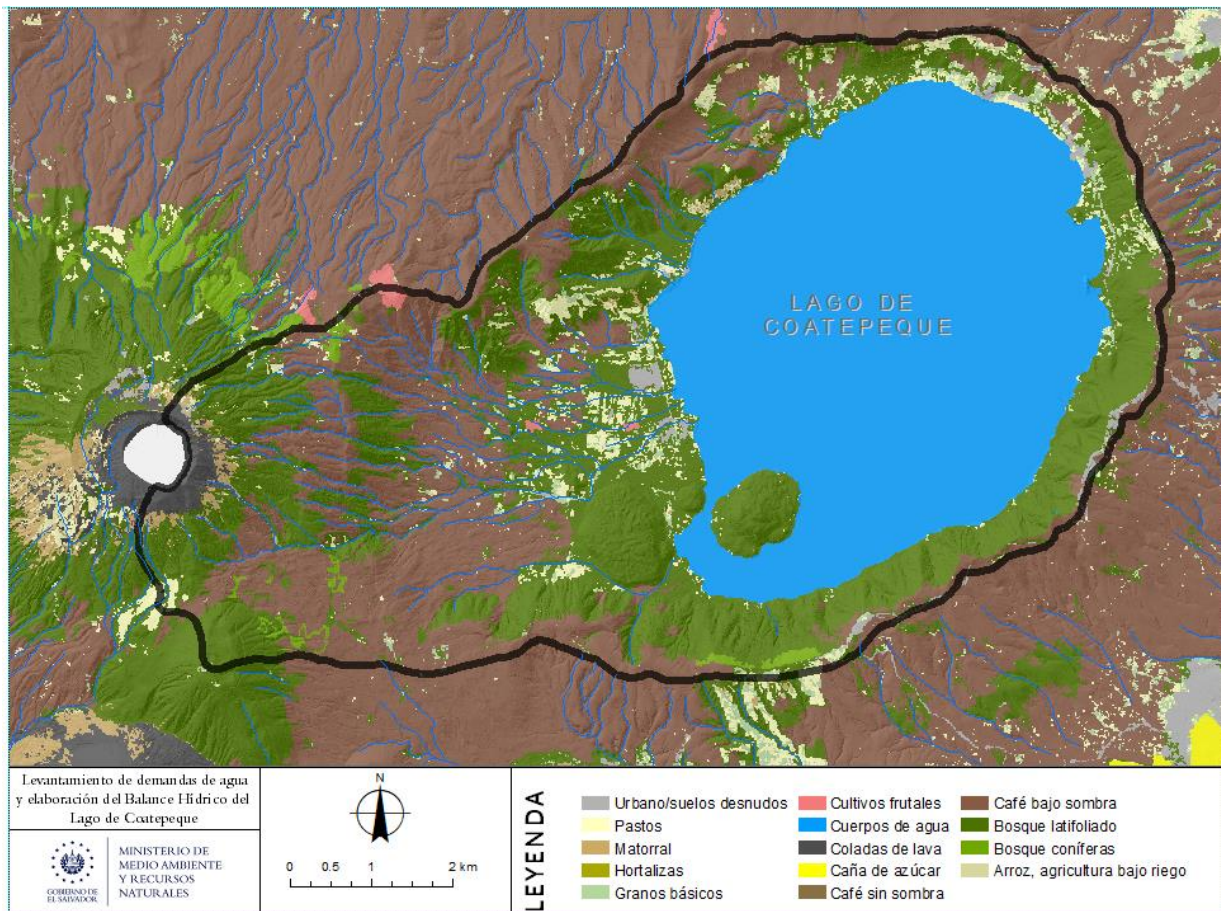


Figura 4. Mapa de uso de suelos de la cuenca del lago de Coatepeque y su entorno
 Fuente: MARN (2018)

1.1.4. Delimitación espacial y temporal de la zona de estudio

Para efecto de esta consultoría, en el producto 2 se delimitó como zona de estudio para el Balance Hídrico y el levantamiento de demandas de agua, el área comprendida al interior de la cuenca del lago de Coatepeque. De forma puntual estos límites han sido ampliados a las zonas altas de las subcuencas/cuencas de los ríos Pampe, Banderas, Sucio y Suquiapa (Figura 5), los cuales han sido considerados por diversos autores como objeto potencial de interrelación con la cuenca del lago de Coatepeque a través de la recepción de descargas de aguas subterráneas, de las cuales, la zona de Zapotitán y la ciudad de Santa Ana (subcuencas de los ríos Sucio y Suquiapa, respectivamente) fueron analizadas en el Producto 3 y corroborados los antecedentes de conexión directa al lago (Marchand Malevez, 2005; Centro de Pronóstico Hidrológico, 2020).

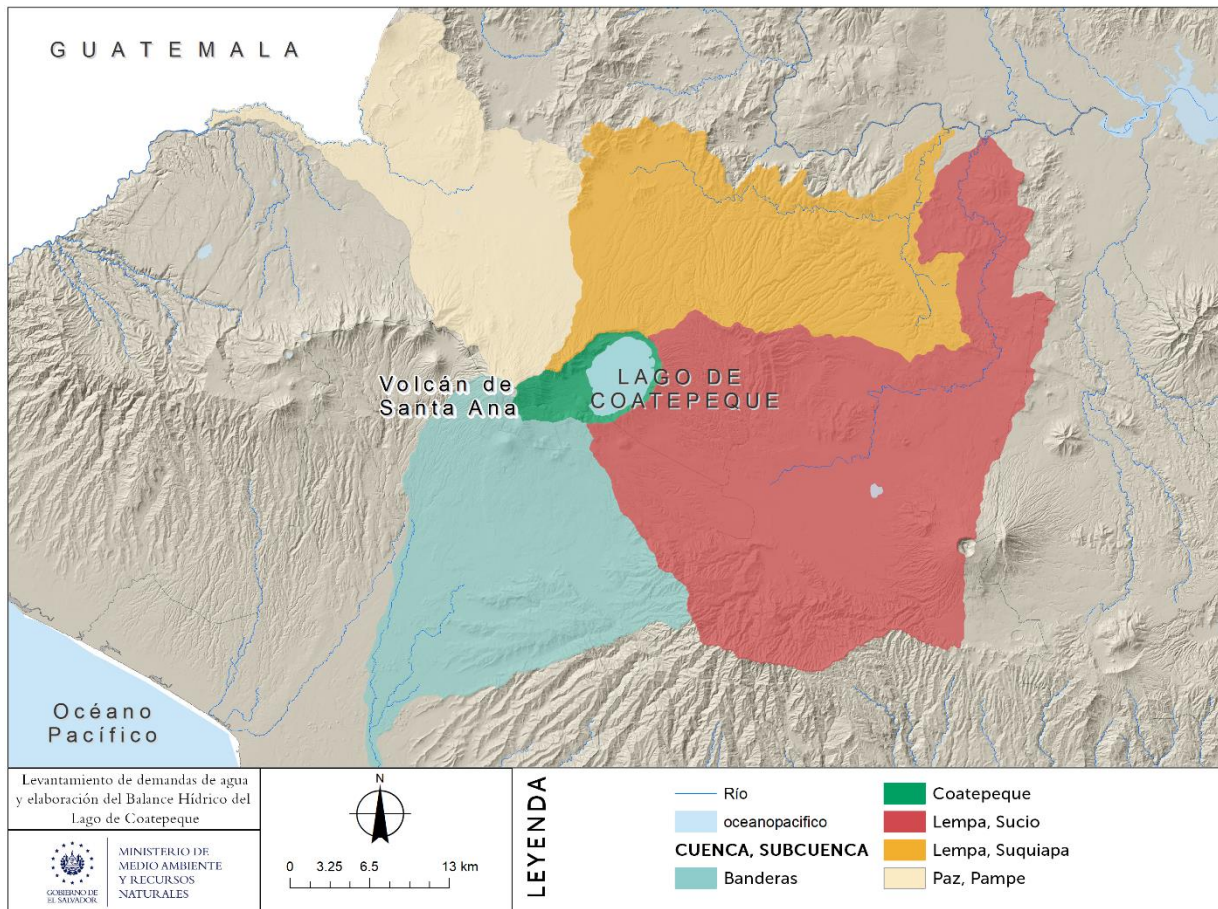


Figura 5. Cuenca/subcuencas incorporadas en el estudio para evaluar interrelación con descargas subterráneas del lago de Coatepeque.

Adicionalmente, ha sido definida la escala temporal de análisis para los distintos objetivos que se persiguen en este estudio. Para el análisis climático, se definió como período normal de análisis, el período 1991-2020, que servirá de comparativo con los análisis climáticos que contendrá el Balance Hídrico para los períodos 2046-2075 y 2071-20100. El análisis de las variables climáticas del producto 2 ha sido retomado en el este producto por consistir en algunas de las variables de ingreso en el Balance Hídrico.

1.2. Aspectos socioeconómicos relevantes del producto 2

Un elemento que destacó en el producto 2, fue la falta de datos específicos por cantón, o incluso por municipio. De esa forma, solamente se logró tener datos aproximados del número

de hogares con situación de pobreza FISDL (2005), los cuales indicaron que en total existen 114 familias en pobreza extrema, 92 en pobreza alta y 316 en pobreza moderada. En cuanto a los datos de saneamiento solamente fue posible obtener datos del municipio del Congo, mientras que en el resto de municipios no fue posible acceder a dicha información.

1.2.1 Diagnóstico integral de la cuenca del lago de Coatepeque

En el diagnóstico presentado en el producto 2, se destacó la compleja y diversa problemática de la cuenca en relación a sus problemas sociales, económicos y ambientales. Asimismo, fue resaltada la brecha social y en sistemas de abastecimiento que pudo identificarse a partir de los talleres realizados, destacando, por ejemplo, que pese a tener el enorme cuerpo de agua frente a sus comunidades, aún existen grupos importantes de poblaciones que no cuentan con un sistema de abastecimiento de agua o su sistema les brinda un servicio limitado. Acá debe señalarse la escasez económica de agua que sufren estas poblaciones.

Adicionalmente, se relató en el Producto 2, la fuerte preocupación de los actores locales por los impactos generados debido a las descargas de aguas residuales. No obstante, se hizo notar que, si bien es cierto que existe tal problemática, la mayor preocupación en cuanto a la calidad debe enfocarse en la alta carga de metales pesados de origen geogénico presentes en el lago. Los cuales podrían ser invisibles en el corto plazo, pero letales en el largo plazo debido a la acumulación de contaminantes que podrían estar ingiriendo los usuarios del agua del lago en caso la utilicen para agua de consumo humano.

El diagnóstico permitió identificar que en la zona se cuenta con una fuerte organización comunitaria, además del apoyo de Fundaciones, que han sido claves además para realizar este trabajo. Sin embargo, también resaltaron que tienen amenazas como los proyectos de extracción con elevados caudales y el impacto del turismo descontrolado. Ello no limita la capacidad de los actores para reconocer que poseen empleo permanente y su fuerte conciencia social sobre el comportamiento del lago.

1.3. Conexiones hidráulicas con acuíferos vecinos, hidrogeoquímica e isótopos estables

En el Producto 3 se presentó el análisis de hidrogeoquímica e isótopos estables que reunía información generada en esta consultoría y complementada con datos de estudios anteriores. Los datos indican que tanto con el acuífero de Zapotitán como con el acuífero de Santa Ana, las conexiones hidráulicas están presentes. Esta condición se observó principalmente en la isotopía de fuentes de agua (pozos y manantiales) que se ubican en la zona de mezcla entre el agua meteórica y el agua del lago de Coatepeque. Con los datos recabados, se hace difícil determinar los flujos hacia cada zona, las conexiones se confirmaron a nivel cualitativo, con

cada zona vecina. Adicionalmente, en este Producto, será posible la estimación de los flujos subterráneos de descarga que podrían estarse entregando desde la cuenca del lago de Coatepeque hacia las cuencas vecinas, no obstante, la determinación precisa de los volúmenes hacia cada zona requiere estudios de investigación con datos de monitoreo bien planificado y prolongado.

Capítulo II.

Balance hídrico actual de la cuenca del lago de Coatepeque

2.1 Características climáticas principales de la cuenca del lago de Coatepeque

En el Producto 2 se incluyó la caracterización climática de la cuenca del lago de Coatepeque, la misma fue realizada a partir del registro de datos climáticos mensuales proporcionado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales e incluyó precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa, presión de vapor y velocidad del viento. En este apartado se describen brevemente resultados de temperatura y precipitación. Los datos más completos corresponden al monitoreo de precipitación y temperatura, el primero contenía datos en el período 1971-2019 y se evaluó un total de 8 estaciones (A-10, A-19, A-21, L-04, T-24, A-18, A-37 y A-35) con datos faltantes variando entre 8 (para la estación A-37) y 439 (para la estación A35). A partir de los datos se obtuvo que la precipitación en la cuenca varía anualmente en promedio, entre 1750 mm en el sector noreste y 2200 mm en el oeste, que coincide con el volcán de Santa Ana (Figura 6)

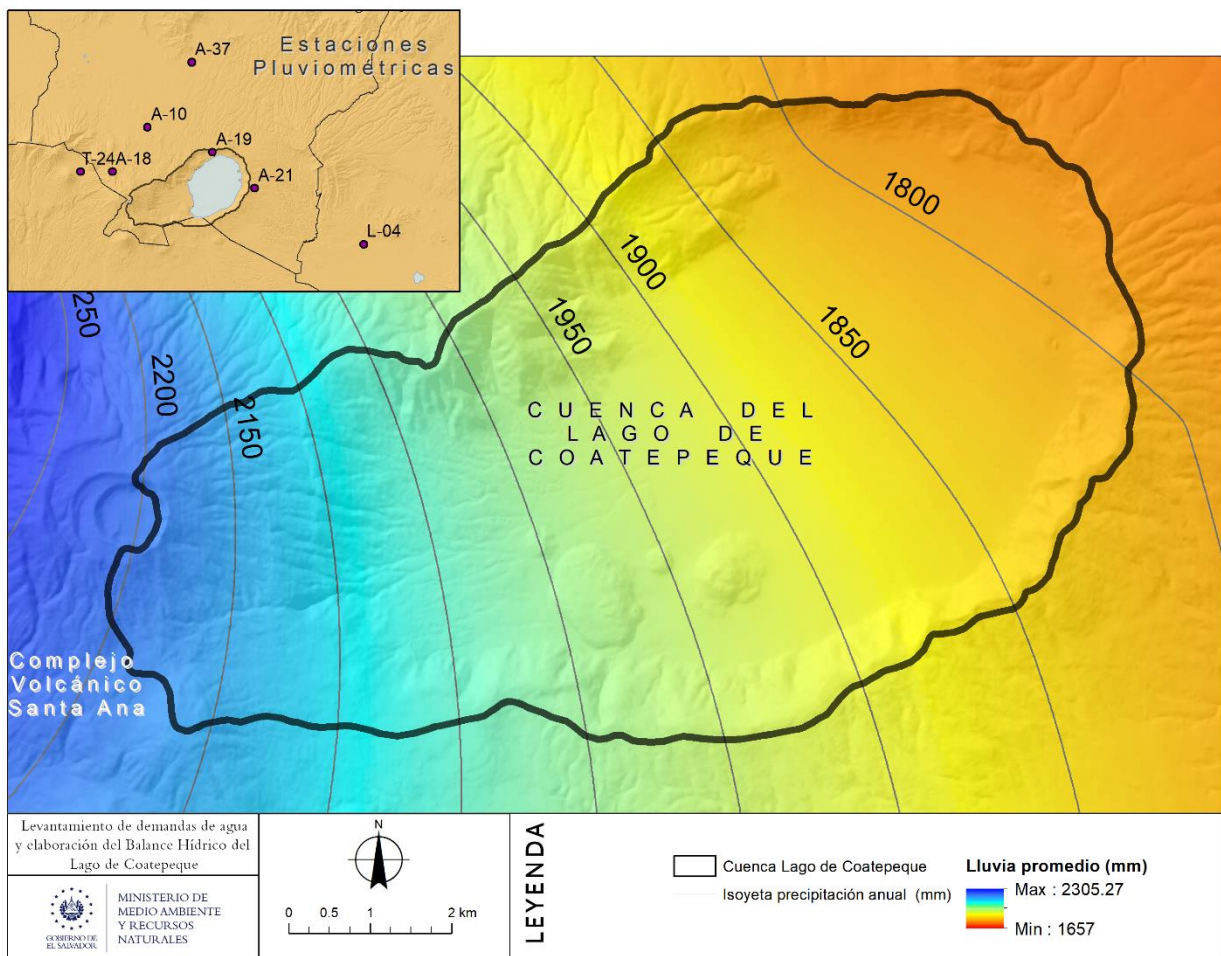


Figura 6. Variación de la lluvia media anual para el período 1990-2019 en la cuenca del lago de Coatepeque, mostrando estaciones de análisis.

En el parámetro de temperatura se analizó el registro histórico de las estaciones A18, A37 y L04 para un registro comprendido entre los años 1981 -2019. A partir de los resultados del completado de datos se obtuvo que la temperatura media máxima de la cuenca del lago de Coatepeque varía entre 29.9°C y 31°C. Por su parte la temperatura mínima en la cuenca presenta un rango de variación mayor, oscilando entre 10.7°C y 14.5°C. Mientras que la temperatura media tiene la menor variación, presentándose valores medios mensuales entre 21.2°C y 22°C. En todos los casos las menores temperaturas ocurren en la cima del volcán de Santa Ana y las máximas en el sector noreste del lago. En la Figura 7 puede observarse dicha variación para la temperatura promedio de la cuenca.

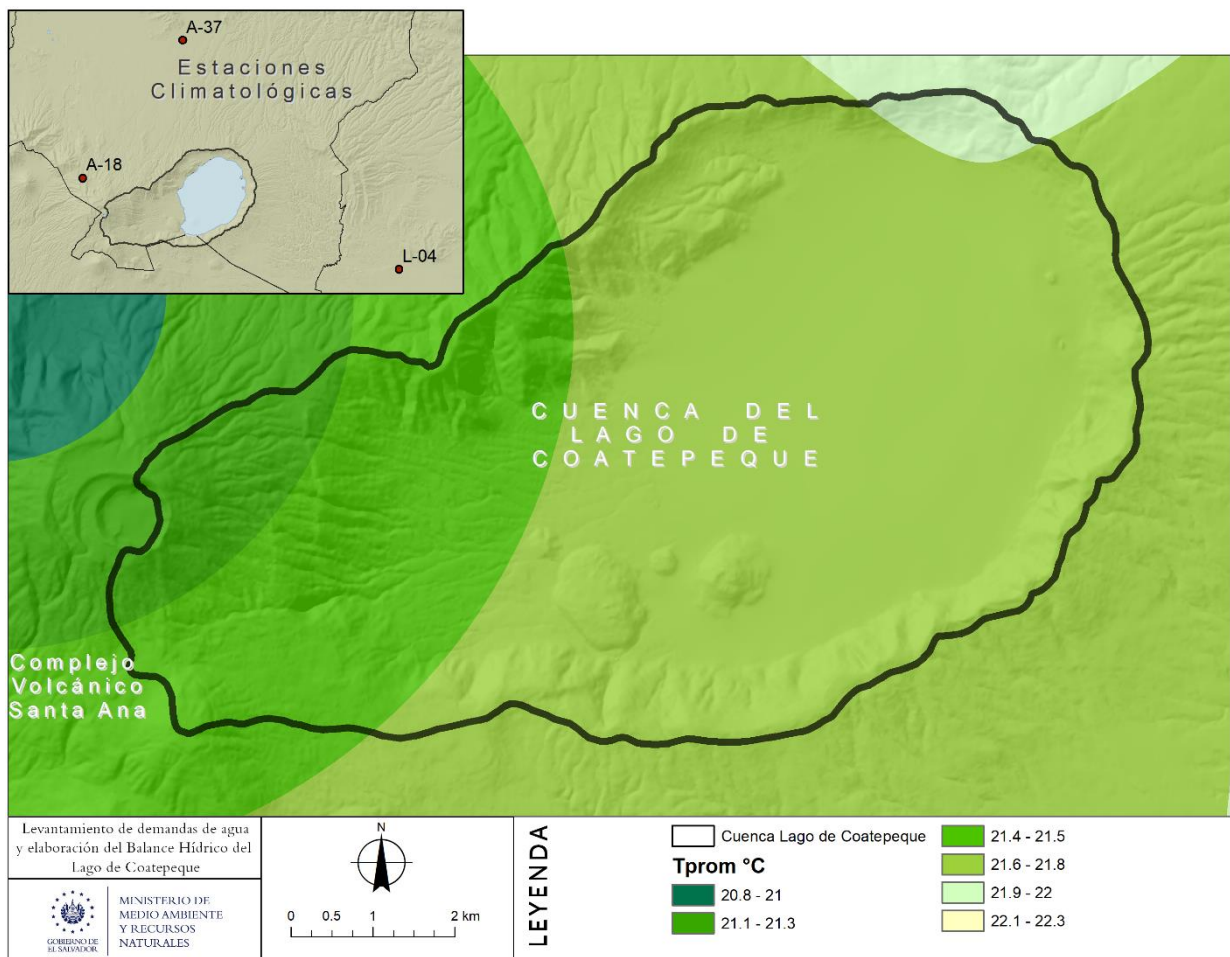


Figura 7. Variación de la temperatura mínima media anual en la cuenca del lago de Coatepeque y localización de estaciones utilizadas en la interpolación

2.2 Balance hidrológico del lago de Coatepeque

2.2.1 Modelo de Temez

El balance hídrico fue calculado mediante el modelo hidrometeorológico de precipitación – Escorrentía TEMEZ. Los pasos seguidos para la elaboración del modelo presentado en este apartado fueron:

- Elaboración del modelo conceptual
- Construcción del modelo.
- Calibración de los parámetros del modelo.
- Validación del modelo.

El modelo agregado Temez (CEDEX, 1999), reproduce los procesos de transporte de agua en las diferentes fases del ciclo hidrológico, basado en el principio de continuidad o conservación de la masa y regulado por leyes específicas de reparto y transformación de volúmenes de agua; divide al terreno en dos zonas: la superior, la supone no saturada, en cuyos poros coexisten el agua y el aire; la inferior (acuífero), se considera saturada de agua y conectada a la red de drenaje. El modelo parte de la precipitación (P), una parte de ella se pierde por evapotranspiración (ET) y la otra constituye el excedente (T) que se infiltra o escurre. El volumen infiltrado (I) alimenta el acuífero, apareciendo más tarde en la red de drenaje, el resto escurre sobre la superficie por los diferentes conductos de drenaje (S) (Figura 8).

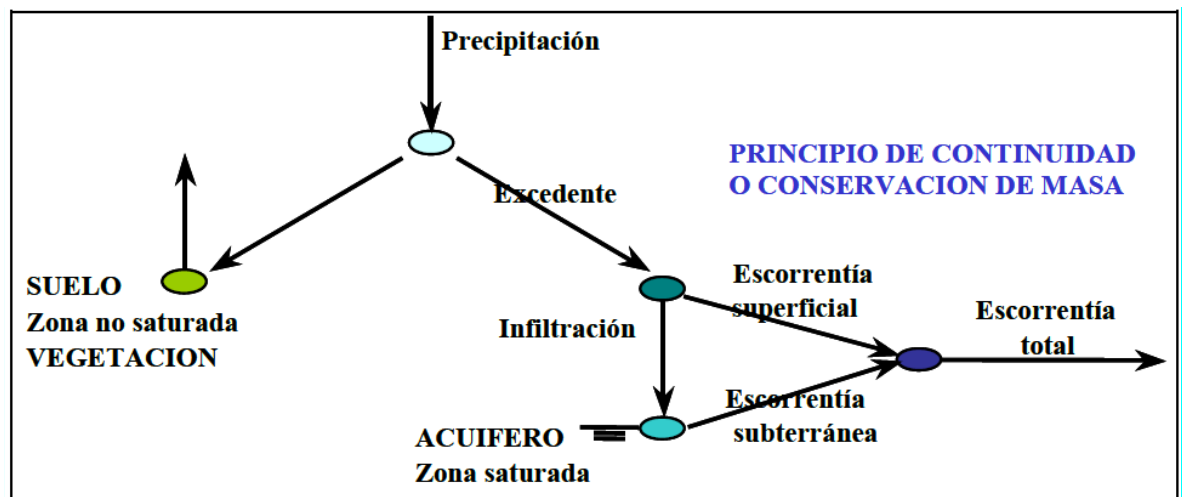


Figura 8. Esquema conceptual del Modelo de Temez
Fuente: CEDEX (2013)

Para el reparto inicial de agua, el modelo considera un umbral de escurrimiento (P_0), el cual depende del grado de humedad del suelo y del parámetro de excedencia (C). El reparto posterior está determinado por I_{max} , que corresponde a la capacidad máxima de infiltración

del suelo. El objetivo es determinar las aportaciones totales (A_{toti}) integradas por la escorrentía superficial (A_{supi}) y la aportación subterránea (A_{subi}), nombrada también en este documento como infiltración. El proceso de cálculo se realiza internamente en el modelo mediante el cálculo de una serie de ecuaciones que se describen entre la (Ec. 1) y la (Ec. 12).

Humedad del suelo

Condición de humedad del suelo (H_i)

Una vez estimado el excedente la humedad (T) en el suelo al final del período resultará:

$$H_i = \text{Max}(0, H_{i-1} + P_i - T_i - EP_i) \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde:

- P_i = Precipitación en el período comprendido desde el instante i-1 al instante i (mm)
- T_i = Excedente de humedad en el período comprendido desde el instante i-1 hasta el instante i (mm)
- H_{i-1} = Humedad en el suelo en el instante i-1 (mm)
- EP_i = Evapotranspiración potencial de cuenca desde el instante i-1 al instante i (mm)

Evapotranspiración real

Se producirá una evapotranspiración real igual a:

$$ER_i = \text{Min}(H_{i-1} + P_i - T_i, EP_i) \quad (\text{Ec. 2})$$

Esta expresión indica que se puede evapotranspirar toda el agua disponible con el límite superior igual a la evapotranspiración potencial.

Generación de excedencia

La ley de excedentes indica el valor que adopta el excedente de humedad en base al valor de umbral de escorrentía.

$$P_i > P_0 \rightarrow T_i = \frac{(P_i - P_0)^2}{(P_i + \delta - 2P_0)} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$P_i \leq P_0 \rightarrow T_i = 0 \quad (\text{Ec. 4})$$

En donde:

$$P_0 = C(H_{max} - H_{i-1}) \quad (\text{Ec. 5})$$

$$d = H_{max} - H_{i-1} + EP_i \quad (\text{Ec. 6})$$

P_0 = Umbral de escorrentía (mm)

C = Parámetro de excedencia (adimensional)

H_{max} = Capacidad máxima de almacenamiento de humedad en el suelo (mm)

Infiltración

El modelo adopta una ley de infiltración al acuífero (I) en función del excedente y del parámetro de infiltración máxima (I_{max}). La ley tiene por expresión matemática la (Ec. 7) y la infiltración aumenta con el excedente, siendo asintótica al valor límite I_{max} para valores altos del excedente.

$$I_i = I_{max} \frac{T_i}{(T_i + I_{max})} \quad (\text{Ec. 7})$$

Aportaciones superficiales

Esta infiltración I se admite que se convierte en recarga del acuífero (R), en tanto que el resto del excedente $T-I$ será drenado por el cauce.

$$A_{sup\ i} = T_i - I_i \quad (\text{Ec. 8})$$

Almacenamiento en el acuífero

La relación entre el caudal de descarga y el volumen almacenado en el acuífero es igual a:

$$Q_i = \alpha t V_i \quad (\text{Ec. 9})$$

En donde:

- Q_i = Caudal de descarga en el instante i ($\text{Hm}^3/\text{período}$)
 α = Coeficiente de la rama de descarga del acuífero (días^{-1})
 t = Período de tiempo de simulación ($\text{días}/\text{período}$)
 V_i = Volumen del acuífero en el instante i (Hm^3)

Descarga del acuífero

La recarga por infiltración se supone concentrada en la mitad del período, con lo cual la ley de los caudales subterráneos resulta:

$$Q_i = Q_{i-1} e^{-\alpha t} + \alpha t R_i e^{-\frac{\alpha t}{2}} \quad (\text{Ec. 10})$$

Siendo R_i la recarga al acuífero en el período $i-1$, i ($\text{Hm}^3/\text{período}$)

Aportación subterránea

La aportación subterránea a lo largo del período resulta:

$$A_{sub\ i} = V_{i-1} - V_i + R_i t \quad (\text{Ec. 11})$$

Aportación total

Esta aportación será la suma de la escorrentía superficial (excedente menos infiltración) y la aportación subterránea:

$$A_{tot\ i} = A_{sup\ i} + A_{sub\ i} \quad (\text{Ec. 12})$$

2.2.2 Ecuación de balance hídrico y conceptualización de flujos

Para determinar los parámetros de entrada fue necesario hacer uso del Balance Hidrológico general de Thornthwaite y L. Serra, el cual es utilizado en estudios hidrogeológicos de la ANDA y el MARN. Este balance, al igual que el modelo de Témez, tiene como fundamento el principio de conservación de la masa de forma general (Ec. 13). El cual para el caso de la cuenca del lago de Coatepeque, considerada como unidad de análisis en este estudio, puede conceptualizarse esquemáticamente mediante la integración de los términos de cada componente según se muestra en la Figura 9.

$$E - S = \Delta V \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

- E = Entradas al sistema, en unidades de volumen
 S = Salidas del Sistema, en unidades de volumen
 ΔV = Cambio de volumen en el almacenamiento

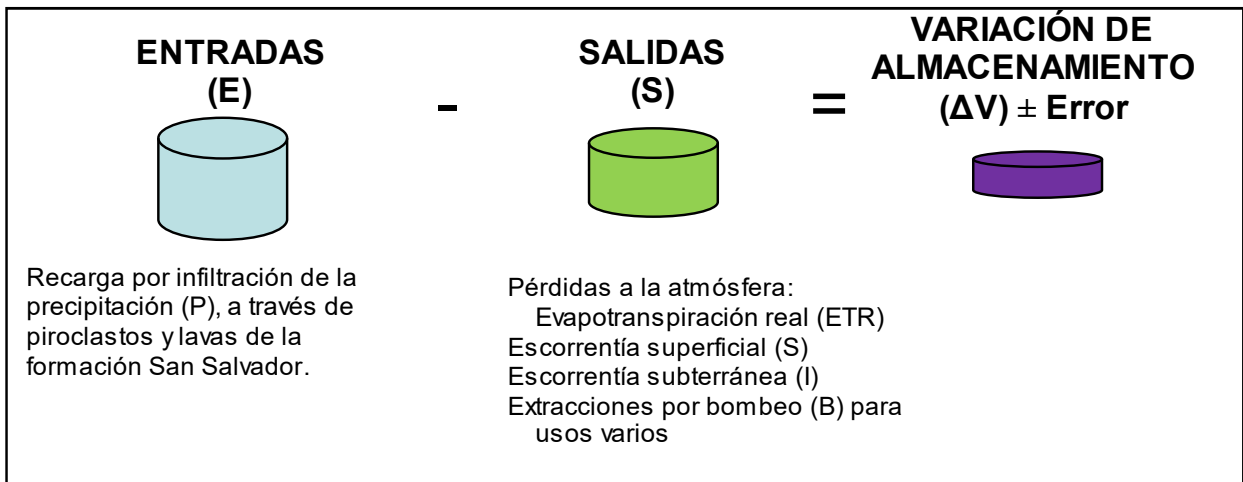


Figura 9. Diagrama conceptual del balance hídrico en la cuenca del Lago de Coatepeque

La Ecuación 13 se puede escribir en función de las variables que tienen lugar en el área de estudio y de acuerdo al modelo conceptual del sistema, que retoma las demandas de agua en la cuenca:

$$P - (ETR + I + S + B) = \Delta V \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

P	=	Precipitación
ETR	=	Evapotranspiración real
I	=	Infiltración
S	=	Escorrentía superficial
B	=	Extracción por bombeo
ΔV	=	Cambio de volumen en el almacenamiento

Considerando que en la subcuenca en estudio $\Delta V = 0$ para un período largo de observación, debido a que los valores de los elementos del ciclo hidrológico son promedios de varios años de registro, la Ecuación 14 anterior se simplifica así:

$$P - ETR - B = I + S \quad (Ec. 15)$$

2.2.3 Metodología para determinación de parámetros de entrada al modelo

Uno de los principales retos que se enfrentó para el cálculo de este balance fue la determinación de volúmenes de escorrentía superficial, ya que en la zona no existen estaciones hidrométricas. Por lo tanto, es necesario recurrir a métodos indirectos como modelos de precipitación – escorrentía, cálculo de índices de infiltración, coeficientes de escorrentía, así como analogías con otras regiones (cuencas hidrográficas) en las que sí se cuenta con monitoreo de caudales.

Ante esa situación, el método utilizado para determinar el escurrimiento superficial fue el propuesto en el Balance Hídrico Integrado y Dinámico de El Salvador (Servicio Hidrológico Nacional, 2005). Este método consiste en la relación Escorrentía Superficial/Precipitación para la Región Homogénea No. 9 a la que pertenece la cuenca del lago de Coatepeque, como se puede verificar en la Figura 10.



Figura 10. Mapa de regiones hidrográficas homogéneas, y ubicación del área del Proyecto (Fuente: SNET, 2005)

Este modelo considera regiones hidrológicamente homogéneas con similares condiciones en cuanto a la fisiografía, tipo de suelos, geología y usos del suelo (SNET, 2005), asignándoles una relación entre la Escorrentía Superficial (S) y la precipitación (P), según registros históricos. La cuenca del lago de Coatepeque corresponde a la Zona Hidrográfica Homogénea No. 9 (Ver Figura 10), de donde se adoptaron los valores de la relación Escorrentía Superficial (S) y precipitación (P) sugeridos por dicho autor y resaltados en la Tabla 2.

Conociendo la precipitación mensual de la cuenca es posible obtener el escurrimiento superficial promedio mensual por medio de la multiplicación del factor S/P y la precipitación mensual correspondiente. El método de THORNTHWAITE y L. SERRA, considera cada uno de los elementos del ciclo hidrológico, determinando un déficit y un excedente de escorrentía. Las variables I y S se obtienen como Q o escurrimiento total:

$$Q = I + S \quad (Ec. 16)$$

En donde:

Q= Escurrimiento total,

I= Infiltración o escorrentía subterránea
 S= Escorrentía superficial

Tabla 2.
 Coeficientes de relación escorrentía superficial / precipitación (S/P) por zona hidrográfica homogénea

Zona	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Annual
1	3.91	5.86	1.11	0.41	0.15	0.19	0.23	0.24	0.31	0.49	0.69	2.06	0.30
2	2.20	5.26	0.58	0.17	0.08	0.12	0.15	0.25	0.34	0.37	0.42	1.51	0.27
3	2.20	6.25	0.65	0.18	0.08	0.11	0.15	0.22	0.30	0.46	0.45	1.79	0.26
4	2.92	2.47	0.28	0.09	0.10	0.20	0.22	0.18	0.36	0.50	0.51	1.09	0.29
5	1.86	1.20	0.12	0.05	0.11	0.32	0.23	0.30	0.45	0.57	0.64	0.75	0.35
6	1.11	1.15	0.18	0.06	0.07	0.20	0.30	0.28	0.42	0.63	0.65	1.23	0.31
7	1.52	2.96	0.51	0.12	0.07	0.18	0.18	0.19	0.32	0.35	0.37	1.08	0.25
8	1.33	1.05	0.29	0.10	0.08	0.24	0.28	0.27	0.32	0.42	0.47	0.90	0.28
9	4.30	9.02	1.41	0.40	0.17	0.17	0.20	0.21	0.28	0.42	0.83	2.43	0.31
10	1.52	2.96	0.51	0.12	0.07	0.18	0.18	0.19	0.32	0.35	0.37	1.08	0.25

Fuente: (Servicio Hidrológico Nacional, 2005)

El balance de humedad del suelo exige el conocimiento de las características del suelo tales como capacidad de campo, punto de marchitez, profundidad del suelo, etc. Para este caso, se han retomado los datos propuestos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Tabla 3). Su uso en el cálculo de las variables de entrada se explica adelante.

Tabla 3.
 Textura y propiedades de humedad de suelos

Textura	Punto de Marchitez (Agua por pie de profundidad)			Capacidad de Campo (Agua por pie de profundidad)			Capacidad de agua disponible (Agua por pie de profundidad)		
	%	(plg)	(mm)	(%)	(plg)	(mm)	(%)	(plg)	(mm)
Unidades									
Arena media	1.7	0.3	7.62	6.8	1.2	30.48	5.1	0.9	22.86
Arena fina	2.3	0.4	10.16	8.5	1.5	38.1	6.1	1.1	27.94
Franco Arenoso	3.4	0.6	15.24	11.3	2	50.8	7.9	1.4	35.56
Franco arenoso fino	4.5	0.8	20.32	14.7	2.6	66.04	10.2	1.8	45.72
Franco	6.8	1.2	30.48	18.1	3.2	81.28	11.3	2	50.8
Franco limoso	7.9	1.4	35.56	19.8	3.5	88.9	11.9	2.1	53.34
Franco Arcilloso	10.2	1.8	45.72	21.5	3.8	96.52	11.3	2	50.8
Arcilloso	14.7	2.6	66.04	22.6	4	101.6	7.9	1.4	35.56

Fuente: Servicio Hidrológico Nacional (2005)

Procesamiento de datos de precipitación y evapotranspiración

Los datos de precipitación y evapotranspiración potencial mensual para la cuenca fueron obtenidos mediante la delimitación de polígonos de Thiessen. A partir del trazo de dichos polígonos, fue posible identificar del total de estaciones de la zona (precipitación y temperatura), las que tienen influencia directa en la cuenca. A partir de la identificación de los polígonos y sus estaciones, cada valor mensual de precipitación, del producto 2 o evapotranspiración (determinada con temperaturas del Producto 2 por el método de Hargreaves) para el del período de análisis, se ponderó por el área de influencia de su polígono en la cuenca. Obteniéndose así el valor para la cuenca a utilizar en el modelo.

El trazo de los polígonos indica que para precipitación se tiene la influencia de tres estaciones: Lago de Coatepeque (A-19) en el centro de la cuenca, de noreste a suroeste; Finca San José Monterrey (A-21) en el sector sureste y Los Andes (A-18) en el oeste de la cuenca (Figura 11).

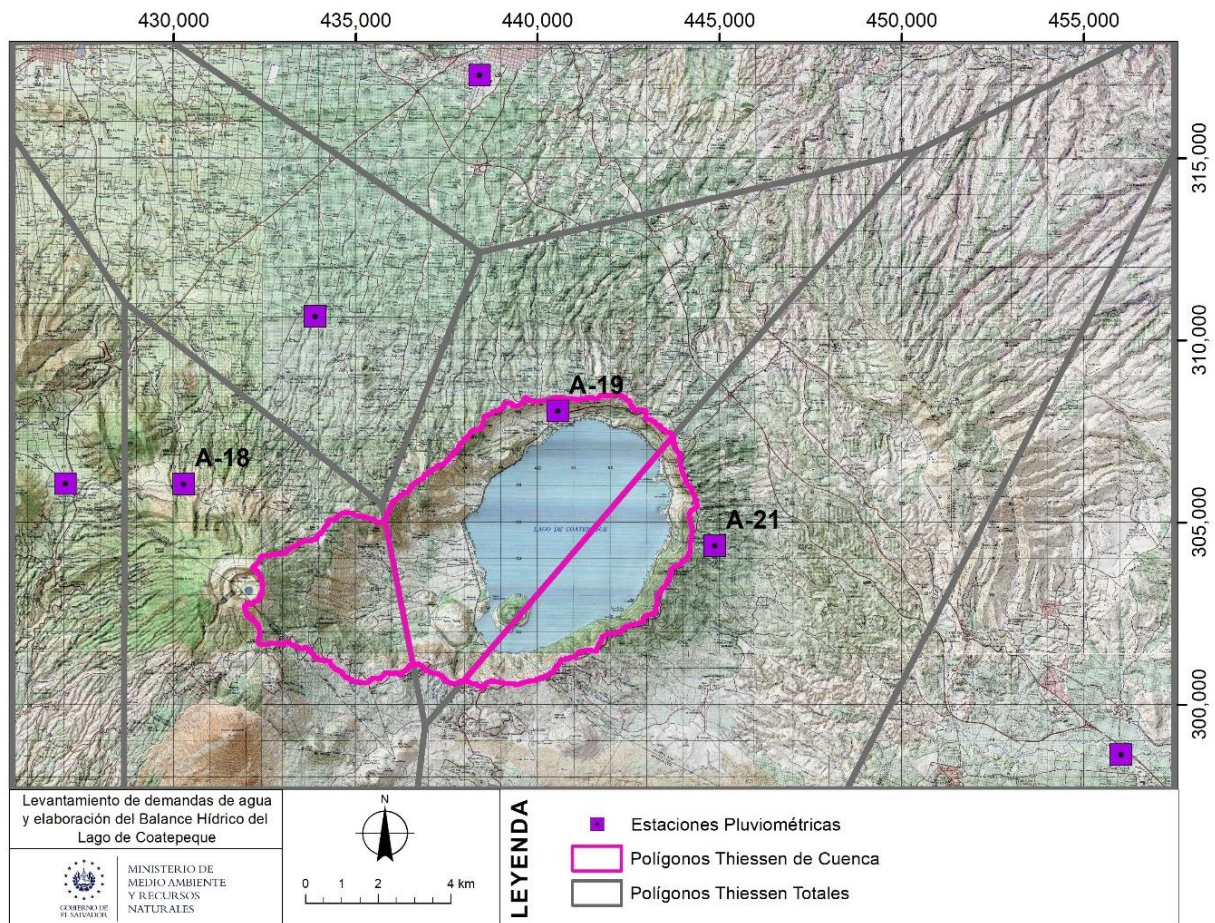


Figura 11. Mapa de Polígonos de Thiessen de la Cuenca del Lago Coatepeque.
 Parámetro Precipitación

En la Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6 se presentan los datos de lluvia mensual de las estaciones pluviométricas utilizadas en el estudio de la precipitación de la cuenca del Lago de Coatepeque. Los valores utilizados corresponden a los promedios mensuales completados de las estaciones pluviométricas Los Andes (A-18), Lago de Coatepeque (A-19) y Finca San José Monterrey (A-21), para un período de 30 años, 1991-2020. El año 2020 fue completado con los valores medios mensuales del período analizado en el producto 2 (1990-2019),

Tabla 4.
 Precipitación Mensual y Anual de la Estación A-18, período 1991-2020.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
1991	7.9	0.0	0.3	93.6	223.1	527.9	159.0	473.1	383.0	343.9	62.1	107.1	2,381.0
1992	0.0	0.4	17.5	32.9	105.2	569.5	571.6	350.1	506.8	156.1	34.2	33.0	2,377.3
1993	6.9	0.0	53.5	51.7	186.4	547.7	311.3	615.3	523.4	211.6	1.3	0.8	2,509.9
1994	0.3	20.9	2.4	33.7	406.4	311.3	205.7	590.5	324.4	141.0	29.0	0.3	2,065.9
1995	0.0	0.2	6.8	105.8	161.2	294.8	330.8	445.8	446.8	214.5	10.7	37.8	2,055.2
1996	16.0	0.0	4.9	125.7	353.8	531.2	639.8	481.3	382.5	173.2	48.5	0.0	2,756.9
1997	35.1	17.8	29.6	57.0	187.3	467.7	246.6	326.1	337.7	108.6	116.8	8.4	1,938.7
1998	0.0	2.4	2.3	0.3	133.1	350.5	543.1	575.4	174.1	521.7	419.0	2.0	2,723.9
1999	1.4	0.0	0.2	40.5	137.4	339.2	469.0	438.7	365.0	200.6	22.7	18.0	2,032.7
2000	0.0	0.0	0.2	58.9	174.0	338.3	189.4	498.3	284.3	144.8	4.4	0.0	1,692.6
2001	0.0	5.8	0.1	48.6	196.9	308.5	520.6	355.4	305.2	172.3	62.6	0.0	1,976.0
2002	0.0	0.2	4.2	116.4	198.9	338.0	402.0	454.9	621.1	153.7	36.6	0.4	2,326.4
2003	0.0	0.0	26.9	5.1	294.0	324.7	383.8	425.9	376.9	155.7	10.0	0.0	2,003.0
2004	2.2	10.1	40.1	24.3	377.0	326.2	433.2	284.7	477.1	167.1	73.0	63.5	2,278.5
2005	4.7	0.0	68.7	10.5	324.9	394.9	214.1	498.3	449.4	581.1	0.0	14.6	2,561.2
2006	14.5	14.6	0.0	266.1	176.1	478.4	568.8	421.3	299.0	123.5	113.4	0.6	2,476.3
2007	0.5	0.0	32.6	90.6	142.5	204.0	468.5	351.4	401.7	346.8	7.2	0.2	2,046.0
2008	0.0	7.0	10.6	56.8	147.7	453.4	480.2	250.6	342.1	476.2	0.0	0.0	2,224.6
2009	0.4	10.4	15.6	20.4	427.0	127.7	303.1	496.7	448.6	184.5	210.5	33.5	2,278.4
2010	0.1	0.0	32.7	56.7	699.5	567.7	406.8	512.3	795.1	56.7	8.0	0.0	3,135.6
2011	0.8	47.0	95.5	54.3	86.8	333.9	486.2	479.4	256.4	1,284.9	50.8	0.3	3,176.3
2012	4.7	0.2	30.2	132.2	289.8	186.8	370.9	468.8	355.3	250.4	1.2	25.1	2,115.6
2013	0.4	11.0	0.0	45.0	350.4	461.1	313.5	557.6	294.7	453.1	116.6	1.2	2,604.6
2014	0.0	5.9	39.5	50.1	336.7	709.5	203.0	428.6	522.4	488.5	35.2	0.0	2,819.4
2015	0.0	28.0	13.8	80.1	221.8	224.1	264.1	307.5	340.1	501.6	138.7	1.4	2,121.2
2016	0.0	0.0	18.7	37.9	108.7	445.1	508.7	182.1	442.1	62.8	56.8	47.2	1,910.1
2017	0.0	5.0	51.8	6.8	201.1	330.4	405.5	409.9	368.3	170.2	2.4	4.7	1,956.1
2018	15.6	8.0	17.0	148.6	394.8	380.4	231.4	429.9	434.2	291.6	121.7	6.1	2,479.3
2019	1.0	10.1	1.0	88.8	217.7	155.9	392.9	289.1	294.7	467.3	35.0	5.4	1,958.9

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
Producto 4 Balance hídrico integral de la cuenca del lago de Coatepeque

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
<i>2020</i>	<i>4.3</i>	<i>7.5</i>	<i>20.8</i>	<i>68.0</i>	<i>255.7</i>	<i>379.5</i>	<i>379.1</i>	<i>424.9</i>	<i>396.8</i>	<i>291.6</i>	<i>63.3</i>	<i>13.8</i>	<i>2,305.2</i>
<i>Prom</i>	<i>4.3</i>	<i>7.5</i>	<i>20.8</i>	<i>68.0</i>	<i>255.7</i>	<i>379.5</i>	<i>379.1</i>	<i>424.9</i>	<i>396.8</i>	<i>291.6</i>	<i>63.3</i>	<i>13.8</i>	<i>2,305.</i>

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
 Producto 4 Balance hídrico integral de la cuenca del lago de Coatepeque

Tabla 5.

Precipitación Mensual y Anual de la Estación A-19, período 1991-2020.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
1991	0.0	0.0	0.0	114.7	204.5	193.8	163.2	370.4	293.3	162.0	41.4	61.8	1,605.1
1992	0.0	0.8	52.8	33.9	18.8	408.7	447.6	356.9	476.3	119.0	26.8	26.5	1,968.1
1993	1.5	0.0	55.4	69.5	234.7	328.4	242.0	356.7	394.9	265.6	0.0	0.0	1,948.7
1994	0.0	0.0	0.0	72.2	234.5	167.0	221.6	136.9	41.8	6.5	80.7	0.0	961.2
1995	0.0	0.0	10.9	17.9	107.4	264.6	229.0	263.9	363.5	61.9	9.6	16.2	1,344.9
1996	1.3	0.0	5.8	144.1	252.5	330.5	586.2	421.8	422.4	173.3	76.5	0.0	2,414.4
1997	11.1	4.8	5.3	65.4	243.3	229.1	154.6	317.3	312.5	203.5	75.6	6.7	1,629.2
1998	0.0	0.0	2.8	0.0	60.3	240.6	434.4	392.3	162.7	415.8	277.3	0.0	1,986.2
1999	0.0	0.0	0.0	25.9	178.1	216.0	375.6	314.7	302.5	154.7	11.4	10.8	1,589.7
2000	0.0	0.0	0.0	84.5	159.4	200.9	208.3	320.5	268.3	129.4	6.5	0.0	1,377.8
2001	0.0	7.0	0.0	47.3	174.3	330.4	391.1	301.6	214.2	184.8	39.7	0.0	1,690.4
2002	0.0	0.0	0.0	90.2	85.3	246.6	262.7	413.7	352.0	221.6	18.9	0.0	1,691.0
2003	0.0	0.0	8.4	0.0	309.4	221.0	294.9	257.3	296.8	173.9	9.6	0.0	1,571.3
2004	0.0	4.8	30.7	26.4	200.2	307.1	326.5	208.9	429.2	170.1	54.2	37.0	1,795.1
2005	6.1	0.0	38.0	15.6	278.2	381.1	202.6	423.8	320.3	517.1	0.0	0.0	2,182.8
2006	12.1	8.0	0.0	157.5	152.7	328.8	529.3	255.0	247.3	86.6	51.1	13.7	1,842.1
2007	0.0	0.0	17.4	53.8	108.2	132.7	402.7	96.0	318.6	262.7	17.8	0.0	1,409.9
2008	0.0	16.6	7.2	46.9	103.5	437.6	415.8	260.0	23.8	359.9	0.0	0.0	1,671.3
2009	0.0	6.5	13.3	11.8	320.3	94.7	267.3	427.5	0.0	156.7	125.4	10.5	1,434.0
2010	0.0	0.0	30.5	20.0	473.1	431.3	319.4	327.0	481.7	43.0	0.7	0.0	2,126.7
2011	0.0	13.8	27.9	83.2	163.9	341.3	461.7	390.1	175.7	906.5	0.0	0.0	2,564.1
2012	0.5	0.0	42.7	95.8	274.2	110.9	322.8	482.3	332.3	239.5	0.0	10.3	1,911.3
2013	0.0	11.7	0.0	17.0	227.1	369.6	269.1	471.3	214.3	392.7	96.7	0.0	2,069.5
2014	0.0	8.2	5.3	22.5	278.9	457.9	149.0	294.1	410.4	475.8	0.0	0.0	2,102.1
2015	0.0	0.0	0.8	35.4	168.3	170.8	194.3	237.9	265.0	403.0	167.3	0.0	1,642.8
2016	0.0	0.0	21.5	22.7	101.4	312.8	524.6	123.4	460.2	51.4	11.2	19.0	1,648.2
2017	0.0	0.0	65.4	0.0	169.7	285.7	396.1	373.6	260.2	194.6	5.2	14.8	1,765.3
2018	17.5	15.5	10.5	104.3	322.7	225.3	174.9	407.7	476.8	291.2	98.6	1.7	2,146.7
2019	0.0	0.0	0.0	29.7	316.9	237.2	281.3	250.7	322.7	376.5	61.6	0.0	1,876.6
2020	2.4	3.8	15.2	53.1	207.2	277.2	316.5	317.3	295.1	244.8	47.1	7.7	1,787.4
Prom	2.4	3.8	15.2	53.1	207.2	277.2	316.5	317.3	295.1	244.8	47.1	7.7	1,787.4

Tabla 6.

Precipitación Mensual y Anual de la Estación A-21, período 1991-2020.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
1991	0.0	2.1	1.7	105.9	158.0	411.0	139.0	284.0	373.0	237.3	23.8	54.5	1,790.3
1992	0.0	0.0	45.0	63.8	70.0	427.3	395.4	250.9	427.7	158.7	30.8	6.5	1,876.1
1993	1.2	0.0	18.2	26.8	319.1	362.1	62.5	390.7	385.9	227.6	0.0	0.0	1,794.1
1994	0.0	0.0	0.0	84.0	203.0	177.0	240.2	399.4	189.6	131.3	28.0	0.5	1,453.0
1995	0.0	0.0	2.2	26.0	44.1	345.1	146.0	216.0	383.0	148.0	5.0	25.9	1,341.3
1996	2.3	1.4	1.8	110.2	156.0	399.7	433.4	409.3	348.0	125.8	46.1	0.0	2,034.0
1997	0.0	28.4	16.9	65.7	248.0	243.0	202.0	268.0	281.8	131.4	39.0	0.0	1,524.2
1998	0.0	0.0	0.0	0.1	92.2	233.6	375.4	432.4	166.7	348.2	227.9	0.0	1,876.5
1999	0.0	0.0	1.0	8.4	156.4	260.2	301.7	309.4	293.2	173.8	0.0	12.0	1,516.1
2000	0.0	0.0	0.0	106.0	134.0	227.0	290.0	309.0	275.0	155.0	9.0	0.0	1,505.0
2001	0.0	7.0	0.0	37.0	186.0	407.0	321.5	244.1	178.4	200.5	46.6	0.0	1,628.1
2002	0.0	7.9	0.0	114.0	310.4	305.0	287.0	418.1	321.2	234.2	52.0	0.0	2,049.8
2003	0.0	0.0	10.3	4.0	226.1	233.0	252.7	321.4	331.6	144.8	16.8	1.0	1,541.7
2004	0.0	1.3	13.1	26.3	362.9	395.1	500.9	340.8	436.1	232.2	79.4	0.0	2,388.1
2005	0.0	0.0	63.9	25.6	339.5	418.5	159.5	574.9	455.6	527.3	19.4	0.0	2,584.2
2006	19.0	0.0	0.0	125.4	219.1	479.0	753.4	395.8	403.8	137.8	86.8	27.0	2,647.1
2007	0.0	0.0	3.0	136.5	94.9	134.4	452.3	348.5	284.0	295.9	10.0	0.0	1,759.5
2008	0.0	15.3	3.0	49.5	204.3	485.4	181.4	0.0	0.0	298.0	0.0	0.0	1,236.9
2009	0.0	12.5	9.0	27.0	272.4	200.1	306.6	522.8	0.0	218.0	122.0	0.0	1,690.4
2010	9.0	0.0	20.2	53.9	537.5	536.5	465.5	594.9	497.9	59.7	0.0	0.0	2,775.1
2011	0.0	25.5	7.5	73.5	111.0	248.0	231.0	371.0	143.0	599.5	0.0	0.0	1,810.0
2012	0.0	0.0	49.0	49.2	183.7	82.2	356.0	519.3	385.0	280.9	2.3	0.0	1,907.6
2013	0.0	3.5	0.0	18.0	176.0	391.7	206.5	390.1	161.3	334.1	43.0	0.0	1,724.2
2014	0.0	0.0	2.0	32.0	267.9	421.4	141.6	344.5	318.5	376.8	11.0	0.0	1,915.7
2015	0.0	0.0	0.0	115.2	262.4	112.0	257.9	203.0	237.6	370.6	99.0	0.0	1,657.7
2016	0.0	0.0	19.5	15.0	164.5	303.0	318.4	149.5	309.9	51.3	7.7	27.9	1,366.7
2017	0.0	3.5	22.3	0.0	120.6	356.9	293.6	357.0	170.0	116.0	16.0	0.0	1,455.9
2018	0.0	3.2	1.1	81.3	247.0	195.0	132.0	371.0	437.0	190.0	16.4	0.0	1,674.0
2019	0.0	22.0	0.0	126.0	273.4	147.5	206.0	260.0	260.0	436.5	7.0	0.0	1,738.4
2020	1.1	4.8	10.9	60.5	212.3	308.8	291.9	342.1	294.0	233.4	36.4	5.4	1,801.5
Prom	1.1	4.8	10.9	60.5	212.3	308.8	291.9	342.1	294.0	233.4	36.4	5.4	1,801.5

La precipitación media ponderada por los polígonos de Thiessen de las estaciones pluviométricas que influyen el área de la cuenca en estudio se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7.

Precipitación media ponderada mensual y anual, en mm para la cuenca del lago de Coatepeque.

Est.	EN E	FE B	MA R	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NO V	DIC	SUMA	AREA (m ²)	%A
A-18	4.3	7.5	20.8	68. 0	255.7	379.5	379.1	424. 9	396. 8	291.6	63.3	13. 8	2,305.3	13,996,307.33	0.2186
A-19	2.4	3.8	15.2	53.1	207. 2	277.2	316.5	317.3	295.1	244. 8	47.1	7.7	1,787.4	33,754,139.45	0.5271
A-21	1.1	4.8	10.9	60. 5	212.3	308. 8	291.9	342.1	294. 0	233.4	36.4	5.4	1,801.6	16,290,231.45	0.2544
Pro m	2.5	4.9	15.3	58. 2	219. 1	307. 6	323. 9	347.1	317.0	252.1	47.9	8.4	1,904. 2	64,040,678.2 3	1.000 0

Para evapotranspiración potencial el trazo de los polígonos de Thiessen indica que dos estaciones tienen influencia: Los Andes (A-18) en la mayor parte de la cuenca y San Andrés (L-04) en el extremo sureste (Figura 12), sin embargo, esta última tiene una influencia marginal y la cota de dicha estación es demasiado baja, con relación a las cotas topográficas de la cuenca del lago, por lo que la misma no se consideró en el análisis y se utilizó el valor obtenido para A-18 como parámetro de entrada en toda la cuenca.

Evapotranspiración potencial

Para determinar la evapotranspiración potencial mensual se utilizó el método de Hargreaves, para lo cual se retomaron los datos de temperatura promedio, mensual, completados en el Producto 2. Los 30 años de datos completados corresponden al período 1991-2020. En la Tabla 8, se presentan los datos de temperatura correspondientes a la estación climatológica Finca Los Andes (A-18). El año 2020 fue completado con los valores medios mensuales del período analizado en el producto 2 (1990-2019).

El método de Hargreaves requiere datos de temperatura media mensual, humedad relativa mensual y radiación solar mensual. Este último parámetro se obtiene de tablas, por lo que para el cálculo de la ETP basta con dos parámetros. La Ecuación 17 refleja las variables que intervienen en el cálculo de la ETP por el método de Hargreaves. En la Tabla 9 se puede consultar los valores de la radiación solar extraterrestre que interviene en el cálculo de ETP, dichos valores fueron estimados para la latitud 13°52'30.01", la cual se encuentra entre las latitudes 12° y 14°.

$$ETP = 0.0075 RSM TMF \quad (Ec. 17)$$

En donde:

ETP = La evapotranspiración potencial expresada en milímetros de agua por período de tiempo

RSM = Es la radiación solar incidente expresada en milímetros de agua evaporada

$$RSM = 0.075 \times RMM \times S^{1/2}$$

RMM = Es la radiación extraterrestre en milímetros de agua evaporada (se obtiene de tablas, en función de la latitud de la estación meteorológica)

S = Es el porcentaje del posible brillo de sol

$$S = 12.5 \times (100 - HM)^{1/2}$$

HM = Representa la humedad relativa

TMF = Temperatura media mensual en grados Fahrenheit

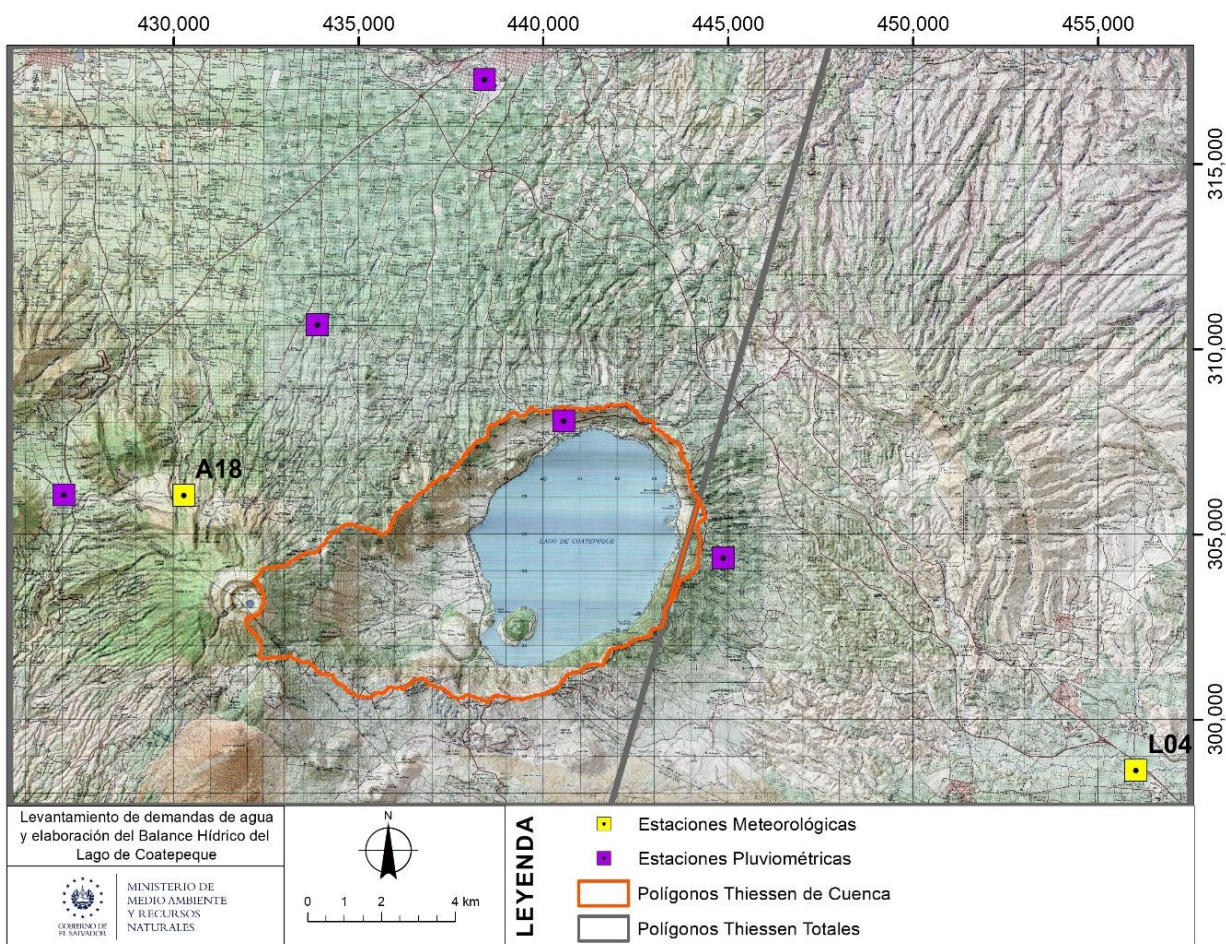


Figura 12. Mapa de Polígonos de Thiessen de la Cuenca del Lago Coatepeque. Parámetro evapotranspiración potencial

Tabla 8.

Temperatura Promedio Mensual y Anual de la Estación A-18, Período 1991-2020.

Año/Me	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUA
1991	16.3	16.0	18.5	19.2	18.6	18.7	18.4	18.3	18.0	16.8	15.2	15.3	17.4
1992	15.9	16.5	18.2	18.8	18.9	18.5	17.6	17.9	17.5	17.3	17.0	15.4	17.5
1993	15.4	16.5	17.4	18.8	18.9	17.6	17.4	17.1	17.1	16.9	15.5	14.9	17.0
1994	15.0	15.6	17.2	18.1	18.1	17.8	17.7	17.6	17.2	17.0	15.9	14.9	16.8
1995	15.1	15.7	17.3	18.1	18.4	17.8	17.4	17.2	17.2	16.9	15.8	15.6	16.9
1996	14.4	15.3	16.0	17.6	17.2	17.9	17.3	17.1	17.5	16.7	15.1	14.9	16.4
1997	15.0	15.8	17.2	18.3	18.3	17.6	17.8	17.8	17.8	17.2	16.7	15.8	17.1
1998	16.5	17.3	17.3	19.2	19.5	18.7	17.7	18.0	17.5	17.3	15.9	14.7	17.5
1999	14.9	15.3	16.7	18.2	18.0	17.3	16.8	17.6	16.8	15.8	14.0	14.0	16.3
2000	14.0	14.6	17.1	17.7	17.6	17.1	17.1	17.0	17.1	15.7	16.3	14.2	16.3
2001	14.2	15.7	16.8	17.9	18.2	17.4	17.8	17.7	17.3	16.7	15.2	15.6	16.7
2002	16.4	16.9	19.9	18.1	17.7	16.9	17.7	17.8	17.2	17.1	15.4	15.4	17.2
2003	13.4	16.3	17.4	18.6	18.8	17.8	17.6	17.9	17.7	17.0	15.9	14.0	16.9
2004	14.6	16.1	16.4	17.6	17.9	17.7	17.6	18.2	17.4	17.3	15.4	14.5	16.7
2005	13.6	15.6	18.0	18.5	18.3	17.9	17.7	17.8	17.6	16.2	14.8	15.4	16.8
2006	14.8	15.1	16.4	17.5	18.0	17.3	17.8	18.2	17.7	17.6	15.0	15.5	16.7
2007	15.6	16.2	16.5	18.2	18.4	18.0	17.7	17.4	17.1	16.0	14.7	14.9	16.7
2008	14.6	16.0	16.5	17.3	18.2	17.5	17.2	17.7	17.5	16.0	14.2	14.7	16.4
2009	14.5	14.5	15.4	18.3	17.7	18.1	17.9	17.7	18.1	17.6	15.7	15.9	16.8
2010	14.4	16.9	17.9	18.5	18.5	17.9	17.5	17.3	17.1	15.5	14.8	13.1	16.6
2011	15.3	15.7	15.8	17.9	18.2	17.7	17.5	17.4	17.2	15.9	15.2	14.5	16.5
2012	14.9	16.3	16.5	17.7	17.9	17.5	17.7	17.5	17.4	16.2	14.6	15.2	16.6
2013	15.2	16.7	16.4	18.4	17.8	17.5	17.9	17.5	17.2	17.6	16.4	15.6	17.0
2014	14.7	16.9	18.0	18.3	18.3	18.1	18.0	17.7	17.3	16.7	14.9	13.9	16.9
2015	13.5	14.4	16.3	18.2	18.1	17.8	18.2	19.1	18.3	18.0	17.5	16.8	17.2
2016	15.2	14.5	18.4	19.1	19.8	18.1	18.1	18.3	17.5	17.0	15.6	15.7	17.3
2017	15.1	16.8	16.5	18.7	18.6	17.8	18.2	18.2	17.9	16.9	15.6	14.9	17.1
2018	13.4	15.9	18.0	18.0	18.5	18.3	18.4	18.2	18.0	17.0	16.7	15.0	17.1
2019	14.7	16.5	16.5	18.3	18.3	18.8	18.6	18.7	18.3	17.1	16.2	15.7	17.3
2020	14.9	15.9	17.1	18.3	18.3	17.9	17.8	17.8	17.5	16.8	15.6	15.0	16.9
PROM	14.9	15.9	17.1	18.3	18.3	17.9	17.8	17.8	17.5	16.8	15.6	15.0	16.9

Tabla 9.

Radiación solar extraterrestre RMM en mm/día.

Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
16	11.8	13.2	14.6	15.6	15.8	15.8	15.7	15.6	14.9	13.6	12.1	11.4
14	12.2	13.5	14.7	15.6	15.7	15.6	15.6	15.5	15.0	13.8	12.5	11.8

Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
12	12.6	13.8	14.9	15.5	15.5	15.3	15.3	15.4	15.1	14.1	12.9	12.2
10	13.0	14.1	15.1	15.5	15.3	15.1	15.1	15.3	15.1	14.3	13.2	12.7

Para tomar en cuenta las pérdidas por evaporación del agua del lago, se calculó la ETP de la cuenca afectada por un Coeficiente de Evaporación, el cual varió de época lluviosa a época seca. De esta manera, se aplicó un factor de 1.15 de noviembre a abril y de 1.10 de mayo a octubre, de acuerdo a coeficientes para cuerpos de agua sugeridos por la FAO (SNET, 2005).

Una vez obtenidas, la evapotranspiración en la cuenca y la evaporación en el lago, se procedió a calcular el valor ponderado medio de evapotranspiración para la cuenca. Esto se realizó a través de una ponderación por área así: la evapotranspiración mensual se obtiene a partir del producto de la ETP del área de escurrimiento por su porcentaje de área respecto a la cuenca (61.5%) más la evaporación del lago (E) por su porcentaje de área respecto a la cuenca (31.5%). El área total de la cuenca del Lago de Coatepeque es de 64.04, Km² y el área superficial del lago es de 24.66 Km², por lo que el área correspondiente a tierra, incluyendo la isla, es de 39.38 Km².

Los valores medios mensuales de ETP, calculados para la cuenca, se muestran en la Escorrentía Superficial

En la cuenca del Lago de Coatepeque no existe una escorrentía superficial permanente, su comportamiento es efímero y dominante en época de lluvia. A partir de lo anterior, es posible suponer que el flujo dominante cuando no hay lluvias, es subterráneo. La zona se caracteriza por tener pocas quebradas, y de corto recorrido, siendo un indicativo de una alta infiltración. Teniendo en cuenta estos elementos, la magnitud de la escorrentía superficial fue determinada por el método Precipitación-Escorrentía, propuesto por el SNET (2005), que utiliza los factores de la Tabla 2.

Tabla 10, mientras que los valores de evaporación del lago, se muestran en la Tabla 11. Luego, en la Tabla 12 se muestran los datos de ETP mensual y anual, ponderadas por las respectivas áreas de la cuenca (descontando el área del cuerpo de agua) y del lago. Los datos indican que, en la parte de cuenca no sumergida, la evapotranspiración potencial anual oscilaría entre 1208.2 mm/año y 1392.8 mm/año (Escorrentía Superficial

En la cuenca del Lago de Coatepeque no existe una escorrentía superficial permanente, su comportamiento es efímero y dominante en época de lluvia. A partir de lo anterior, es posible suponer que el flujo dominante cuando no hay lluvias, es subterráneo. La zona se caracteriza por tener pocas quebradas, y de corto recorrido, siendo un indicativo de una alta infiltración. Teniendo en cuenta estos elementos, la magnitud de la escorrentía superficial fue determinada por el método Precipitación-Escorrentía, propuesto por el SNET (2005), que utiliza los factores de la Tabla 2.

Tabla 10). Mientras que en la superficie del lago, la evaporación alcanza valores medios anuales entre 1327.7 mm/año y 1566.8 mm/año (Tabla 11).

En base a las ponderaciones explicadas anteriormente, la evapotranspiración potencial anual en la cuenca puede alcanzar valores entre 1236.8 mm/año y 1459.8 mm/año. Siendo los meses de mayores salidas a la atmósfera marzo con 129.4 mm y abril con 130 mm. Mientras que los meses más fríos reflejarían los valores de menor evapotranspiración: noviembre con 92.6 mm/año y diciembre con 95.2 mm/año (Tabla 12).

Con estos valores se tendría cubiertas dos de las variables que determinan el balance hídrico de la cuenca. Nótese que la falta de instrumentación para medir parámetros climáticos en la cuenca, limita la determinación precisa de variables como precipitación y principalmente evapotranspiración. Este estudio aporta evidencia importante sobre el monitoreo de parámetros en las cuencas, como parte fundamental de la gestión de recursos hídricos.

Escorrentía Superficial

En la cuenca del Lago de Coatepeque no existe una escorrentía superficial permanente, su comportamiento es efímero y dominante en época de lluvia. A partir de lo anterior, es posible suponer que el flujo dominante cuando no hay lluvias, es subterráneo. La zona se caracteriza por tener pocas quebradas, y de corto recorrido, siendo un indicativo de una alta infiltración. Teniendo en cuenta estos elementos, la magnitud de la escorrentía superficial fue determinada por el método Precipitación-Escorrentía, propuesto por el SNET (2005), que utiliza los factores de la Tabla 2.

Tabla 10.

Evapotranspiración Potencial Mensual y Anual del área de escurrimiento, Período 1991-2020.

Año/Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1991	113.8	111.9	148.5	135.2	122.3	115.1	124.4	122.1	112.4	101.7	95.4	89.9	1,392.8
1992	105.4	105.6	130.6	127.9	139.2	112.7	117.1	119.4	109.2	106.8	100.5	93.2	1,367.6
1993	106.9	109.3	129.9	127.9	127.9	108.3	116.4	111.6	104.5	102.1	93.4	99.5	1,337.6
1994	101.3	101.8	128.0	126.8	120.7	112.2	121.8	119.7	108.3	105.9	89.8	85.5	1,321.7
1995	98.0	101.3	121.6	116.1	118.1	107.0	107.3	96.9	97.1	91.3	85.8	85.3	1,225.7
1996	97.1	99.0	118.3	112.8	100.2	105.3	104.9	101.7	98.0	90.8	82.2	88.7	1,199.2
1997	93.7	93.5	121.3	125.0	118.1	102.1	101.7	103.6	101.0	96.8	83.9	97.1	1,237.9
1998	102.3	112.6	126.4	130.7	136.7	111.4	112.2	106.4	100.2	92.5	79.5	89.7	1,300.7
1999	96.3	96.7	120.6	123.3	122.0	103.4	107.3	111.4	91.4	93.0	86.2	90.7	1,242.2
2000	101.5	95.6	123.1	127.4	112.2	104.9	111.8	105.5	101.0	90.7	92.6	90.0	1,256.4
2001	97.6	98.1	130.7	124.7	125.4	109.1	119.2	113.6	103.4	95.7	91.0	92.3	1,300.9
2002	106.9	104.8	129.1	123.0	114.2	95.8	112.1	113.9	99.1	100.9	86.7	91.8	1,278.2
2003	84.6	101.0	124.4	128.3	124.4	110.4	109.7	114.1	104.5	96.4	86.2	92.0	1,276.0
2004	92.5	99.0	115.8	122.6	113.0	108.6	111.6	118.5	101.8	101.4	88.4	92.2	1,265.5
2005	91.1	102.0	118.4	124.3	125.8	107.2	112.0	108.1	100.3	94.2	99.2	90.2	1,272.8
2006	91.5	97.2	119.7	119.6	113.5	96.9	108.3	113.4	104.7	95.7	83.9	83.2	1,227.7
2007	95.3	100.6	117.6	122.1	124.6	107.6	113.8	104.8	96.9	89.1	81.0	91.9	1,245.3
2008	89.4	96.4	116.0	116.3	119.4	105.9	110.6	111.7	102.2	86.4	91.2	91.2	1,236.8
2009	96.2	90.9	113.8	122.2	106.4	107.8	108.7	103.5	101.9	102.3	83.6	91.6	1,228.9
2010	90.3	96.5	124.9	114.0	108.6	98.6	100.8	97.3	86.4	90.1	87.0	85.3	1,179.8
2011	97.3	91.7	115.0	121.0	117.6	102.7	100.7	102.7	79.7	83.4	86.2	82.5	1,180.6
2012	91.8	94.8	117.6	118.9	106.8	97.4	110.1	105.2	99.9	86.9	84.7	94.1	1,208.2
2013	92.7	99.7	119.5	121.3	116.3	102.1	110.8	105.1	92.3	100.2	85.4	87.2	1,232.5
2014	94.1	100.4	119.9	119.6	108.2	107.8	116.6	111.9	95.0	93.3	79.6	81.0	1,227.2
2015	83.2	89.6	112.9	116.4	120.5	105.0	118.9	124.8	106.3	94.4	83.3	90.4	1,245.7
2016	94.1	87.1	119.8	123.7	122.8	99.2	115.3	109.7	100.2	96.4	90.7	89.3	1,248.2
2017	101.7	101.3	118.8	132.3	113.4	100.7	111.6	111.2	96.8	85.9	90.7	87.1	1,251.6
2018	89.0	101.8	127.5	118.8	116.9	110.2	117.9	115.0	103.5	91.7	92.1	92.0	1,276.6
2019	95.6	100.3	116.2	122.5	110.4	110.0	124.9	120.1	104.4	102.7	84.9	92.5	1,284.4
2020	96.1	103.3	122.8	121.6	109.3	111.5	122.8	119.6	103.1	99.9	82.2	92.9	1,285.2

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
 Producto 4 Balance hídrico integral de la cuenca del lago de Coatepeque

Año/Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
PROM	96.3	99.5	122.3	122.9	117.8	105.9	112.7	110.8	100.2	95.3	87.6	90.0	1,261.1

Nota: ETP correspondiente a Áreas circundantes al lago + la isla.

Tabla 11.

Evaporación Potencial Mensual y Anual del Lago, Período 1991-2020.

Año/Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1991	130.9	128.7	170.8	155.5	134.6	126.6	136.8	134.3	123.6	111.9	109.7	103.3	1,566.8
1992	121.2	121.4	150.2	147.0	153.1	124.0	128.8	131.3	120.2	117.5	115.6	107.2	1,537.5
1993	122.9	125.7	149.4	147.1	140.7	119.1	128.0	122.7	115.0	112.3	107.4	114.4	1,504.7
1994	116.5	117.1	147.2	145.8	132.7	123.4	134.0	131.7	119.2	116.5	103.3	98.3	1,485.6
1995	112.7	116.4	139.8	133.5	130.0	117.7	118.0	106.6	106.8	100.5	98.6	98.1	1,378.7
1996	111.7	113.9	136.1	129.7	110.2	115.9	115.4	111.9	107.8	99.9	94.5	102.1	1,349.0
1997	107.7	107.6	139.5	143.8	129.9	112.3	111.8	113.9	111.1	106.5	96.5	111.7	1,392.4
1998	117.7	129.4	145.4	150.3	150.4	122.6	123.4	117.1	110.2	101.7	91.4	103.2	1,462.9
1999	110.7	111.2	138.7	141.8	134.2	113.7	118.0	122.5	100.5	102.4	99.1	104.3	1,397.1
2000	116.8	110.0	141.5	146.5	123.4	115.4	123.0	116.1	111.1	99.7	106.5	103.5	1,413.5
2001	112.3	112.8	150.3	143.5	137.9	120.1	131.1	125.0	113.7	105.3	104.7	106.2	1,462.8
2002	122.9	120.5	148.5	141.4	125.7	105.4	123.3	125.3	109.1	110.9	99.7	105.6	1,438.1
2003	97.3	116.1	143.1	147.5	136.9	121.5	120.7	125.5	114.9	106.1	99.1	105.8	1,434.4
2004	106.4	113.8	133.2	141.0	124.3	119.4	122.8	130.4	112.0	111.6	101.7	106.0	1,422.6
2005	104.8	117.3	136.1	142.9	138.4	117.9	123.2	118.9	110.4	103.6	114.1	103.7	1,431.4
2006	105.2	111.7	137.7	137.6	124.9	106.6	119.2	124.8	115.1	105.3	96.4	95.7	1,380.2
2007	109.6	115.6	135.3	140.4	137.0	118.4	125.2	115.2	106.6	98.0	93.1	105.7	1,400.3
2008	102.8	110.9	133.4	133.8	131.3	116.5	121.7	122.9	112.4	95.0	104.9	104.9	1,390.5
2009	110.7	104.5	130.9	140.5	117.0	118.5	119.6	113.9	112.1	112.5	96.2	105.4	1,381.7
2010	103.9	110.9	143.7	131.1	119.4	108.4	110.9	107.0	95.0	99.1	100.0	98.1	1,327.7
2011	111.9	105.5	132.3	139.2	129.3	112.9	110.8	112.9	87.7	91.8	99.1	94.9	1,328.3
2012	105.6	109.0	135.3	136.7	117.5	107.1	121.1	115.8	109.9	95.6	97.5	108.2	1,359.2
2013	106.6	114.7	137.4	139.5	128.0	112.3	121.9	115.6	101.5	110.2	98.2	100.2	1,386.1
2014	108.2	115.4	137.9	137.5	119.0	118.6	128.2	123.0	104.5	102.7	91.5	93.1	1,379.6
2015	95.6	103.1	129.9	133.9	132.6	115.5	130.7	137.2	116.9	103.9	95.8	103.9	1,399.0
2016	108.3	100.2	137.8	142.2	135.1	109.1	126.8	120.6	110.2	106.0	104.3	102.6	1,403.2
2017	117.0	116.5	136.6	152.1	124.8	110.8	122.7	122.4	106.4	94.5	104.3	100.2	1,408.3
2018	102.4	117.1	146.7	136.6	128.6	121.3	129.7	126.5	113.9	100.9	105.9	105.8	1,435.3
2019	109.9	115.3	133.7	140.8	121.5	121.0	137.4	132.1	114.8	113.0	97.6	106.3	1,443.4
2020	110.5	118.8	141.2	139.8	120.2	122.7	135.1	131.6	113.4	109.9	94.6	106.9	1,444.7
PROM	110.7	114.4	140.6	141.3	129.6	116.5	124.0	121.8	110.2	104.8	100.7	103.5	1,418.2

Nota: Evaporación correspondiente al cuerpo de agua del Lago Coatepeque.

Tabla 12.

Evapotranspiración Potencial Ponderada Mensual y Anual de la Cuenca del Lago de Coatepeque, Período 1991-2020.

Año/Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1991	120.4	118.4	157.1	143.0	127.0	119.5	129.1	126.8	116.7	105.6	100.9	95.0	1,459.8
1992	111.5	111.7	138.2	135.2	144.5	117.1	121.6	124.0	113.5	110.9	106.3	98.6	1,433.0
1993	113.1	115.6	137.4	135.3	132.8	112.4	120.9	115.9	108.6	106.0	98.8	105.2	1,402.0
1994	107.1	107.7	135.4	134.1	125.3	116.5	126.5	124.3	112.5	110.0	95.0	90.4	1,384.8
1995	103.7	107.1	128.6	122.8	122.7	111.1	111.4	100.6	100.8	94.8	90.7	90.2	1,284.6
1996	102.8	104.7	125.2	119.3	104.1	109.4	108.9	105.6	101.8	94.3	86.9	93.9	1,256.8
1997	99.1	98.9	128.3	132.3	122.6	106.1	105.6	107.6	104.9	100.6	88.8	102.7	1,297.4
1998	108.2	119.1	133.7	138.3	141.9	115.7	116.5	110.5	104.1	96.0	84.1	94.9	1,363.2
1999	101.8	102.3	127.6	130.4	126.7	107.4	111.4	115.7	94.9	96.6	91.2	95.9	1,301.9
2000	107.4	101.2	130.2	134.8	116.5	109.0	116.1	109.6	104.8	94.2	98.0	95.2	1,316.9
2001	103.3	103.7	138.2	132.0	130.2	113.4	123.8	118.0	107.4	99.4	96.3	97.7	1,363.3
2002	113.1	110.8	136.6	130.1	118.6	99.5	116.4	118.3	103.0	104.7	91.7	97.1	1,339.8
2003	89.5	106.8	131.6	135.7	129.2	114.7	113.9	118.5	108.5	100.1	91.2	97.3	1,337.0
2004	97.9	104.7	122.5	129.7	117.3	112.8	115.9	123.1	105.7	105.3	93.5	97.5	1,326.0
2005	96.4	107.9	125.2	131.5	130.6	111.3	116.3	112.3	104.2	97.8	105.0	95.4	1,333.9
2006	96.8	102.8	126.7	126.5	117.9	100.6	112.5	117.8	108.7	99.4	88.7	88.0	1,286.4
2007	100.9	106.4	124.4	129.1	129.4	111.8	118.2	108.8	100.6	92.5	85.7	97.2	1,305.0
2008	94.6	102.0	122.7	123.1	124.0	110.0	114.9	116.0	106.1	89.7	96.5	96.5	1,296.0
2009	101.8	96.2	120.4	129.3	110.5	111.9	112.9	107.5	105.8	106.2	88.5	96.9	1,287.8
2010	95.5	102.0	132.2	120.6	112.7	102.4	104.7	101.0	89.7	93.6	92.0	90.2	1,236.8
2011	102.9	97.0	121.7	128.0	122.1	106.6	104.6	106.6	82.8	86.6	91.1	87.3	1,237.4
2012	97.1	100.3	124.4	125.7	110.9	101.1	114.4	109.3	103.8	90.2	89.6	99.5	1,266.4
2013	98.0	105.5	126.4	128.3	120.8	106.0	115.0	109.2	95.9	104.0	90.4	92.2	1,291.7
2014	99.5	106.2	126.8	126.5	112.4	111.9	121.1	116.2	98.6	96.9	84.2	85.6	1,285.9
2015	88.0	94.8	119.4	123.1	125.2	109.0	123.4	129.6	110.4	98.1	88.1	95.6	1,304.7
2016	99.6	92.1	126.7	130.8	127.5	103.0	119.7	113.9	104.0	100.1	96.0	94.4	1,307.9
2017	107.6	107.1	125.7	139.9	117.8	104.6	115.9	115.5	100.5	89.2	96.0	92.2	1,311.9
2018	94.1	107.7	134.9	125.6	121.5	114.5	122.4	119.5	107.5	95.3	97.4	97.3	1,337.7
2019	101.1	106.1	123.0	129.5	114.7	114.2	129.7	124.7	108.4	106.7	89.8	97.8	1,345.6
2020	101.6	109.3	129.9	128.6	113.5	115.8	127.5	124.2	107.1	103.8	87.0	98.3	1,346.6
PROM	101.8	105.2	129.4	130.0	122.4	110.0	117.0	115.0	104.0	99.0	92.6	95.2	1,321.6

Nota: ETP ponderada, correspondiente a toda la cuenca del Lago Coatepeque.

Flujo Base

El flujo base de la cuenca no se conoce a priori, será determinado por el balance hidrológico. En base a la conceptualización del sistema hidrológico de la cuenca y a los elementos expuestos en los apartados precedentes, es posible considerar que la infiltración que se produce en la cuenca, recarga el acuífero subyacente de la cuenca, el cual a su vez descarga en la masa de agua del Lago de Coatepeque.

Suelos

Los suelos en el área de la cuenca son de varios grupos: Regosoles, Aluviales, Latosoles Arcillo Rojizos y Litosoles (Figura 13), los cuales se pueden clasificar en varios tipos de textura, de acuerdo con el mapa de suelos en escala 1:50,000 del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). Sus características, localización general en la cuenca, extensión y profundidad pueden consultarse en la Tabla 13. Adicionalmente, los datos hidrológicos de estos suelos y el valor ponderado por área para la cuenca se presenta en la Tabla 14.

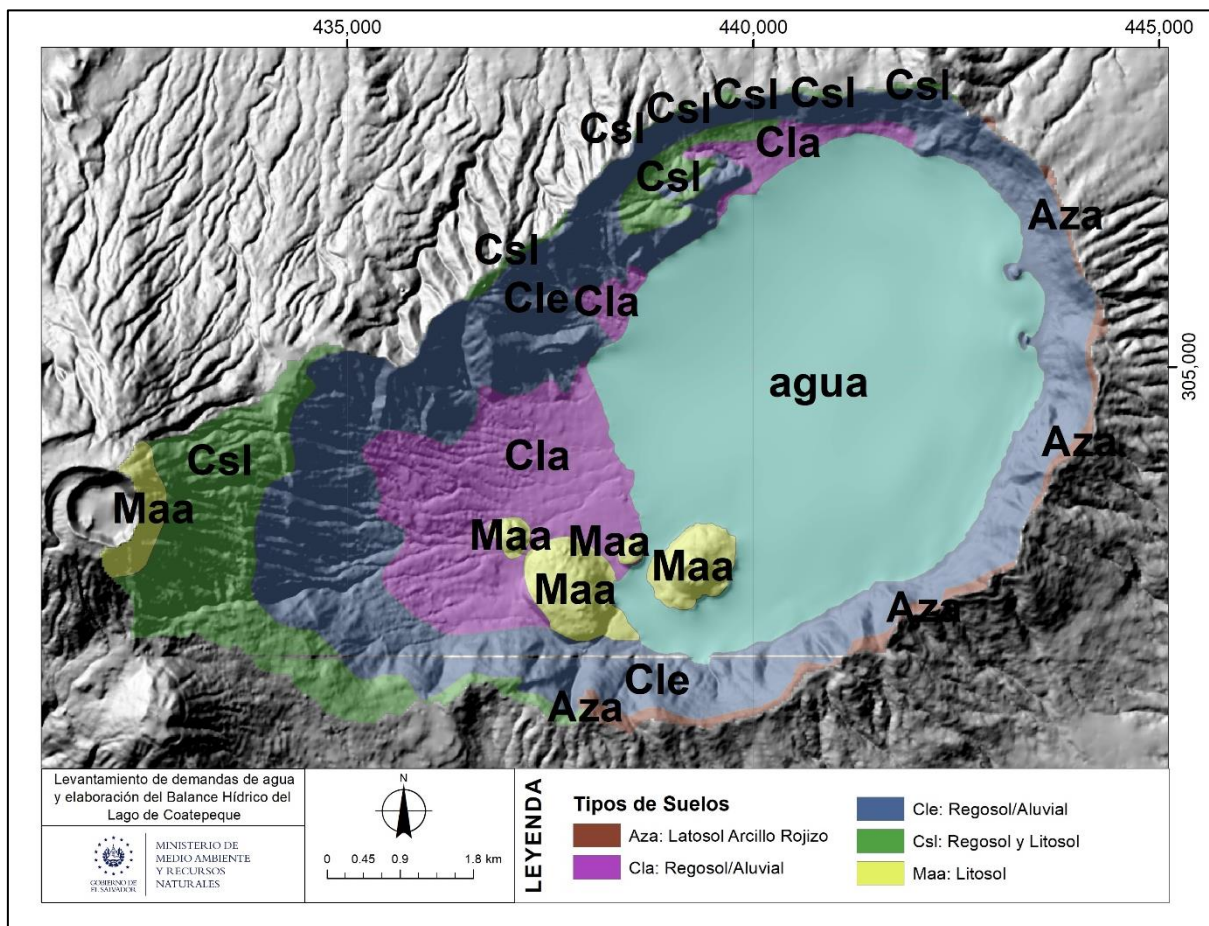


Figura 13. Mapa de tipos de suelos de la cuenca del lago de Coatepeque.

Tabla 13.

Tipos de suelos de la Cuenca del Lago de Coatepeque y sus características.

Ubicación	Código	Tipo de Suelo	Textura	Área, m ²	Espesor, m
Alta	Maa	Pertenecen al gran grupo Litosol o mejor dicho a las tierras sin suelo agrícola.	Franco arenoso	7,856,308.79	0.25
	Csl	Pertenecen a los grandes grupos Regosol y Litosol.			
	Aza	Pertenecen al gran grupo Latosol Arcillo Rojizo.	Franco limoso	1,192,497.27	0.75
Media	Cle	Pertenecen al gran grupo Regosol Aluvial.	Franco arenoso fino	20,208,899.71	0.50
Baja	Cla	Es un complejo de suelos perteneciente al gran grupo Regosol Aluvial.	Franco	7,967,214.05	0.25
	Maa	Pertenecen al gran grupo Litosol o mejor dicho a las tierras sin suelo agrícola.	Arena media	2,299,340.88	0.15

En el área de la cuenca del Lago de Coatepeque, la profundidad del suelo es de aproximadamente unos 30 cm de espesor en la parte alta, de aproximadamente 50 cm en la parte media y, en la parte baja, es de aproximadamente 20 cm. Los valores de capacidad de retención de agua se obtienen ponderando los valores de la Tabla 3 por los espesores de suelos y las áreas respectivas (Tabla 14). El valor ponderado de profundidad de suelos para toda la cuenca es de 0.39 m, mientras que el valor ponderado de capacidad de retención de agua de los suelos de toda la subcuenca es de 57.16 mm.

Tabla 14.

Cálculo de la humedad disponible en suelos.

Textura	Capacidad de agua disponible (agua por pie de profundidad)			Prof. Suelo m	Hum. Disp. mm	Área suelo Km ²	Hum x Área mm.Km ²
	%	Pulg	mm				
Arena media	5.1	0.9	22.86	0.15	11.25	2.30	25.87
Franco arenoso	7.9	1.4	35.56	0.25	29.17	7.86	229.14
Franco arenoso fino	10.2	1.8	45.72	0.50	75.00	20.21	1,515.67
Franco	11.3	2.0	50.80	0.25	41.67	7.97	331.97
Franco limoso	11.9	2.1	53.34	0.75	131.25	1.19	156.52
						39.52	2,259.16

2.2.4 Balance hidrológico preliminar: datos de entrada al modelo

Conociendo la humedad disponible de suelos, los parámetros climáticos de precipitación, evapotranspiración potencial y los coeficientes Precipitación/Escurrimiento, se cuenta con la información para una primera estimación de las variables que conforman el balance hidrológico de la cuenca del Lago de Coatepeque, por el método de Thornthwaite y L. Serra. Los valores mensuales de cada variable se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15.

Balance hidrológico preliminar de la cuenca Lago Coatepeque, en mm. Método de Thornthwaite y L. Serra.

PARÁMETRO	MESES												TOTAL
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Precipitación (P, mm)	2.5	4.9	15.3	58.2	219.1	307.6	323.9	347.1	317.0	252.1	47.9	8.4	1,904.2
Evapotranspiración Potencial (ETP, mm)	101.8	105.2	129.4	130.0	122.4	110.0	117.0	115.0	104.0	99.0	92.6	95.2	1,321.6
Evapotranspiración Real (ETR, mm)	2.5	4.9	15.3	58.2	122.4	110.0	117.0	115.0	104.0	99.0	92.6	20.9	861.8
Reserva de agua útil (RAU, mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	12.4	0.0	
Déficit de Almacenaje (DA, mm)	99.3	100.3	114.0	71.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	74.3	459.7
Exceso de Almacenaje (EX, mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	39.6	197.6	206.9	232.1	213.0	153.2	0.0	0.0	1,042.4
Escurrimiento Total (Q, mm)	22.3	11.2	5.6	2.8	21.2	109.4	158.1	195.1	204.1	178.6	89.3	44.7	1,042.4
Relación S/P	4.3	9.0	1.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.8	2.4	0.3
Escurrimiento Superficial (S, mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	20.9	52.3	64.8	72.9	88.8	105.9	0.0	0.0	405.5
Escurrimiento Subterráneo (I, mm)	22.3	11.2	5.6	2.8	0.3	57.1	93.4	122.2	115.3	72.7	89.3	44.7	636.8

De la Tabla 15 se obtienen los siguientes resultados:

Precipitación:	121,946,316.98	m ³	=	100.0%P
Evapotranspiración Real:	55,193,386.64	m ³	=	45.3% P
Escorrentamiento Total:	66,752,874.05	m ³	=	54.7% P
Escorrentamiento Superficial:	25,971,022.11	m ³	=	21.3% P
Escorrentamiento Subterráneo:	40,781,851.94 m ³		=	33.4% P

En términos de caudales, el caudal total se reparte entre caudal superficial y caudal subterráneo. Se hace notar que entre los meses de diciembre a abril, la época seca, se ha forzado el flujo superficial a ser cero, por lo que el flujo total en esos meses sería completamente flujo subterráneo. Además, en el mes de mayo también se ha forzado el flujo superficial igual al flujo total. Por consiguiente, en ese mes el flujo subterráneo es cero. En la Figura 14 se observa el comportamiento de los parámetros del balance hidrológico. El desfase del pico del flujo superficial es de dos meses, con respecto al pico de precipitación.

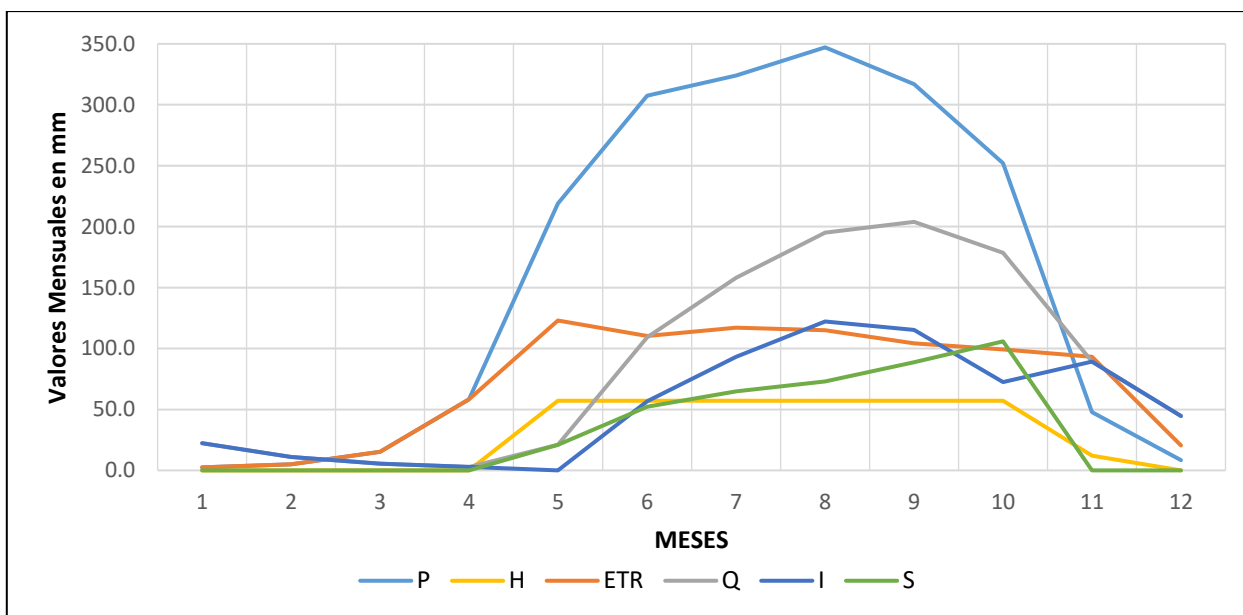


Figura 14. Distribución mensual de los componentes del balance hídrico preliminar en la cuenca del lago de Coatepeque, determinados mediante el Método Thornthwaite y L. Serra

Los caudales de flujos y características de la cuenca en base al balance hidrológico preliminar serían:

Q superficial: 823.54 L/s = 0.8235 m³/s

Q subterráneo: 1,293.18 L/s = 1.2932 m³/s

Q total:	2,116.72 L/s	=	2.1167 m ³ /s
Área cuenca:	64,040,678 m ²	=	64.04 Km ²
Rendimiento específico:	20.19 L/s/Km ²		

Es interesante hacer notar que el flujo subterráneo o recarga del acuífero, ha resultado de aproximadamente de 1,300 L/s, que es el citado por Marchand en el estudio de FORGAES, como pérdida subterránea de la cuenca del lago.

Por último, los parámetros a ingresar en el modelo hidrológico de TEMEZ a partir de los resultados anteriores, serían:

l_{max}: 122.2 mm

H_{max}: 57.16 mm

C: 0.2130

α: 0.0167

Como se dijo antes, estos parámetros serán orientativos y no necesariamente serán los mismos al final de la calibración del modelo, únicamente son los valores iniciales del proceso iterativo de calibración.

2.2.5 Modelación hidrológica

Se utilizó los archivos de precipitaciones medias areales, evapotranspiración potencial media y caudales para ingresarlos al modelo TEMEZ para la calibración de parámetros del mismo y posterior simulación de caudales en el área de interés.

Antes de ingresar los archivos al modelo, fué necesario generar el archivo de caudales, el cual se realizó de una manera no convencional, pues no existe un flujo superficial saliendo de la cuenca del Lago de Coatepeque; sin embargo, se tienen mediciones de la variación del nivel del agua en el lago, durante el período 2012-2018, con períodos de pérdida de datos intermedios.

A partir de la variación de niveles y la batimetría del lago, se calcularon los volúmenes totales del lago y por diferencia entre los valores de nivel medio mensual, se obtuvo el flujo promedio mensual que perdió o ganó el lago.

Sin embargo, fue necesario tomar un nivel de referencia mínimo, para obtener volúmenes positivos, ya que aunque la cuenca y el lago ganen o pierdan, siempre existe un volumen enorme, que para fines prácticos se puede considerar infinito, pues las variaciones de volumen son muy pequeñas.

Para lo anterior, fue necesario utilizar unos supuestos, basados en las teorías expresadas por Marchand y otros, al citar que el lago pierde en promedio 1,300 L/s mensuales. También se consultaron registros de aforos realizados por ANDA durante los años 1988-1996 y por ANDA

y SNET en los periodos 2002-2003 y 2006-2007, para analizar los caudales de los manantiales del área de Santa Ana y Zapotitán, los cuales se supone que reciben flujos del lago de Coatepeque, que contribuyen en variados porcentajes en los caudales medidos. Se estimó un valor medio inicial de aporte de agua del lago a dichos manantiales de 981.68 L/s.

Cálculo de variación de volúmenes en el Lago Coatepeque

La variación de niveles en el lago se ha medido diariamente, pero los parámetros que se ingresan al modelo TEMEZ son de paso mensual, por lo que fue necesario calcular las variaciones mensuales de nivel, comprobando los niveles máximos y mínimos, para asegurar que los cálculos son representativos de cada mes. En la Tabla 16 se muestran los niveles promedios mensuales calculados, cuya variación temporal se presenta gráficamente en la Figura 15. Para uniformizar los datos de batimetría con el resto de información, se utilizó de referencia el nivel máximo histórico reportado en el informe de batimetría, que es 743.973 msnm.

Tabla 16.

Nivel mensual de agua procesado del registro de la Estación Limnimétrica del lago de Coatepeque.

Fecha	Profundidad medida en	Nivel al final del mes	Nivel promedio/mes	Máximo	Mínimo
31/10/2012	1.585	742.388	742.412	742.448	742.338
30/11/2012	1.835	742.138	742.264	742.398	742.088
31/12/2012	1.915	742.058	742.102	742.218	742.038
31/1/2013	1.945	742.028	742.030	742.068	741.988
28/2/2013					
31/3/2013					
30/4/2013					
31/5/2013	2.315	741.658	741.589	741.668	741.538
30/6/2013	2.075	741.898	741.761	741.908	741.658
31/7/2013	1.975	741.998	741.944	742.008	741.908
31/8/2013	1.645	742.328	742.161	742.328	741.998
30/9/2013	1.555	742.418	742.380	742.428	742.318
31/10/2013	1.335	742.638	742.506	742.638	742.418
30/11/2013	1.435	742.538	742.600	742.658	742.528
31/12/2013	1.585	742.388	742.454	742.528	742.378
31/1/2014	1.785	742.188	742.277	742.378	742.158
28/2/2014	1.855	742.118	742.146	742.188	742.108
31/3/2014	1.955	742.018	742.071	742.118	742.018
30/4/2014	2.045	741.928	741.966	742.038	741.918
31/5/2014	1.855	742.118	742.045	742.158	741.978
30/6/2014	1.505	742.468	742.396	742.488	742.178
31/7/2014	1.545	742.428	742.435	742.468	742.398
31/8/2014	1.365	742.608	742.534	742.628	742.418

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
 Producto 4 Balance hídrico integral de la cuenca del lago de Coatepeque

Fecha	Profundidad medida en	Nivel al final del mes	Nivel promedio/mes	Máximo	Mínimo
30/9/2014	1.135	742.838	742.764	742.838	742.618
31/10/2014	1.125	742.848	742.845	742.848	742.838
30/11/2014	1.135	742.838	742.847	742.848	742.838
31/12/2014	1.275	742.698	742.760	742.848	742.698
31/1/2015	1.475	742.498	742.597	742.698	742.488
28/2/2015	1.615	742.358	742.419	742.488	742.358
31/3/2015	1.735	742.238	742.294	742.368	742.238
30/4/2015	1.755	742.218	742.230	742.258	742.208
31/5/2015	1.685	742.288	742.246	742.298	742.188
30/6/2015	1.715	742.258	742.280	742.308	742.218
31/7/2015	1.665	742.308	742.278	742.338	742.198
31/8/2015	1.595	742.378	742.334	742.378	742.288
30/9/2015	1.465	742.508	742.461	742.508	742.398
31/10/2015	1.245	742.728	742.604	742.738	742.508
30/11/2015	1.285	742.688	742.718	742.758	742.678
31/12/2015	1.385	742.588	742.611	742.611	742.611
31/1/2016	1.575	742.398	742.496	742.588	742.398
29/2/2016	1.805	742.168	742.285	742.418	742.158
31/3/2016	1.865	742.108	742.150	742.178	742.108
30/4/2016	1.965	742.008	742.051	742.108	742.008
20/5/2016	2.005	741.968	742.003	742.028	741.968
30/6/2016					
22/7/2016	1.645	742.328	742.328	742.328	742.328
31/8/2016					
30/9/2016					
31/10/2016					
30/11/2016					
31/12/2016	1.785	742.188	742.261	742.378	742.158
31/1/2017	1.995	741.978	742.085	742.228	741.978
28/2/2017	2.065	741.908	741.937	742.028	741.898
31/3/2017	2.245	741.728	741.807	741.908	741.708
30/4/2017	2.385	741.588	741.648	741.758	741.588
23/5/2017	2.285	741.688	741.589	741.688	741.588
30/6/2017					
31/7/2017					
30/8/2017					
30/9/2017	1.745	742.228	742.206	742.238	742.148
30/10/2017	1.775	742.198	742.251	742.298	742.188
30/11/2017	1.975	741.998	742.093	742.208	741.958
22/12/2017	2.145	741.828	741.893	742.008	741.788
31/1/2018					
11/2/2018	2.535	741.438	741.438	741.438	741.438

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
 Producto 4 Balance hídrico integral de la cuenca del lago de Coatepeque

Fecha	Profundidad medida en	Nivel al final del mes	Nivel promedio/mes	Máximo	Mínimo
31/3/2018					
30/4/2018					
31/5/2018	2.630	741.343	741.342	741.403	741.283
30/6/2018	2.600	741.373	741.336	741.403	741.293
31/7/2018	2.660	741.313	741.322	741.383	741.283
31/8/2018	2.410	741.563	741.403	741.573	741.303
30/9/2018	2.170	741.803	741.693	741.813	741.563
31/10/2018	2.160	741.813	741.791	741.823	741.753
7/11/2018	2.08	741.89	741.89	741.89	741.89

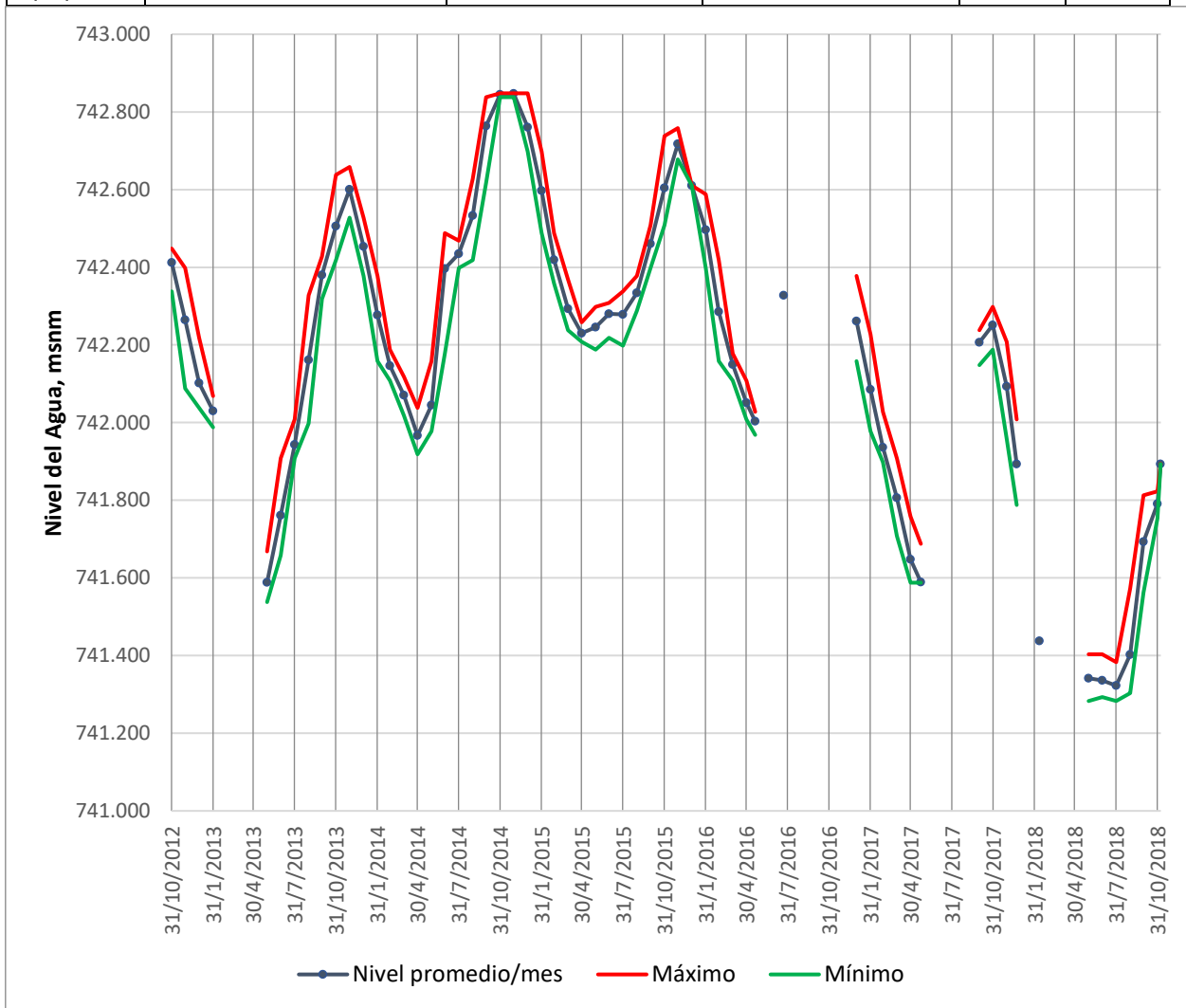


Figura 15. Variación de niveles medios, máximos y mínimos mensuales en el Lago Coatepeque.

El cálculo de los volúmenes se realizó con el raster de la batimetría actualizado y proporcionado por el MARN (MZ Consultores S.A. de C.V., 2020) y la herramienta Surface Volume de Arc Map. En la Figura 16 se muestra el Mapa de Batimetría del Lago de Coatepeque, representado por un raster.

En la Tabla 17 se muestran los valores de volumen (relativos) calculados para los niveles promedios mensuales, así como los volúmenes (absolutos) referidos a un valor mínimo de pérdidas del lago, que se estimó en 600 L/s. Además, se presentan los volúmenes naturalizados, que requiere el modelo, para lo cual fue necesario restar los volúmenes que son descargados al lago y sumar los volúmenes que son extraídos del mismo. En este punto se aclara que se estimó como coeficiente de retorno de las demandas de agua un factor de 0.5, pero excluyendo los volúmenes que se trasvasan hacia afuera de la cuenca.

El volumen neto, extraído por bombeo directo desde el lago y por medio de pozos obtenido en el Producto 3 fue de 171,047.91 m³/mes (1.583 m³/s), de los cuales 69,714.20 m³/mes (0.645 m³/s), salen de la cuenca, por lo que los retornos se calcularon para un volumen de extracción neto de 101,333.71 m³/mes (0.938 m³/s). Adicionalmente, durante la época lluviosa, las extracciones se redujeron en un 30%, para tomar en cuenta la reducción del bombeo para riego de jardines en las quintas recreativas, ya que siempre se dan extracciones según se confirmó durante el trabajo de campo y entrevistas de este proyecto. Los volúmenes naturalizados se convirtieron luego a caudales, considerando el número de días de cada mes.

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
 Producto 4 Balance hídrico integral de la cuenca del lago de Coatepeque

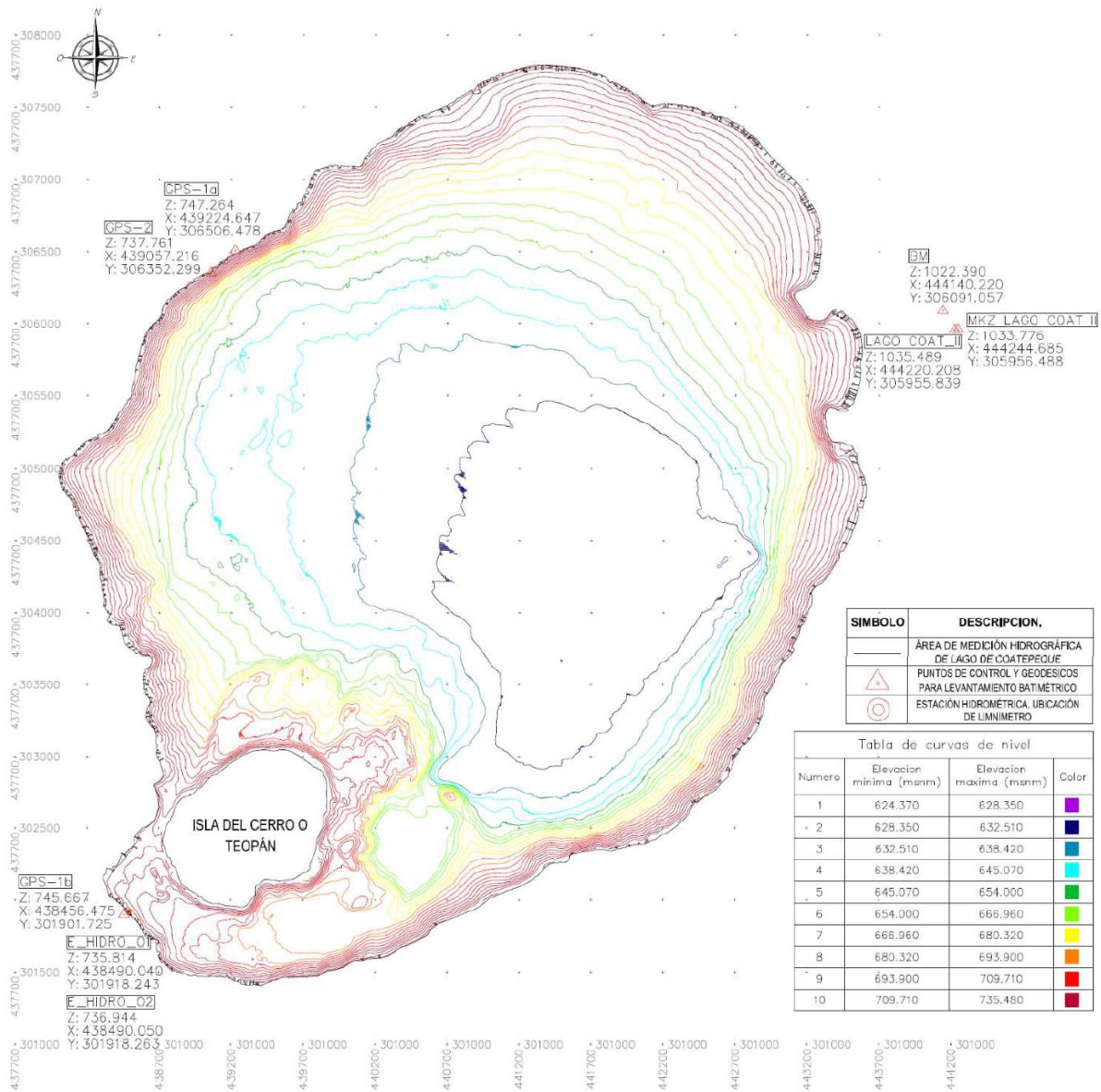


Figura 16. Mapa de isobatas presentado en el levantamiento batimétrico del lago de Coatepeque.

Fuente: MZ Consultores S.A. de C.V. (2020)

Tabla 17.

Cálculo del volúmenes y caudales actuales y naturalizados en el Lago de Coatepeque.

Fecha	Volumen total del lago, m ³	Volumen Relativo Mensual, m ³	Volumen Absoluto Mensual, m ³	Volumen Naturalizado Mensual, m ³	Qn, m ³ /s
31/10/2012	1,907,140,942.34				
30/11/2012	1,903,516,483.66	-3,624,458.68	4,088,488.43	4,208,869.48	1.62
31/12/2012	1,899,551,730.54	-3,964,753.12	3,748,193.99	3,868,575.04	1.44
31/1/2013	1,897,790,476.24	-1,761,254.30	5,951,692.80	6,072,073.86	2.27

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
 Producto 4 Balance hídrico integral de la cuenca del lago de Coatepeque

Fecha	Volumen total del lago, m ³	Volumen Relativo Mensual, m ³	Volumen Absoluto Mensual, m ³	Volumen Naturalizado Mensual, m ³	Qn, m ³ /s
28/2/2013					
31/3/2013					
30/4/2013					
31/5/2013	1,887,014,372.84				
30/6/2013	1,891,214,942.57	4,200,569.72	11,913,516.83	12,018,697.83	4.64
31/7/2013	1,895,687,456.79	4,472,514.23	12,185,461.33	12,305,842.39	4.59
31/8/2013	1,900,995,374.22	5,307,917.43	13,020,864.53	13,141,245.59	4.91
30/9/2013	1,906,357,086.30	5,361,712.08	13,074,659.18	13,195,040.24	5.09
31/10/2013	1,909,444,123.68	3,087,037.37	10,799,984.48	10,920,365.53	4.08
30/11/2013	1,911,748,206.91	2,304,083.24	10,017,030.34	10,137,411.39	3.91
31/12/2013	1,908,169,911.93	-3,578,294.98	4,134,652.12	4,255,033.17	1.59
31/1/2014	1,903,834,758.79	-4,335,153.13	3,377,793.97	3,498,175.03	1.31
28/2/2014	1,900,628,312.55	-3,206,446.25	4,506,500.86	4,626,881.91	1.91
31/3/2014	1,898,793,348.00	-1,834,964.55	5,877,982.55	5,998,363.61	2.24
30/4/2014	1,896,225,365.58	-2,567,982.42	5,144,964.68	5,265,345.74	2.03
31/5/2014	1,898,157,360.69	1,931,995.11	9,644,942.21	9,765,323.26	3.65
30/6/2014	1,906,749,001.26	8,591,640.58	16,304,587.68	16,424,968.73	6.34
31/7/2014	1,907,704,403.39	955,402.13	8,668,349.23	8,788,730.29	3.28
31/8/2014	1,910,130,352.01	2,425,948.62	10,138,895.72	10,259,276.78	3.83
30/9/2014	1,915,770,258.00	5,639,905.99	13,352,853.10	13,473,234.15	5.20
31/10/2014	1,917,757,772.12	1,987,514.12	9,700,461.23	9,820,842.28	3.67
30/11/2014	1,917,806,855.05	49,082.92	7,762,030.02	7,882,411.08	3.04
31/12/2014	1,915,672,126.03	-2,134,729.01	5,578,218.09	5,698,599.14	2.13
31/1/2015	1,911,674,658.40	-3,997,467.63	3,715,479.48	3,835,860.53	1.43
28/2/2015	1,907,312,424.77	-4,362,233.63	3,350,713.47	3,471,094.53	1.43
31/3/2015	1,904,250,990.73	-3,061,434.04	4,651,513.07	4,771,894.12	1.78
30/4/2015	1,902,684,153.23	-1,566,837.51	6,146,109.60	6,266,490.65	2.42
31/5/2015	1,903,075,823.46	391,670.23	8,104,617.34	8,224,998.39	3.07
30/6/2015	1,903,908,209.35	832,385.89	8,545,332.99	8,665,714.05	3.34
31/7/2015	1,903,859,242.21	-48,967.14	7,663,979.97	7,784,361.02	2.91
31/8/2015	1,905,230,476.25	1,371,234.04	9,084,181.14	9,204,562.19	3.44
30/9/2015	1,908,341,424.00	3,110,947.75	10,823,894.86	10,944,275.91	4.22
31/10/2015	1,911,846,273.02	3,504,849.02	11,217,796.12	11,338,177.18	4.23
30/11/2015	1,914,641,844.09	2,795,571.07	10,508,518.17	10,628,899.23	4.10
31/12/2015	1,912,017,892.64	-2,623,951.45	5,088,995.65	5,209,376.71	1.94
31/1/2016	1,909,199,061.52	-2,818,831.12	4,894,115.99	5,014,497.04	1.87
29/2/2016	1,904,030,628.98	-5,168,432.54	2,544,514.56	2,664,895.61	1.06
31/3/2016	1,900,726,193.42	-3,304,435.56	4,408,511.55	4,528,892.60	1.69

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
 Producto 4 Balance hídrico integral de la cuenca del lago de Coatepeque

Fecha	Volumen total del lago, m ³	Volumen Relativo Mensual, m ³	Volumen Absoluto Mensual, m ³	Volumen Naturalizado Mensual, m ³	Qn, m ³ /s
30/4/2016	1,898,304,120.88	-2,422,072.54	5,290,874.56	5,411,255.62	2.09
31/5/2016	1,897,130,141.97	-1,173,978.90	6,538,968.20	6,659,349.25	2.49
30/6/2016					
31/7/2016	1,905,083,543.02				
31/8/2016					
30/9/2016					
31/10/2016					
30/11/2016					
31/12/2016	1,903,443,038.00				
31/1/2017	1,899,135,831.22	-4,307,206.78	3,405,740.32	3,526,121.38	1.32
28/2/2017	1,895,516,314.33	-3,619,516.89	4,093,430.21	4,213,811.27	1.74
31/3/2017	1,892,338,860.54	-3,177,453.79	4,535,493.32	4,655,874.37	1.74
30/4/2017	1,888,454,927.11	-3,883,933.43	3,829,013.67	3,949,394.73	1.52
31/5/2017	1,887,014,372.84	-1,440,554.27	6,272,392.84	6,392,773.89	2.39
30/6/2017					
31/7/2017					
31/8/2017					
30/9/2017	1,902,096,696.80				
31/10/2017	1,903,198,225.76	1,101,528.96	8,814,476.06	8,934,857.11	3.34
30/11/2017	1,899,331,544.88	-3,866,680.87	3,846,266.23	3,966,647.28	1.53
31/12/2017	1,894,440,675.90	-4,890,868.98	2,822,078.12	2,942,459.18	1.10
31/1/2018					
28/2/2018	1,883,329,141.24				
31/3/2018					
30/4/2018					
31/5/2018	1,880,987,416.32				
30/6/2018	1,880,841,089.56	-146,326.75	7,566,620.35	7,687,001.41	2.97
31/7/2018	1,880,499,674.68	-341,414.88	7,371,532.22	7,491,913.28	2.80
31/8/2018	1,882,475,279.00	1,975,604.32	9,688,551.42	9,808,932.48	3.66
30/9/2018	1,889,553,892.76	7,078,613.76	14,791,560.87	14,911,941.92	5.75
31/10/2018	1,891,947,908.14	2,394,015.38	10,106,962.48	10,227,343.53	3.82
30/11/2018	1,894,440,675.90	2,492,767.76	10,205,714.87	10,326,095.92	3.98

Qn: Caudal naturalizado

En base a lo anterior es posible resumir los caudales naturalizados mensuales y anuales descargados del lago durante el período 2012-2018 del cual se cuenta con registro (Tabla 18). El valor de -100, indica un vacío de información. Como el período de análisis es de 1991 a 2020, fue necesario rellenar con -100 los años 1991 a 2012 y 2018-2020. De igual manera,

el total anual se rellenó con -100 cuando se tenía al menos un vacío de datos mensuales. De la Tabla 18 se observa que solo se tienen dos años completos, lo cual es una limitante, por el reducido registro de niveles.

Tabla 18.

Caudales naturalizados mensuales descargados desde el lago de Coatepeque

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2012	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	1.62	1.44	-100.00
2013	2.27	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	4.64	4.59	4.91	5.09	4.08	3.91	1.59	-100.00
2014	1.31	1.91	2.24	2.03	3.65	6.34	3.28	3.83	5.20	3.67	3.04	2.13	3.22
2015	1.43	1.43	1.78	2.42	3.07	3.34	2.91	3.44	4.22	4.23	4.10	1.94	2.86
2016	1.87	1.06	1.69	2.09	2.49	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00
2017	1.32	1.74	1.74	1.52	2.39	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	3.34	1.53	1.10	-100.00
2018	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00	2.97	2.80	3.66	5.75	3.82	3.98	-100.00	-100.00

Los registros mensuales de precipitación y evapotranspiración fueron presentados previamente en este capítulo (Tablas 3-5, y Tabla 12). En el método TEMEZ se hace necesario obtener los valores ponderados de cada variable para cada mes del período de análisis (1991-2020). Para ello se ponderó igual que se expuso anteriormente, las series de precipitación por los factores de área de los polígonos de Thiessen, evapotranspiración no fue necesario ponderarla ya que solo se tomó los datos de una estación.

En las figuras 17-19, se muestran las series de precipitación para las estaciones A-18, A19 y A-21 ingresadas al modelo para ser utilizadas en la ponderación mensual; en la Figura 20, puede observarse la serie de evapotranspiración ingresada en el modelo para la estación A-18, mientras que en la Figura 21 se presenta la serie ingresada de salidas naturalizadas en el lago. Todas las series corresponden al período de análisis de 1991-2020.

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
Producto 4 Balance Hídrico de la cuenca del Lago de Coatepeque

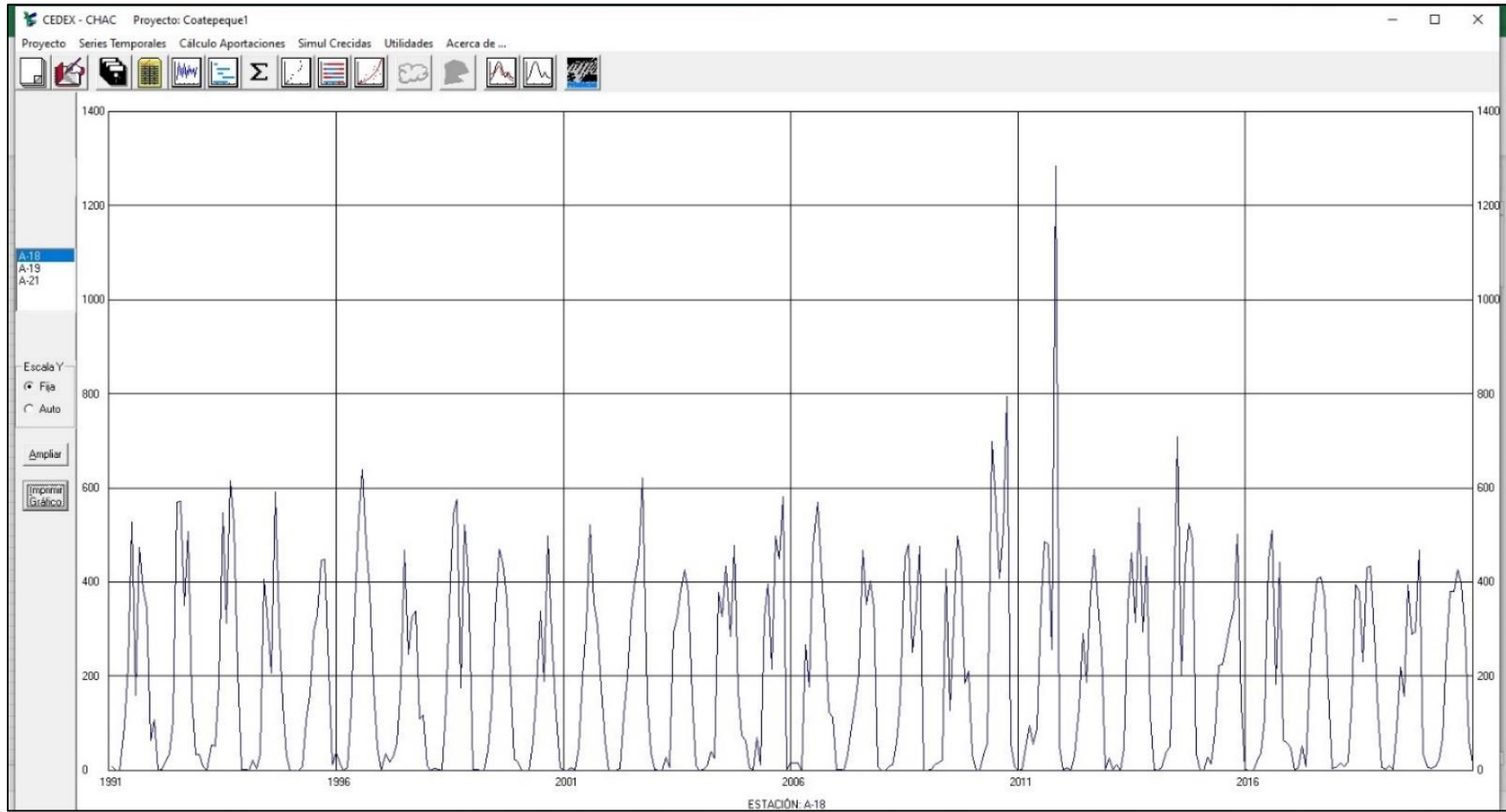


Figura 17. Serie de precipitación de la estación pluviométrica A-18, del período 1991-2020.

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
Producto 4 Balance Hídrico de la cuenca del Lago de Coatepeque

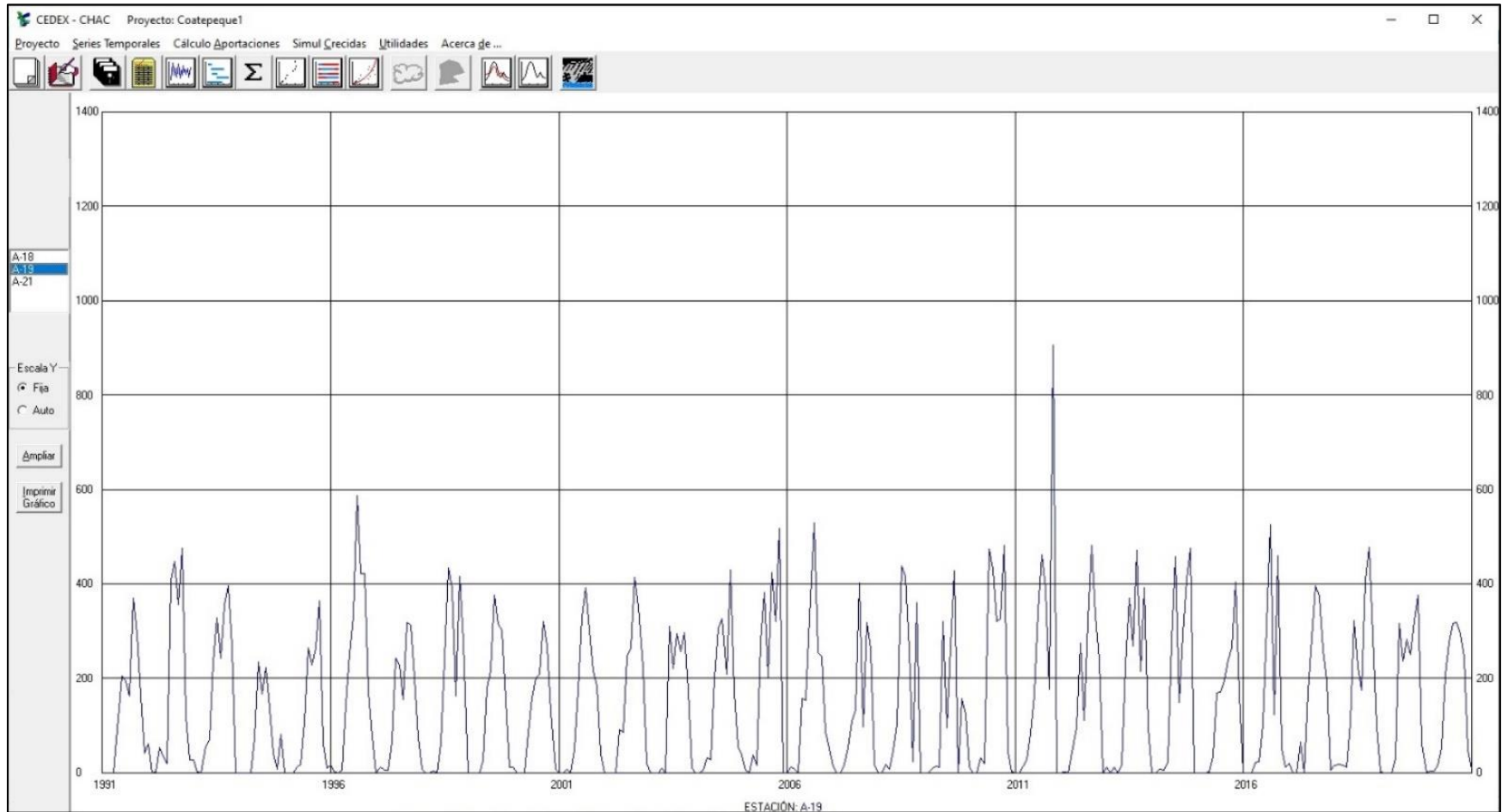


Figura 18. Serie de precipitación de la estación pluviométrica A-19, del período 1991-2020.

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
Producto 4 Balance Hídrico de la cuenca del Lago de Coatepeque

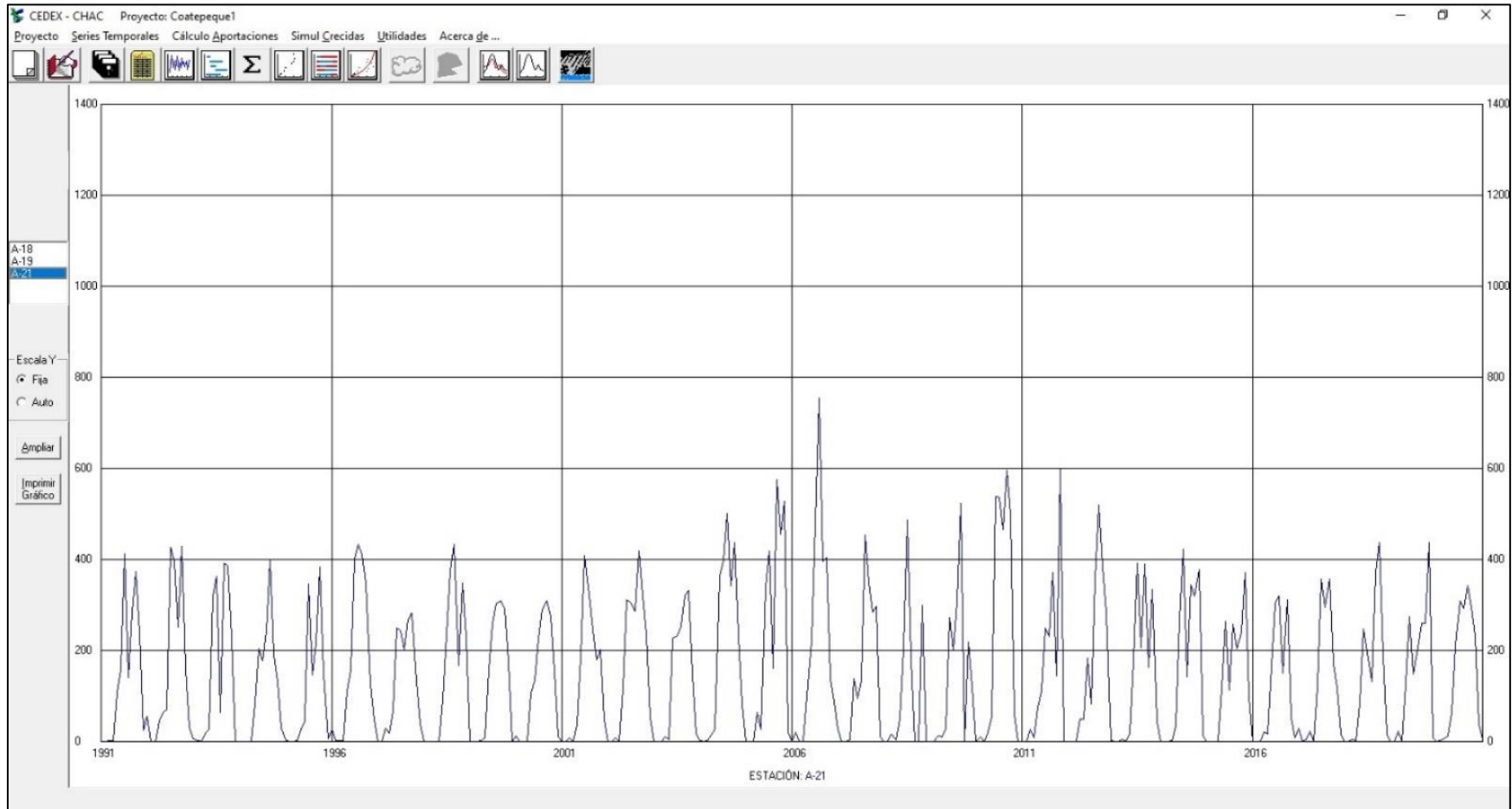


Figura 19. Serie de precipitación de la estación pluviométrica A-21, del período 1991-2020.

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
Producto 4 Balance Hídrico de la cuenca del Lago de Coatepeque

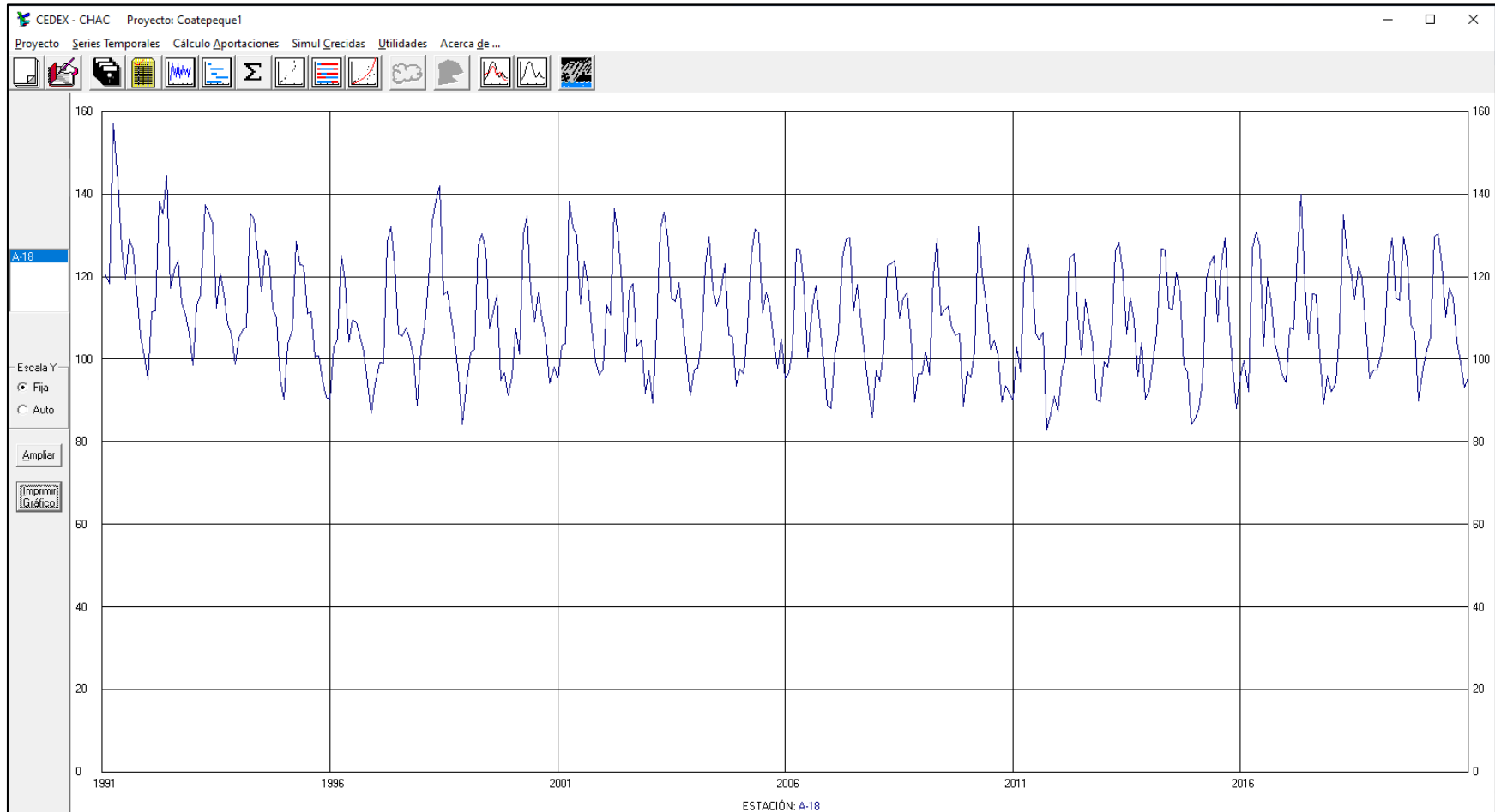


Figura 20. Serie de evapotranspiración potencial para la estación climatológica A-18, del período 1991-2020.

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
Producto 4 Balance Hídrico de la cuenca del Lago de Coatepeque

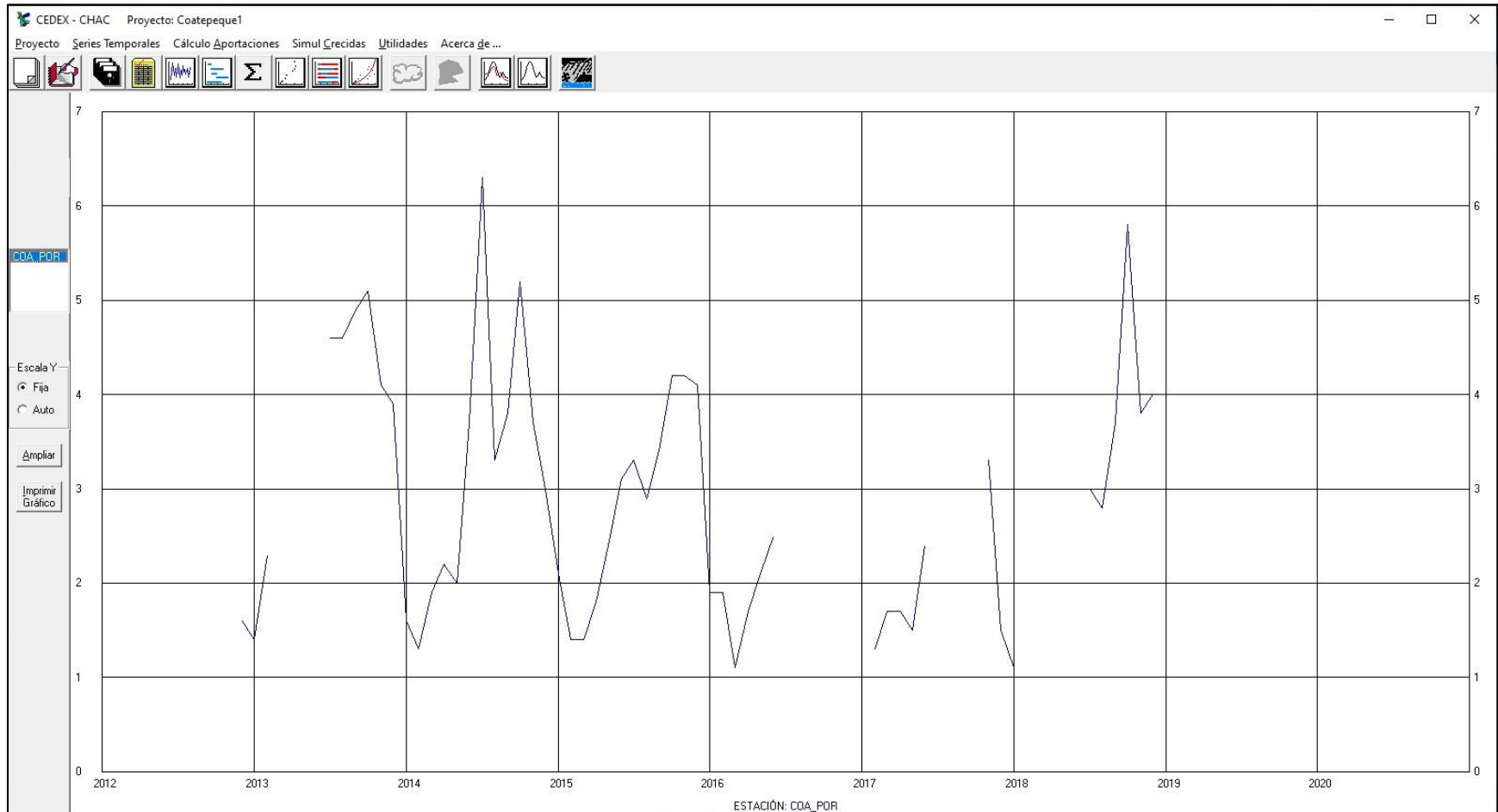


Figura 21. Caudales descargados por el lago de Coatepeque en el 2012-2018

2.2.6 Calibración del modelo para balance en condiciones actuales

La calibración es la etapa del proceso de modelización en la que se consigue que el modelo reproduzca el funcionamiento del sistema observado. Además, la calibración se utiliza para dar valores numéricos a aquellos parámetros sobre los que se dispone de pocos o ningún dato. El grado de ajuste entre los valores simulados por el modelo y los observados en la realidad se mide mediante la utilización de una función o criterio objetivo.

Los criterios seguidos para elegir el conjunto óptimo de parámetros han sido los siguientes:

- Visualización gráfica del año medio simulado y observado.
- Visualización gráfica de los ajustes año a año.
- Visualización gráfica de la correlación a nivel anual entre aportación histórica y simulada.
- Valor de funciones objetivo matemáticas de apoyo (errores medios relativos y cuadráticos).

Para el modelo hidrológico de la cuenca del lago de Coatepeque, la evaluación inicial del modelo indica que los valores asumidos inicialmente no son adecuados ya que el ajuste entre los caudales simulados y registrados no es óptimo resultando en un error medio de 0.479 (Figura 22), a partir del proceso de ajuste, se logró reducir este error medio a 0.0174 (Figura 23).

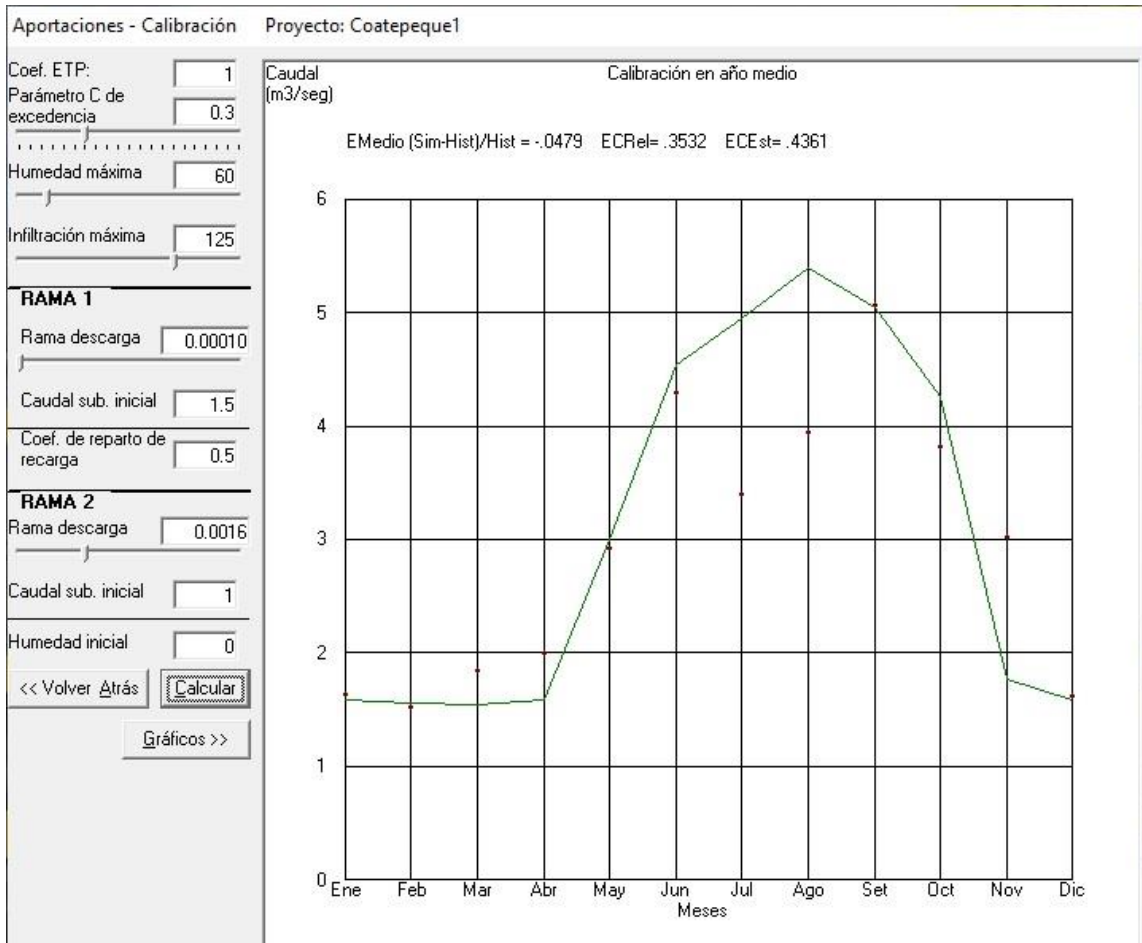


Figura 22. Valores iniciales de la calibración del modelo.

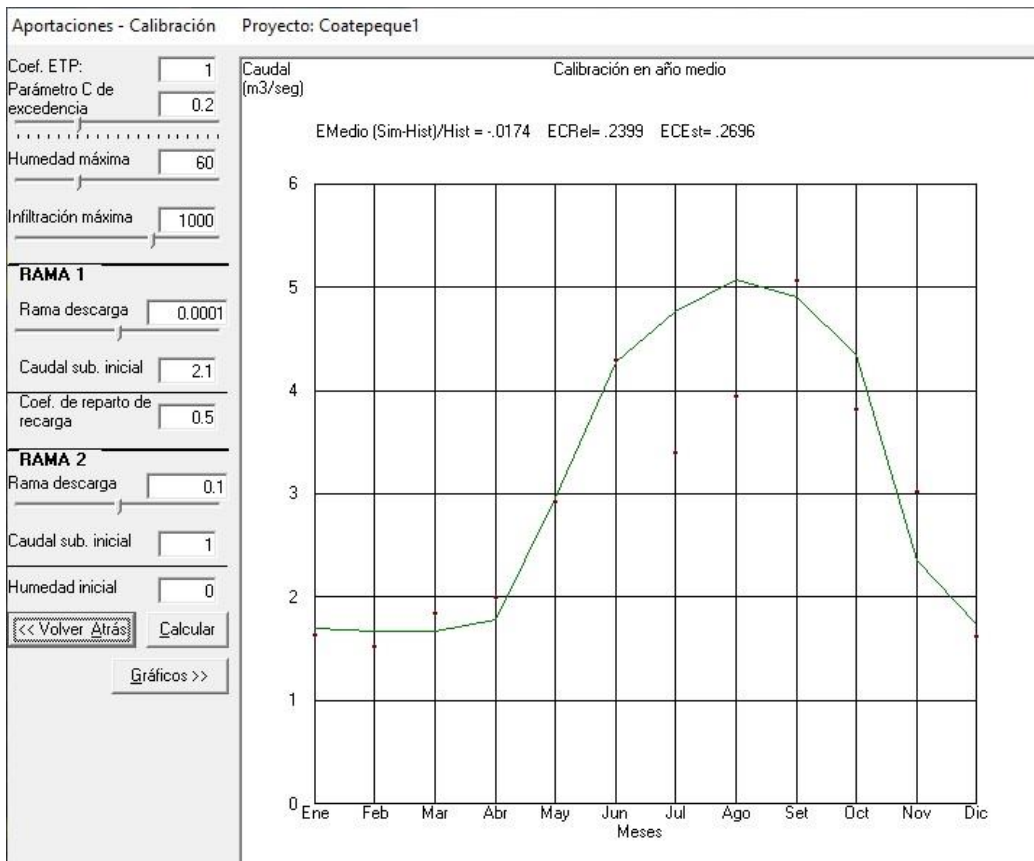


Figura 23. Calibración final del modelo.

En la calibración del modelo se logró un buen ajuste en los valores absolutos de los caudales totales, ya sea en volumen o en m^3/s , demostrado con el valor del error medio, el cual es de 1.74%; sin embargo, no se logró un buen ajuste a la forma y eso se deduce del gráfico, pero también de los valores de los errores relativo y cuadrático, con valores de 23.99% y 26.96%, respectivamente. Esto se da por la falta de datos suficientes, ya que en la serie de 30 años modelada, apenas se cuenta con dos años completos de caudales obtenidos del registro de niveles en el lago. La convergencia entre valores registrados y simulados puede apreciarse en la Figura 24.

En la Figura 22 y Figura 23, es posible observar que los valores de C, Hmáx y caudales iniciales son similares a los valores iniciales; sin embargo, el valor de Infiltración Máxima es muy alto comparado con el valor inicial. Este valor elevado de Imáx indica que los suelos son muy permeables, aumentando la recarga del acuífero, lo cual es consistente con lo expuesto en párrafos precedentes, en donde se comentó que la red de drenajes es pobre y la ausencia de flujo superficial en los drenajes de la cuenca, permitiendo que se suponga la presencia de un flujo subterráneo predominante en la cuenca, que a este nivel puede asociarse con al aporte al lago.

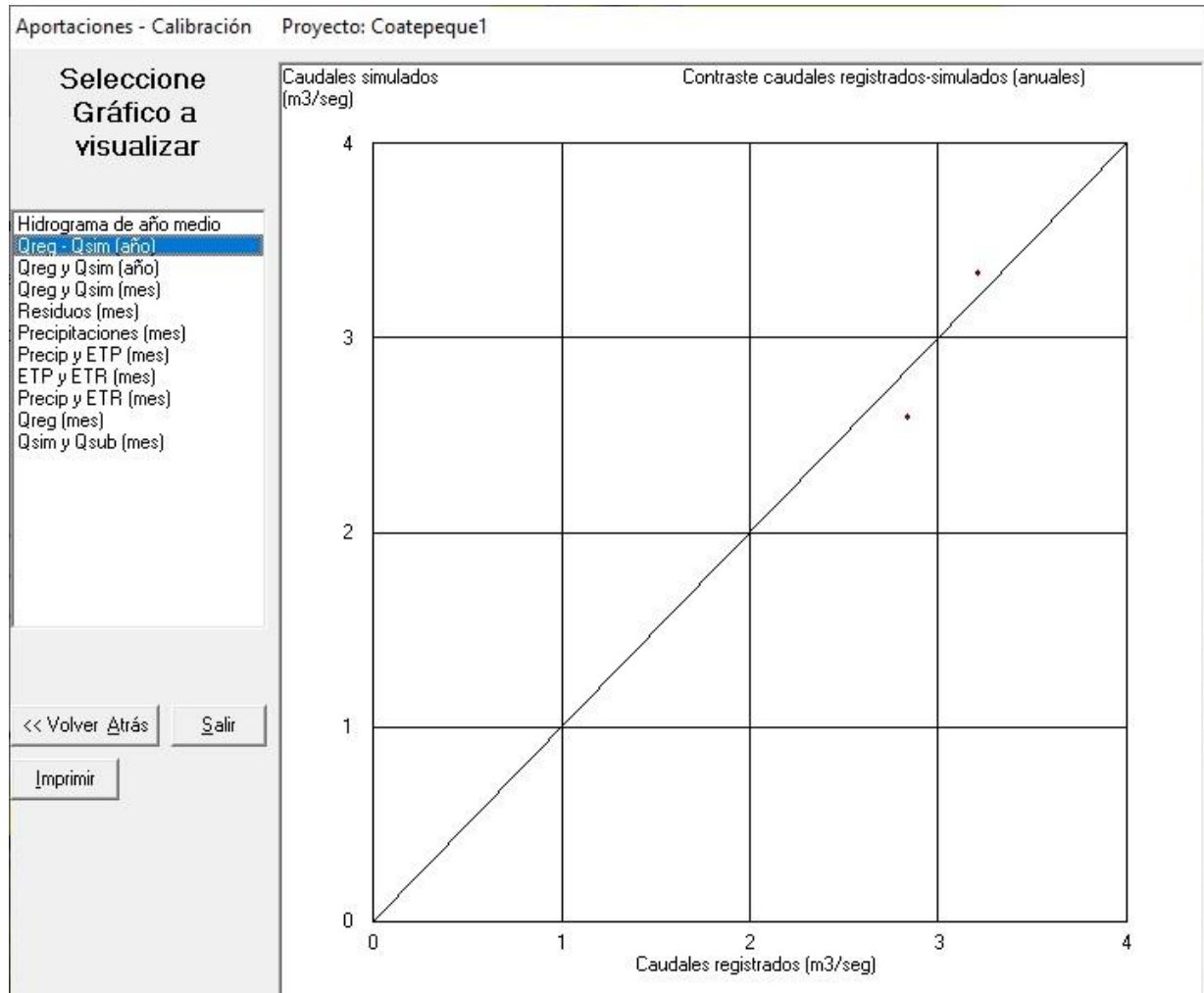


Figura 24. Caudales registrados y simulados anuales

El proceso de calibración es bastante largo, ya que se van variando los parámetros y calculando el error medio, relativo y cuadrático, hasta conseguir el mejor ajuste, el cual también se comprueba gráficamente. En la Figura 25 se puede ver que los caudales simulados en la calibración son muy similares a los calculados para el lago de Coatepeque. Por otra parte, en la Figura 26 se muestran los residuos mensuales, los cuales están distribuidos a lo largo del valor cero.

Una vez calibrado y validado el modelo de evaluación de recursos, se pasó a la simulación con los parámetros ajustados previamente, para diversos períodos y escenarios de cambio climático. La validación se realizó con la misma calibración, debido al reducido número de datos de caudales, solo dos años completos.

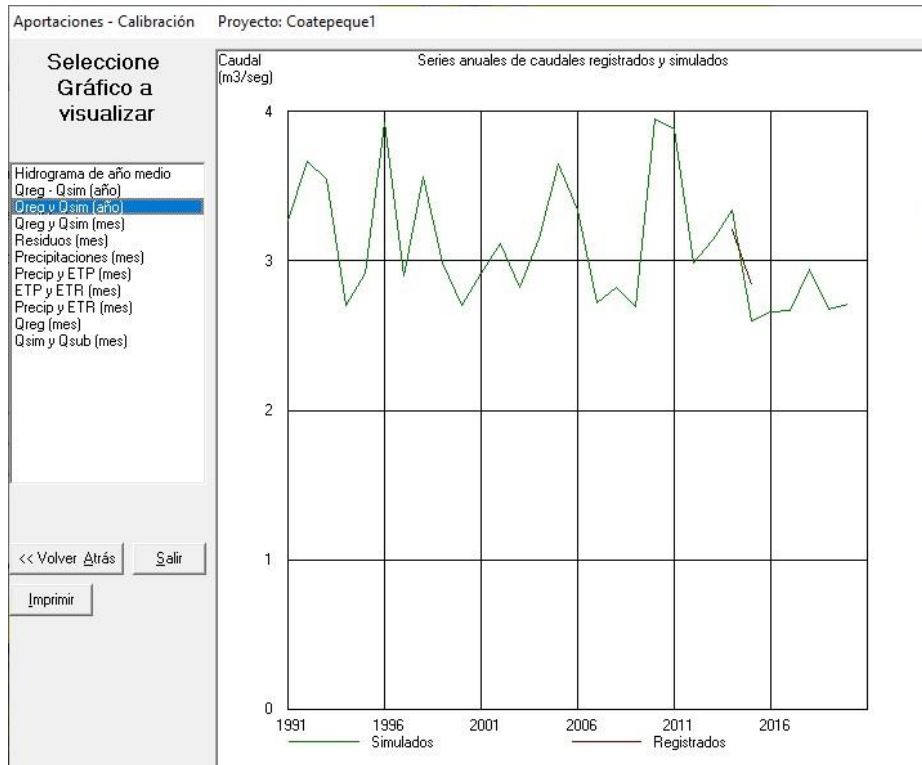


Figura 25. Series anuales de caudales simulados y registrados

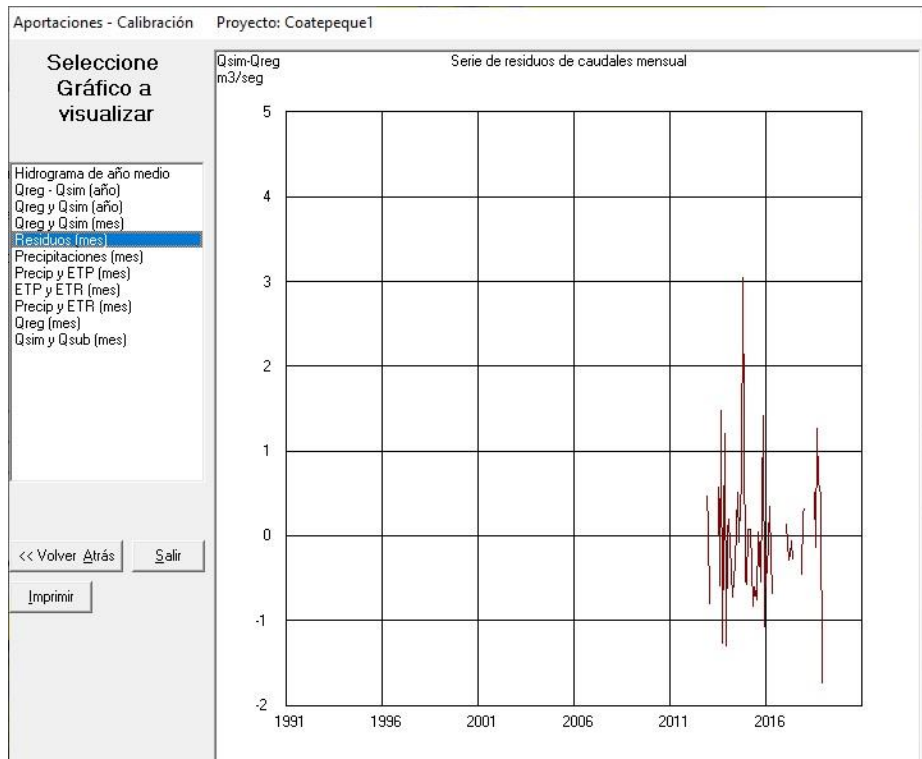


Figura 26 Residuos de los caudales mensuales
La Figura 27 muestra la relación entre precipitación y evapotranspiración potencial, indicando el comportamiento estable de la ETP y la alta variabilidad de la precipitación, que si tiene influencia en la cantidad de evapotranspiración real que puede salir de la cuenca. Asimismo, en la Figura 28 es posible observar que la salida por evapotranspiración en la cuenca, presenta una alta variabilidad correspondiendo con la cantidad de agua disponible provista a partir de la precipitación y teniendo como límite, la ETP.

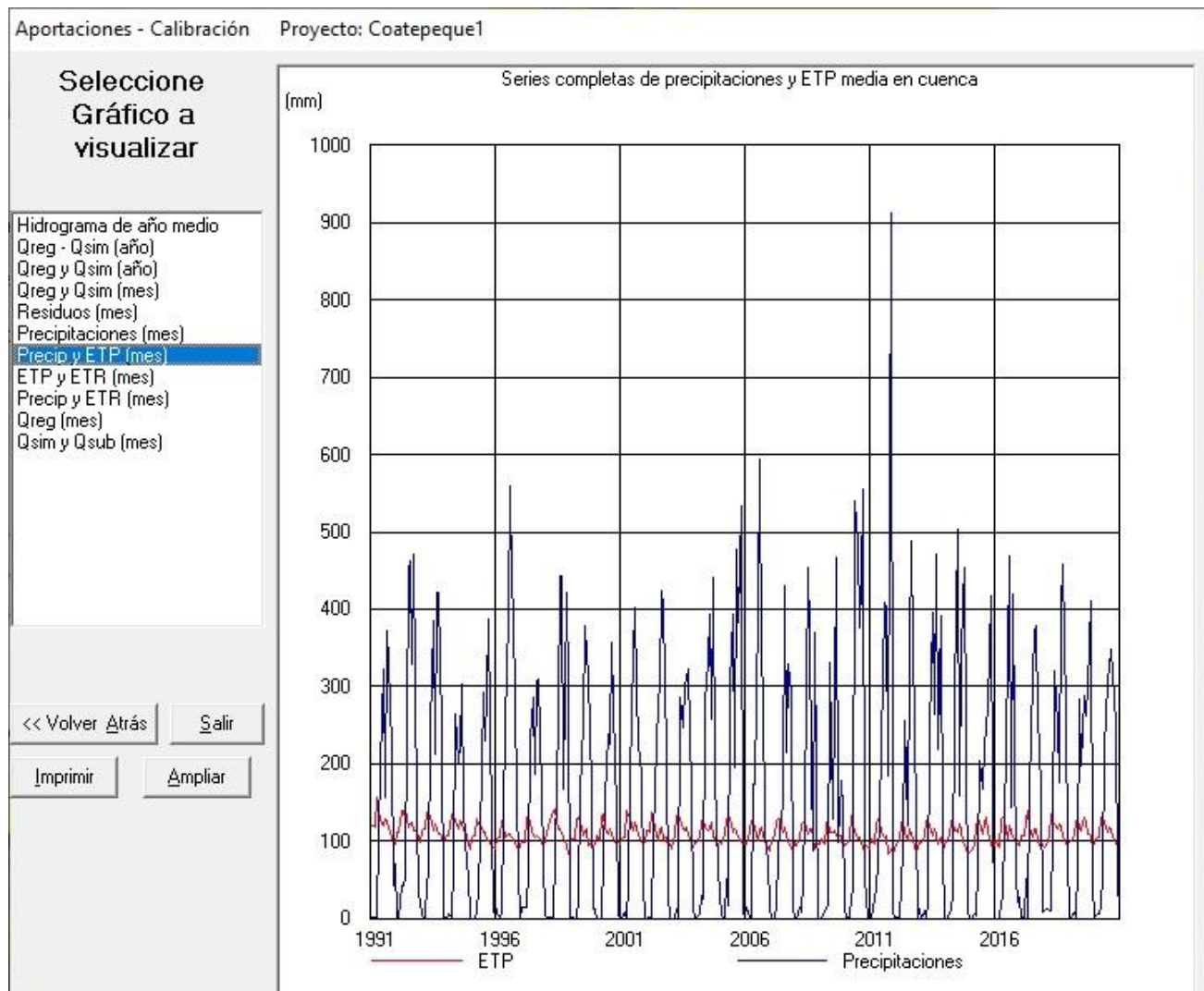


Figura 27 Series de P y ETP anuales para el período 1991-2020

Así, en los meses secos, se aprecia que la ETR es baja comparada con la ETP, mientras que en meses lluviosos, este valor sube considerablemente a partir del ingreso de humedad en el sistema (Figura 28)

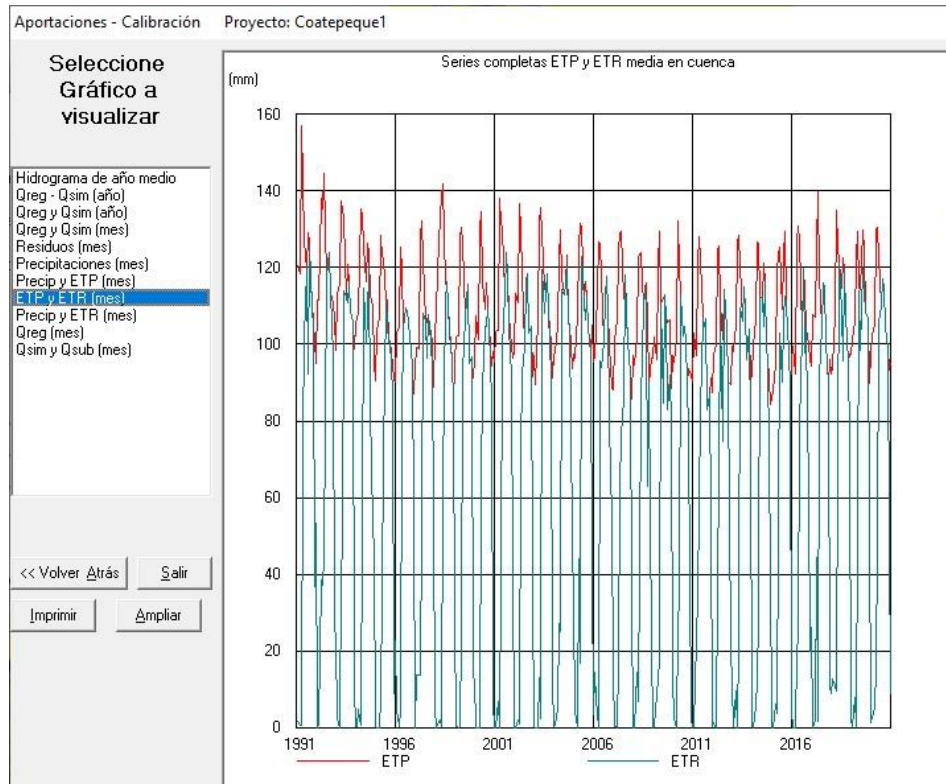


Figura 28 Series de ETP y ETR anuales para el período 1991-2020

La Figura 29 muestra las series simuladas de caudales totales y subterráneos, indicando que la componente de flujo subterráneo en la cuenca tiene una alta importancia, de esa forma puede apreciarse los valores de aporte subterráneo en la cuenca y que en menor proporción ocurren los aportes de flujo subperiférico. En las tablas 19 a 22, se muestran las series del período 1991-2020 de los parámetros Evapotranspiración Real, Volúmenes Subterráneos, Caudales Subterráneos, Caudales Totales, respectivamente.

En las tablas 18-22 se presentan los resultados mensuales, anuales y multianuales de evapotranspiración real, volumen subterráneo, caudal subterráneo y caudales totales que ocurren en la cuenca del lago de Coatepeque a partir de la modelación naturalizada realizada con el Modelo Témez. Los resultados indican que la evapotranspiración real anual naturalizada podría variar entre 651.4 mm y 829.3 mm, mientras que el flujo subterráneo para el período simulado varía entre 2.24 m³/s y el flujo total, entre 2.6 y 3.95 m³/s.

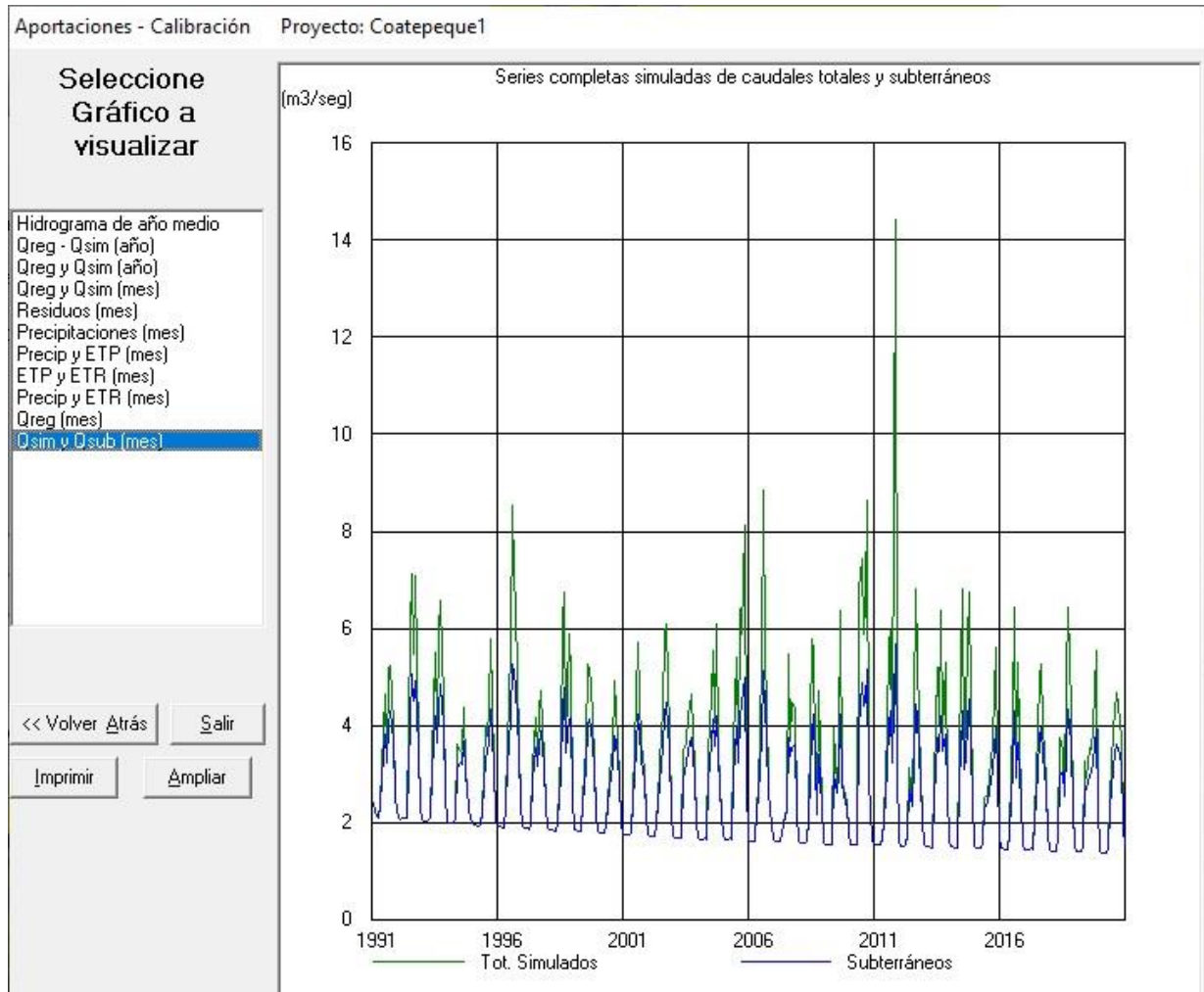


Figura 29 Series simuladas de caudales totales y subterráneos para el período 1991-2020

Tabla 19.

Evapotranspiración Real en mm, Cuenca Lago Coatepeque. Período 1991-2020.

TIPO	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
ERA	1991	1.7	0.5	0.5	75.8	101.9	119.5	92.3	126.8	116.7	103.6	36.7	53.2	829.3
ERA	1992	0.0	0.5	38.6	37.2	44.2	117.1	121.6	124.0	113.5	96.6	27.6	22.1	743.1
ERA	1993	2.6	0.0	40.5	46.8	113.8	112.4	110.7	115.9	108.6	106.0	10.3	0.2	767.8
ERA	1994	0.1	4.6	0.5	54.1	114.8	100.0	107.5	120.1	83.5	53.0	45.8	0.2	684.0
ERA	1995	0.0	0.0	7.8	35.5	71.5	111.1	105.5	100.6	100.8	87.4	8.7	22.5	651.4
ERA	1996	4.8	0.3	4.6	81.7	104.1	109.4	108.9	105.6	101.8	94.3	55.9	0.0	771.4
ERA	1997	13.6	13.6	13.5	52.1	108.1	106.1	96.4	107.6	104.9	94.3	55.4	5.4	771.0
ERA	1998	0.0	0.5	2.0	0.1	64.4	111.1	116.5	110.5	102.9	96.0	84.1	28.1	716.1
ERA	1999	0.3	0.0	0.3	23.9	93.2	106.7	111.4	115.7	94.9	96.6	13.4	12.7	669.0
ERA	2000	0.0	0.0	0.0	63.8	88.9	104.6	104.6	109.6	104.8	85.1	6.7	0.0	668.0
ERA	2001	0.0	6.7	0.0	39.9	99.1	113.4	123.8	118.0	104.4	91.8	39.8	0.0	736.9
ERA	2002	0.0	2.0	0.9	71.7	92.2	99.5	116.4	118.3	103.0	104.7	35.0	0.1	743.9
ERA	2003	0.0	0.0	12.9	2.1	119.5	108.1	113.9	118.5	108.5	92.0	11.5	0.3	687.3
ERA	2004	0.5	5.1	27.0	24.9	114.2	112.8	115.9	120.3	105.7	105.0	50.3	30.8	812.6
ERA	2005	4.3	0.0	44.0	16.9	122.8	111.3	106.5	112.3	104.2	97.8	40.1	3.2	763.2
ERA	2006	14.4	7.5	0.0	95.8	94.1	100.6	112.5	117.8	108.7	79.3	54.5	14.1	799.2
ERA	2007	0.1	0.0	17.0	62.5	76.1	85.7	118.2	107.8	100.6	92.5	31.8	0.0	692.2
ERA	2008	0.0	14.2	6.9	42.9	84.9	110.0	114.9	108.4	62.9	89.7	21.7	0.0	656.4
ERA	2009	0.1	8.9	12.7	17.3	110.5	84.7	112.9	107.5	83.1	92.0	78.9	12.9	721.5
ERA	2010	2.3	0.0	27.0	33.4	112.7	102.4	104.7	101.0	89.7	77.1	2.1	0.0	652.4
ERA	2011	0.2	23.1	34.3	58.1	82.9	106.6	104.6	106.6	82.8	86.6	56.3	0.1	742.2
ERA	2012	1.3	0.0	37.2	66.9	108.1	74.8	114.4	109.3	103.8	90.2	21.3	11.0	738.2
ERA	2013	0.1	9.5	0.0	22.7	109.3	106.0	115.0	109.2	95.9	104.0	77.4	0.3	749.3
ERA	2014	0.0	5.6	12.0	29.1	112.4	111.9	104.8	116.2	98.6	96.9	42.2	0.0	729.7
ERA	2015	0.0	6.2	3.5	52.6	103.0	90.2	107.1	112.7	110.4	98.1	88.1	4.8	776.6
ERA	2016	0.0	0.0	20.0	23.3	78.4	103.0	119.7	97.9	104.0	60.9	19.9	25.9	653.0
ERA	2017	0.0	2.0	44.2	1.5	91.4	104.6	115.9	115.5	100.5	89.2	10.7	8.9	684.4
ERA	2018	12.7	10.8	9.6	73.9	121.3	108.9	95.7	119.5	107.5	95.3	75.1	2.2	832.5
ERA	2019	0.2	7.7	0.2	53.9	113.8	98.4	119.9	114.1	108.4	106.7	53.6	1.2	778.1
ERA	2020	2.5	4.9	15.3	48.7	105.7	110.2	117.1	114.9	104.3	99.2	50.4	8.5	781.7
ERA	MEDIO	2.1	4.5	14.4	43.6	98.6	104.7	111.0	112.7	100.6	92.1	40.2	9.0	733.4

ERA: Código del software para la evapotranspiración real.

Tabla 20.

Volumen subterráneo en Hm³ en la cuenca del lago de Coatepeque Período 1991-2020.

TIPO	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
VMA	1991	1809.0	1803.6	1798.1	1794.1	1792.1	1792.9	1788.4	1790.6	1790.8	1788.2	1781.9	1777.2	1792.2
VMA	1992	1771.7	1766.4	1761.3	1756.1	1751.1	1755.9	1758.9	1758.6	1762.3	1756.9	1751.0	1745.8	1758.0
VMA	1993	1740.5	1735.3	1730.3	1725.4	1725.1	1727.5	1724.6	1727.9	1730.3	1728.2	1721.7	1716.5	1727.8
VMA	1994	1711.3	1706.2	1701.1	1696.5	1696.8	1694.3	1692.7	1693.0	1688.7	1683.7	1678.9	1673.7	1693.1
VMA	1995	1668.7	1663.7	1658.7	1653.9	1650.2	1651.4	1649.7	1650.1	1652.7	1647.6	1642.1	1637.2	1652.2
VMA	1996	1632.3	1627.4	1622.5	1619.7	1619.7	1622.6	1628.4	1630.8	1633.0	1629.2	1624.1	1619.0	1625.7
VMA	1997	1614.1	1609.3	1604.5	1600.2	1599.9	1600.3	1597.7	1598.8	1599.5	1596.1	1591.4	1586.4	1599.8
VMA	1998	1581.6	1576.9	1572.2	1567.5	1563.6	1564.3	1568.3	1571.6	1567.8	1572.0	1572.2	1565.7	1570.3
VMA	1999	1561.0	1556.3	1551.6	1547.0	1545.1	1545.3	1547.9	1549.0	1549.9	1546.9	1541.4	1536.8	1548.2
VMA	2000	1532.2	1527.6	1523.0	1519.3	1517.2	1517.0	1515.8	1518.2	1517.9	1514.4	1509.2	1504.6	1518.0
VMA	2001	1500.1	1495.6	1491.1	1486.9	1485.6	1488.1	1491.0	1491.0	1489.6	1487.6	1482.5	1478.0	1488.9
VMA	2002	1473.6	1469.1	1464.7	1461.6	1459.8	1461.0	1461.8	1465.5	1468.3	1466.2	1460.8	1456.3	1464.1
VMA	2003	1451.9	1447.6	1443.3	1438.9	1440.6	1440.1	1441.2	1442.1	1443.4	1440.4	1435.3	1430.9	1441.3
VMA	2004	1426.7	1422.4	1418.2	1414.0	1415.7	1417.5	1420.5	1419.6	1424.1	1421.3	1416.7	1412.3	1419.1
VMA	2005	1408.1	1403.9	1400.0	1395.7	1398.0	1401.2	1398.8	1404.5	1406.8	1412.9	1405.7	1401.4	1403.1
VMA	2006	1397.2	1393.0	1388.8	1387.7	1385.9	1390.3	1397.4	1397.7	1398.5	1394.3	1390.4	1386.1	1392.3
VMA	2007	1381.9	1377.8	1373.6	1370.3	1367.5	1365.6	1370.6	1368.8	1371.0	1371.9	1366.1	1362.0	1370.6
VMA	2008	1357.9	1353.8	1349.8	1346.0	1344.0	1349.9	1352.1	1349.8	1345.8	1350.1	1344.1	1340.0	1348.6
VMA	2009	1336.0	1332.0	1328.0	1324.0	1327.4	1323.8	1325.5	1330.7	1325.7	1324.6	1322.4	1317.8	1326.5
VMA	2010	1313.9	1309.9	1306.1	1302.3	1310.4	1315.3	1317.6	1321.9	1328.7	1322.1	1317.9	1313.9	1315.0
VMA	2011	1310.0	1306.1	1302.3	1299.1	1297.0	1299.8	1303.7	1307.2	1305.1	1318.8	1310.6	1306.4	1305.5
VMA	2012	1302.5	1298.6	1294.9	1292.0	1293.3	1290.0	1293.3	1298.9	1300.7	1300.7	1295.3	1291.4	1296.0
VMA	2013	1287.5	1283.7	1279.8	1276.0	1277.1	1281.2	1281.1	1286.6	1285.1	1289.2	1284.4	1280.2	1282.7
VMA	2014	1276.3	1272.5	1268.7	1265.0	1267.4	1273.6	1270.1	1272.9	1277.0	1281.8	1275.3	1271.4	1272.7
VMA	2015	1267.6	1263.8	1260.0	1256.7	1256.7	1255.1	1255.1	1255.1	1256.1	1260.6	1257.4	1252.9	1258.1
VMA	2016	1249.1	1245.4	1241.7	1238.0	1235.9	1239.5	1244.8	1241.1	1246.3	1240.8	1236.9	1233.2	1241.0
VMA	2017	1229.5	1225.8	1222.4	1218.7	1217.9	1220.6	1223.8	1226.8	1227.0	1225.3	1220.8	1217.1	1223.0
VMA	2018	1213.4	1209.8	1206.2	1204.0	1207.0	1207.1	1205.3	1210.0	1214.9	1215.0	1210.9	1206.9	1209.2
VMA	2019	1203.3	1199.7	1196.1	1193.0	1195.5	1194.3	1195.8	1196.2	1198.0	1202.3	1196.7	1193.0	1197.0
VMA	2020	1189.4	1185.8	1182.3	1179.1	1179.8	1182.1	1184.2	1186.7	1188.6	1188.9	1184.3	1180.6	1184.3
VMA	MEDIO	1439.9	1435.6	1431.4	1427.6	1427.5	1428.9	1430.2	1432.1	1433.1	1432.6	1427.6	1423.2	1430.8

Tabla 21.

Caudales Subterráneos, en m³/s, Cuenca Lago Coatepeque. Período 1991-2020.

TIPO	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
QSI	1991	2.41	2.11	2.09	2.34	2.92	3.81	3.23	3.97	4.29	3.68	2.55	2.24	2.97
QSI	1992	2.12	2.05	2.08	2.09	2.1	4.08	5.05	4.51	4.91	3.51	2.31	2.05	3.07
QSI	1993	2.02	2.01	2.05	2.09	3.01	4.18	3.65	4.33	4.83	4.01	2.53	2.02	3.06
QSI	1994	1.98	1.98	1.97	2.07	3.11	3.22	3.2	3.66	3.01	2.3	2.1	1.98	2.55
QSI	1995	1.94	1.93	1.92	1.95	2.19	3.3	3.43	3.66	4.32	3.14	2.12	1.92	2.65
QSI	1996	1.9	1.89	1.88	2.28	3.12	4.15	5.25	5.13	4.77	3.46	2.35	1.95	3.18
QSI	1997	1.87	1.87	1.86	1.95	2.83	3.52	3.15	3.56	3.88	3.14	2.32	1.93	2.66
QSI	1998	1.84	1.83	1.82	1.82	1.98	3	4.31	4.79	3.44	4.12	4.15	2.5	2.97
QSI	1999	1.84	1.81	1.8	1.8	2.35	3.12	3.99	4.12	3.99	3.17	2.13	1.8	2.66
QSI	2000	1.78	1.77	1.77	1.93	2.36	2.98	3.11	3.79	3.72	2.83	2	1.76	2.48
QSI	2001	1.74	1.73	1.73	1.77	2.39	3.55	4.24	3.89	3.29	2.89	2.12	1.75	2.59
QSI	2002	1.71	1.7	1.7	1.94	2.38	3.2	3.58	4.23	4.48	3.49	2.16	1.72	2.69
QSI	2003	1.68	1.68	1.67	1.67	2.87	3.22	3.48	3.64	3.75	2.96	1.97	1.67	2.52
QSI	2004	1.65	1.65	1.66	1.65	2.84	3.65	4.12	3.58	4.2	3.33	2.14	1.73	2.68
QSI	2005	1.65	1.63	1.68	1.65	2.91	3.98	3.21	4.18	4.42	4.99	2.78	1.68	2.9
QSI	2006	1.62	1.61	1.61	2.21	2.5	3.74	5.13	4.38	3.72	2.59	1.95	1.69	2.73
QSI	2007	1.61	1.6	1.59	1.75	1.95	2.22	3.75	3.36	3.52	3.62	2.22	1.61	2.4
QSI	2008	1.58	1.57	1.56	1.62	2.01	3.82	4.21	3.15	2.15	3.4	2.33	1.59	2.42
QSI	2009	1.55	1.54	1.54	1.54	3.02	2.6	2.98	4.23	2.8	2.38	2.35	1.77	2.36
QSI	2010	1.53	1.52	1.53	1.54	3.95	4.89	4.41	4.47	5.14	2.86	1.64	1.53	2.92
QSI	2011	1.52	1.52	1.54	1.65	1.97	3.1	4.05	4.3	3.23	5.67	3.19	1.6	2.78
QSI	2012	1.51	1.51	1.54	1.72	2.67	2.34	3.21	4.42	4.2	3.48	2.07	1.52	2.52
QSI	2013	1.49	1.49	1.48	1.48	2.47	3.73	3.46	4.2	3.45	3.81	2.58	1.64	2.61
QSI	2014	1.49	1.48	1.47	1.48	2.73	4.31	3.1	3.28	4.07	4.54	2.48	1.52	2.66
QSI	2015	1.47	1.47	1.46	1.56	2.27	2.4	2.63	2.84	3.09	3.94	2.91	1.75	2.32
QSI	2016	1.46	1.44	1.44	1.44	1.76	3.12	4.28	2.93	3.64	2.4	1.52	1.45	2.24
QSI	2017	1.43	1.42	1.48	1.44	1.98	3.07	3.75	3.94	3.41	2.67	1.75	1.43	2.31
QSI	2018	1.41	1.4	1.4	1.67	2.91	3.07	2.52	3.51	4.34	3.63	2.23	1.53	2.47
QSI	2019	1.4	1.39	1.39	1.49	2.66	2.68	2.95	3.02	3.22	3.9	2.32	1.45	2.32
QSI	2020	1.38	1.37	1.37	1.45	2.26	3.11	3.43	3.61	3.55	3.19	1.98	1.43	2.34
QSI	MEDIO	1.69	1.67	1.67	1.77	2.55	3.37	3.7	3.89	3.83	3.44	2.31	1.74	2.63

Tabla 22.

Caudales Totales, en m³/s, Cuenca Lago Coatepeque. Período 1991-2020.

TIPO	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
QSI	1991	2.41	2.11	2.09	2.37	3.13	4.64	3.32	5.14	5.22	4.01	2.55	2.24	3.27
QSI	1992	2.12	2.05	2.08	2.09	2.1	5.97	7.13	5.45	7.09	3.6	2.31	2.05	3.67
QSI	1993	2.02	2.01	2.05	2.09	3.38	5.51	3.93	5.97	6.58	4.49	2.53	2.02	3.55
QSI	1994	1.98	1.98	1.97	2.08	3.59	3.45	3.49	4.35	3.08	2.31	2.1	1.98	2.7
QSI	1995	1.94	1.93	1.92	1.95	2.21	3.97	3.79	4.36	5.77	3.2	2.12	1.92	2.92
QSI	1996	1.9	1.89	1.88	2.34	3.58	5.56	8.52	7.11	6.42	3.64	2.36	1.95	3.93
QSI	1997	1.87	1.87	1.86	1.95	3.16	4.16	3.35	4.34	4.71	3.29	2.33	1.93	2.9
QSI	1998	1.84	1.83	1.82	1.82	1.99	3.49	6.15	6.75	3.61	5.87	5.02	2.5	3.56
QSI	1999	1.84	1.81	1.8	1.8	2.46	3.59	5.27	5.15	4.89	3.35	2.13	1.8	2.99
QSI	2000	1.78	1.77	1.77	1.94	2.47	3.37	3.42	4.91	4.33	2.92	2	1.76	2.7
QSI	2001	1.74	1.73	1.73	1.77	2.54	4.56	5.7	4.62	3.64	3.09	2.12	1.75	2.92
QSI	2002	1.71	1.7	1.7	1.96	2.51	3.84	4.31	5.9	6.1	3.82	2.16	1.72	3.12
QSI	2003	1.68	1.68	1.67	1.67	3.45	3.64	4.21	4.41	4.63	3.1	1.97	1.67	2.82
QSI	2004	1.65	1.65	1.66	1.65	3.42	4.59	5.54	4.07	6.08	3.55	2.15	1.73	3.15
QSI	2005	1.65	1.63	1.68	1.65	3.6	5.39	3.44	6.38	5.87	8.11	2.78	1.68	3.65
QSI	2006	1.62	1.61	1.61	2.35	2.65	5.25	8.84	5.39	4.5	2.63	1.96	1.69	3.34
QSI	2007	1.61	1.6	1.59	1.76	1.98	2.31	5.45	3.67	4.46	4.38	2.22	1.61	2.72
QSI	2008	1.58	1.57	1.56	1.62	2.08	5.78	5.52	3.38	2.16	4.72	2.33	1.59	2.82
QSI	2009	1.55	1.54	1.54	1.54	3.95	2.66	3.6	6.35	2.83	2.55	2.44	1.77	2.69
QSI	2010	1.53	1.52	1.53	1.54	6.82	7.44	5.87	6.5	8.65	2.86	1.64	1.53	3.95
QSI	2011	1.52	1.52	1.54	1.66	2.03	3.94	5.68	5.96	3.5	14.42	3.19	1.6	3.88
QSI	2012	1.51	1.51	1.54	1.74	3.13	2.39	4.19	6.81	5.41	4.05	2.07	1.52	2.99
QSI	2013	1.49	1.49	1.48	1.48	2.85	5.18	4.01	6.37	3.83	5.3	2.61	1.64	3.14
QSI	2014	1.49	1.48	1.47	1.48	3.38	6.81	3.23	4.22	5.74	6.75	2.48	1.52	3.34
QSI	2015	1.47	1.47	1.46	1.57	2.5	2.54	2.94	3.22	3.66	5.62	3.03	1.75	2.6
QSI	2016	1.46	1.44	1.44	1.44	1.8	4.14	6.44	3.03	5.31	2.4	1.52	1.45	2.66
QSI	2017	1.43	1.42	1.48	1.44	2.11	3.89	5.01	5.26	3.98	2.85	1.75	1.43	2.67
QSI	2018	1.41	1.4	1.4	1.7	3.73	3.51	2.67	4.97	6.43	4.28	2.25	1.53	2.94
QSI	2019	1.4	1.39	1.39	1.49	3.27	2.9	3.54	3.49	3.95	5.52	2.32	1.45	2.68
QSI	2020	1.38	1.37	1.37	1.45	2.54	3.88	4.31	4.66	4.44	3.7	1.98	1.43	2.71
QSI	MEDIO	1.69	1.67	1.67	1.78	2.95	4.28	4.76	5.07	4.9	4.35	2.35	1.74	3.1

2.2.7 Caudales en régimen alterado

Fue necesario naturalizar los caudales para la modelación hidrológica en CHAC, por lo que es necesario devolver los caudales al régimen alterado. En la naturalización de caudales se restaron las descargas al lago, básicamente se consideró el retorno del 50% del consumo a través de bombas que extraen directamente agua del lago, ya que los pozos de algunos sistemas comunitarios, extraen el agua de la cuenca, hacia comunidades fuera de los límites de la cuenca del lago de Coatepeque. Por otra parte, también fue necesario sumar lo que se le extrae, básicamente todo el bombeo, ya sea directamente del lago, como de los pozos. También se tomó en cuenta la reducción del bombeo para riego de jardines de las quintas recreativas, en época de invierno.

La devolución al régimen alterado solo se realiza para la serie con datos de caudales registrados (niveles registrados), es decir entre 2012 y 2018, que corresponde al período en el cual se realizó la naturalización de caudales, ya que se contaba con los datos de niveles.

En las Tabla 23 se muestran las series de datos de extracciones y retornos mensuales, tanto en volúmenes como en caudales, considerando el número de días por cada mes.

Tabla 23.

Series de extracciones y retornos mensuales en la Cuenca Coatepeque. Período 2012-2018.

Día/Mes/año	V extraído, m3 al final del mes	Q extraído, m3/s	V retorno, m3 al final del mes	Retornos, m3/s
31/1/2012	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
29/2/2012	171,047.91	0.0707	50,666.85	0.0209
31/3/2012	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
30/4/2012	171,047.91	0.0660	50,666.85	0.0195
31/5/2012	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/6/2012	140,647.80	0.0543	35,466.80	0.0137
31/7/2012	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
31/8/2012	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/9/2012	140,647.80	0.0543	35,466.80	0.0137
31/10/2012	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/11/2012	171,047.91	0.0660	50,666.85	0.0195
31/12/2012	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
31/1/2013	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
28/2/2013	171,047.91	0.0707	50,666.85	0.0209
31/3/2013	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
30/4/2013	171,047.91	0.0660	50,666.85	0.0195

Día/Mes/año	V extraído, m3 al final del mes	Q extraído, m3/s	V retorno, m3 al final del mes	Retornos, m3/s
31/5/2013	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/6/2013	140,647.80	0.0543	35,466.80	0.0137
31/7/2013	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
31/8/2013	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/9/2013	140,647.80	0.0543	35,466.80	0.0137
31/10/2013	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/11/2013	171,047.91	0.0660	50,666.85	0.0195
31/12/2013	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
31/1/2014	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
28/2/2014	171,047.91	0.0707	50,666.85	0.0209
31/3/2014	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
30/4/2014	171,047.91	0.0660	50,666.85	0.0195
31/5/2014	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/6/2014	140,647.80	0.0543	35,466.80	0.0137
31/7/2014	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
31/8/2014	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/9/2014	140,647.80	0.0543	35,466.80	0.0137
31/10/2014	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/11/2014	171,047.91	0.0660	50,666.85	0.0195
31/12/2014	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
31/1/2015	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
28/2/2015	171,047.91	0.0707	50,666.85	0.0209
31/3/2015	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
30/4/2015	171,047.91	0.0660	50,666.85	0.0195
31/5/2015	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/6/2015	140,647.80	0.0543	35,466.80	0.0137
31/7/2015	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
31/8/2015	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/9/2015	140,647.80	0.0543	35,466.80	0.0137
31/10/2015	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/11/2015	171,047.91	0.0660	50,666.85	0.0195
31/12/2015	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
31/1/2016	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
29/2/2016	171,047.91	0.0707	50,666.85	0.0209
31/3/2016	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
30/4/2016	171,047.91	0.0660	50,666.85	0.0195
31/5/2016	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/6/2016	140,647.80	0.0543	35,466.80	0.0137

Día/Mes/año	V extraído, m3 al final del mes	Q extraído, m3/s	V retorno, m3 al final del mes	Retornos, m3/s
31/7/2016	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
31/8/2016	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/9/2016	140,647.80	0.0543	35,466.80	0.0137
31/10/2016	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/11/2016	171,047.91	0.0660	50,666.85	0.0195
31/12/2016	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
31/1/2017	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
28/2/2017	171,047.91	0.0707	50,666.85	0.0209
31/3/2017	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
30/4/2017	171,047.91	0.0660	50,666.85	0.0195
31/5/2017	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/6/2017	140,647.80	0.0543	35,466.80	0.0137
31/7/2017	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
31/8/2017	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/9/2017	140,647.80	0.0543	35,466.80	0.0137
31/10/2017	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/11/2017	171,047.91	0.0660	50,666.85	0.0195
31/12/2017	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
31/1/2018	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
28/2/2018	171,047.91	0.0707	50,666.85	0.0209
31/3/2018	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189
30/4/2018	171,047.91	0.0660	50,666.85	0.0195
31/5/2018	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/6/2018	140,647.80	0.0543	35,466.80	0.0137
31/7/2018	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
31/8/2018	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/9/2018	140,647.80	0.0543	35,466.80	0.0137
31/10/2018	140,647.80	0.0525	35,466.80	0.0132
30/11/2018	171,047.91	0.0660	50,666.85	0.0195
31/12/2018	171,047.91	0.0639	50,666.85	0.0189

En las tablas 24-27, se muestran los caudales simulados, extraídos, retornos y caudales alterados, es decir, el sistema sometido a presiones tal y como se encuentra en condiciones actuales. A partir de la desnaturalización de estos caudales, se elaboró la gráfica de caudales naturalizados y alterados comparados (Figura 30). Esta gráfica refleja que el efecto de las presiones en los caudales totales para el período analizado, es muy pequeño. Esta condición obedece principalmente al efecto del retorno y no se aprecia un cambio sensible.

Tabla 24.

Caudales simulados, m³/s, del período 2012-2018.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2,012	1.5100	1.5100	1.5400	1.7400	3.1300	2.3900	4.1900	6.8100	5.4100	4.0500	2.0700	1.5200	2.9900
2,013	1.4900	1.4900	1.4800	1.4800	2.8500	5.1800	4.0100	6.3700	3.8300	5.3000	2.6100	1.6400	3.1400
2,014	1.4900	1.4800	1.4700	1.4800	3.3800	6.8100	3.2300	4.2200	5.7400	6.7500	2.4800	1.5200	3.3400
2,015	1.4700	1.4700	1.4600	1.5700	2.5000	2.5400	2.9400	3.2200	3.6600	5.6200	3.0300	1.7500	2.6000
2,016	1.4600	1.4400	1.4400	1.4400	1.8000	4.1400	6.4400	3.0300	5.3100	2.4000	1.5200	1.4500	2.6600
2,017	1.4300	1.4200	1.4800	1.4400	2.1100	3.8900	5.0100	5.2600	3.9800	2.8500	1.7500	1.4300	2.6700
2,018	1.4100	1.4000	1.4000	1.7000	3.7300	3.5100	2.6700	4.9700	6.4300	4.2800	2.2500	1.5300	2.9400
Prom.	1.4657	1.4586	1.4671	1.5500	2.7857	4.0657	4.0700	4.8400	4.9086	4.4643	2.2443	1.5486	2.9057

Tabla 25.

Caudales extraídos en m³/s, del período 2012-2018.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2,012	0.0639	0.0707	0.0639	0.0660	0.0525	0.0543	0.0525	0.0525	0.0543	0.0525	0.0660	0.0639	0.0594
2,013	0.0639	0.0707	0.0639	0.0660	0.0525	0.0543	0.0525	0.0525	0.0543	0.0525	0.0660	0.0639	0.0594
2,014	0.0639	0.0707	0.0639	0.0660	0.0525	0.0543	0.0525	0.0525	0.0543	0.0525	0.0660	0.0639	0.0594
2,015	0.0639	0.0707	0.0639	0.0660	0.0525	0.0543	0.0525	0.0525	0.0543	0.0525	0.0660	0.0639	0.0594
2,016	0.0639	0.0707	0.0639	0.0660	0.0525	0.0543	0.0525	0.0525	0.0543	0.0525	0.0660	0.0639	0.0594
2,017	0.0639	0.0707	0.0639	0.0660	0.0525	0.0543	0.0525	0.0525	0.0543	0.0525	0.0660	0.0639	0.0594
2,018	0.0639	0.0707	0.0639	0.0660	0.0525	0.0543	0.0525	0.0525	0.0543	0.0525	0.0660	0.0639	0.0594
Prom.	0.0639	0.0707	0.0639	0.0660	0.0525	0.0543	0.0525	0.0525	0.0543	0.0525	0.0660	0.0639	0.0594

Tabla 26.

Caudales de retorno en m³/s, del período 2012-2018.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2,012	0.0189	0.0209	0.0189	0.0195	0.0132	0.0137	0.0132	0.0132	0.0137	0.0132	0.0195	0.0189	0.0164
2,013	0.0189	0.0209	0.0189	0.0195	0.0132	0.0137	0.0132	0.0132	0.0137	0.0132	0.0195	0.0189	0.0164
2,014	0.0189	0.0209	0.0189	0.0195	0.0132	0.0137	0.0132	0.0132	0.0137	0.0132	0.0195	0.0189	0.0164
2,015	0.0189	0.0209	0.0189	0.0195	0.0132	0.0137	0.0132	0.0132	0.0137	0.0132	0.0195	0.0189	0.0164
2,016	0.0189	0.0209	0.0189	0.0195	0.0132	0.0137	0.0132	0.0132	0.0137	0.0132	0.0195	0.0189	0.0164
2,017	0.0189	0.0209	0.0189	0.0195	0.0132	0.0137	0.0132	0.0132	0.0137	0.0132	0.0195	0.0189	0.0164
2,018	0.0189	0.0209	0.0189	0.0195	0.0132	0.0137	0.0132	0.0132	0.0137	0.0132	0.0195	0.0189	0.0164
Prom.	0.0189	0.0209	0.0189	0.0195	0.0132	0.0137	0.0132	0.0132	0.0137	0.0132	0.0195	0.0189	0.0164

Tabla 27.
Caudales de alterados en m³/s, del periodo 2012-2018.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2,012	1.4651	1.4602	1.4951	1.6936	3.0907	2.3494	4.1507	6.7707	5.3694	4.0107	2.0236	1.4751	2.9462
2,013	1.4451	1.4402	1.4351	1.4336	2.8107	5.1394	3.9707	6.3307	3.7894	5.2607	2.5636	1.5951	3.1012
2,014	1.4451	1.4302	1.4251	1.4336	3.3407	6.7694	3.1907	4.1807	5.6994	6.7107	2.4336	1.4751	3.2945
2,015	1.4251	1.4202	1.4151	1.5236	2.4607	2.4994	2.9007	3.1807	3.6194	5.5807	2.9836	1.7051	2.5595
2,016	1.4151	1.3902	1.3951	1.3936	1.7607	4.0994	6.4007	2.9907	5.2694	2.3607	1.4736	1.4051	2.6129
2,017	1.3851	1.3702	1.4351	1.3936	2.0707	3.8494	4.9707	5.2207	3.9394	2.8107	1.7036	1.3851	2.6279
2,018	1.3651	1.3502	1.3551	1.6536	3.6907	3.4694	2.6307	4.9307	6.3894	4.2407	2.2036	1.4851	2.8970
Prom.	1.4208	1.4088	1.4222	1.5036	2.7464	4.0251	4.0307	4.8007	4.8680	4.4250	2.1978	1.5036	2.8627

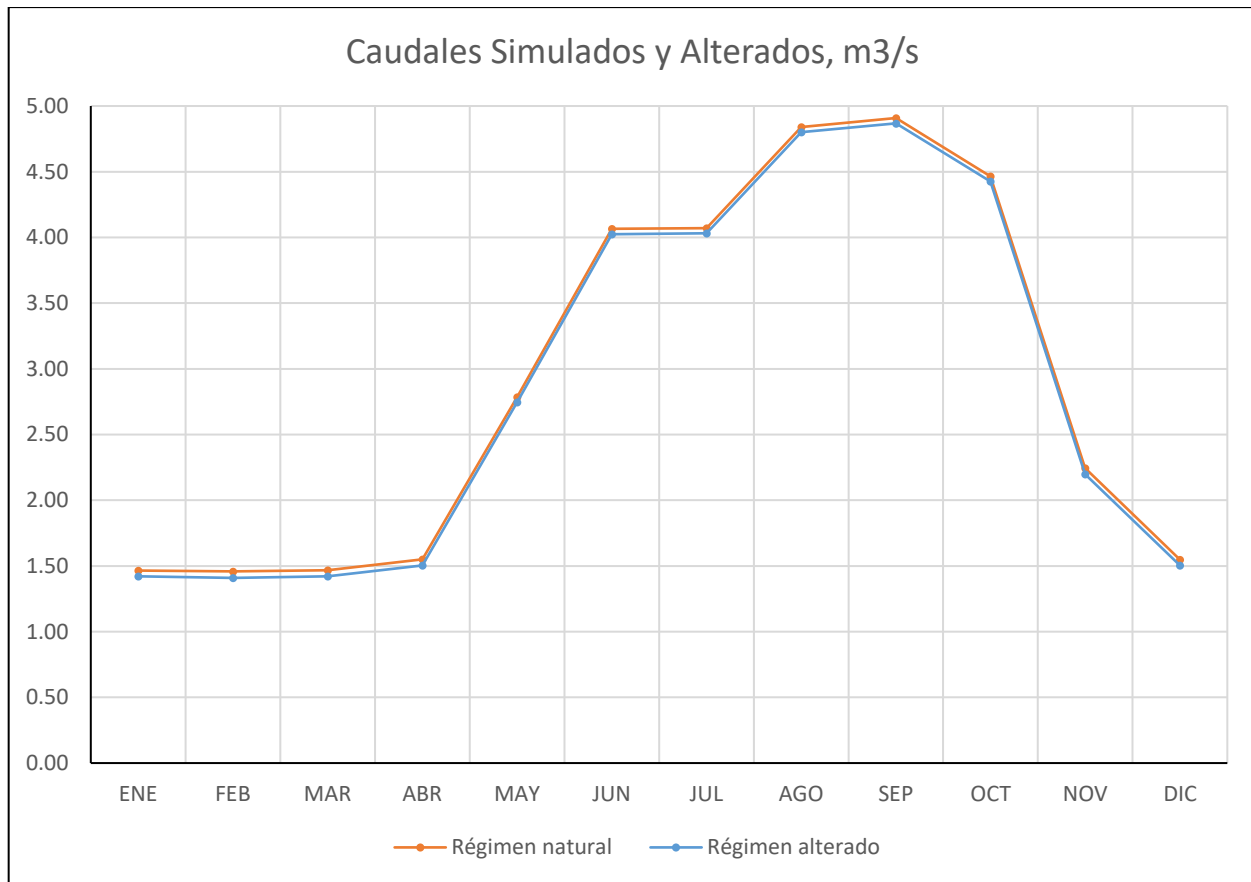


Figura 30 Superposición de caudales naturalizados y alterados, m³/s, del período 2012-2018.

Capítulo III.

Balance hídrico de la cuenca del lago de Coatepeque bajo escenarios climáticos

3.1 Selección de escenarios climáticos y períodos de análisis

El quinto informe de evaluación del IPCC (2013) define cuatro escenarios de cambio climático o caminos representativos de concentración (RCP por sus siglas en inglés) que difieren en el cambio esperado de radiación (8,5; 6,0; 4,5 y 2,6 vatios por metro cuadrado) causado por cambios en la radiación solar incidente, incrementos en la concentración de GEI (GEI) y cambios en las propiedades reflectivas del planeta para el año 2100.

Los reportes nacionales más recientes sobre cambio climático en El Salvador, tienen a su base el quinto informe de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (Stocker et al., 2013), el cual consiste en el más reciente informe elaborado por el IPCC (el sexto informe se encuentra en elaboración). Actualmente, estos autores definen cuatro escenarios de trayectorias de concentración representativas RCP (por sus siglas en inglés de Representative Concentration Pathway), las cuales difieren en el cambio esperado de radiación (8.5, 6.0, 4.5 y 2.6 W/m²), provocado por cambios en la radiación solar incidente, incrementos en la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y cambios en las propiedades reflectivas del planeta para el año 2100 (MARN, 2018). En este apartado, se tendrá como fuente principal el mencionado documento a menos que se indique lo contrario.

Para El Salvador, se ha estimado las modificaciones en las variables climáticas de precipitación, temperatura, humedad relativa, presión superficie, velocidad y dirección del viento e impactos de la variabilidad climática en comparación con el período de referencia 1961-1990 en una análisis de escala mensual. Cada variable contó con al menos el 85% de la información, siendo confiable acorde a la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Para efecto del balance hídrico, únicamente se retoma las proyecciones de precipitación y temperatura mensual para los escenarios adoptados.

Para el análisis de balance hídrico de la cuenca del lago de Coatepeque, se adoptó los RCP 4.5 y RCP 8.5; el primero (RCP 4.5), debido a que refleja condiciones climáticas adversas que superan ligeramente a las más favorables (RCP 2.6), en cuyo caso, se cumplirían las proyecciones. No obstante, es frecuente conocer de los científicos que las mejores proyecciones, en general no se cumplen. El escenario RCP 8.5 fue seleccionado por presentar las condiciones más adversas para la región, lo cual permite tener una idea del peor escenario que se podría estar enfrentando en términos del balance hídrico de la cuenca. Esta decisión sobre escenarios fue consensuada con los administradores de contrato.

En ambos casos se analizó el promedio de dos períodos normales de 30 años: (1) 2046-2075 y (2) 2071-2100, cumpliendo así con lo estipulado en los términos contractuales. De esta forma Se realizaron las proyecciones de cambio de las variables climáticas en El Salvador considerando el promedio de estos escenarios. Para ello, se utilizaron: (a) datos observados

nacionales, (b) modelos de circulación general y (c) un método de ensamble de modelos para obtener resultados bajo las condiciones de los diferentes escenarios. Los escenarios de cambio climático presentados por el (MARN, 2018) indican los comportamientos proyectados para precipitación, temperatura y humedad relativa:

Precipitación

La precipitación nacional en el primer periodo, es decir, entre 2021-2050, podrá reducirse entre un 10 % a 20 % ante cualquier escenario RCP. Particularmente, el cambio podrá ser superior al 20 % bajo el RCP8.5.

Temperatura

La temperatura media y mínima presentará aumentos en los periodos 2021-2050 y 2071-2100 bajo todos los escenarios RCP (Figura 37). Lo anterior, podrá involucrar cambios de entre 1°C y 3°C y hasta 4,5° C hacia finales del siglo. Se destaca que dicho comportamiento resulta similar a los cambios esperados por el IPCC.

Humedad relativa

En todos los periodos de análisis, se mantiene la tendencia de reducciones bajo todos los escenarios RCP (Figura 41), en comparación con sus valores para el periodo de línea base 1961-1990. Sin embargo, se considera que dichos cambios no son significativos (debido a que los rangos de cambios no sobrepasan el 4 %).

3.1.1 Promedio de ensamble de confiabilidad ponderado de variables climáticas para los escenarios de CC utilizado en el balance hídrico

Los Modelos de Circulación Global (GCM, por sus siglas en inglés de Global Circulation Model) adoptados como comportamiento probable para El Salvador son cinco y fueron proyectados para el período 2011 – 2100 en cada uno de los escenarios (RCP) y para cada variable, siendo de interés para el balance, la precipitación, temperaturas extremas y evapotranspiración de referencia.

- MRI-CGCM3: Meteorological Research Institute (MRI)
- HadGEM2-AO: Met Office Hadley Centre
- MIROC5: Atmosphere and Ocean Research Institute (MIROC) (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, y Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

- GFDL-CM3: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL-NOAA2)
- CSIRO-Mk3-6-0: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) en colaboración con Queensland Climate Change Centre of Excellence (QCCCE)

En la Tercera Comunicación de CC (MARN, 2018), se expone que se realizó un ensamble de Confiabilidad Ponderada (REA, por sus siglas en inglés de Reliability Ensemble Averaging) (Giorgi y Mearns, 2002). Por lo tanto, se facilitó al equipo consultor, los valores ensamblados de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima mensual para las estaciones dentro de la zona de influencia de la cuenca del lago de Coatepeque y para todo el período, a partir de dichos datos se ha trabajado en la modelación hidrológica considerando escenarios climáticos.

3.2 Metodología utilizada para la elaboración de los balances bajo escenarios climáticos

Para realizar las proyecciones del balance hidrológico hacia el futuro, se consideraron los resultados de los ensambles de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5, como los más representativos de los escenarios de cambio climático futuros en El Salvador, uno no tan optimista y el otro muy pesimista.

Con el modelo hidrológico calibrado muy bien en cuanto a las variaciones de volúmenes observados, no así en el ajuste a la curva de comportamiento de los parámetros, debido a la poca información de series históricas disponible, sobre todo de niveles de agua en el lago y la evolución de la explotación de agua para los diversos usos, se realizaron las simulaciones hidrológicas con los resultados de los ensambles RCP 4.5 y RCP 8.5 para los períodos 2046-2075 y 2071-2100, es decir a 25 y 50 años a partir del período de modelación, 1991-2020, en períodos de 30 años, necesarios para observar tendencias.

Los datos proyectados de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media, para el período de 2011-2100, fueron proporcionados por el MARN, a partir de esos datos se optó por utilizar un método de cálculo de la evapotranspiración potencial que considerase dichas variables..

El método adoptado para el cálculo de la evapotranspiración potencial, es el mismo de Hargreaves, pero modificado, para utilizar únicamente datos de temperaturas y radiación extraterrestre (de tablas), Hargreaves y Samani (1985).

La ecuación de cálculo de la ETP por el método de Hargreaves y Samani, es la siguiente:

$$ETO = 0.0023 (t_{med} + 17.78)RO (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (Ec. 18)$$

Donde:

ETO = evapotranspiración potencial diaria, mm/día

t_{med} = temperatura media mensual, °C

RO = Radiación solar extraterrestre, en mm/día de agua evaporada (se obtiene de tablas, en función de la latitud de la estación meteorológica, ver Tabla 9)

t_{max} = temperatura máxima mensual, °C

t_{min} = temperatura mínima mensual, °C

Al igual que en la calibración del modelo, se ponderó la evapotranspiración terrestre y evaporación del cuerpo de agua, para obtener la evapotranspiración potencial para toda la cuenca.

Las estaciones climáticas de lluvia y temperatura proporcionadas por el MARN se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28.

Estaciones climáticas con datos de parámetros proyectados con cambio climático.

Índice	Dirección	Departamento	Latitud	Longitud	Este	Norte	Elevación
A12	Santa Ana, El Palmar	Santa Ana	13.976663	-89.570003	438,415	317,270	725
A18	Finca Los Andes	Santa Ana	13.875004	-89.645000	430,282	306,044	1,770
A19	Lago de Coatepeque	Santa Ana	13.893331	-89.550001	440,555	308,046	780
L4	San Andres, Ciudad Arce	La Libertad	13.808333	-89.406666	456,031	298,612	460
T3	Izalco	Sonsonate	13.761666	-89.704998	423,760	293,524	390

3.3 Resultados de los balances hídricos proyectados bajo escenarios climáticos

De las cinco estaciones proporcionadas, para la simulación hidrológica de la cuenca del Lago Coatepeque para escenarios de cambio climático, todas contienen datos de precipitación, pero solo dos contienen datos de temperaturas máxima, mínima y promedio mensual, las estaciones A-12 (también identificada como A-37, por su cambio de ubicación en la ciudad de Santa Ana) y A-18. A partir de su identificación y localización se trazaron los polígonos de Thiessen para determinar cuáles estaciones con datos de precipitación se utilizarían en las simulaciones de escenarios de cambio climático.

3.3.1 Influencia de las estaciones con datos de Cambio Climático en la cuenca del lago de Coatepeque

Se identificó con cuáles estaciones se trabajaría, tomando el criterio de adoptar aquellas que están en el área de influencia de la cuenca. Para ello se trazaron los polígonos de Thiessen para identificar los polígonos que intersectan el área de la cuenca, tanto para estaciones con datos de precipitación pluvial, como para estaciones con datos de evapotranspiración potencial tomadas a partir de las que tienen datos de temperatura. Ver Figura 31 y Figura 32.

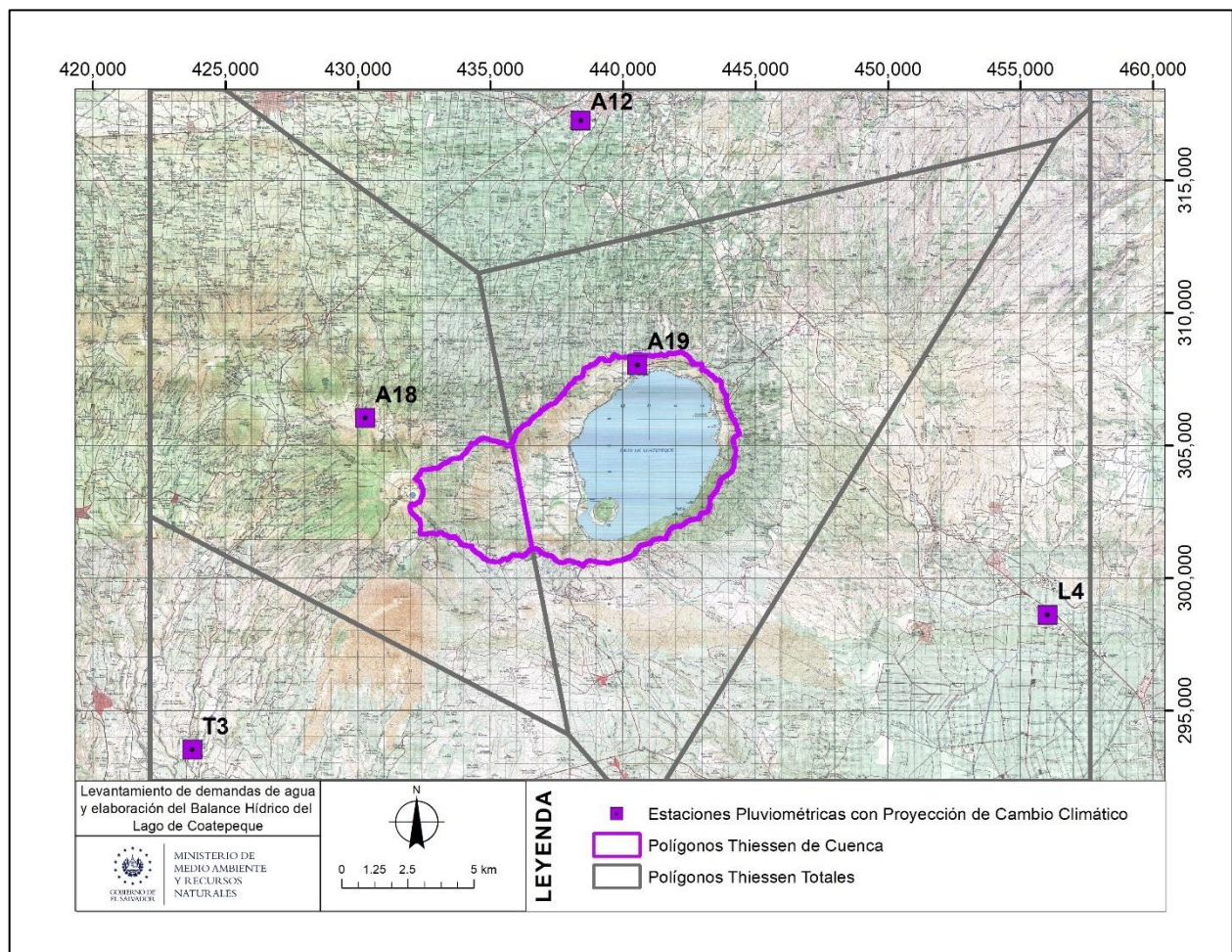


Figura 31 Mapa de Polígonos de Thiessen del Parámetro Precipitación para Escenarios de Cambio Climático.

Se puede ver en la Figura 31 que las estaciones de Precipitación proyectadas con cambio climático, que influyen la cuenca del Lago de Coatepeque son las estaciones pluviométricas A-18 y A-19. Mientras que en temperatura la influencia es ejercida por las estaciones A-18 y A-12, sin embargo, esta última tiene una influencia pequeña y la cota de dicha estación está por debajo de la cota mínima de la cuenca del lago, por lo que la misma no se consideró en el análisis. También, de esta manera, se mantiene la misma y única estación utilizada en el proceso de calibración del modelo hidrológico

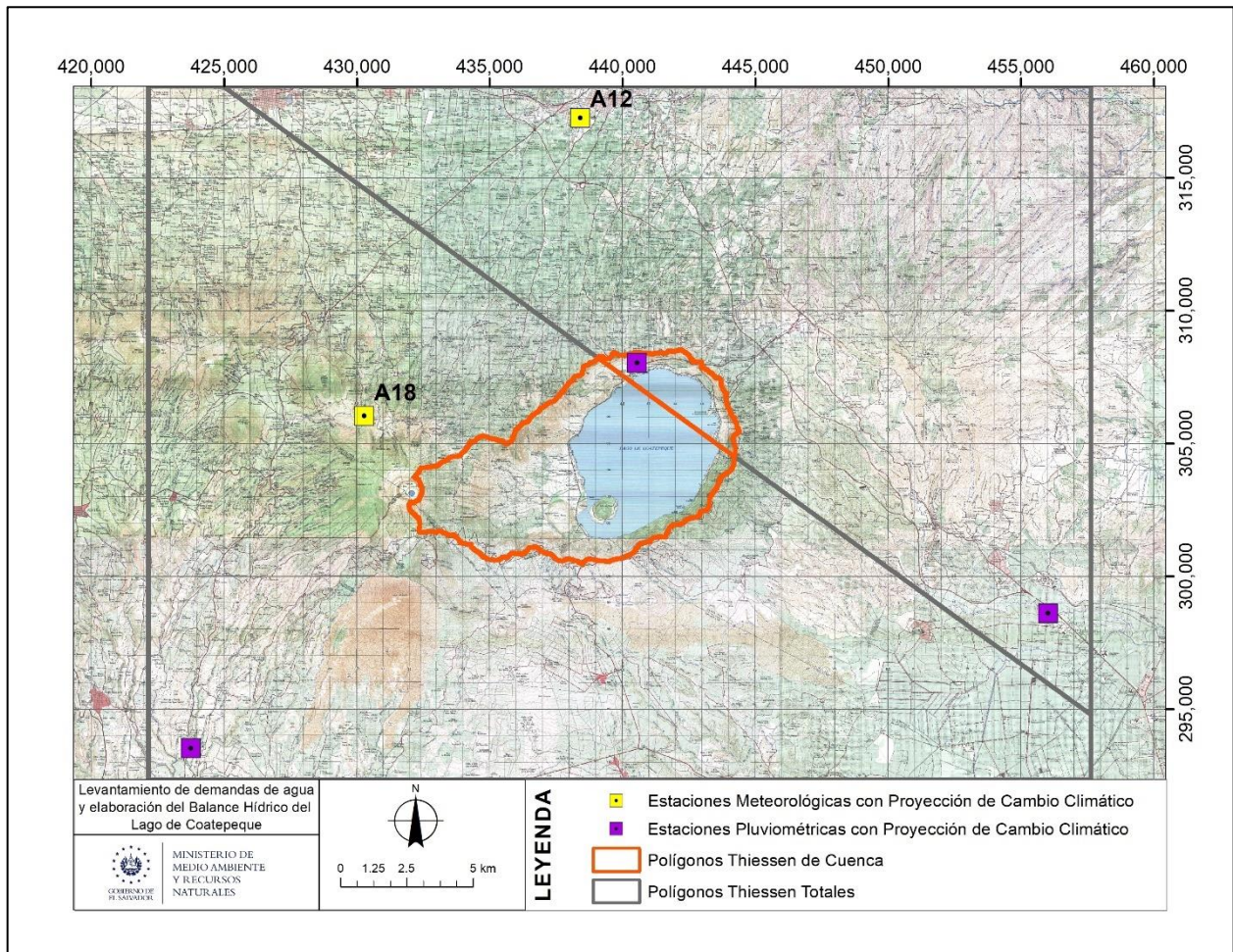


Figura 32. Mapa de Polígonos de Thiessen del Parámetro Temperatura (máxima, media y mínima) para Escenarios de Cambio Climático.

3.3.2 Balance hídrico para el escenario RCP4.5 en el período 2046-2075. Proceso metodológico utilizado en escenarios climáticos.

Temperatura

Los datos de temperatura máxima, mínima y promedio mensual, proyectadas para los ensambles RCP 4.5 para los períodos de simulación a 25 y 50 años (2046-2075 y 2071-2100), se muestran en las tablas 29 a 31 para el período 2046-2075, correspondientes a la Estación climatológica Finca Los Andes (A-18), adoptada como la única influencia en el área de la cuenca.

Tabla 29.

Temperatura Máxima Mensual y Anual de la Estación A-18. Escenario RCP 4.5, Período 2046-2075.

Año/Me	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUA
2046	20.3	21.7	23.9	24.0	24.6	22.3	22.6	22.6	21.8	20.7	20.0	19.9	22.0
2047	20.0	21.4	23.2	24.1	23.6	22.8	22.9	22.6	21.6	21.0	20.3	20.3	22.0
2048	20.6	21.8	23.7	24.7	24.2	23.0	23.7	23.5	23.1	21.8	20.7	20.5	22.6
2049	20.9	22.2	24.2	24.4	23.9	23.1	22.9	23.1	22.2	20.9	20.0	20.0	22.3
2050	20.6	22.0	23.5	24.5	23.7	22.8	23.4	22.7	21.9	21.0	19.9	19.8	22.2
2051	20.3	21.8	23.5	24.4	23.8	22.7	23.6	23.5	22.5	21.2	20.3	20.1	22.3
2052	20.7	22.1	23.8	24.5	24.0	22.6	23.3	23.5	22.7	21.4	20.1	19.9	22.4
2053	20.4	21.8	24.3	24.9	24.6	22.9	23.1	23.8	22.9	21.8	20.7	20.3	22.6
2054	20.7	21.9	24.2	25.1	23.9	22.6	23.8	23.7	22.8	21.5	20.7	20.9	22.7
2055	21.2	22.0	24.2	25.0	24.4	23.3	23.3	23.3	22.5	21.0	20.3	20.1	22.5
2056	20.5	22.2	24.2	25.0	24.2	22.8	23.4	23.5	22.3	21.2	20.6	20.3	22.5
2057	20.7	22.2	24.0	24.5	24.0	22.6	23.1	23.4	22.4	21.1	20.4	20.0	22.4
2058	20.4	21.6	23.4	24.4	23.7	23.1	24.2	23.9	22.7	21.9	20.6	20.8	22.6
2059	20.7	21.9	24.0	24.6	24.2	23.1	23.4	23.8	22.7	21.7	20.9	20.3	22.6
2060	20.8	22.3	24.1	25.1	24.3	23.3	23.8	24.5	23.0	21.3	20.4	20.4	22.8
2061	20.9	22.3	24.1	24.6	23.7	22.9	23.1	23.2	22.0	20.7	20.2	19.7	22.3
2062	20.6	21.7	23.8	24.8	23.9	22.6	23.3	23.8	22.2	21.0	20.3	20.2	22.4
2063	20.5	22.2	24.0	24.6	23.9	23.1	23.2	23.1	22.6	21.0	20.1	19.9	22.4
2064	20.5	22.0	23.8	24.7	24.2	23.1	23.5	23.4	22.3	21.2	20.1	20.4	22.4
2065	20.8	22.4	24.2	25.1	24.3	23.6	23.8	23.9	22.7	22.0	20.7	20.9	22.9
2066	21.3	22.4	24.2	24.7	24.3	22.8	23.6	23.8	22.7	21.2	20.6	20.3	22.6
2067	20.5	22.2	24.1	24.8	24.5	22.8	23.6	23.5	22.3	21.4	20.6	20.2	22.5
2068	20.8	22.2	24.2	24.8	24.7	23.5	23.9	23.6	22.6	21.5	20.7	20.2	22.7
2069	20.7	22.3	24.0	25.2	24.7	23.9	23.8	23.9	22.7	21.8	20.9	20.5	22.9
2070	20.6	22.2	24.1	25.5	24.3	23.3	23.6	23.7	23.2	21.5	20.6	20.6	22.8
2071	20.9	22.5	24.5	25.4	24.7	23.6	23.7	23.9	23.2	21.4	20.6	20.5	22.9
2072	20.4	22.2	24.0	24.9	24.8	24.3	24.0	23.8	23.1	21.8	20.9	20.5	22.9
2073	21.2	22.2	24.4	25.0	24.3	23.6	23.5	23.4	22.6	21.2	20.6	20.5	22.7
2074	21.1	22.3	24.0	24.9	24.2	23.3	23.8	24.0	23.2	21.4	20.1	20.3	22.7
2075	20.6	22.0	23.9	25.3	24.6	23.5	23.2	23.4	22.7	21.6	20.6	20.4	22.7
Prom.	20.7	22.1	24.0	24.8	24.2	23.1	23.5	23.5	22.6	21.3	20.5	20.3	22.5

Tabla 30.

Temperatura Mínima Mensual y Anual de la Estación A-18. Escenario RCP 4.5, Período 2046-2075.

Año/Me	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUA
2046	11.8	12.3	13.7	14.8	15.8	15.2	14.7	14.8	14.9	14.3	13.4	12.6	14.0
2047	11.9	12.4	13.4	14.7	15.3	15.1	14.8	14.9	14.9	14.6	13.6	12.8	14.0
2048	12.2	12.4	13.8	14.8	15.7	15.4	15.2	15.4	15.5	15.1	13.8	13.0	14.4
2049	12.4	12.7	14.1	14.8	15.7	15.6	15.1	15.2	15.3	14.6	13.5	12.7	14.3
2050	12.1	12.7	13.8	14.9	15.6	15.3	15.0	15.1	15.1	14.5	13.5	12.7	14.2
2051	12.0	12.7	13.6	14.8	15.6	15.4	15.0	15.2	15.3	14.7	13.5	12.6	14.2
2052	12.2	12.5	13.9	14.9	15.7	15.4	15.0	15.3	15.4	14.7	13.6	12.5	14.3
2053	11.9	12.2	14.0	15.0	15.8	15.5	15.2	15.3	15.5	15.1	14.1	13.0	14.4
2054	12.2	12.7	14.0	15.5	15.9	15.5	15.3	15.4	15.6	14.9	13.9	13.1	14.5
2055	12.6	12.5	14.0	15.2	16.0	15.7	15.3	15.3	15.3	14.7	13.5	12.6	14.4
2056	12.1	12.8	14.0	15.2	15.8	15.4	15.1	15.2	15.3	14.6	13.7	12.8	14.3
2057	12.1	13.0	14.0	15.0	15.7	15.2	15.0	15.3	15.3	14.7	13.7	12.6	14.3
2058	11.7	12.4	13.9	15.0	15.6	15.4	15.1	15.3	15.5	14.9	13.8	13.1	14.3
2059	12.3	12.8	14.1	15.0	15.8	15.5	15.2	15.4	15.5	15.0	13.9	13.1	14.5
2060	12.4	12.9	14.1	15.2	16.0	15.8	15.3	15.7	15.6	14.9	13.7	12.8	14.5
2061	12.3	12.9	14.0	15.0	15.7	15.3	14.9	15.1	15.1	14.6	13.6	12.7	14.3
2062	12.2	12.5	13.7	15.1	15.7	15.3	15.0	15.3	15.3	14.6	13.4	12.6	14.2
2063	12.3	12.9	13.9	14.9	15.7	15.5	15.0	15.1	15.3	14.6	13.5	12.8	14.3
2064	12.2	12.8	14.0	15.1	15.8	15.5	15.2	15.3	15.4	14.8	13.7	12.9	14.4
2065	12.3	12.8	14.0	15.2	15.6	15.7	15.4	15.5	15.6	15.2	14.0	13.3	14.6
2066	12.6	13.0	14.0	15.4	16.0	15.6	15.3	15.4	15.5	14.7	13.6	12.9	14.5
2067	12.2	12.8	14.2	15.3	15.9	15.6	15.3	15.3	15.3	14.9	13.8	12.9	14.5
2068	12.3	12.8	14.1	15.3	15.9	15.7	15.4	15.4	15.6	14.9	13.9	12.8	14.5
2069	12.3	12.6	14.0	15.4	16.2	15.9	15.5	15.4	15.6	15.1	13.9	12.9	14.6
2070	12.1	12.7	14.1	15.6	15.9	15.8	15.5	15.5	15.8	15.0	13.9	13.1	14.6
2071	12.5	13.2	14.2	15.3	16.0	15.9	15.3	15.5	15.7	14.9	13.7	13.1	14.6
2072	12.0	12.6	13.9	15.0	15.9	15.7	15.4	15.5	15.7	15.1	14.0	13.0	14.5
2073	12.4	12.6	14.3	15.4	16.0	15.8	15.4	15.4	15.6	14.8	13.9	13.0	14.5
2074	12.5	12.8	13.8	15.3	15.8	15.7	15.3	15.4	15.6	14.9	13.5	12.8	14.5
2075	12.1	12.7	13.9	15.3	15.9	15.6	15.2	15.3	15.5	14.9	13.7	12.9	14.4
Prom.	12.2	12.7	14.0	15.1	15.8	15.5	15.2	15.3	15.4	14.8	13.7	12.8	14.4

Tabla 31.

Temperatura Promedio Mensual y Anual de la Estación A-18. Escenario RCP 4.5, Período 2046-2075.

Año/Me	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUA
2071	16.2	17.2	18.8	19.8	19.8	19.3	18.9	19.1	18.8	17.6	16.8	16.4	18.2
2072	15.7	16.8	18.3	19.4	19.8	19.5	19.1	19.1	18.8	17.9	17.0	16.3	18.1
2073	16.2	16.7	18.8	19.6	19.6	19.1	18.9	18.8	18.5	17.5	16.8	16.3	18.1
2074	16.3	16.9	18.3	19.5	19.5	19.0	19.0	19.1	18.8	17.6	16.4	16.1	18.0
2075	15.8	16.8	18.3	19.8	19.7	19.0	18.6	18.8	18.6	17.7	16.7	16.3	18.0
2076	16.2	16.7	18.8	19.4	19.6	19.1	19.0	19.1	18.4	17.7	16.9	16.6	18.1
2077	16.2	16.9	18.7	19.6	19.7	19.4	19.0	19.1	18.6	17.7	16.8	16.6	18.2
2078	16.2	17.0	18.7	19.6	19.9	18.9	18.8	18.8	18.6	17.8	17.0	16.3	18.1
2079	16.4	17.0	18.6	19.6	19.7	19.3	18.8	19.3	19.1	17.9	16.8	16.5	18.3
2080	16.1	16.9	19.1	19.8	19.6	19.0	19.0	18.7	18.6	17.6	16.4	16.2	18.1
2081	15.6	16.8	18.5	19.4	19.4	18.8	18.6	18.8	18.5	17.7	17.0	16.3	18.0
2082	16.1	16.8	18.6	19.6	19.9	19.2	19.0	19.1	18.7	18.0	17.0	16.4	18.2
2083	16.2	16.8	18.8	19.8	19.8	19.5	19.3	19.0	18.7	17.7	16.8	16.3	18.2
2084	16.3	17.0	18.7	19.3	19.8	18.7	18.9	19.3	18.9	17.8	17.1	16.5	18.2
2085	16.4	17.2	18.5	19.8	19.7	19.2	18.9	19.3	18.7	17.9	16.9	16.5	18.2
2086	16.1	16.6	18.6	19.7	19.8	18.9	18.9	18.8	18.5	17.6	16.7	16.1	18.0
2087	15.7	16.9	18.4	19.2	19.7	19.0	18.9	19.0	18.6	17.7	16.6	16.2	18.0
2088	16.3	16.5	18.5	19.6	19.8	19.2	19.3	19.2	18.9	18.2	16.9	16.3	18.2
2089	16.5	17.2	19.0	19.9	20.0	19.2	19.4	19.4	18.8	17.8	17.1	16.5	18.4
2090	16.3	17.1	18.9	20.0	20.3	19.4	18.8	19.1	18.6	17.8	16.9	16.3	18.3
2091	16.4	16.9	18.7	19.9	19.9	19.1	18.7	18.9	18.5	17.4	16.6	16.2	18.1
2092	16.1	16.6	18.7	19.5	20.1	19.1	18.7	19.0	18.7	17.8	16.8	16.2	18.1
2093	15.8	16.8	18.5	19.6	19.9	18.8	18.8	18.7	18.4	17.6	16.7	16.1	18.0
2094	16.2	16.8	18.6	19.4	19.6	19.4	18.9	19.1	18.6	17.6	17.0	16.4	18.1
2095	15.9	16.8	18.6	19.5	19.6	19.2	18.8	19.1	18.5	17.8	16.9	16.6	18.1
2096	16.3	17.1	18.5	19.4	19.5	19.0	19.2	19.1	18.8	17.8	17.2	16.5	18.2
2097	16.4	17.2	18.6	19.6	19.6	19.3	19.0	19.3	18.9	17.7	17.2	16.5	18.3
2098	16.1	17.2	19.0	19.7	20.0	19.5	19.0	19.5	19.0	17.7	16.9	16.4	18.3
2099	16.3	17.0	18.9	19.8	19.7	19.5	18.9	18.9	18.4	17.6	16.9	16.5	18.2
2100	16.4	17.0	18.5	19.7	19.7	19.3	19.2	18.9	18.6	17.7	16.9	16.0	18.2
Prom.	16.2	16.9	18.7	19.6	19.8	19.2	18.9	19.0	18.7	17.7	16.9	16.3	18.2

Precipitación

A partir del trazo de polígonos de Thiessen y siguiendo la metodología de ponderación por área de influencia explicada para condiciones actuales, se procedió al cálculo de la

precipitación media ponderada de la cuenca en estudio. La Figura 33 y Figura 34 muestran las series de precipitación para las estaciones A-18 y A-19 utilizadas en el modelo hidrológico.

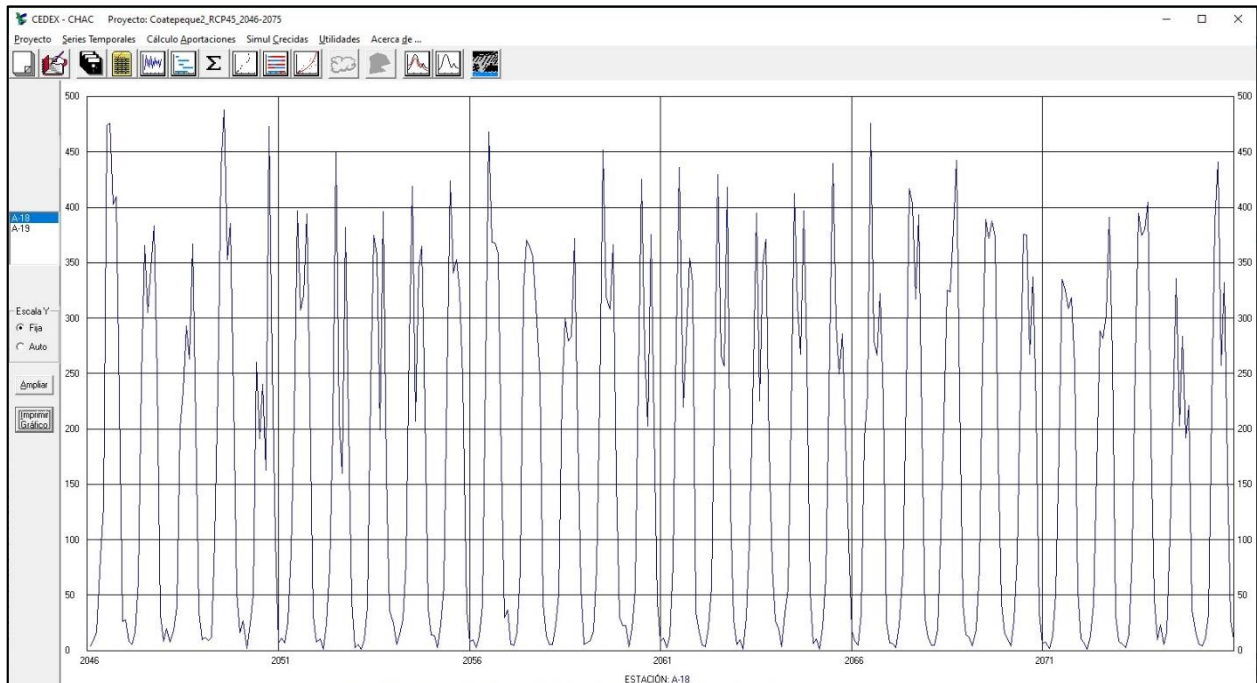


Figura 33 Serie de precipitación de la Estación A-18, escenario RCP 4.5, período 2046.2075

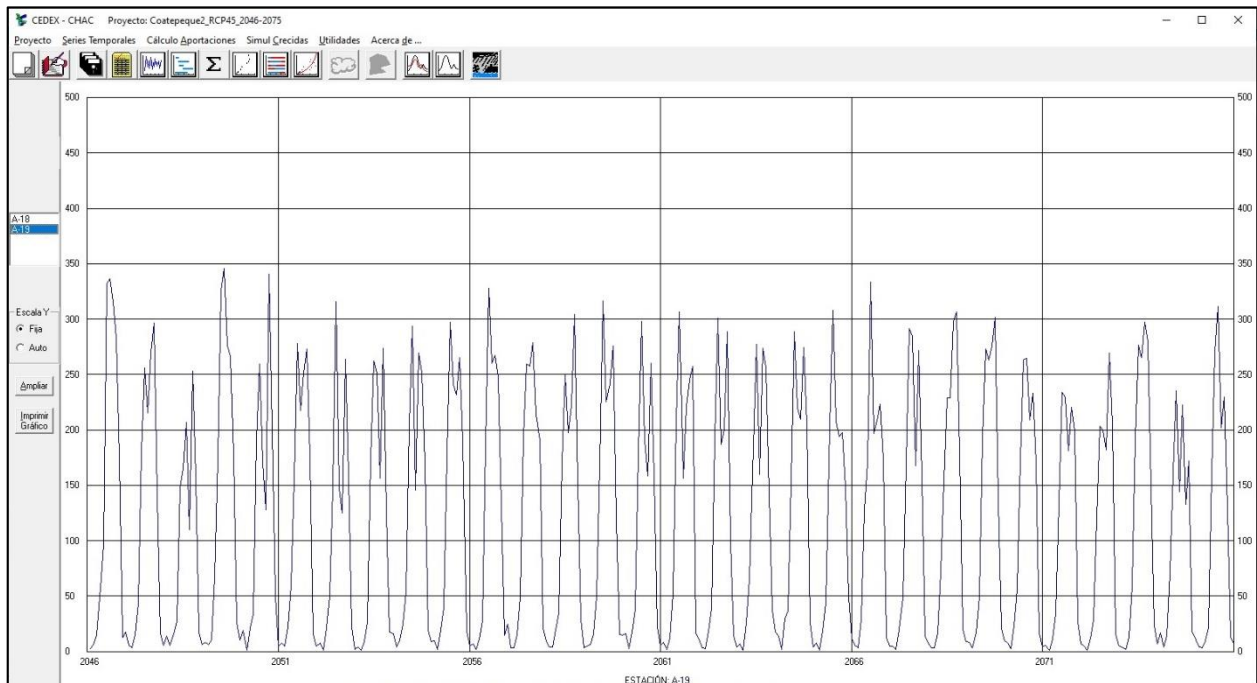


Figura 34 Serie de precipitación de la Estación A-19, escenario RCP 4.5, período 2046.2075

La Tabla 32 presenta los valores proyectados de precipitación para la cuenca del lago de Coatepeque. A partir de los datos procesados, es posible visualizar la reducción de la precipitación en la cuenca para el período de mediano plazo 2046-2075, lo cual está alertando en cuanto a la disponibilidad de agua en la cuenca, principalmente por alta sensibilidad que presentan las aportaciones a esta variable.

Tabla 32.

Precipitación media ponderada mensual y anual en mm en la cuenca del lago de Coatepeque proyectada bajo el escenario RCP 4.5, Período 2046-2075

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
2046	3.1	6.7	15.2	63.3	104.0	363.1	367.1	334.8	310.8	185.6	15.7	19.9	1,789.3
2047	6.2	3.9	14.8	47.4	194.4	279.9	235.1	286.7	315.4	164.3	19.9	6.2	1,574.5
2048	15.5	5.7	16.4	29.6	160.0	179.9	225.9	143.5	278.3	167.7	21.0	6.9	1,250.4
2049	9.4	6.6	10.9	74.5	187.9	349.8	376.7	292.9	292.6	188.1	31.7	11.6	1,832.7
2050	21.0	1.4	21.4	37.4	206.7	244.7	185.8	135.4	369.6	214.2	61.6	5.2	1,504.3
2051	8.4	5.1	23.5	65.8	167.7	304.0	237.4	266.7	299.4	186.1	19.2	5.6	1,588.8
2052	8.0	1.1	21.4	55.9	159.3	345.1	160.8	132.5	290.0	168.5	27.0	2.0	1,371.7
2053	4.5	1.0	9.0	29.6	187.0	287.1	274.9	165.5	300.4	132.8	21.7	18.1	1,431.5
2054	4.5	11.3	25.4	58.5	220.0	321.3	159.3	286.2	277.1	180.3	22.9	10.2	1,577.1
2055	10.4	2.1	20.6	43.6	191.9	325.0	262.9	258.0	278.2	201.4	22.0	5.6	1,621.8
2056	7.3	2.0	11.6	30.6	200.7	358.6	284.0	289.2	272.0	139.6	18.2	27.3	1,641.0
2057	3.9	3.5	15.2	54.2	222.3	283.6	281.0	295.5	235.4	202.9	25.9	10.0	1,633.2
2058	4.4	4.3	20.6	38.0	183.6	260.5	215.9	236.3	319.1	161.7	35.1	3.9	1,483.3
2059	5.4	7.0	16.1	55.8	182.2	346.2	246.1	256.1	296.0	127.0	18.6	16.6	1,573.0
2060	17.5	2.5	17.9	41.9	193.3	325.9	207.9	167.8	285.4	166.7	26.5	6.1	1,459.5
2061	8.9	2.2	12.2	58.1	224.2	335.0	170.2	234.7	269.0	273.8	20.6	12.7	1,621.6
2062	3.8	2.7	19.1	42.9	207.0	329.2	204.4	212.9	317.2	105.3	16.8	4.1	1,465.5
2063	7.7	1.1	27.1	72.6	174.4	303.2	174.2	290.6	281.3	152.0	45.5	19.6	1,549.2
2064	15.5	2.3	30.3	41.1	165.6	316.2	239.7	222.1	301.4	218.0	32.4	4.8	1,589.6
2065	8.2	1.0	19.2	48.8	218.4	336.6	226.8	206.4	217.1	157.8	59.6	13.0	1,512.8
2066	6.3	3.6	29.8	141.6	184.2	364.9	215.1	221.4	245.0	184.6	15.8	5.1	1,617.3
2067	4.8	1.9	20.2	53.0	182.6	319.3	310.6	200.6	298.6	168.6	16.9	8.6	1,585.9
2068	3.6	3.5	17.2	78.9	166.5	249.8	249.6	316.4	336.1	189.0	25.2	10.4	1,646.2
2069	9.0	3.3	17.2	55.2	207.6	298.2	287.0	300.3	317.5	145.0	25.6	11.1	1,677.0
2070	8.1	3.2	23.8	62.4	187.0	287.8	289.0	221.8	255.8	181.5	20.3	4.5	1,545.1
2071	5.9	1.4	11.5	38.1	144.1	256.2	250.6	209.5	241.8	211.7	32.6	7.9	1,411.3
2072	5.2	1.1	12.0	31.0	130.1	222.0	217.6	208.5	296.3	217.7	19.2	6.0	1,366.8
2073	3.9	2.1	13.0	65.5	206.9	302.7	289.2	315.5	307.1	157.7	28.1	7.3	1,699.1

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
2074	18.5	4.4	14.4	77.6	174.8	257.6	157.0	235.9	145.6	183.0	22.1	11.4	1,302.4
2075	4.2	3.3	10.3	24.2	173.5	296.0	339.8	214.2	252.3	136.5	16.3	7.5	1,478.2
Prom	8.1	3.4	17.9	53.9	183.6	301.6	244.7	238.6	283.4	175.6	26.1	9.6	1,546.7

Evapotranspiración Potencial

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se utilizó el método de Hargreaves, con el mínimo de parámetros climáticos, ya que solo requiere datos de temperatura máxima, mínima y media mensual, y radiación solar mensual. Este último parámetro se obtiene de tablas (Tabla 9), por lo que para el cálculo de la ETP basta con los parámetros de temperatura antes mencionados.

Para tomar en cuenta las pérdidas por evaporación del agua del lago, se calculó la ETP de la cuenca afectada por un Coeficiente de Evaporación, el cual varió de época lluviosa a época seca. De esta manera, se aplicó un factor de 1.15 de noviembre a abril y de 1.10 de mayo a octubre, de acuerdo a coeficientes para cuerpos de agua sugeridos por la FAO (SNET, 2005).

Los valores medios mensuales de ETP, calculados para la superficie terrestre, se muestran en la Tabla 33, , mientras que los valores de evaporación del lago, se muestran en la Tabla 34. Luego, en la Tabla 35 se muestran los datos de ETP mensual y anual, ponderadas por las respectivas áreas, terrestre y del lago. El área total de la cuenca del Lago de Coatepeque es de 64.04, Km² y el área superficial del lago es de 24.66 Km², por lo que el área correspondiente a tierra, incluyendo la isla, es de 39.38 Km².

Con las variables climáticas para el escenario RCP 4.5 en el período 2046-2075, se procedió a la simulación hidrológica, obteniéndose valores de evapotranspiración real que varían entre 669.2 y 771.2 mm/año, el caudal subterráneo variando entre 1.78 m³/s y 3.01 m³/s y caudales totales variando entre 1.89 m³/s y 3.39 m³/s. La distribución de caudales multianuales muestra el reflejo del comportamiento de las aportaciones a partir de la precipitación (Figura 35). Asimismo, muestra el incremento de caudales que ocurre anualmente para la época lluviosa, mientras que, en la época seca, los caudales se mantendrían en un valor mínimo cercano a 1.7 m³/s. Este gráfico indica el volumen que estaría disponible en el caso de que las proyecciones climáticas se comporten en forma similar al RCP 4.5 para el período de 30 años que iniciaría en 25 años.

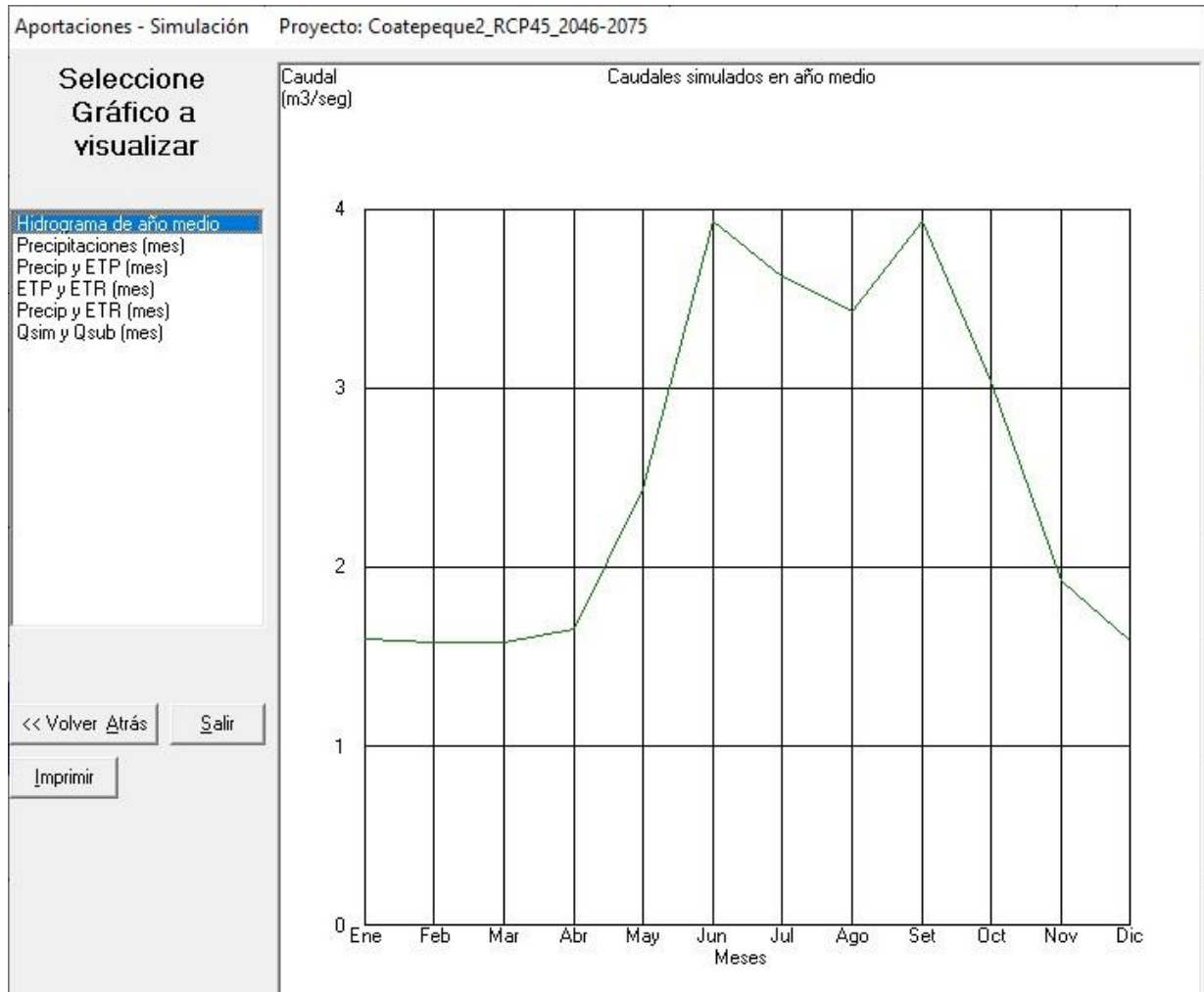


Figura 35 Hidrograma de año medio en la cuenca del lago de Coatepeque, escenario RCP 4.5, período 2046 -2075

Tabla 33.

Evapotranspiración potencial mensual y anual en mm de la cuenca del lago de Coatepeque proyectada bajo el escenario RCP 4.5, Período 2046-2075

Año/Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2046	85.9	91.7	121.8	119.7	125.0	104.0	112.8	111.5	96.9	88.7	77.6	77.6	1213.2
2047	83.9	89.7	118.2	121.4	119.5	108.6	114.3	111.3	95.4	88.9	78.8	79.8	1209.7
2048	86.3	91.9	120.2	125.0	122.2	108.6	119.4	116.6	104.8	92.6	80.8	80.1	1248.2
2049	87.8	93.2	122.4	122.9	119.8	108.4	113.3	113.8	98.8	88.2	77.1	77.7	1223.5
2050	86.4	92.6	119.2	123.7	118.9	108.1	117.9	111.0	97.5	89.9	75.9	77.3	1218.6
2051	85.5	91.1	119.9	123.0	119.7	106.5	119.3	116.7	101.2	90.1	79.1	79.7	1231.8
2052	86.9	94.0	120.8	122.9	119.9	105.5	117.2	116.9	102.6	91.3	77.5	78.2	1233.5
2053	86.6	92.6	123.8	126.0	124.8	107.2	114.1	118.8	103.1	92.5	79.5	79.0	1247.9
2054	87.1	91.9	123.2	125.0	118.1	105.4	119.5	117.3	102.0	91.7	80.5	82.1	1243.9
2055	88.9	93.4	123.3	125.4	121.9	109.3	115.7	115.1	100.4	88.5	79.2	79.1	1240.2
2056	86.2	93.2	123.1	126.1	121.8	106.9	117.5	116.8	99.3	90.8	79.9	79.8	1241.3
2057	87.3	92.8	122.0	122.9	119.9	106.6	115.4	115.7	100.3	89.8	79.1	78.7	1230.4
2058	87.3	90.5	117.8	122.3	118.4	109.5	124.0	120.1	101.9	94.7	80.0	81.3	1248.0
2059	86.9	91.6	121.5	123.7	121.1	108.9	116.9	118.7	101.4	93.2	81.4	78.5	1243.8
2060	86.9	93.6	122.0	126.2	120.9	109.4	119.4	123.4	103.4	90.0	79.1	79.8	1254.2
2061	88.4	93.8	122.3	123.3	118.2	108.4	116.1	115.2	97.4	86.9	77.9	76.5	1224.5
2062	86.5	91.2	122.0	124.6	120.0	106.0	117.0	119.2	98.8	89.0	79.5	79.8	1233.4
2063	85.5	92.7	122.0	123.4	119.4	109.3	117.0	114.7	101.4	89.5	77.8	77.5	1230.3
2064	86.3	92.0	119.9	124.3	121.9	109.5	118.0	116.1	98.6	89.5	77.2	79.8	1233.1
2065	87.3	94.4	123.0	126.5	123.1	112.0	119.4	118.6	101.3	93.8	79.5	81.4	1260.2
2066	89.1	93.5	123.2	122.2	120.8	106.4	118.2	118.1	101.8	89.9	80.3	79.6	1243.1
2067	85.8	92.8	121.7	123.6	123.5	106.3	118.4	116.2	99.5	91.1	79.9	78.8	1237.4
2068	87.6	93.1	123.1	123.9	125.6	111.2	120.1	116.2	100.6	91.2	80.0	78.9	1251.4
2069	87.0	94.8	121.8	126.2	123.8	114.0	119.0	118.9	100.8	93.2	81.2	80.6	1261.3
2070	86.9	93.7	122.4	127.7	121.8	109.7	117.4	117.2	104.3	91.0	79.6	80.6	1252.2
2071	87.4	93.9	124.8	128.3	125.0	110.9	118.6	118.5	104.7	90.5	79.9	80.1	1262.6
2072	86.5	94.4	122.0	126.1	126.3	117.8	121.0	117.8	103.9	92.9	81.0	80.3	1270.0
2073	89.2	93.6	123.7	124.6	121.7	112.1	116.3	114.8	100.7	89.8	79.6	80.2	1246.3
2074	88.3	93.9	122.3	124.4	121.7	109.6	120.1	119.9	105.1	90.8	78.1	79.8	1254.0
2075	86.8	92.5	121.5	128.2	124.3	111.9	115.4	116.2	101.9	92.3	80.3	80.1	1251.3
PROMEDIO	87.0	92.8	121.8	124.5	121.6	108.9	117.6	116.7	101.0	90.7	79.2	79.4	1,241.3

Nota: ETP correspondiente a Áreas circundantes al lago + la isla.

Tabla 34.

Evapotranspiración potencial mensual y anual en mm del lago de Coatepeque
 proyectada bajo el escenario RCP 4.5, Período 2046-2075

Año/Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2046	98.8	105.5	140.1	137.7	137.5	114.4	124.0	122.6	106.6	97.6	89.2	89.3	1,363.2
2047	96.5	103.2	135.9	139.6	131.4	119.5	125.7	122.4	104.9	97.8	90.6	91.8	1,359.3
2048	99.2	105.7	138.2	143.7	134.4	119.4	131.3	128.2	115.2	101.8	92.9	92.1	1,402.2
2049	101.0	107.2	140.8	141.3	131.8	119.3	124.6	125.2	108.7	97.0	88.7	89.3	1,374.9
2050	99.4	106.5	137.1	142.2	130.8	118.9	129.7	122.1	107.2	98.9	87.3	88.9	1,369.2
2051	98.3	104.8	137.9	141.5	131.6	117.2	131.2	128.4	111.3	99.1	91.0	91.6	1,383.9
2052	100.0	108.0	138.9	141.4	131.9	116.0	128.9	128.6	112.9	100.5	89.1	89.9	1,385.9
2053	99.6	106.4	142.4	144.9	137.2	117.9	125.5	130.7	113.4	101.8	91.5	90.8	1,402.1
2054	100.2	105.7	141.7	143.8	129.9	115.9	131.5	129.1	112.3	100.8	92.6	94.5	1,397.8
2055	102.3	107.5	141.8	144.2	134.1	120.2	127.3	126.6	110.4	97.3	91.1	90.9	1,393.7
2056	99.2	107.2	141.5	145.0	133.9	117.6	129.2	128.5	109.2	99.9	91.8	91.7	1,394.8
2057	100.4	106.7	140.3	141.3	131.9	117.3	127.0	127.2	110.3	98.7	90.9	90.5	1,382.6
2058	100.4	104.1	135.5	140.7	130.2	120.5	136.4	132.1	112.1	104.2	92.1	93.5	1,401.8
2059	99.9	105.3	139.8	142.3	133.2	119.8	128.6	130.6	111.5	102.5	93.6	90.2	1,397.3
2060	99.9	107.6	140.3	145.1	133.0	120.4	131.3	135.7	113.7	99.0	91.0	91.8	1,409.0
2061	101.7	107.9	140.6	141.8	130.0	119.2	127.7	126.7	107.2	95.6	89.6	88.0	1,376.0
2062	99.5	104.9	140.3	143.3	131.9	116.6	128.6	131.1	108.6	97.9	91.4	91.7	1,386.0
2063	98.3	106.6	140.3	141.9	131.4	120.2	128.7	126.1	111.6	98.5	89.5	89.1	1,382.2
2064	99.2	105.8	137.9	143.0	134.1	120.5	129.8	127.7	108.4	98.5	88.8	91.8	1,385.4
2065	100.4	108.5	141.4	145.4	135.4	123.2	131.3	130.5	111.4	103.2	91.4	93.6	1,415.8
2066	102.5	107.5	141.7	140.5	132.9	117.0	130.1	129.9	112.0	98.9	92.3	91.5	1,396.8
2067	98.7	106.7	140.0	142.1	135.9	116.9	130.2	127.8	109.4	100.2	91.8	90.6	1,390.3
2068	100.7	107.1	141.6	142.5	138.2	122.3	132.1	127.9	110.6	100.3	92.0	90.7	1,405.9
2069	100.0	109.0	140.1	145.1	136.1	125.5	130.9	130.8	110.8	102.5	93.4	92.7	1,417.0
2070	99.9	107.8	140.7	146.8	133.9	120.7	129.2	128.9	114.7	100.1	91.6	92.7	1,406.9
2071	100.5	108.0	143.5	147.6	137.5	122.0	130.5	130.4	115.2	99.6	91.9	92.1	1,418.6
2072	99.5	108.5	140.3	145.0	139.0	129.6	133.1	129.6	114.3	102.2	93.2	92.4	1,426.5
2073	102.6	107.6	142.2	143.3	133.9	123.3	128.0	126.3	110.8	98.8	91.6	92.3	1,400.5
2074	101.5	108.0	140.6	143.1	133.9	120.6	132.1	131.9	115.6	99.9	89.8	91.7	1,408.7
2075	99.9	106.3	139.7	147.4	136.7	123.1	126.9	127.8	112.1	101.5	92.3	92.1	1,405.9
PROM	100.0	106.7	140.1	143.1	133.8	119.8	129.4	128.4	111.1	99.8	91.1	91.3	1,394.7

Nota: Evaporación correspondiente al cuerpo de agua del Lago Coatepeque.

Tabla 35.

Evapotranspiración potencial ponderada mensual y anual en mm de la cuenca del lago de Coatepeque proyectada bajo el escenario RCP 4.5, Período 2046-2075

Año/Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2046	90.9	97.0	128.8	126.7	129.8	108.0	117.1	115.7	100.6	92.1	82.1	82.1	1,270.9
2047	88.8	94.9	125.0	128.4	124.1	112.8	118.7	115.5	99.1	92.3	83.3	84.4	1,267.3
2048	91.3	97.2	127.1	132.2	126.9	112.7	124.0	121.1	108.8	96.1	85.4	84.7	1,307.5
2049	92.9	98.6	129.5	130.0	124.4	112.6	117.6	118.2	102.7	91.6	81.6	82.2	1,281.8
2050	91.4	98.0	126.1	130.8	123.5	112.3	122.4	115.2	101.2	93.4	80.3	81.8	1,276.5
2051	90.4	96.4	126.9	130.1	124.3	110.6	123.9	121.2	105.1	93.6	83.7	84.3	1,290.4
2052	91.9	99.4	127.7	130.0	124.5	109.5	121.7	121.4	106.6	94.8	81.9	82.7	1,292.2
2053	91.6	97.9	130.9	133.3	129.6	111.3	118.5	123.4	107.1	96.1	84.1	83.5	1,307.3
2054	92.1	97.2	130.4	132.2	122.6	109.4	124.1	121.9	106.0	95.2	85.2	86.9	1,303.2
2055	94.1	98.8	130.4	132.7	126.6	113.5	120.1	119.5	104.3	91.9	83.8	83.6	1,299.3
2056	91.2	98.6	130.2	133.4	126.5	111.0	122.0	121.3	103.1	94.3	84.5	84.4	1,300.4
2057	92.3	98.2	129.1	130.0	124.5	110.7	119.9	120.1	104.1	93.2	83.6	83.2	1,289.0
2058	92.4	95.8	124.6	129.4	123.0	113.8	128.8	124.7	105.8	98.4	84.7	86.0	1,307.3
2059	91.9	96.9	128.5	130.9	125.7	113.1	121.4	123.3	105.3	96.8	86.1	83.0	1,302.9
2060	91.9	99.0	129.1	133.5	125.6	113.7	124.0	128.2	107.3	93.5	83.7	84.4	1,313.8
2061	93.5	99.2	129.3	130.5	122.7	112.6	120.6	119.6	101.2	90.3	82.4	80.9	1,282.8
2062	91.5	96.5	129.0	131.8	124.6	110.1	121.5	123.8	102.6	92.4	84.1	84.4	1,292.2
2063	90.4	98.1	129.1	130.5	124.0	113.5	121.5	119.1	105.3	93.0	82.3	82.0	1,288.8
2064	91.2	97.3	126.8	131.5	126.6	113.7	122.6	120.6	102.4	93.0	81.6	84.4	1,291.8
2065	92.4	99.8	130.1	133.8	127.8	116.3	123.9	123.2	105.2	97.4	84.1	86.1	1,320.1
2066	94.3	98.8	130.3	129.3	125.5	110.5	122.8	122.6	105.7	93.4	84.9	84.2	1,302.2
2067	90.8	98.1	128.8	130.7	128.3	110.4	122.9	120.6	103.3	94.6	84.5	83.3	1,296.3
2068	92.6	98.5	130.2	131.1	130.5	115.5	124.7	120.7	104.4	94.7	84.6	83.4	1,310.9
2069	92.0	100.3	128.8	133.4	128.5	118.4	123.6	123.5	104.6	96.8	85.9	85.3	1,321.2
2070	91.9	99.1	129.4	135.0	126.5	114.0	121.9	121.7	108.3	94.5	84.2	85.3	1,311.8
2071	92.4	99.3	132.0	135.8	129.8	115.2	123.2	123.1	108.8	94.0	84.5	84.7	1,322.7
2072	91.5	99.8	129.1	133.3	131.2	122.3	125.6	122.3	107.9	96.5	85.7	85.0	1,330.3
2073	94.4	99.0	130.8	131.8	126.4	116.4	120.8	119.2	104.6	93.3	84.2	84.9	1,305.7
2074	93.4	99.4	129.3	131.6	126.4	113.9	124.7	124.5	109.1	94.3	82.6	84.4	1,313.6
2075	91.8	97.8	128.5	135.6	129.1	116.2	119.8	120.7	105.8	95.8	84.9	84.7	1,310.8
PROM	92.0	98.2	128.9	131.6	126.3	113.1	122.1	121.2	104.9	94.2	83.8	84.0	1,300.4

Nota: ETP ponderada, correspondiente a toda la cuenca del Lago Coatepeque.

Con las variables climáticas para el escenario RCP 4.5 en el período 2046-2075, se procedió a la simulación hidrológica, obteniéndose valores de evapotranspiración real que varían entre 669.2 y 771.2 mm/año, el caudal subterráneo variando entre 1.78 m³/s y 3.01 m³/s y caudales totales variando entre 1.89 m³/s y 3.39 m³/s. Los resultados tabulados y sus gráficas pueden consultarse en el Anexo 1.

3.3.3 Modelación hidrológica para RCP4.5 y RCP 8.5 en los períodos 2046-2075 y 2071-2100.

De forma similar al proceso detallado en el apartado 3.3.2, se modelaron el resto de escenarios climáticos. Los resultados tabulados y gráfica de caudales totales y subterráneos comparados pueden consultarse en los Anexos 1-4. A partir del proceso de simulación de la respuesta hidrológica de la cuenca ante escenarios climáticos es posible apreciar una reducción general de aportaciones totales en la cuenca del lago de Coatepeque con respecto al comportamiento actual.

La reducción de caudales podría representar el 18.01% de las aportaciones totales para RCP4.5 en el período 2046-2075 y aumentar a 21.49% de dichas aportaciones para el RCP8.5 en el período 2071-2100. Estos porcentajes representan caudales entre 0.56 m³/s y 0.67 m³/s, para cada escenario, respectivamente (Figura 36 y Tabla 36).

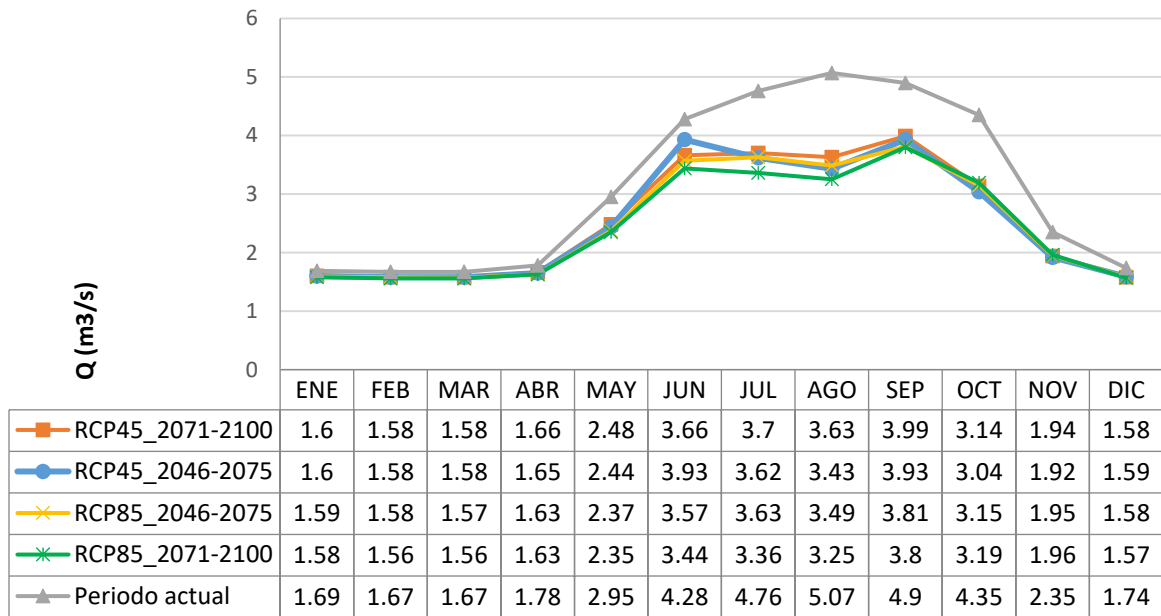


Figura 36 Hidrograma de año medio en la cuenca del lago de Coatepeque, para condiciones actuales y escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 en los períodos 2046 -2075 y 2071-20100

Tabla 36.

Variación de las aportaciones totales a partir de los balances hídricos para los escenarios climáticos RCP4.5 y RCP 8.5 en los períodos 2046-2075 y 2071-2100

Escenario	m ³ /a	m ³ /s	Dif (m ³ /año)	Dif (m ³ /s)	% Reducción
<i>RCP85_2046-2075</i>	80416800	2.55	-17663616	-0.56010959	18.01%
<i>RCP85_2071-2100</i>	79785216	2.53	-18295200	-0.58013699	18.65%
<i>RCP85_2046-2075</i>	78781248	2.50	-19299168	-0.6119726	19.68%
<i>RCP85_2071-2100</i>	77003136	2.44	-21077280	-0.66835616	21.49%
<i>Caudales actuales</i>	98080416	3.11	0	0	0.00%

Capítulo IV.

Balance hídrico del lago de Coatepeque en un sistema de soporte de decisión

4.1 Conceptualización del modelo de gestión del lago de Coatepeque

La integración de la caracterización de la cuenca, el levantamiento de demandas de agua y el balance hidrológico correspondientes a los productos 2 y 3 y la primera parte de este producto 4, permitió formular un modelo conceptual de funcionamiento del sistema hidrológico desde la perspectiva de la gestión hídrica, el cual ha sido modelado con el Sistema de Soporte de Decisión Aquatool + versión 6.7.10 (Universitat Politècnica de Valencia). Según se presenta en la Figura 37. Este modelo consiste en una interface de apoyo para la decisión en planificación y gestión de cuencas (Solera Solera et al., 2015).

El modelo conceptual se ha construido de la siguiente forma: en el lago de Coatepeque las entradas de agua corresponden a la convergencia de todas las aportaciones generadas en la cuenca (Aportación_1), las cuales corresponden al flujo superficial, subsuperficial o interflujo y flujo subterráneo. La integración de estos flujos ingresa al lago de Coatepeque mediante un elemento de conducción (Flujos_de_ingreso), simulado como un embalse (Lago Coatepeque).

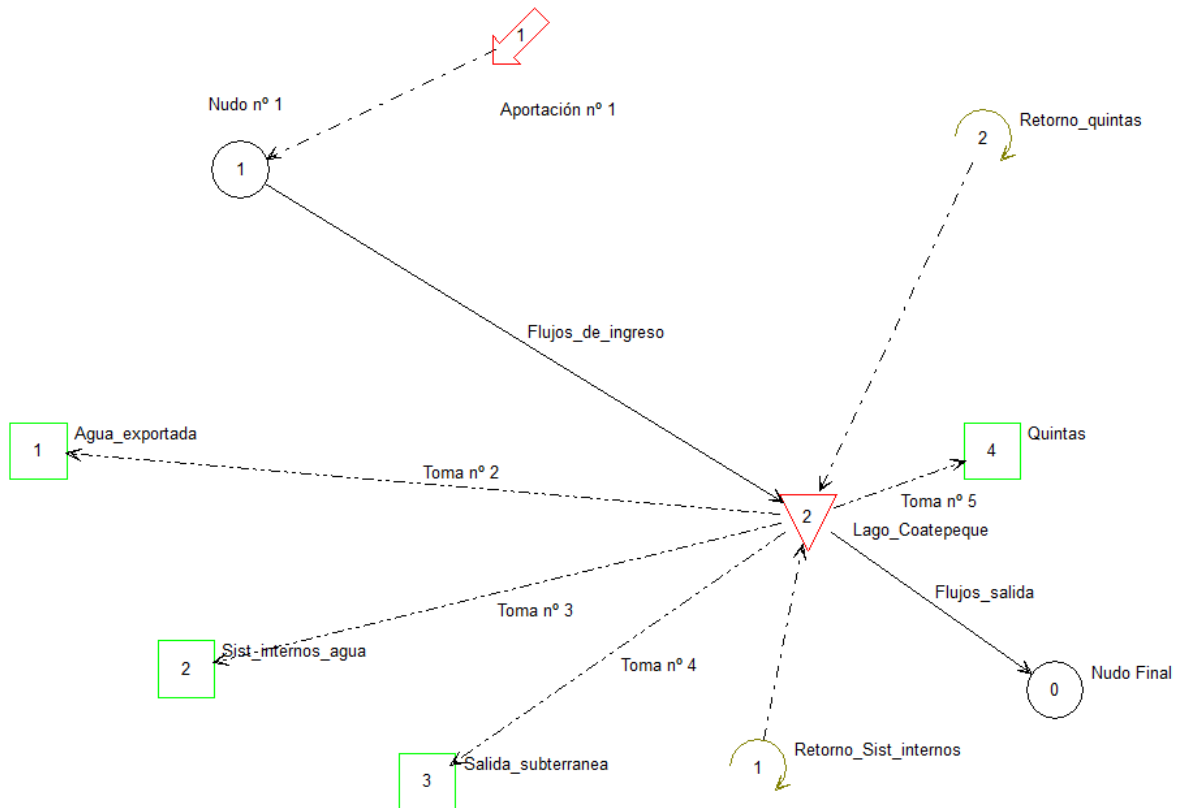


Figura 37 Modelo de gestión construido para el lago de Coatepeque utilizando Aquatool

Las salidas de agua del lago están conformadas por las salidas naturales integradas por su componente de evaporación y el caudal subterráneo que alimenta principalmente a la cabecera de los ríos Sucio y Suquiapa, potencialmente al río La Joya (simulados en el modelo como salida_subterranea). A estas salidas se suman las demandas antrópicas que pueden subdividirse desde la perspectiva de la gestión, en: (a) Quintas; (b) Demandas de agua exportada; y (c) Demandas internas en la cuenca. La primera y la última retornan agua al sistema, cuyo porcentaje fue estimado en 50% a partir de la experiencia de datos levantados en campo (Retono_Sis_internos y Retorno_quintas).

4.1.1 Configuración del funcionamiento del embalse

Para realizar esta tarea, se retomó los resultados del hidrológico de la cuenca determinado en el capítulo II y III para condiciones normales y con cambio climático, respectivamente. Los datos de entrada utilizados corresponden a las aportaciones totales de la cuenca (Tabla 22) y la evaporación potencial del lago (Tabla 11), que para el caso, correspondería a la evaporación real. Adicionalmente, se utilizó el registro histórico de niveles en el lago, que corresponde al período 2012 – 2018, y a los datos procesados de volumen correspondientes (Tabla 16), de estos datos se desarrollaron dos correlaciones lineales; volumen – elevación y superficie – elevación, que permitieron extrapolar volúmenes en niveles inferiores a los monitoreados a efecto de definir los volúmenes objetivo, mínimo y cero para efecto de la construcción del modelo (Figura 38 y Figura 39).

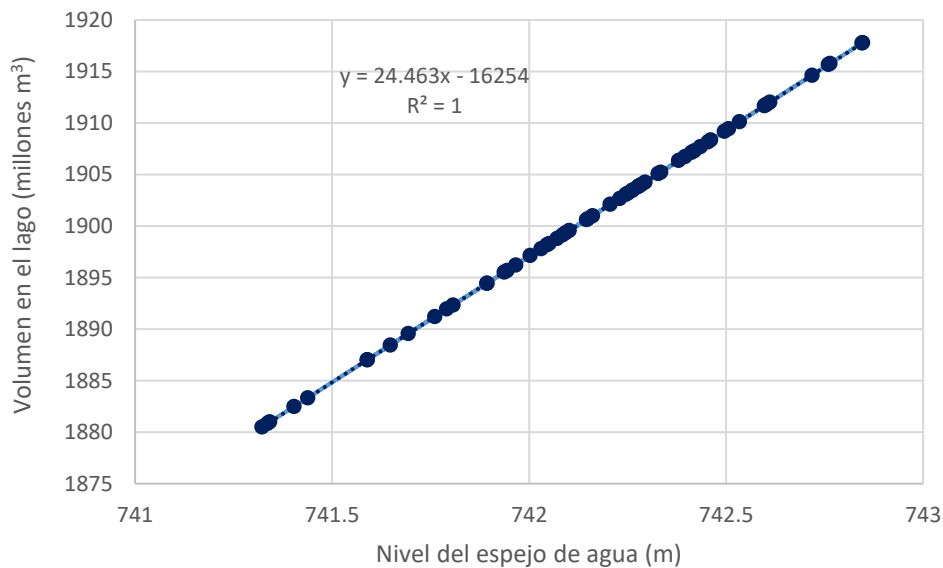


Figura 38 Relación entre volumen en el embalse y niveles registrados, con valores obtenidos de registro de monitoreo MARN y batimetría del lago de Coatepeque (MZ Consultores S.A. de C.V., 2020).

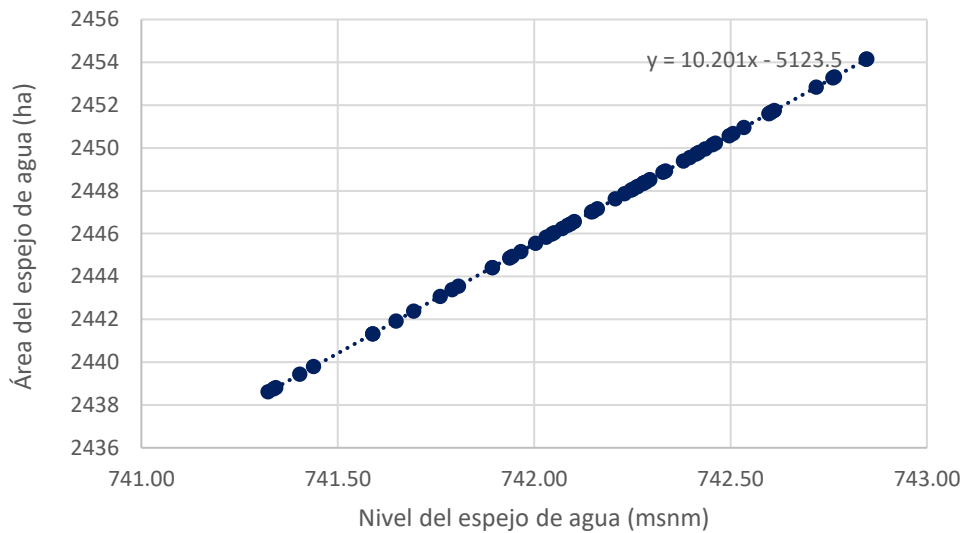


Figura 39 Relación entre el área del espejo de agua en el embalse y niveles registrados, con valores obtenidos de registro de monitoreo MARN y batimetría del lago de Coatepeque (MZ Consultores S.A. de C.V., 2020).

Los niveles fueron definidos retomando el concepto de funcionamiento del software para la gestión de embalses (Figura 40), por lo tanto, se definió los niveles máximo, objetivo, mínimo y cero. Para configurar razonablemente el sistema, el nivel máximo se definió como el nivel máximo alcanzado por el registro de niveles del período 2013-2018. Para definir el nivel de fondo, se analizó el registro histórico y se adoptó como el valor de 739 msnm al cual corresponde un volumen de 1824.16 Mm³.

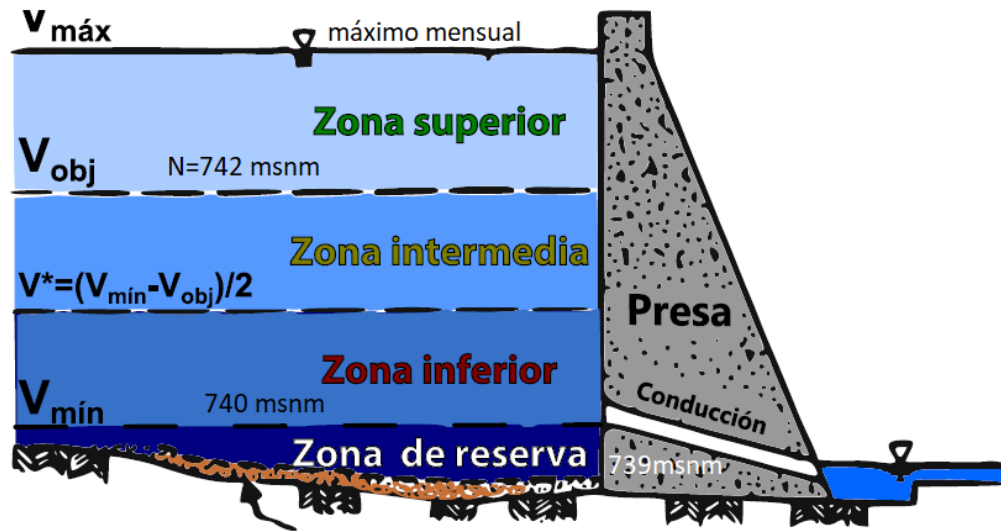


Figura 40 Esquema conceptual de niveles y funcionamiento del embalse en Aquatool+
 Fuente: Solera Solera et al. (2015)

Ese nivel mínimo corresponde para el modelo a un volumen de cero (fondo del embalse) para delimitar la disponibilidad de las salidas en el cuerpo de agua. Todos los volúmenes utilizados en el modelo fueron calculados como la diferencia entre el volumen total del lago a ese nivel y el volumen en el nivel de cota cero (Figura 40). De esta forma, se definió como nivel objetivo, el valor de 742 msnm, y se calculó su volumen correspondiente. Este nivel corresponde aproximadamente con el nivel medio entre los valores reportados en el registro de monitoreo (Figura 38), sin embargo puede modificarse a criterio del MARN en base a las decisiones de manejo que se adopten para el lago.

El volumen contenido entre el nivel máximo y el nivel objetivo, contiene el agua que el modelo utilizará para satisfacer las demandas inicialmente, en este rango de niveles. En una forma similar se adoptó el nivel mínimo con un valor de 740 msnm ya que es un nivel por debajo de los niveles reportados a la fecha. Este a su vez puede modificarse en base a las decisiones de manejo del lago. En la Figura 40 se reflejan los niveles adoptados para el cálculo de los volúmenes en el lago de Coatepeque y en la Tabla 37 se reportan los valores iniciales adoptados para su funcionamiento óptimo.

Tabla 37.
 Volúmenes utilizados en el modelo de gestión del lago de Coatepeque

nivel objetivo	742
Vobjetivo embalse	18975460
nivel muerto	740

Levantamiento de demandas de agua y elaboración del Balance Hídrico del Lago de Coatepeque
 Producto 4 Balance hídrico integral de la cuenca del lago de Coatepeque

Volumen
 embalse
 muerto 18486200
 Cota cero 739
 Volumen de
 cota cero 18241570

	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
Volumen máximo a final de mes descontado resguardo por avenidas (hm³)	936008	936499	915151	875177	831554	800940	785272	789188	825920	835474	859734	916133
Volumen Objetivo	733890	733890	733890	733890	733890	733890	733890	733890	733890	733890	733890	733890
Embalse muerto (hm³)	244630	244630	244630	244630	244630	244630	244630	244630	244630	244630	244630	244630

La variación de niveles, cotas y volúmenes utilizados en el modelo son presentados en la Figura 41.

Cota	Sup. (Ha)	Vol. (Hm³)
739	0	0
740	2415.04	244630
741	2425.24	489260
741.32	2435.44	563426
741.59	2436.6	628573
741.94	2443.07	715305
742.15	2444.9	765692
742.29	2447.04	798736
742.72	2448.4	904848
742.85	2454.14	936007

Figura 41 Niveles, áreas y volúmenes utilizados para el modelo de gestión

Para las demandas, se utilizó inicialmente valores constantes ya que no se cuenta con datos de variación temporal de dicho parámetro. Los valores utilizados se presentan en la Tabla 38. Adicionalmente, se configuró las conducciones y las aportaciones en base a los resultados del balance hídrico (Tabla 22).

4.1.2 Resultados de la simulación del balance hídrico del lago de Coatepeque

Como parte del proceso de análisis de resultados, se procedió a verificar el cumplimiento de las demandas de agua y la sostenibilidad del nivel objetivo. Los resultados indican que en general para años medios y húmedos el nivel objetivo de 742 msnm se mantiene, mientras que para años secos muestra meses en los cuales este nivel se reduce tal y como se ha reportado en el monitoreo de niveles en el lago.

Tabla 38.

Demandas de agua configuradas en el modelo inicial de gestión del lago de Coatepeque

	<i>Dem AP_exportada (m3/mes)</i>	<i>Dem Sistemas_internos (m3/mes)</i>	<i>Quintas (m3)</i>	<i>Salidas subterráneas</i>
<i>OCT</i>	697	553	322	69116
<i>NOV</i>	697	553	598	69116
<i>DIC</i>	697	553	598	69116
<i>ENE</i>	697	553	598	69116
<i>FEB</i>	697	553	598	69116
<i>MAR</i>	697	553	598	69116
<i>ABR</i>	697	553	598	69116
<i>MAY</i>	697	553	322	69116
<i>JUN</i>	697	553	322	69116
<i>JUL</i>	697	553	322	69116
<i>AGO</i>	697	553	322	69116
<i>SEP</i>	697	553	322	69116
<i>TOTAL</i>	8364	6636	5520	829392
<i>Retorno</i>	0	0.5	0.5	0

Uno de los elementos que se incorporó en el modelo fue una salida que colectara el agua el nivel máximo registrado en el lago fuese superado (partiendo del hecho que el nivel no se eleva más en base al registro reciente 2012-2018), simulando un aumento en las salidas que no han sido contabilizadas en este momento y que podrían estar integradas tanto por salidas naturales como por salidas antrópicas. Asimismo, se evaluó el inicio de la simulación para nivel máximo inicial reportado como para nivel mínimo registrado en el embalse. En ambas condiciones, el sistema tiende a estabilizarse y reportar niveles inferiores al nivel objetivo solamente en pocos meses durante los años 2010, 2016, 2017 y 2018 (Figura 42 y Figura 43).

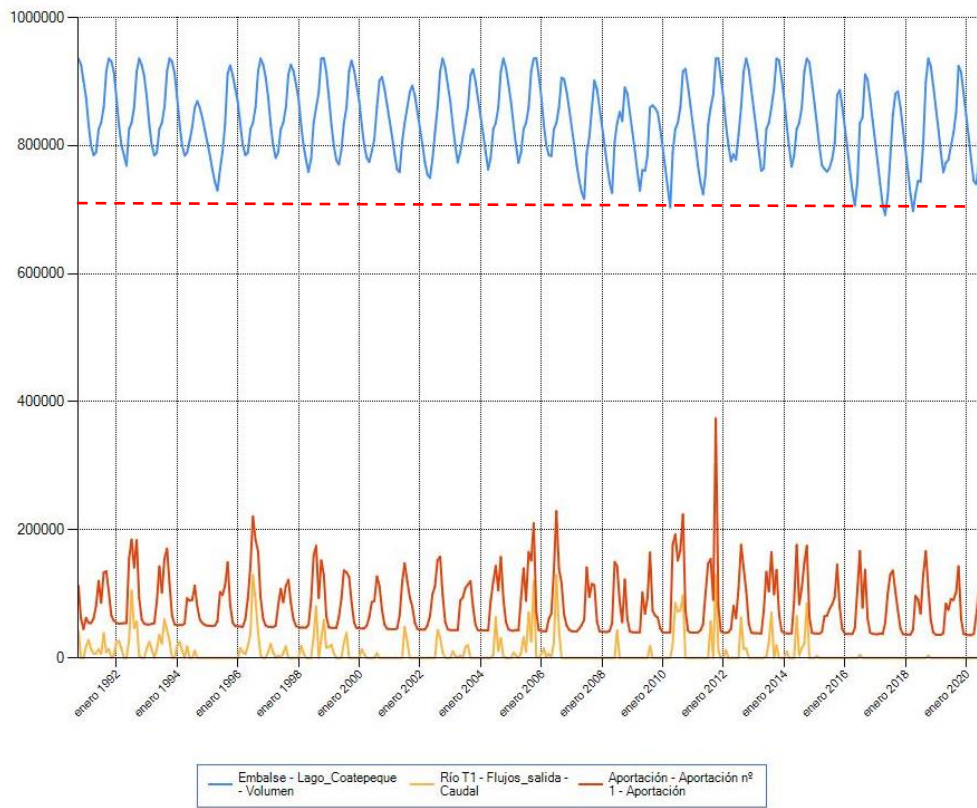


Figura 42 Volumen de agua en el lago, las aportaciones y el flujo de salida (demandas no contabilizadas), considerando nivel máximo inicial

A partir de la identificación de estos flujos de salida se procedió a analizar su comportamiento temporal, teniendo en cuenta que este flujo puede asociarse a una demanda predominante, tomando en consideración su comportamiento convencional, así:

- Si las salidas se concentran en los meses secos, es posible asociar dichos caudales no contabilizados a demandas por riego de jardines y otros usos asociados a mayor demanda en la época seca. A esta salida podría sumarse la evaporación por encontrarse en meses de mayor temperatura.
- Si existe una tendencia de exceso que mantenga un caudal base mínimo constante, es posible asociarlo a consumo doméstico.
- Si los excesos responden a un comportamiento estacional concentrado en la época lluviosa, es posible que estas demandas se integren a un aumento en la carga hidráulica del embalse, cuyo valor máximo se regula naturalmente a través de un aumento en las salidas del lago.

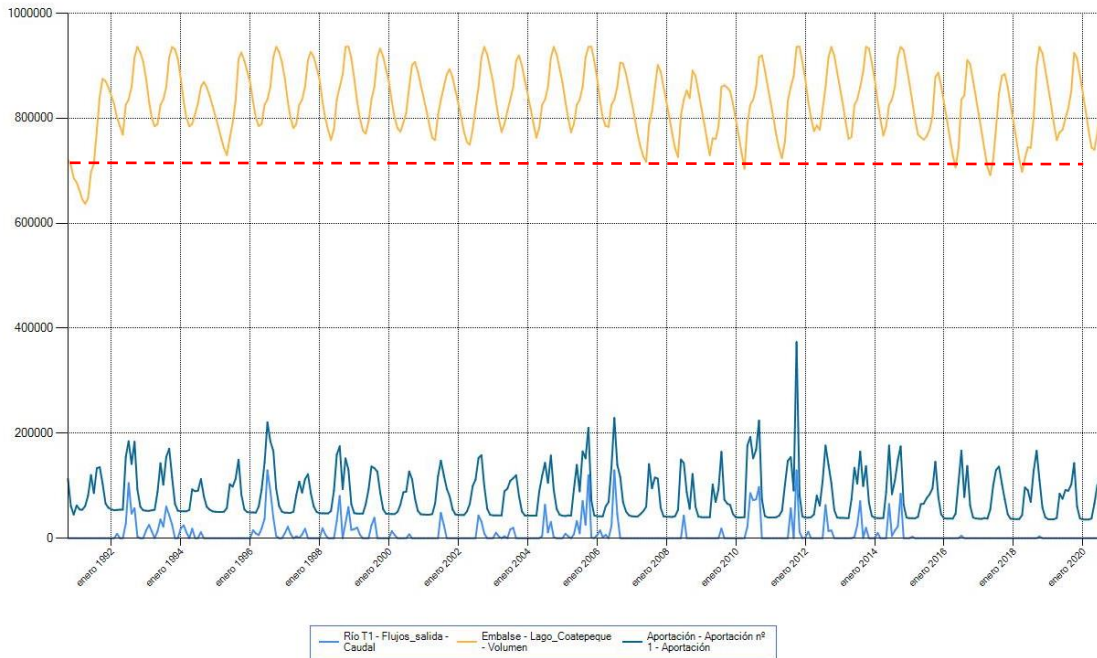


Figura 43 Volumen de agua en el lago, las aportaciones y el flujo de salida (demandas no contabilizadas), considerando nivel mínimo inicial

4.1.3 Salidas de agua desde el lago de Coatepeque hacia cuencas vecinas

A partir de la Figura 42 y Figura 43, es posible deducir que de los casos antes descritos, el comportamiento de estos flujos de salida no contabilizados se ajusta mejor a un aumento en las salidas de agua subterránea (Figura 44), esto es, el caudal de agua subterránea adoptado a partir del balance hídrico, podría ser mayor, en este caso, se obtuvo un promedio en modelo del balance del lago igual a 345 L/s, lo cual representaría un aumento para años húmedos en el total de salidas de agua desde el lago hacia otras cuencas.

Los resultados del balance hídrico de la cuenca indicaron que el flujo de salida subterráneo en promedio era de 2.63 m³/s, sin embargo, a partir de la simulación es posible indicar que este valor puede llegar a alcanzar valores medios anuales de 2.98 m³/s, que representaría salidas anuales desde el lago que podrían variar entre 89.94 Mm³/año y 93.82 Mm³/año en promedio. Este volumen de salidas representa aproximadamente el 50% de la demanda de agua abastecida por la ANDA para el Área Metropolitana de San Salvador. Es importante considerar que, en años secos, el límite inferior podría de salidas también podría reducirse, sin embargo esta evaluación se encuentra fuera del alcance de esta consultoría y requiere investigación permanente.



Figura 44 Variación media del volúmenes de salida de agua del lago (superan nivel máximo), estas se han contabilizado como salidas de agua subterránea adicionales. Mes inicia en Octubre.

Al adicionar la demanda bajo estas condiciones, el modelo se ajusta bien para años en transición húmeda a transición seca, sin embargo, para años muy secos, tiende a sobreestimar el nivel de agua en el lago (Figura 45), indicando la necesidad de un mayor monitoreo para ajustar las salidas por períodos. Posiblemente en años húmedos esta demanda obedezca a un aumento en la evaporación del lago, sin embargo, no se cuenta con suficiente información para realizar este ajuste.

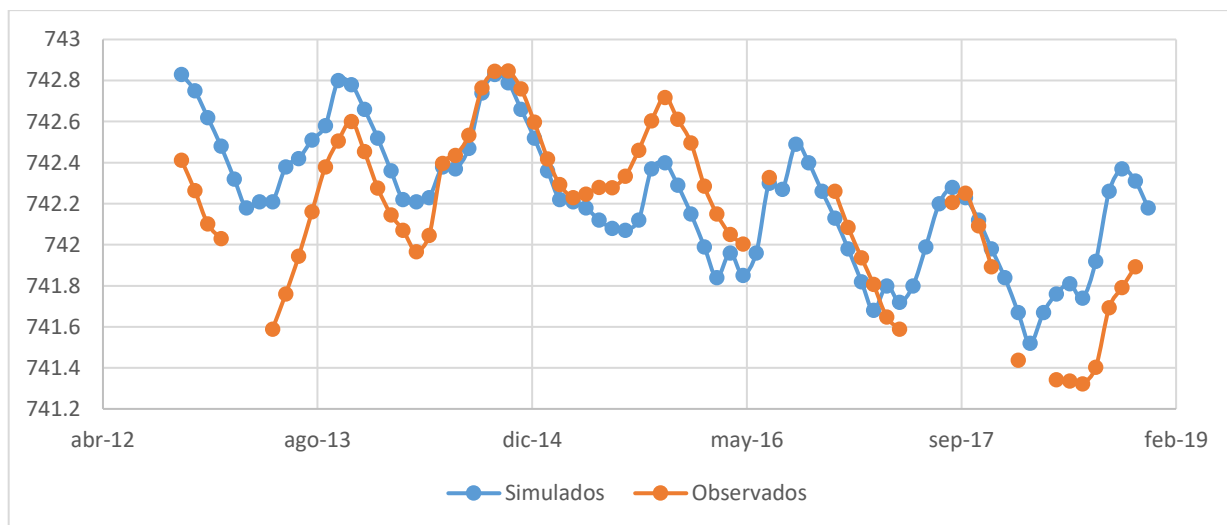


Figura 45 Valores simulados y observados para niveles de agua en la cuenca del lago de Coatepeque, utilizando el sistema de Soporte a la Decisión Aquatool.

Capítulo V. Conclusiones

Los tipos de suelos identificados en la cuenca del Lago de Coatepeque, son cuatro: Regosoles, Aluviales, Latosoles arcillo rojizos y Litosoles, más la combinación de algunos de éstos. Se han identificado cinco clases de texturas de los suelos, que van desde arenas medias hasta franco limosos, muy permeables. Predominan los suelos Franco arenosos finos.

A partir de la información disponible se ha estimado que la capacidad de almacenamiento de humedad en los suelos de la cuenca podría oscilar entre 22.86 y 53.34, por pie de espesor de suelo. La humedad disponible en suelos para toda la cuenca se estimó en 60 mm, para un espesor promedio ponderado de 0.39 m.

La textura de los suelos permite una alta infiltración, lo cual se debe a que retienen poca humedad, por lo que la mayor parte de la humedad percola a mayores profundidades, convirtiéndose en recarga para el acuífero.

Por el método de balance hídrico de Thornthwaite y L. Serra, se obtuvo una recarga alta, mayor que la escorrentía superficial, la cual se produce únicamente durante la temporada de lluvias. Los flujos superficiales y subterráneos llegan eventualmente hacia la masa de agua del Lago de Coatepeque.

Se realizó un artificio para poder aplicar el software en la modelación hidrológico de la cuenca, la variación de niveles medida desde una estación limnimétrica del MARN, se tradujo en variación de volúmenes y luego en caudales. Dichos caudales así obtenidos se utilizaron en la calibración, pero antes se naturalizaron, es decir se les quitó toda afectación antropogénica, así: Los caudales extraídos se le sumaron y los retornos de los sistemas sanitarios se le restaron.

Para tomar en cuenta la evaporación del lago, se aplicaron factores de evaporación recomendados por la FAO y citados por el SNET en el balance hídrico de El Salvador. Luego se ponderaron la evapotranspiración de la fase terrestre y la evaporación de la fase acuosa, para obtener la evapotranspiración potencial distribuida en el área de la cuenca.

Se logró una calibración muy buena en el ajuste de los volúmenes de agua del modelo, con un error medio de 1.74%; sin embargo, el ajuste en la forma no fue muy bueno, con un error relativo (caudales bajos) de 24.99% y un error cuadrático (caudales altos) de 26.94%. Esto es así por la falta de información, ya que solo se obtuvieron dos años completos de mediciones de niveles (caudales).

Los parámetros calibrados en el Modelo de Temez son los siguientes: $C=0.20$ (parámetro de excedencia), $H_{max}=60$ mm (capacidad máxima de retención de humedad del suelo), $I_{max}=1000$ mm (capacidad máxima de infiltración del suelo); $a_1=0.0001$ y $a_2=0.1$ (ramas de descarga de los acuíferos), una de las ramas de descarga es la que condiciona más, la de mayor desfase en días, es decir el valor más bajo.

Luego de calibrado el modelo, se restauraron los caudales al régimen alterado, para la misma serie que fueron naturalizados, 2012-2018 (período en el que se midieron niveles de agua en el lago) para conocer las condiciones actuales. El caudal medio anual es de 2.86 m³/s, con variaciones mensuales promedio de 1.40 hasta 4.86 m³/s. Dichas variaciones son los

caudales que descarga la caldera de Coatepeque hacia las cuencas vecinas de Zapotitán y Santa Ana, produciéndose el mínimo en febrero y el máximo en septiembre.

Con el modelo calibrado y validado, se procedió a la simulación hidrológica para dos escenarios de cambio climático, de los ensambles RCP 4.5 y RCP 8.5, realizándose dos simulaciones para cada escenario, proyectados a 25 y 50 años, siendo los períodos de 30 años, de 2046-2075 y 2071-2100. Como la longitud de las series es igual, el comportamiento resultante de las 4 simulaciones (2 por cada escenario) es muy similar en su forma y tendencia, siempre a la baja.

Los promedios anuales de los caudales totales para las simulaciones RCP 4.5, resultaron de 2.53 y 2.54 m³/s, para los períodos de 2046-2075 y 2071-2100, respectivamente. De similar manera, los promedios anuales de los caudales totales para las simulaciones RCP 8.5, resultaron de 2.49 y 2.44 m³/s, para los períodos de 2046-2075 y 2071-2100, respectivamente. Estos resultados alarman sobre una sensible reducción de la disponibilidad de agua en la cuenca, razón por la cual el sistema de soporte de decisión y el monitoreo permanente es de suma importancia.

Los resultados de las simulaciones, con relación a la condición actual, siempre es a la baja, para los dos escenarios y los 4 períodos; sin embargo, la simulación del escenario RCP 8.5 disminuye aún más el caudal medio anual. Condición actual: Caudal Medio Anual=2.86 m³/s. Escenario RCP 4.5: Caudal Medio Anual: 2.53 m³/s (período 2046-2075) y 2.54 m³/s (período 2071-2100). Escenario RCP 8.5: Caudal Medio Anual: 2.49 m³/s (período 2046-2075) y 2.44 m³/s (período 2071-2100).

Modelación de balance del lago de Coatepeque

El modelo de balance mediante el sistema de gestión de las demandas ha permitido un mayor entendimiento del comportamiento del sistema hidrológico del lago de Coatepeque. Los resultados indican que bajo las condiciones actuales para años medios y húmedos la cuenca es capaz de satisfacer las demandas antrópicas totales internas de 0.038 m³/s, y de agua exportada de 0.027 m³/s, un total de 2.27% aproximadamente, manteniendo la condición de salida subterránea que puede variar entre 2.63 m³/s y 2.98 m³/s, asimismo podría mantener un nivel objetivo de operación de 742 msnm. Adicionalmente, los datos indican que para años hidrológicos secos consecutivos el nivel del lago caerá por debajo de dicho nivel, pudiendo alcanzar una recuperación para períodos hidrológicos húmedos consecutivos, si estos ocurren con intensidades similares a las históricas para la zona.

A partir de los modelos de balance y gestión elaborados en este estudio, las salidas subterráneas de agua del lago de Coatepeque han sido contabilizadas en un rango de valores que podría oscilar entre 2.63 m³/s y 2.98 m³/s pueden representar entre el 91.96% y llegar hasta 104.2%, de las aportaciones totales. Estos resultados pueden explicar la sensible variación de niveles percibida en el lago y la percepción de la población sobre una tendencia a la reducción de niveles en el cuerpo de agua. Sin embargo, estas salidas obedecen a

procesos naturales que se vuelven casi imposibles de controlar en base a las capacidades humanas y tecnológicas actuales.

Pese a las dificultades de acceso a datos climáticos precisos para la cuenca del lago de Coatepeque, ha sido posible establecer un balance calibrado de la cuenca del lago de Coatepeque, lo cual originó un buen ajuste en el modelo de sistema de gestión, que a su vez ha facilitado la identificación de flujos adicionales de salida que no se habían contabilizado con anterioridad. Estudios anteriores habían contabilizado valores de 41.34 Mm^3 de salidas subterráneas, los cuales han superado el doble a partir de los datos analizados en este estudio, resultando entre 82.94 Mm^3 y 93.98 Mm^3 , indicando además que el lago está evacuando agua de su almacenamiento en algunos años, lo cual explica los descensos continuos reportados en los últimos años.

Un aspecto importante a considerar es que la variación en el nivel del lago puede reflejar una reducción importante en las salidas, ya que por ser un cuerpo embalsado, sus caudales dependen de la carga hidráulica que se tenga en el punto de salida, y al reducirse el nivel, también se tendrá una reducción en los caudales.

Capítulo VI. Recomendaciones

Aunque en este informe se ha logrado el mejor ajuste posible en el balance hídrico del lago y puede considerarse que se ha reducido la incertidumbre de forma importante a partir de un modelo calibrado con un registro de mediciones en el nivel del lago, es muy importante que se reactive la estación climática Cerro Verde o se implemente una equivalente, para mejorar la distribución de las variables climáticas y afinar el balance en futuras evaluaciones.

Asimismo, es necesario que se establezca un sistema de monitoreo de evaporación en la zona del lago de Coatepeque, ya que dada la alta relevancia que este cuerpo de agua presenta y lo ajustado del balance entre las entradas y las salidas, la medición de este parámetro es fundamental para estimar los flujos de retorno de humedad a la atmósfera.

Brindar constante monitoreo y mantenimiento a la estación limnimétrica instalada en el lago para el monitoreo de sus niveles, de forma tal que se pueda ir conociendo la respuesta que tiene el sistema a las condiciones climáticas presentes y que tendrá a las futuras condiciones.

Pese a que las demandas antrópicas no superan el 3% de las aportaciones anuales en el lago de Coatepeque, es importante que los usuarios de la cuenca conozcan cómo se comporta el sistema y cuiden el agua que consumen y extraen de ese cuerpo de agua.

Tanto al interior como al exterior de la cuenca, es necesario tener presente la reducción de la disponibilidad de agua que se prevé tener por efectos del cambio climático. Por lo tanto, deben orientarse medidas hacia el manejo de la demanda ya que la variación de las condiciones naturales es casi imposible de controlar. Por tanto, en este caso, son la predicción y la resiliencia las que pueden ayudar a sobrellevar los retos que se ven venir bajo las condiciones de clima cambiante que se enfrentan en el planeta.

Referencias

- Centro de Pronóstico Hidrológico. (2020). *Balance hídrico—Lago de Coatepeque, Santa Ana, El Salvador*. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- FISDL. (2005). *Mapa de pobreza Tomo 1: Política social y focalización* (p. 173). Fondo de Inversión Social y Desarrollo Local (FISDL).
- Marchand Malevez, J. (2005). *Investigaciones hidrogeológicas, hidrológicas e hidroquímicas en el lago de Coatepeque*. FORGAES - SNET.
- MARN. (2018). *Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático* [Comunicación Nacional]. Gobierno de El Salvador.
- Mena, Z. E., Grande, L., & Salguero, M. (2021). *Evaluación de la calidad del agua del lago de Coatepeque. El Salvador -2021* (p. 32). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- MZ Consultores S.A. de C.V. (2020). *Informe de Batimetría del Lago de Coatepeque* (p. 35). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Servicio Hidrológico Nacional. (2005). *Balance Hídrico Integrado y Dinámico de El Salvador. Componente Evaluación de Recursos Hídricos*. Servicio Nacional de Estudios Territoriales.
- Solera Solera, A., Paredes Arquiola, J., & Andreu Álvarez, J. (2015). *Aquatool+ Entorno de desarrollo de sistemas de ayuda a la decisión en materia de planificación de la gestión de cuencas hidrográficas incluyendo utilización conjunta y criterios de calidad de aguas*.

ANEXOS



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS
NATURALES

www.marn.gob.sv | medioambiente@marn.gob.sv

