



Universidad de Ciego de Ávila
Facultad de ingeniería



Centro de estudios
hidrotécnicos



Ministerio de la Agricultura
Instituto de Investigaciones
de Ingeniería Agrícola

**IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO WEAP COMO
HERRAMIENTA DE PLANEACIÓN DEL AGUA PARA
LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA, CONSIDERANDO
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO. CASO DE
ESTUDIO: CUENCAS DEL SISTEMA HIDRÁULICO
SUR CENTRO DE LA PROVINCIA DE PINAR DEL RÍO.**

Tesis presentada en opción al título de Maestro en Riego y Drenaje

Autor: Ing. Guillermo Hervis Granda

Tutores: Dra. Teresa López Seijas

Dr. Gerardo Sánchez Torres-Esqueda

La Habana, Cuba
2020



Universidad de Ciego de Ávila
Facultad de ingeniería

Centro de estudios
hidrotécnicos

Ministerio de la Agricultura
Instituto de Investigaciones
de Ingeniería Agrícola

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO WEAP COMO HERRAMIENTA DE PLANEACIÓN DEL AGUA PARA LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA, CONSIDERANDO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO. CASO DE ESTUDIO: SISTEMA HIDRÁULICO SUR CENTRO DE LA PROVINCIA DE PINAR DEL RÍO.

Tesis presentada en opción al título de Maestro en Riego y Drenaje

Autor: Ing. Guillermo Hervis Granda

Tutores: Dra. Teresa López Seijas

Dr. Gerardo Sánchez Torres-Esqueda



La presente tesis se desarrolló en el marco del proyecto de cooperación internacional BASAL, Bases Ambientales para la Sostenibilidad Alimentaria Local, que se ejecuta en Cuba desde el 2013 con financiamiento de la Unión Europea y la Agencia Suiza COSUDE, implementado por el PNUD y liderado por la Agencia de Medio Ambiente y el Inst. de Geografía Tropical, con la participación de entidades del MINAG y del MES

IMPLEMENTADO POR:



FINANCIADO POR:



DEDICATORIA

Por la confianza, por el apoyo incondicional, por todas las enseñanzas y horas dedicadas a mi formación profesional.

Por enseñarme lo maravilloso que puede ser dedicarse a la ciencia y el placer infinito que dan sus resultados

Por darme la seguridad que muchas veces me faltó para enfrentar este reto, el cual puedo ver enteramente cumplido gracias a ustedes

Esta tesis va dedicada a mis amigos del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola y de la Universidad Autónoma de Tamaulipas

Teresa López Seijas

Felicita González Robaina

Carmen Duarte Díaz

Marta Cambra Cuba

Yoima Chaterlán Durruty

Rocío del Carmen Vargas Castillejas

Julián Herrera Puebla

Gerardo Sánchez Torres-Esqueda

Greco Cid Lazo

Enrique Cisneros Zayas

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su amor, por apoyarme en todo momento, por hacer de mí el hombre que soy y por enseñarme que para conseguir las cosas en la vida se necesita una alta dosis de sacrificio y perseverancia

Al Dr. Julián Herrera Puebla, por todas sus acertadas aportaciones y recomendaciones para la afrontar la investigación y la discusión de los resultados, por su amistad

A mis compañeros del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, a los mencionados en la dedicatoria y a todos en general, por todo el apoyo en el desarrollo de este trabajo y por darme la oportunidad de representarlos en este reto

Al proyecto BASAL, por todo lo me ha enseñado y por darme la oportunidad de hacer de sus objetivos parte de mi investigación, en especial al Dr. Juan Mario Martínez Suárez, que me consideró para formar parte del equipo de modelación de gestión de agua del proyecto y por su apoyo para mi formación

A mis compañeros del Instituto de Geografía Tropical: Dra. Tatiana Geler Roffe y MsC. Elieser Mármol Fundora, y al Dr. Iban Amestoy y MsC. Ezio Cretaz del Join Research Center, por todas sus enseñanzas y el acompañamiento en las difíciles horas de implementación del modelo

A los colegas de Ingenieros Sin Fronteras México y a la División de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, en especial al Dr. Gerardo Sánchez Torres-Esqueda, la Dra. Rocío del Carmen Vargas Castillejas y al Dr. Julio Cesar Rolón Aguilar por la posibilidad que me dieron de formarme con ellos en tres estancias académica

A los más valiosos estudiantes que tuve en mi paso por el Centro de Investigaciones Hidráulicas: Rosmely, Arianna, Rafael, Adrián e Hiran

Resumen

La práctica habitual para el planeamiento hidrológico a nivel de cuenca en el mundo es el empleo de modelos de simulación y modelos hidrológicos, en particular para trazar estrategias de desarrollo a partir del análisis de escenarios climáticos. El objetivo de este trabajo fue calibrar el modelo WEAP, acoplado a un modelo hidrológico, como herramienta para la planeación del agua para la producción agrícola, considerando escenarios de cambio climático, en el sistema hidráulico Sur-Centro de la provincia de Pinar del Río. Para su realización se generaron primeramente las bases de datos geoespaciales y alfanuméricas necesarias para el proceso de modelación hidrológica y de la gestión de los recursos hídricos, considerando además escenarios de cambio climático. Se implementó y calibró un modelo hidrológico distribuido para la generación matemática de los escurrimientos medios mensuales de las cuencas analizadas. Se construyó en el ambiente de WEAP el modelo conceptual de la gestión del agua del sistema hidráulico en estudio, involucrando las fuentes de agua, la infraestructura para el aprovechamiento de los recursos hídricos y los usuarios del agua. Para la calibración de la operación de las fuentes de agua, se utilizó como variable observada el volumen de almacenamiento del embalse. Finalmente se evaluó el balance disponibilidad-demanda para la producción agrícola de la zona de estudio, considerando escenarios de demanda futura y escenarios de cambio climático. Se concluye que los parámetros calibrados en el modelo hidrológico permiten explicar los caudales medios mensuales en los períodos y subcuencas estudiadas en el orden del 83% como promedio y del 78% para el período de validación. El modelo conceptual de la gestión del agua generado con WEAP permite representar espacialmente las fuentes de agua y las conexiones entre éstas, la infraestructura para el aprovechamiento de los recursos hídricos y los usuarios del agua. El modelo WEAP con los parámetros calibrados es capaz de representar el 93% como promedio de la variación de los volúmenes de los 4 embalses estudiados. El balance general de los recursos hídricos promedio para las condiciones del escenario RCP 4.5 es positivo, con una proyección de 0.7% del volumen total de escurrimiento respecto al periodo antecedente. Para el escenario RCP 8.5 el balance es negativo, con una reducción proyectada del volumen de escurrimiento de 1.3% (cerca de 4.27 millones de m³ de agua). Para el escenario base (2010-2015) existe similitud entre la cobertura de agua representada por WEAP y las reportadas en el país por el INRH, con un déficit medio de 79.4 millones de m³ de agua (32.3% en el periodo mayo-octubre y 67.7% en el periodo noviembre-abril). Los resultados demuestran las potencialidades de la herramienta para el estudio de la disponibilidad de los recursos hídricos y el planeamiento hidrológico, como soporte a la toma de decisión en la gestión de los recursos hídricos para la producción agrícola.

Abstract

The usual practice for hydrological planning at the basin level in the world is the use of simulation models and hydrological models, in particular to draw development strategies based on the analysis of climate scenarios. The objective of this work was to calibrate the WEAP model, coupled to a hydrological model, as a tool for water planning for agricultural production, considering climate change scenarios, in the South-Central hydraulic system of the province of Pinar del Río. To carry it out, the geospatial and alphanumeric databases necessary for the hydrological modeling process and the management of water resources were first generated, also considering climate change scenarios. A distributed hydrological model was implemented and calibrated for the mathematical generation of the monthly mean runoff from the analyzed basins. The conceptual model of the water management of the hydraulic system under study was built in the WEAP environment, involving the water sources, the infrastructure for the use of water resources and the water users. For the calibration of the operation of the water sources, the storage volume of the reservoir was used as the observed variable. Finally, the availability-demand balance for agricultural production in the study area was evaluated, considering future demand scenarios and climate change scenarios. It is concluded that the parameters calibrated in the hydrological model allow explaining the monthly mean flows in the periods and sub-basins studied in the order of 83% as an average and 78% for the validation period. The conceptual model of water management generated with WEAP allows the spatial representation of water sources and the connections between them, the infrastructure for the use of water resources and water users. The WEAP model with the calibrated parameters is capable of representing 93% as an average of the variation of the volumes of the 4 reservoirs studied. The general balance of average water resources for the conditions of the RCP 4.5 scenario is positive, with a projection of 0.7% of the total volume of runoff compared to the previous period. For the RCP 8.5 scenario, the balance is negative, with a projected reduction in runoff volume of 1.3% (about 4.27 million m³ of water). For the baseline scenario (2010-2015) there is similarity between the water coverage represented by WEAP and those reported in the country by the INRH, with an average deficit of 79.4 million m³ of water (32.3% in the period May-October and 67.7% in the November-April period). The results demonstrate the potential of the tool for the study of the availability of water resources and hydrological planning, as a support for decision-making in the management of water resources for agricultural production.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
1.1. Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y el Cambio Climático.....	5
1.2. Planeamiento hidrológico	6
1.3. Modelos hidrológicos	7
1.3.1. Algunos modelos hidrológicos consultados	8
1.4. Modelos de planeamiento y gestión de los recursos hídricos	10
1.4.1. Algunos modelos de planificación y gestión de los recursos hídricos consultados	11
1.5. Cambio climático	13
1.1. Repercusión en la disponibilidad de los recursos hídricos	14
1.2. Repercusión en la agricultura	14
1.3. Evidencias del impacto del cambio climático en Cuba	15
1.5.1. Cambio climático y la planificación hidrológica.....	15
1.6. Modelación del clima futuro.....	16
1.6.1. Aspectos generales sobre el funcionamiento del clima	16
1.6.2. Escenarios de emisiones de GEI	17
1.6.3. Modelos de cambio climático.....	19
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	22
2.1. Caracterización del área de estudio	22
2.1.1. Infraestructura hidráulica. Fuentes de agua.....	23
2.1.2. Características climáticas	24
2.1.3. Estaciones de medición de variables del ciclo hidrológico	25
2.2. Modelo de evaluación y planeamiento de los recursos hídricos (WEAP).....	26
2.2.1. Funcionamiento del modelo	26
2.2.2. Enfoque del modelado y configuración del problema para la investigación.....	26
2.2.3. Aspectos metodológicos para la calibración y validación.....	27
2.3. Etapa 1: Procesamiento y generación de la información básica para la modelación de la gestión del agua	27
2.3.1. Fase A: Análisis estadísticos de las variables hidrológicas.....	28
2.3.2. Fase B: Inventario de las demandas históricas de agua.....	29
2.4. Etapa 2: Modelación hidrológica	31
2.4.1. Generación matemática de la serie de escurrimiento medios mensuales	31
2.4.2. Calibración y validación del modelo hidrológico	33
2.5. Etapa 3: Generación de escenarios de cambio climático	35
2.6. Etapa 4: Modelación de la gestión de los recursos hídricos en WEAP	36
2.6.1. Construcción del modelo esquemático de la gestión del agua. Entrada de datos.....	37
2.6.2. Calibración de la operación de los recursos hidráulicos.....	39
2.1. Etapa 5: Análisis de escenarios base y futuros	40
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
3.1. Modelo esquemático de la gestión del agua	41
3.2. Calibración y validación del modelo hidrológico.....	43
3.3. Calibración de la operación de los recursos hídricos.....	48

3.4.	Análisis de las anomalías de cambio en la precipitación.....	52
3.4.1.	Escenario RCP 4.5 W/m ²	52
3.4.2.	Escenario RCP 8.5 W/m ²	54
3.4.3.	Resultados finales del análisis de anomalías de cambio en la precipitación	56
3.5.	Disponibilidad de los recursos hídricos para los escenarios de cambio climático	57
3.6.	Análisis de escenarios	62
3.6.1.	Escenario de referencia	62
3.6.2.	Resultados escenario 1	65
3.6.3.	Resultados del escenario 2	68
CONCLUSIONES.....		72
RECOMENDACIONES.....		73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		74
ANEXOS		86
Anexos 1: Información relativa a la caracterización del área de estudio.		86
Anexos 2: Procesamiento y generación de la información básica para la modelación.		92
Anexos 3: Modelación de la gestión de los recursos hídricos. Modelo WEAP.....		104
Anexo 4: Información complementaria sobre la estimación de la disponibilidad del agua para los escenarios de cambio climático		112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
Figura 1.1. Comportamiento de la temperatura previstos para los escenarios Vías de Concentración Representativa (RCPs).....	19
Figura 2.1 Mapa de ubicación de la región de estudio.	22
Figura 2.2 Flujograma de procesos de la fase A, etapa 1 en la investigación.	28
Figura 2.6 Flujograma de procesos de la etapa 4 en la investigación.....	37
Figura 2.7 Flujograma de procesos de la etapa 4 en la investigación.....	41
Figura 2.8 Matriz para la modelación de escenarios.....	41
Figura 3.1 Modelo esquemático de la gestión del agua del municipio Los Palacios creado en el modelo WEAP	42
Figura 3.2 Comparación de los caudales medios mensuales observados y simulados en el tramo de río de la subcuenca BC1, cuenca Bacunagua, para el período de calibración y validación.....	45
Figura 3.3 Comparación de los caudales medios mensuales observados y simulados en el tramo de río de la subcuenca LP-1, cuenca Los Palacios, para el período de calibración y validación.	45
Figura 3.4 Comparación de los caudales medios mensuales observados y simulados en el tramo de río de las subcuencas SD-1, 2 y 3, cuenca San Diego para el período de calibración y validación.	45
Figura 3.5 Regresión forzada al origen de coordenadas entre caudales medios mensuales observados y simulados en el período de calibración del modelo hidrológico para cada tramo de río:	47
Figura 3.6 Comparación de los volúmenes observados y simulados, embalse Herradura.	49
Figura 3.7 Comparación de los volúmenes observados y simulados, Embalse Los Palacios.	49
Figura 3.8 Comparación de los volúmenes observados y simulados, Embalse Bacunagua.	49
Figura 3.9 Comparación de los volúmenes observados y simulados, embalse La Juventud.....	50
Figura 3.10 Regresión lineal forzada al origen de las coordenadas entre los volúmenes simulados y observados en los embalses: a) Herradura, b) Bacunagua, c) Los Palacios y d) La Juventud..	52
Figura 3.11 Anomalías en la precipitación mensual resultado de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 4.5 W/m ² en el periodo 2015-2039.....	53
Figura 3.12 Anomalías en la precipitación mensual resultado de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 4.5 W/m ² en el periodo 2045-2069.....	54
Figura 3.13 Anomalías en la precipitación mensual resultado de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 8.5 W/m ² en el periodo 2015-2039.....	55
Figura 3.14 Anomalías en la precipitación mensual resultado de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 8.5 W/m ² en el periodo 2045-2065.....	55
Figura 3.15 Anomalías media en la precipitación mensual resultado del promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 4.5 y 8.5 W/m ² para el periodo 2016-2050.	57
Figura 3.16 Diferencia entre el volumen de escurrimiento regional para el escenario RCP 4.5 en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base (1981-2010).	58
Figura 3.17 Diferencia entre el volumen de escurrimiento regional para el escenario RCP 8.5 en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base (1981-2010).	59

Figura 3.18 Balance entre la Demanda de Agua y el Suministro entregado para toda la región escenario de referencia, periodo 2010-2015.	62
Figura 3.19 Balance entre la Demanda de Agua y el Suministro entregado para toda la región en el periodo 2010-2015, incluyendo la cobertura de la demanda simulada por WEAP y declarada por los organismos oficiales.	63
Figura 3.20 Balance mensual promedio entre la Demanda de Agua y el Suministro entregado para toda la región en el periodo 2010-2015.	64
Figura 3.21 Balance entre la Demanda de Agua y el Suministro entregado para toda la región en el periodo 2010-2015, incluyendo la cobertura de la demanda.	65
Figura 3.22 Diferencia entre el volumen mensual demandado entre el escenario de referencia (2010-2015) y el escenario de demanda 1.	66
Figura 3.23 Volumen de déficit mensual promedio para las condiciones del escenario de demanda 1 considerando los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 W/m ² para el periodo 2016-2050.....	66
Figura 3.24 Diferencia promedio entre el volumen de la demanda no cubierta entre los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 W/m ² para el periodo 2016-2050.	67
Figura 3.25 Volumen demandado entre el escenario de referencia (2010-2015) y el escenario de demanda que considera el supuesto de una demanda futura para el cultivo de arroz en un 12% en toda la región.....	68
Figura 3.26 Diferencia entre el volumen demandado entre el escenario de referencia (2010-2015) y el escenario de demanda 2.	68
Figura 3.27 Volumen de déficit mensual promedio para las condiciones del escenario de demanda 2 considerando los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 W/m ² para el periodo 2016-2050.....	69
Figura 3.28 Diferencia promedio entre el volumen de la demanda no cubierta entre los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 W/m ² para el periodo 2016-2050.	69
Figura 3.29 Comparación de la cobertura de la demanda mensual promedio para las condiciones del escenario de referencia y el escenario de demanda 2 con las forzantes del escenario de cambio climático RCP 8.5 W/m ² para el periodo 2016-2050.....	70
Figura 3.30 Comparación entre el volumen mensual promedio de los embalses en la región para el escenario de referencia y considerando el aumento en un 12% de la demanda de agua del arroz para las condiciones del escenario climático RCP 8.5 W/m ²	71
Figura A1.1 Esquema del sistema hidráulico Sur-Centro de la Provincia de Pinar del Río, aparecen en la figura el límite administrativo y la delimitación por cuencas, los embalses, las derivadoras en los ríos, el canal magistral y las estructuras de aprovechamiento de escurrimientos no regulados.	23
Figura A1.2 Imagen del Canal Magistral tramo Bacunagua-Los Palacios.....	86
Figura A1.3 Derivadora Río San Diego, a la derecha tramo de canal magistral San Diego-Los Palacios y a la derecha tramo San Diego Herradura.	86
Figura A1.4 Imagen del Canal primario de riego P-9, abastece al Distrito arrocero Sierra Maestra.	87
Figura A1.5 Imagen de estructuras de aprovechamiento de los escurrimientos no regulados vista desde el satélite.	87

Figura A1.6 Mapa de ubicación de las estaciones pluviométricas y su distribución por cuencas.	88
Figura A1.7 Mapa de división por subcuencas y red hidrográfica teniendo en cuenta la afectación al drenaje natural por las obras hidráulicas construidas y puntos de interés.....	90
Figura A1.8 Mapa de estaciones de aforo en los ríos, evaluación preliminar de las subcuencas con información para la calibración hidrológica y con información para la calibración asociada.....	91
Figura A2.1 Comparación de gráficos cronológicos entre estaciones pluviométricas.	93
Figura A2.2 Gráficos de Simple Masa de las estaciones series de precipitación por equipo.	95
Figura A2.3 Mapa de polígonos de Thiessen para las cuencas estudiadas, con las áreas de influencia para cada una de las estaciones de precipitación.	98
Figura A2.4 Mapa de tenencia de la tierra en el Municipio Los Palacios, empleado para la definición de los usuarios del agua y su distribución espacial dentro del área de estudio.....	99
Figura A2.5 Tablas de ejemplo del procesamiento de las bases de datos para e inventario de los cultivos agrícolas bajo riego.	100
Figura A2.6 Mapa de valores de la curva número en la región de estudio, obtenido a partir del procesamiento en la herramienta HEC-GeoHMS con del tipo de suelo, uso del suelo y las tablas de parámetros del método USDA-SCS.....	103
Figura A3.1 Pantalla principal de WEAP	104
Figura A3.2 Flujograma de procesos en la construcción del modelo esquemático en WEAP. .	109
Tabla A3.3 Usuarios del agua, definidos como sitios de demanda en WEAP, estos se encuentran agrupados considerando su ubicación en una región definida y un sistema de la distribución de agua compartido.....	109
Figura A4.1 Comparación entre el volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Los Palacios considerando el comportamiento medio y los resultados obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR: a) escenario RCP 4.5 W/m ² y b) escenario RCP 4.5 W/m ² . 115	115
Figura A4.2 Diferencia entre el volumen de escurrimiento regional en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base (1981-2010) para la cuenca Los Palacios: a) escenario RCP 4.5 W/m ² y b) escenario RCP 4.5 W/m ²	115
Figura A4.3 Comparación entre el volumen de escurrimiento mensual de la cuenca San Diego considerando el comportamiento medio y los resultados obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR: a) escenario RCP 4.5 W/m ² y b) escenario RCP 4.5 W/m ² ... 117	117
Figura A4.4 Diferencia entre el volumen de escurrimiento regional en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base (1981-2010) para la cuenca San Diego: a) escenario RCP 4.5 W/m ² y b) escenario RCP 4.5 W/m ²	117
Figura A4.5 Comparación entre el volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Bacunagua considerando el comportamiento medio y los resultados obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR: a) escenario RCP 4.5 W/m ² y b) escenario RCP 4.5 W/m ² ... 119	119
Figura A4.6 Diferencia entre el volumen de escurrimiento regional en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base (1981-2010) para la cuenca Bacunagua: a) escenario RCP 4.5 W/m ² y b) escenario RCP 4.5 W/m ²	119

Figura A4.7 Comparación entre el volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Herradura considerando el comportamiento medio y los resultados obtenidos de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR: **a)** escenario RCP 4.5 W/m² y **b)** escenario RCP 4.5 W/m²... 121

Figura A4.8 Diferencia entre el volumen de escurrimiento regional en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del período base (1981-2010) para la cuenca Herradura: **a)** escenario RCP 4.5 W/m² y **b)** escenario RCP 4.5 W/m². 121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
Tabla 1.1 Algunos de los modelos climáticos globales de mejores resultados según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático.	20
Tabla 2.1 Características de las cuencas y ríos principales en el área de estudio.	22
Tabla 2.2 Algunos parámetros técnicos y de explotación de los embalses.	24
Tabla 2.3 Datos de estaciones de aforo en el cauce de los ríos y longitud de la serie.	25
Tabla 2.4 Interpretación cualitativa de los parámetros estadísticos para calibración y validación.	35
Tabla 2.5 Parámetros operacionales de los embalses para la calibración del modelo WEAP.	39
Tabla 3.1 Valores del número de la curva inicial y calibrado en la modelación hidrológica de las subcuencas aforadas.	44
Tabla 3.2. Resumen de los índices estadísticos de la calibración y validación del modelo hidrológico para las subcuencas aforadas.	46
Tabla 3.3 Valores del número de la curva obtenidos a partir de la calibración hidrológica asociada a la operación de los recursos hídricos.	48
Tabla 3.4 Diferencia entre el volumen de escurrimiento por cuencas para el escenario RCP 4.5 en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base.	58
Tabla 3.5 Diferencia entre el volumen de escurrimiento por cuencas para el escenario RCP 8.5 en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base.	60
Tabla A1.1 Información sobre el completamiento y estado de las series de precipitación por estaciones.	89
Tabla A2.1 Resultados de las pruebas de homogeneidad aplicadas a la serie de precipitaciones por equipo.	96
Tabla A2.2 Resultados de las pruebas de homogeneidad de las series de escurrimientos por estaciones.	97
Tabla A2.3 Número de la curva en función de la cobertura del suelo y grupo hidrológico.	101
Tabla A2.4 Grupo hidrológico de los suelos en función de su clasificación.	101
Tabla A2.5 Número de la curva en función de la cobertura del suelo y grupo hidrológico.	102
Tabla A3.1 Vistas del entorno principal de los modelos WEAP.	104
Tabla A3.2 Descripción de los elementos que emplea el modelo WEAP en la construcción del esquema simplificado de las cuencas.	105
Tabla A3.3 Resumen de datos requeridos para construir un modelo en WEAP, organizado en función del elemento del esquema.	107
Tabla A4.1 Precipitación media mensual para el periodo climático base (1981-2010) empleada para generar la precipitación futura en la región.	112
Tabla A4.2 Anomalías promedios mensuales para la región de estudio para los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 W/m ² para los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR en los períodos 2015-2039 y 2045-2065.	113
Tabla A4.3 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Los Palacios, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 4.5 W/m ² para el periodo 2016-2050.	114

Tabla A4.4 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Los Palacios, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 8.5 W/m ² para el periodo 2016-2050.	114
Tabla A4.5 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca San Diego, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 4.5 W/m ² para el periodo 2016-2050.	116
Tabla A4.6 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca San Diego, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 8.5 W/m ² para el periodo 2016-2050.	116
Tabla A4.7 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Bacunagua, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 4.5 W/m ² para el periodo 2016-2050.	118
Tabla A4.8 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Bacunagua, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 8.5 W/m ² para el periodo 2016-2050.	118
Tabla A4.9 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Herradura, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 4.5 W/m ² para el periodo 2016-2050.	120
Tabla A4.10 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Herradura, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 8.5 W/m ² para el periodo 2016-2050.	120

INTRODUCCIÓN

El 70% del agua utilizada a nivel mundial es consumida anualmente por la agricultura, convirtiéndose en el más importante consumidor del recurso (*UNESCO, 2013*). El 65% del agua anualmente usada en Cuba, según las últimas estadísticas disponibles, fueron destinadas al sector agrícola con un volumen de 4 519 millones de m³, de este total el 43% es consumido por el cultivo de arroz (*Herrera et al, 2011*). Del volumen agua extraída por la agricultura el 65.2% por ciento proviene de fuentes superficiales (*FAO, 2015*).

En particular para Cuba, el agua es un recurso esencial que define su desarrollo agrícola, debido a que a pesar de registrarse como promedio más de 1200 mm anuales, la distribución irregular de las precipitaciones define un período del año denominado seco (noviembre - abril) donde solo ocurre el 20% de las mismas y es precisamente en esta época donde, dada la disminución de las temperaturas, se desarrollan óptimamente la mayoría de los cultivos agrícolas de interés para la producción nacional. Por estas razones el riego constituye un factor imprescindible para la obtención de rendimientos agrícolas óptimos.

Según *Herrera et al. (2011)* un análisis de la relación entre el agua total asignada para el riego de los cultivos agrícolas y las áreas bajo riego refleja un crecimiento de este índice del 52%, y en este crecimiento tiene un mayor peso el aumento de esta relación para el cultivo del arroz, clave para la anhelada sostenibilidad alimentaria, por ser alimento principal en los hogares cubanos. Razones como la diversificación de la producción agrícola, la recuperación de tierras ociosas potencialmente aprovechables para aumentar la siembra y la necesidad de producir más arroz para el autoabastecimiento de las necesidades nacionales, y por otra parte, a la ineficiencia de los sistemas con muchos años explotación y sin un programa de reparación y mantenimiento efectivo, a lo cual se le suman también aspectos de operación y manejo ineficiente de los mismos, provocan un aumento considerable de la demanda de agua de éste sector productivo.

Considerando que los episodios de sequía hidrológica como los acontecidos en los últimos años, probablemente se agraven frente a un horizonte de menor disponibilidad de agua debido a la disminución de las precipitaciones pronosticadas por los efectos de la variabilidad y el cambio climático para Cuba (*Planos, 2014*), la evaluación del impacto del cambio climático es esencial para los formuladores de políticas y los administradores de recursos hídricos en la preparación e implementación de medidas de mitigación y adaptación *IPCC (2014)*. Al tiempo, que el aumento en las forzantes radiativas para las próximas décadas y decenios hace imperante la necesidad de modelar los posibles efectos a nivel hidrológico y la consecuente modificación en la disponibilidad

de recursos hídricos en las cuencas a nivel global, herramientas necesarias en la gestión y explotación de los recursos hídricos en el mediano y largo plazo (*IPCC, 2014a*).

En este contexto se hace necesaria la evaluación y previsión del balance hidrológico a nivel de cuenca hidrográfica, unido a los estudios de disponibilidad del recurso ante diferentes condiciones o escenarios climáticos futuros, pues la garantía de la sostenibilidad futura de la producción agrícola y los recursos hídricos disponibles para su desarrollo pasa necesariamente por este tipo de estudios de planeación y gestión. Es por esto que contar con herramientas para evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos para la producción agrícola, es de vital importancia en un contexto de en un contexto de variabilidad climática, sequía hidrológica y bajo una gran presión por la alta demanda de agua.

El planeamiento hidrológico es un proceso complejo que busca un balance entre los recursos hidráulicos disponibles y la demanda de los usuarios del agua, teniendo en cuenta los derechos y prioridades existentes y sin olvidar los requerimientos ambientales de la cuenca donde se realiza (*Taylor, 2008*). El balance de agua es la base para la operación de las fuentes de abasto por tal motivo requiere de un trabajo minucioso que permita distribuir racionalmente el agua con el mínimo posible de afectaciones, en el caso de Cuba, este representa la base para la operación de las fuentes de abasto, con el objetivo de lograr un uso más racional de los recursos hídricos. Es un proceso de análisis del estado técnico de las fuentes suministradoras (presas, micro-presas, tramos de aguas subterráneas), demandas de los volúmenes que necesitan los usuarios para garantizar sus planes de producción y otras actividades sociales y económicas; sin violar los principios hidráulicos de explotación de este recurso (*Sánchez y Zamora, 2017*).

La práctica habitual para la ejecución del planeamiento hidrológico a nivel de cuenca en el mundo es el empleo de modelos de simulación y modelos hidrológicos. A partir de la correcta implementación y análisis de los resultados de estas herramientas se puede apoyar la toma de decisión ante fenómenos como la sequía, pudiendo prevenir y anticiparse a la ocurrencia de los de estos fenómenos y desarrollar planes para mitigar sus impactos adversos. Al mismo tiempo, son útiles en el análisis y elaboración de políticas y trazar estrategias de desarrollo a partir del análisis de disímiles escenarios, tanto climáticos como de demanda (*Hervis et al., 2017b*).

Todo lo anterior, nos lleva plantearnos el siguiente **problema científico**

¿Cómo mejorar la gestión actual de los recursos hídricos disponibles para la producción agrícola en el Sistema hidráulico Sur-Centro de la provincia de Pinar del río, en un contexto de

variabilidad climática, sequía hidrológica y bajo una gran presión por la alta demanda de agua para la producción arrocerá?

Para abordar esta problemática esta tesis se plantea la siguiente **hipótesis de trabajo**

A partir de la integración de un modelo hidrológico y el modelo de gestión de los recursos hídricos WEAP se puede simular matemáticamente el balance hídrico de las cuencas del sistema hidráulico bajo estudio y el funcionamiento de la infraestructura hidráulica del Sistema hidráulico Sur-Centro en su proceso de entrega de agua a la agricultura en la zona, lo que permite definir estrategias actuales y futuras para la mejora de la gestión del agua en ese sistema.

Para su verificación se traza como **objetivo general:**

Calibrar el modelo WEAP acoplado a un modelo hidrológico, como herramienta para la planeación del agua requerida para la producción agrícola considerando escenarios de cambio climático, en el sistema hidráulico Sur-Centro de Pinar del Río.

Como forma de medir el cumplimiento del objetivo general, se trazan los siguientes **objetivos específicos:**

- I. *Generar las bases de datos geoespaciales y alfanuméricas necesarias para el desarrollo del proceso de modelación hidrológica y de la gestión de los recursos hídricos, considerando el análisis de escenarios de cambio climático.*
- II. *Implementar y calibrar un modelo hidrológico distribuido para la generación matemática de los escurrimientos medios mensuales para cada una de las cuencas analizadas.*
- III. *Construir en el ambiente de WEAP el modelo conceptual de la gestión del agua del sistema hidráulico Sur-Centro, involucrando las fuentes de agua, la infraestructura para el aprovechamiento de los recursos hídricos y los usuarios del agua.*
- IV. *Calibrar la operación de las fuentes de agua realizada por el modelo de gestión, en función de las variables de entrada y de la variable observada: volumen de almacenamiento del embalse.*
- V. *Evaluar el balance disponibilidad-demanda para la producción agrícola de la zona de estudio, considerando escenarios de demanda futura y escenarios de cambio climático.*

La **novedad científica** de la presente investigación se ve expresada en que:

El empleo de herramientas de modelación en la evaluación y planificación de los recursos hídricos es un tema pendiente en la cotidianidad de la planificación hidrológica a nivel de cuencas en Cuba, a pesar de que a nivel mundial este tipo de software son estándares para la ejecución de

balances de agua. Este trabajo demuestra la efectividad del modelo WEAP, como una herramienta capaz de simular la gestión de los recursos hídricos en uno de los sistemas hidráulicos más complejos de Cuba.

CAPÍTULO 1
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y el Cambio Climático

La Asociación Mundial del Agua, explica que la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es un proceso que fomenta el desarrollo y gestión coordinados de los recursos agua, tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (*Ortega y Saavedra, 2013*). Por su parte, *UNFCC (2012)* explica que la GIRH es un enfoque sistemático a la planificación y al manejo que considera una serie de procesos y acciones de oferta y demanda, e incorpora la participación de actores clave en procesos de decisión, además facilita el manejo adaptativo a través del monitoreo y la revisión continuos de la situación de los recursos hídricos.

Taylor et al. (2005) y *Pérez y Le Blas (2004)* explican que el concepto de GIRH ha sido acompañado por la promoción de las cuencas como las unidades geográficas lógicas para su implementación, pues en ella es donde se concretan las políticas de desarrollo económico y medioambiental en torno al agua, como recurso indispensable para lograr estas metas. Sobre este tema, *Cotler et al. (2013)* explica que las cuencas hidrográficas permiten entender espacialmente el ciclo hidrológico, y por su balance hídrico (comparando oferta y demanda), se pueden denominar cuencas balanceadas (cuando la oferta y demanda son compatibles), deficitarias (cuando la demanda es mayor que la oferta) y con exceso (cuando la oferta es mayor que la demanda).

Uno de los aspectos fundamentales de la GIRH es la administración del agua, en este proceso es primordial conocer de cuánta agua se dispone, es decir, la cantidad de agua que provee el subsistema natural, para poder desarrollar actividades de planificación y políticas adecuadas para su gestión. En este proceso es necesario disponer de información sobre su disponibilidad y su demanda, la asignación de los recursos hídricos a los usuarios, disponer de sistemas de distribución y medición del agua, monitorear usos en cantidad, oportunidad y calidad, invertir para mantener o mejorar los sistemas hídricos y todos aquellos que permitan usar eficientemente los recursos hídricos disponibles (*Maita, 2017*).

Sobre el papel de la GIRH frente al impacto del cambio climático *Bates et al. (2008)* refiere que este proceso es un componente esencial que deberá adaptarse para hacer frente a las presiones climáticas y socioeconómicas de los próximos decenios. Los usos del agua cambiarán por efecto conjunto de: alteraciones de la disponibilidad de agua, variación de la demanda de agua del sector agrícola y de otros sectores que competirán por ella, particularmente el urbano, y cambios en la gestión del agua. *Cap-Net (2009)* explica que a partir de la GIRH se puede identificar y mitigar mejor los riesgos en el proceso del planeamiento de la cuenca y estimular a los usuarios del agua

para que utilicen el recurso de forma sostenible frente a las condiciones cambiantes de los recursos hídricos.

En cuanto a la gestión de los recursos hídricos y el cambio climático (*Ludwig y Moench, 2009*) explica que tradicionalmente, esta se ha basado en los datos históricos climáticos e hidrológicos, suponiendo la estacionalidad en el clima y en el comportamiento de los sistemas de agua. Con un clima cambiante llega a ser cuestionable si el planeamiento para la variabilidad y los extremos pueden seguir basándose únicamente en los datos históricos. La experiencia del pasado ya no puede ser una guía confiable en el futuro (*Pahl-Wostl et al., 2007*).

1.2. Planeamiento hidrológico

El planeamiento hidrológico o planificación del agua es una de las etapas de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y se desarrolla a partir del balance entre recursos y demandas en cada uno de los sistemas de explotación, teniendo en cuenta los derechos del agua y prioridades existentes. Por su importancia dentro de la gestión del agua *Taylor (2008)* explica que, el planeamiento hidrológico proporciona el marco para la asignación de los recursos hídricos, vistos como los recursos de agua superficial y subterránea naturalmente disponibles, y los requerimientos de los caudales ambientales, siendo útil además para analizar las demandas actuales y proyectadas a futuro. Toda esta información es la base para saber cuánta agua se necesita y cuánta puede asignarse en la cuenca hidrográfica.

Reytor et al. (2016) explica que el estudio y la planificación de los recursos hídricos se encaminarán a crear las bases organizativas y el conocimiento necesario para asegurar la preservación y uso racional de las aguas terrestres. Por su parte, *Moariaty et al. (2006)* resalta que uno de los factores críticos a tener en cuenta en la planificación hidrológica es la variabilidad temporal de la disponibilidad de agua que condiciona la asignación del recurso y la operación de las fuentes de agua.

UNFCC (2012) hace referencia que una práctica mundial en la planificación hidrológica a nivel de cuenca es la simulación del sistema de explotación mediante el empleo de modelos matemáticos, estos comprenden elementos como: recursos hídricos superficiales y subterráneos, unidades de demanda, caudales mínimos especificados, embalses de regulación y las conducciones principales. Por otra parte, *UNFCC (2012)* explica que en la simulación del balance de oferta-demanda se tomarán en cuenta la preferencia de cada unidad de demanda, así como el orden de preferencia para la realización de desembalses desde los diferentes embalses o fuentes incluidos en el modelo. Se considerará como una restricción del balance, la entrega del caudal ecológico y en todo momento el abastecimiento a la población conservará su supremacía ante los otros usuarios (*Reytor et al., 2016*).

En Cuba, al planeamiento hidrológico se le denomina balance de agua, sin que el cambio de terminología altere el significado y alcance del proceso, este es elaborado anualmente con el fin de conocer el aseguramiento de agua para las diferentes actividades económicas y sociales del país, según las disponibilidades de las fuentes de abasto para el año que se planifica. *Sánchez y Zamora (2017)* explica que el balance de agua es un proceso de análisis del estado técnico de las fuentes suministradoras (presas, micro-presas, tramos de aguas subterráneas), demandas de los volúmenes que necesitan los usuarios para garantizar sus planes de producción y otras actividades sociales y económicas; sin violar los principios hidráulicos de explotación de este recurso.

1.3. Modelos hidrológicos

Según describe *Chow y Maidment (1994)*, el modelo de un sistema hidrológico es una aproximación al sistema real, que busca simplificar la complejidad real por medio de una selección de los aspectos fundamentales que determinan el funcionamiento del sistema hidrológico, trabaja con un conjunto de variables de entrada y salida que constituyen variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas. En términos generales, explica el autor, el modelo persigue representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca. Por otra parte, *Lastre et al., (2015)* aporta que la modelación hidrológica, por lo general, traduce mediante un modelo matemático el comportamiento de los procesos del ciclo hidrológico dentro de la cuenca. A los criterios de los autores citados se une *Hernández et al., (2016)* que explica que un modelo de cuenca es un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico, con el objetivo de simular la conversión de la precipitación en escurrimiento. Todos los autores coinciden en que, en principio, las técnicas de modelación de cuencas son aplicables a cuencas de cualquier tamaño, ya sean pequeñas, de tamaño medio o grandes.

Los procesos hidrológicos superficiales se modelan matemáticamente a partir el método del balance de agua (entradas y salida), considerando que una parte de la lluvia queda almacenada en el suelo, otra se evapora o evapotranspira y el resto escurre superficial o subsuperficialmente, generando así los recursos hídricos superficiales que se encuentran en lagos, ríos y arroyos. Para desarrollar una modelación es necesario disponer de datos de calidad para lograr reproducir o generar, en su caso más general, los caudales de los ríos, los niveles piezométricos de los acuíferos, los flujos de entradas y salidas en estos, y más concretamente las transferencias de caudal entre ríos y acuíferos (*Pulido et al., 2005*).

Martínez (1999) aclara que un buen modelo debe mantener un equilibrio, de forma que sea suficientemente sencillo para comprenderlo y usarlo, y suficientemente complejo para representar

correctamente el sistema modelado. Por otra parte, el autor hace alusión a que el objeto final de un modelo es el análisis del sistema a menor coste, escala, etc. Son una aplicación fundamental para el hidrólogo, en especial a la hora de proponer o realizar una adecuada gestión de los recursos hídricos.

La importancia de la modelación hidrológica para la evaluación de los recursos hídricos disponibles es explicada por *Paredes et al. (2012)*, resaltando que a nivel de cuenca es aconsejable el empleo de herramientas de modelación matemática para facilitar la planificación y gestión de los recursos hídricos.

De acuerdo con *Rodríguez (2011)* distintos autores plantean que los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos categorías: modelos físicos y modelos abstractos o matemáticos. Los primeros incluyen modelos a escala reducida que representan físicamente el sistema real o prototipo. Los modelos abstractos representan el sistema en forma matemática. Según (Ponce, 1994), en la práctica pueden distinguirse cuatro tipos generales de modelos matemáticos:

- **Determinísticos:** Son formulados siguiendo las leyes de la física y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales.
- **Probabilísticos:** Se formulan siguiendo las leyes del azar o probabilidad. Pueden ser de dos tipos: estadísticos o estocásticos.
- **Conceptuales:** Son representaciones simplificadas de los procesos físicos. Usualmente recaen sobre descripciones matemáticas que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales.
- **Paramétricos o empíricos:** Son los más simples, consisten en una ecuación (o ecuaciones) algebraica (s) que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico.

Rodríguez (2011), *Lastre (2015)*, *Hernández et al. (2016)* afirman que los modelos matemáticos son los más ampliamente difundidos y utilizados en la práctica hidrológica internacional, ya que permiten comprender el funcionamiento de un sistema en situaciones que se producen en la realidad y dan la posibilidad de conocer el funcionamiento también en situaciones que no se han producido, y que permiten mejorar la visión de esta.

1.3.1. Algunos modelos hidrológicos consultados

Los modelos hidrológicos incluidos en esta revisión indistintamente han sido empleados en estudios hidrológicos diversos y en análisis del impacto del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos, demostrando su aplicabilidad, facilidad de manejo y la confiabilidad de sus resultados como modelos de apoyo a la toma de decisión en el sector de los recursos hídricos.

Los más extendidos en estudios hidrológicos a nivel mundial son: SWAT (*Soil Water*) (**Abbaspour et al., 2015**) y HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's-Hydrologic Modeling System*) (**Sharffenberg, 2013; Legesse y Fulio, 2015**). En muchos de estos modelos se ha incluido, el método de la curva número para realizar cálculos hidrológicos, por ejemplo, **Bauwe et al (2016)**, **Petroselli et al (2013)**, realizaron evaluaciones hidrológicas en cuencas empleando la metodología del número de curva, juntamente a otros modelos, obteniendo buenos resultados mediante la aplicación del método de número de curva.

El **modelo SWAT** es una herramienta desarrollada en la década de 1990 por el Departamento de Agricultura de EE. UU (USDA) y el Servicio de Investigación Agrícola (ARS), es una herramienta para predecir el impacto en el manejo del suelo y la vegetación en la producción de agua. El modelo opera sobre la base de la ecuación de balance hídrico y a partir de sus módulos físicos de cuencas hidrológicas, se pueden simular procesos de precipitación-escurrimiento superficial y procesos agrícolas de irrigación (**Suárez et. al, 2016**). SWAT ha sido ampliamente usado en estudio de cambio climático, así pueden citarse los estudios de: **Velázquez-Zapata et al. (2017)** en la evaluación del impacto del Cambio Climático (CC) en los indicadores hidrológicos de una cuenca en el centro de México; **Fan y Shibata (2015)** en la simulación de la hidrología de las cuencas hidrográficas y la calidad del agua del arroyo en el uso de la tierra y los escenarios de cambio climático en la cuenca del río Teshio; **Wu et al. (2015)** en el análisis de la variación de los caudales por el derretimiento de los glaciares en la cuenca del río Heihe en el noroeste de China y **Mehdi et al. (2015)** empleó SWAT en la simulación del impacto del CC y cambio del uso de la tierra por la agricultura en la calidad del agua como vía para trazar estrategias de manejo y adaptación en el río Pike, Canadá.

El **modelo HEC-HMS** es un software de modelación hidrológica HEC-HMS desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. En el modelo se puede simular la relación precipitación-escurrimiento y estimar los hidrogramas de escorrentía directa generados por las precipitaciones en una o varias cuencas (escurrimiento máximo y tiempo al pico). El modelo trata la cuenca como un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos (**Lastre, 2015**). HEC-HMS ha sido protagonista de varios estudios de CC entre los que pueden citarse: **Aryal et al. (2018)** en la cuantificación de fuentes de incertidumbre en el acople de modelos hidrológico y proyecciones de CC; **Villazón et al. (2015)** emplearon HEC en el análisis de vulnerabilidad al Cambio Climático en términos de oferta hídrica para un proyecto hidroeléctrico en Bolivia.

Otros modelos hidrológicos menos extendidos en el mundo, pero de probada aplicabilidad en la evaluación del impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua son: DHSM (*Hydrological Soil Vegetation Model*) (*Wigmosta et al., 1994*, citado por *Bian et al., 2017*), HBV (*Fattorelli y Fernández, 2011; Li et al., 2015 y Wale et al., 2018*), THMB (Terrestrial Hydrologic Model with Biogeochemistry) (*Leong y Donner, 2015*), CEQUEA (*Morin, 2002; Morin y Paquet, 2018*), TETIS: (*Francés, 2012; Francésa y Bussib, 2017*), SRM (Snowmelt Runoff Model) (*Ahmad et. al, 2018*) y VIC (*Variable Infiltration Capacity hydrologic model*) (*Liang et al., 1994*, citado por *Mittal et al., 2015*).

UNFCC (2012) explica que aunque diferentes modelos hidrológicos pueden resultar en diferentes valores de caudal fluvial, históricamente las diferencias han sido reducidas en comparación con las incertidumbres atribuidas al cambio climático que se reflejan en las diferencias entre los resultados de los modelos de circulación general (MCG) (*Boorman y Sefton, 1997; Beven, 2004*, citados por *UNFCC, 2012*). En este sentido el autor expresa que no obstante a la cadena de reacciones desde el clima a la respuesta hidrológica, desde los sistemas de recursos hídricos hasta los impactos reales sobre el suministro de agua, depende de numerosos factores, cada uno con un nivel de incertidumbre diferente que debe tratarse de forma transparente en las evaluaciones de impacto.

1.4. Modelos de planeamiento y gestión de los recursos hídricos

Refiriéndose a los modelos de planeamiento y evaluación de los recursos hídricos *Geller et al. (2016)* y *Hervis et al. (2018)* explican que estos trabajan bajo la filosofía de construir virtualmente una cuenca hidrográfica y traer a escena, a todos los recursos de la cuenca (río, embalses, lagunas, acuíferos, infraestructura de aprovechamiento) y cada uno de los usuarios del agua dentro de esta; de manera que facilitan el análisis de diversas políticas de manejo del agua en la cuenca ante diferentes escenarios climáticos, ambientales y socio-económicos. La mayoría de estos modelos tienen ya interfaces de usuario avanzadas que permiten su uso por personas sin formación técnica en hidrología o hidráulica (*Hervis et al., 2017a*).

UNFCC (2012) explica que estos modelos suelen emplear métodos numéricos complejos para determinar estimaciones de picos de caudal fluvial y niveles de inundación basándose en un conjunto de parámetros de datos que representa las características de la cuenca. Por otra parte, el autor citado hace referencia que estos modelos normalmente requieren una gran cantidad de datos observados para conseguir la validación y calibración del modelo.

Los modelos de planeamiento y gestión de los recursos hídricos facilitan el manejo adaptativo de la cuenca, a través del monitoreo y la revisión continuos del balance del agua. Dichos modelos han sido enfocados en la comprensión de cómo fluye el agua a través de las cuencas en

respuesta a los eventos hidrológicos (por ejemplo, simulaciones hidrológicas y/o hidráulicas) o de cómo distribuir el agua que queda disponible en respuesta a tales eventos (por ejemplo, simulaciones sobre manejo de recursos hídricos) (*Díaz et al., 2017*). *Hervis et al. (2017 b)* hace referencia a que estas herramientas facilitan el análisis de disímiles políticas de manejo del agua en la cuenca y permiten analizar los planes de desarrollo existentes y trazar planes más realistas a partir del balance integral de la disponibilidad y la demanda.

Los modelos de planificación de recursos hídricos requieren datos sobre la oferta y la demanda de agua, la información sobre la demanda de agua generalmente necesita provenir de fuentes locales. En el caso de las demandas de riego pueden determinarse mediante los conocimientos locales sobre cultivos y otras prácticas agrícolas, y los datos de clima de los departamentos de gestión de recursos y/o de la agricultura nacionales. Los datos del suministro de agua pueden darse como series cronológicas prescritas de flujos de ríos. La modelación usualmente requiere de series cronológicas de escurrimiento superficial y de disponibilidad de agua subterránea con periodos de tiempo mínimos de un mes. Una vez que los flujos naturales son determinados, los ajustes en la disponibilidad deben ser hechos en base a la infraestructura hídrica tales como reservorios, pozos, redes de transmisión, plantas de tratamiento de agua, etc. (*UNFCC, 2012*).

1.4.1. Algunos modelos de planificación y gestión de los recursos hídricos consultados

En la revisión se encontraron varios modelos de planificación y gestión de los recursos hídricos, listados de acuerdo utilización a escala mundial, pueden citarse: WEAP (*Sieber et al., 2007*), AQUATOOL (*Arquiola et al., 2014*), RIBASIM (*Omar, 2013*), Aquarius (*Nozari y Mohseni, 2015*), LabSid-AquaNet (*Alexandre y Porto, 2000*), DSS-H2O (*Collazo, 2018*).

UNFCC (2012) aseguro que sin distinción, cada uno de los modelos anteriores puede utilizarse en diferentes situaciones para respaldar la GIRH con un contexto de cambio climático. El uso de un modelo específico estará determinado por diversos factores, como el coste, la capacidad técnica, el acceso a recursos de capacitación, y la calidad deseada de los requisitos de datos de entrada y salida de los modelos.

El **modelo WEAP**, desarrollado por el *Stockholm Environment Institute* (SEI) como Sistema Soporte de Decisión para Gestión Integral del Recurso Hídrico, es un referente mundial en los estudios de planeamiento y evaluación de los recursos hídricos. El modelo opera bajo el modelo de balance hídrico y puede ser aplicado a los sistemas agrícolas y municipales, a cuencas pequeñas o grandes. *Díaz et al. (2017)* explica que por su sencillez y robustez para el trazado de políticas en el sector de los recursos hídricos WEAP ha ganado una gran popularidad entre encargados de

la planificación hidrológica, hidrólogos, agrónomos, economistas, hasta funcionarios públicos encargados del recurso hídrico, y comunidades locales. Por otra parte, **Rada (2017)** refiere que el modelo permite el acceso del planificador a una vista más comprensiva de la amplia gama de factores que deben ser considerados en el manejo de los recursos hídricos para su uso presente y futuro. A su vez, **Giraldo (2014)** explica que WEAP también está armado con técnicas diseñadas para distribuir el agua entre diferentes tipos de usuarios desde una perspectiva humana y ecosistémica, teniendo en cuenta las variables climáticas, por lo que es ideal para realizar estudios de cambio climático. En este último aspecto el modelo es capaz de estimar cambios en la oferta de agua (ejemplo: cambios proyectados en la precipitación) y en la demanda de agua (ejemplo: cambios en la demanda por evaporación en cultivos), los cuales producirán un balance de agua diferente a nivel de cuenca (**Hernández et al., 2017**). Adicionalmente WEAP permite el vínculo a otros modelos, tales como MODFLOW (aguas subterráneas), QUAL2K (la calidad del agua), Mabia (uso de agua del cultivo y programación de riego), Pest (estimación de parámetros), y recientemente ha integrado modelos socioeconómicos. El modelo intenta ayudar en la planificación y gestión de los sistemas de agua, proporcionando una solución flexible y fácil de usar en un marco más completo, amplia diversidad de factores que afectan el agua uso y manejo del agua en el corto y largo plazo (**Taipe, 2012**).

WEAP ha sido ampliamente usado en estudios de cambio climático alrededor del mundo, demostrando su aplicabilidad y desempeño en el apoyo a la toma de decisión en el sector de os recursos hídricos, la agricultura y la hidroenergía. WEAP se aplicó como la herramienta principal en un importante estudio de evaluación de impacto de los cambios climáticos autorizado por el estado de California (**Purkey et al., 2008**). Por otra parte, **Vargas et al. (2014)** empleo el modelo en la cuenca Río Soto La Marina, Tamaulipas; **Quoc et al. (2017)** empleo WEAP para evaluación del impacto del cambio climático en los procesos hidrológicos y la gestión de los recursos hídricos en la cuenca Thac Mo, Vietnam; **Abdelmalek y Nouiri (2017)** desarrollo una aplicación del modelo para el gestión de los recursos hídricos en Túnez, y **Kifle et al. (2017)** estudio el impacto del cambio climático y el crecimiento de la población en la disponibilidad de agua superficial y de demanda en Etiopía. Otros estudios donde se emplea WEAP como modelo de planeamiento y gestión de los recursos hídricos han sido desarrollados por **Castro (2014)**, **Fernanda et al. (2016)**, **Olson et al. (2017)**, **Mansouri et al. (2017)**, **Hassan et al. (2017)** y **Hussen et al. (2018)**.

En Cuba existe poca experiencia en el empleo de modelos de planeamiento y gestión de los recursos hídricos, en la revisión se encontraron unos pocos trabajos que emplearon algunos de los modelos citados a una menor escala. Así puede destacarse el trabajo de **Hervis et al. (2017 a)** con la aplicación del modelo WEAP para la planificación hidrológica de la cuenca San Diego, por otra

parte, *Pérez y Recio (2017)* aplicaron WEAP para obtener una política de operación de embalses y *Sánchez et al. (2019)* aplicó WEAP para elaborar las bases conceptuales para la administración y evaluación del agua en la cuenca subterránea Vento. Además, se tiene información del uso del modelo AQUATOOL por primera vez en la investigación de *Hervis et al. (2019)* para evaluar los recursos hídricos en la cuenca San Diego ante escenarios de cambio climático.

1.5. Cambio climático

El cambio climático está referido a la alteración del clima con respecto al historial climático mundial o regional e involucra a diversos parámetros meteorológicos como temperatura, precipitaciones, presión atmosférica, nubosidad, aumento en el nivel del mar y variaciones en la ocurrencia de eventos extremos del clima como sequías, inundaciones y tormentas tropicales (*IPCC, 2007 a*). El cambio climático se debe tanto a causas naturales como antropogénicas, sin embargo, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) lo define como “*un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que es adicional a la variabilidad climática natural observada durante períodos de tiempo comparables*” (*IPCC, 2007 a*).

En la actualidad existe un amplio consenso científico en que el fenómeno del cambio climático es un hecho inequívoco, según explica el *IPCC (2013)* los efectos adversos del cambio climático pueden poner en riesgo el desarrollo de los países y la integridad ecosistémica a nivel mundial. Los análisis científicos también señalan una tendencia creciente en la frecuencia e intensidad de los eventos meteorológicos extremos en los últimos cincuenta años y se considera probable que las altas temperaturas, olas de calor y fuertes precipitaciones, continuarán siendo más frecuentes en el futuro, lo que puede ser desastroso para la humanidad

Fernández et al. (2015) explican que el fenómeno del cambio climático está asociado al término de calentamiento global, se refiere a algunos de los efectos que las actividades humanas tienen en el clima, actividades entre las que se encuentran la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural), deforestación, cambio de usos de suelo, etc. Estas actividades contribuyen a la emisión a la atmósfera de grandes cantidades de *gases de efecto invernadero*, de los cuales el más importante es el dióxido de carbono. Los gases de efecto invernadero absorben radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra manteniendo la temperatura de la atmósfera más alta que la que tendría sin su presencia.

La modificación a largo plazo de las condiciones meteorológicas medias a escala del planeta puede tener múltiples escalas temporales (días, meses, años, etc.) y espaciales (regional o local) (*OMM, 2009*).

La vulnerabilidad al Cambio Climático es el grado de susceptibilidad o de incapacidad de un sistema para afrontar los efectos adversos del cambio climático y, en particular, la variabilidad del clima y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad dependerá del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático a que esté expuesto un sistema, y de su sensibilidad y capacidad de adaptación (*IPCC, 2007b*).

1.1. Repercusión en la disponibilidad de los recursos hídricos

Por su parte, *Puma y Gold (2011)*, argumentan que el calentamiento global genera desequilibrios energéticos, ecológicos y sociales, que repercute directamente en la disponibilidad de recursos hídricos como en el caso de las precipitaciones.

Se estima que, a lo largo de este siglo, el cambio climático reducirá los recursos de agua superficial y subterránea de manera significativa en la mayoría de las regiones subtropicales secas, lo que supondrá una intensificación de la competencia por el agua. Estudios globales recientes, anticipan que el cambio climático tendrá un fuerte impacto sobre los recursos hídricos alrededor del mundo. Las proyecciones sobre el cambio climático durante el siglo XXI indican que la escorrentía aumenta en latitudes altas y en los trópicos húmedos, y disminuye en latitudes medias y en ciertas partes de los trópicos secos (*IPCC, 2014*).

En todos los continentes se han observado impactos sobre el ciclo hidrológico, que afectan a la disponibilidad de agua dulce y a su calidad. Se han registrado cambios en los caudales de los ríos, que resultan coherentes con los cambios producidos en las precipitaciones y en las temperaturas a partir de 1950. Se estima que, a lo largo de este siglo, el cambio climático reducirá los recursos de agua superficial y subterránea de manera significativa en la mayoría de las regiones subtropicales secas, lo que supondrá una intensificación de la competencia por el agua.

1.2. Repercusión en la agricultura

Es reconocido por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático que las pequeñas islas tienen características que las hacen especialmente vulnerables a los efectos del cambio climático (*IPCC, 2000*). Apunta el informe que es probable que los recursos hídricos en los pequeños territorios insulares estén gravemente en peligro, además de tener efectos graves en la agricultura.

Si la temperatura se incrementa 2°C o más respecto a los niveles de finales del siglo XX, y en ausencia de medidas de adaptación, se prevén impactos negativos sobre la producción de los principales cultivos (trigo, arroz y maíz). Estos impactos afectarán a las regiones tropicales y templadas, aunque algunas ubicaciones puntuales pueden verse beneficiadas. Los principales impactos previstos en zonas rurales, en el corto, medio y largo plazo, guardan relación con la disponibilidad y el suministro de agua, la seguridad alimentaria y los ingresos agrícolas,

incluyendo cambios en las áreas de producción de cultivos alimentarios y no alimentarios en todo el mundo.

1.3. Evidencias del impacto del cambio climático en Cuba

De acuerdo con los planteado en la *Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático (CITMA, 2015)*, el clima en Cuba ha alcanzado un estado similar al evaluado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) para un efecto invernadero intensificado en la atmósfera terrestre: incremento de la temperatura superficial del aire; reducción del rango diario de la temperatura; mayor frecuencia de sequías largas y severas, especialmente en verano; y el aumento de los totales de lluvia asociados a eventos de grandes precipitaciones en invierno.

Información aportada por el gobierno cubano, asegura que: se ha observado un incremento *en la temperatura superficial del aire (0.9 °C) desde mediados del siglo pasado, siendo las últimas dos décadas las más cálidas de los registros*. En cuanto a los registros de precipitación no se aprecia una tendencia significativa estadísticamente, pero revela que, desde finales de la década de los años 70, se ha producido un predominio de anomalías positiva, lo que indica un aumento en los acumulados en el período poco lluvioso del año (*CITMA, 2015*).

Febles y Ruiz (2009) aseguran, que en cuanto a los recursos hídricos la región Oriental resulta la más afectada, si bien en la regiones occidentales y central se produjeron cuatro eventos de sequía de corto período, la región oriental estuvo afectada por seis. Reportan los autores del mencionado trabajo que los procesos de corto período de sequía se han producido en la segunda mitad del período lluvioso (noviembre-abril) y en la primera fase del período lluvioso (mayo-junio).

El Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos en su valoración de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos plantea que los cambios en los patrones de comportamiento de las precipitaciones y su reducción, el incremento de la evaporación, conjuntamente con el incremento de la intrusión salina como consecuencia de la elevación del nivel medio del mar, afectarán la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos del país. Como consecuencia, paulatinamente aparecerán áreas con carencia de agua, que en la actualidad no la padecen, quedándose sin satisfacer las necesidades del recurso para la economía, la sociedad y la protección del medio ambiente. Se presentarán nuevos y más agudos conflictos en el uso de las aguas embalsadas, principalmente entre su uso agrícola, acuícola y el abasto, al competir entre estos y existir menos alternativas de disponibilidad de agua (*Planos et al., 2013*).

1.5.1. Cambio climático y la planificación hidrológica

En la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático la planificación del agua juega un papel crucial, como explica *UNFCC (2012)*, aunque los administradores de recursos

hídricos están acostumbrados las circunstancias cambiantes, siendo muchas de ellas análogas al cambio climático futuro, es muy probable que las acciones de adaptación que se han tomado en el pasado puedan no ser apropiadas para el futuro dependiendo de la magnitud, rapidez y período de afectación con la que se manifiesten los cambios. De acuerdo con la explicación descrita arriba, puede asegurarse con alto grado de confianza que el cambio climático inevitablemente desafiará a las prácticas existentes de administración del agua.

El desafío actual en la planificación hidrológica es la incorporación de incertidumbres sobre el cambio climático junto con otros tipos de incertidumbre que generalmente amenazan el proceso de planificación del agua. *UNFCC (2012)* refiere que la piedra angular del análisis del cambio climático es el uso de modelos hidrológicos para estudiar el efecto de un clima cambiante en los procesos de lluvia-escurrimiento superficial, y vincular esos modelos con planificación de los recursos hídricos para determinar el manejo de embalses y las estrategias de distribución de agua.

La mayor parte de los estudios enfocados a la planificación del agua considerando el cambio climático se desarrollan bajo dos enfoques: *top-down* (arriba-abajo) y *bottom-up* (abajo-arriba). El enfoque *top-down* comienza estableciendo la credibilidad científica del cambio climático, desarrolla escenarios climáticos futuros para ser utilizados a nivel regional, y luego imponen esos cambios potenciales al sistema de recursos hídricos para evaluar la respuesta de este. Alternativamente el enfoque *bottom-up* comienza identificando las vulnerabilidades más críticas de un sistema, articula las causas de esas vulnerabilidades, sugiere como el cambio climático pueden o no exacerbar esas vulnerabilidades y finalmente diseñan un proceso analítico para dirigir mejor y resolver la vulnerabilidad ante la incertidumbre climática. Los dos enfoques pueden ser efectivos para evaluar las opciones de adaptación y sus implicaciones (*Biswas, 2004*).

El *Panel Intergubernamental de Cambio Climático IPCC (2014a)* explica que la evaluación del impacto del cambio climático es esencial para los formuladores de políticas y los administradores de recursos hídricos en la preparación e implementación de medidas de mitigación y adaptación.

1.6. Modelación del clima futuro

1.6.1. Aspectos generales sobre el funcionamiento del clima

El clima es definido tradicionalmente como el promedio de largo plazo de las variables meteorológicas (temperatura, precipitación, húmedo, vientos, etc.) en una región. El clima es determinado por la circulación atmosférica de gran escala y la geografía; a su vez, el clima define en gran parte los ecosistemas y los emprendimientos humanos que se desarrollaron en una región, especialmente las actividades agrícolas y forestales (*Garreaud, 2011*).

Para entender el proceso de modelación matemática del clima, es necesario entender, los procesos físicos que ocurren en nuestro planeta y condicionan su clima. En este sentido *Camino et al. (2014)*, hace referencia que el sistema climático irradia la misma cantidad de calor recibida, nuevamente hacia el espacio, de manera que, en conjunto, se mantiene el equilibrio y la temperatura global no cambia, a menos que se produzca un desbalance energético en la atmósfera terrestre. Por su parte, *Febles y Ruiz (2009)* hace referencia a que el desbalance energético responde a forzamientos radiativos externos, cuando este balance se altera el sistema responde a este reforzamiento e intenta restablecer su equilibrio con cambios de temperatura. En términos generales, el forzamiento externo puede ser natural o antropogénico. Un ejemplo del forzamiento externo natural puede ser un cambio en la energía que emite el sol. Sin embargo, un ejemplo de forzamiento externo antropogénico puede ser el reforzamiento del efecto invernadero.

Este intercambio de calor se lleva a cabo por medio de los movimientos atmosféricos a escala planetaria se denominan la circulación general *Jáuregui (2003)*. Los procesos físicos que describe la circulación general en la atmósfera son realmente complejos, éstos son estudiados por una disciplina de las Ciencias Meteorológicas denominada Física de la Atmósfera.

1.6.2. Escenarios de emisiones de GEI

Los cambios experimentados por las concentraciones de los GEI y aerosoles en la atmósfera, por la cubierta terrestre y por la radiación solar alteran el balance de energía del sistema climático y son factores que originan el cambio climático. Afectan la absorción, la dispersión y la emisión de radiación en la atmósfera y en la superficie de la Tierra (*IPCC, 2007*).

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático en su informe de escenarios de emisiones de GEI *IPCC (2000)* explica que, los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras de gases de efecto invernadero, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Por otra parte, *Amador y Alfaro (2009)*, explica que el concepto de escenario climático se utiliza para denotar un estado probable o plausible, normalmente simplificado, del sistema climático ante uno o más diferentes tipos de forzamientos. Cualquiera que sea la forma de enfocar un escenario climático, los autores coinciden en que un escenario de cambio climático es simplemente la diferencia entre un escenario climático y el clima actual o de una línea o estado base. *BID (2010)* hace referencia que las proyecciones sobre la futura emisión de gases de efecto invernadero o escenarios, se basan en supuestos con respecto al desarrollo económico, el crecimiento demográfico, el desarrollo de energía alternativa y el cambio tecnológico. Ningún escenario particular en materia de emisiones es el “correcto”, o tiene más probabilidades de materializarse que los otros.

Desde que comenzó la generación de escenarios climáticos por parte de Panel Intergubernamental del Cambio Climático, éstos se han utilizado ampliamente para el análisis de un posible cambio climático, de sus repercusiones y de las opciones para mitigar dicho cambio (*IPCC, 2000*).

El IPCC ha definido desde 1990 una serie de escenarios futuros en los que se presenta las condiciones y el panorama de cómo se comportaría el clima. Hoy en día los escenarios se han perfeccionado bastante desde sus inicios y representan más fielmente, una mayor cantidad de forzantes, procesos e impactos del cambio climático (*Serrano, 2014*). Actualmente se ha definido un nuevo tipo de escenarios, estos escenarios son conocidos mundialmente como *Representative Concentration Pathways* (Vías de concentración representativas, RCP por sus siglas en inglés) (*IPCC, 2013*) que se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo total en el año 2100 en relación con los años 1750, estos son: RCP 2.6 (forzamiento de 2.6 W/m²), RCP 4.5 (forzamiento de 4.5 W/m²), RCP 6.0 (forzamiento de 6.0 W/m²) y RCP 8.5 (forzamiento de 8.5 W/m²). Según explica el IPCC en su informe sobre Bases Físicas del cambio climático (*IPCC, 2013*) los cuatro escenarios de RCP comprenden un escenario de mitigación conducente a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP 2.6); dos escenarios de estabilización (RCP 4.5 y RCP 6.0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 8.5).

El escenario RCP 4.5 es un escenario de estabilización que estabiliza el forzamiento radiativo a 4.5 Watts por metro cuadrado en el año 2100 sin exceder nunca ese valor, en otras palabras, habla acerca de una estabilización en las emisiones de CO₂ (*Castillo et al., 2017*). Referido a este escenario. *CIIFEN (2014)* explica que, para lograr este objetivo, se suponen políticas climáticas, que en este caso incluyen la penalización del uso de carbono. En este escenario, la población mundial llega a nueve mil millones en 2065 y se reduce a 8,7 mil millones en 2100.

Por otra parte, el escenario RCP 8.5 combina los supuestos sobre la alta población y el crecimiento relativamente lento de los ingresos con modestas tasas de cambio tecnológico y mejoras en la intensidad energética, llevando a largo plazo la alta demanda de energía y a las emisiones de gases de efecto invernadero en ausencia de políticas climáticas. En comparación con el conjunto total de vías de concentración representativas, el RCP 8.5 corresponde a la vía con las mayores emisiones de gases de efecto invernadero (*Castillo et al., 2017*).

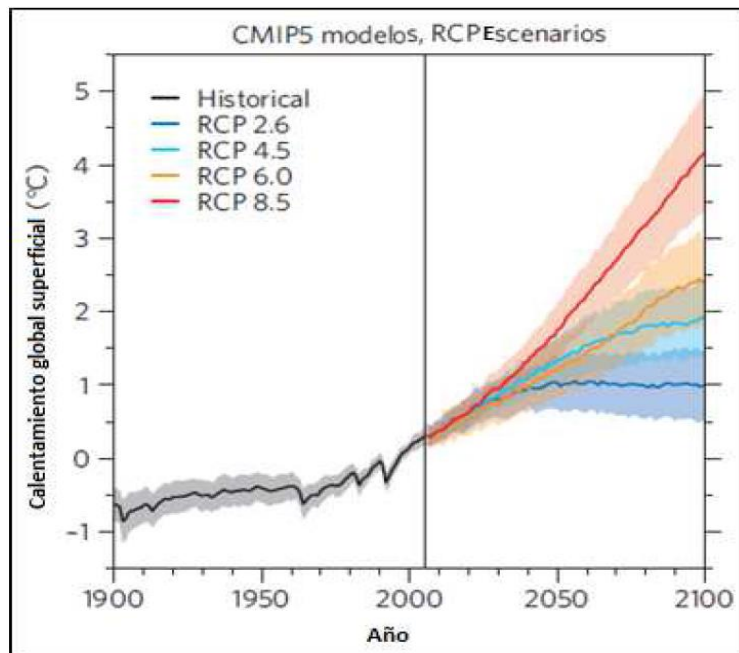


Figura 1.1. Comportamiento de la temperatura previstos para los escenarios Vías de Concentración Representativa (RCPs).

Fuente: Serrano Bustos (2014)

1.6.3. Modelos de cambio climático

Los modelos del sistema climático surgen como una respuesta a la necesidad de poder representar y estudiar con más detalle ciertas interacciones del sistema atmósfera-océano-superficie terrestre en respuesta a posibles forzamientos específicos (*BID, 2010*). En las investigaciones de Cambio Climático, *Gaertner et al. (2006)* afirma que los Modelos de Circulación General del Océano y la Atmósfera (AOGCM, del inglés *Atmosphere-Ocean General Circulation Models*) son la herramienta más importante para explorar la posible evolución futura del clima en escenarios de cambio de las concentraciones de gases de efecto invernadero.

Describir la dinámica compleja de la atmósfera en términos matemáticos es tarea difícil. Los modelos son capaces de reproducir matemáticamente de una forma adecuada los principales procesos que ocurren en los cinco componentes del sistema climático: Atmósfera, océano, criosfera, geosfera y biosfera (*McGuffie y Henderson-Sellers, 2005*). Las ecuaciones contienen muchas variables y aun cuando se han empleado las computadoras más potentes ha sido necesario hacer algunas simplificaciones. Los modelos matemáticos resuelven numéricamente las ecuaciones matemáticas fundamentales que describen la física y dinámica de los movimientos y procesos que tienen lugar en la atmósfera, el océano, el hielo y la superficie terrestre (*Gaertner et al. 2006*).

Relacionado a la fiabilidad de los modelos de cambio climático *Raisänen (2006)* refiere que estos se evalúan considerando tres aspectos: (1) su destreza para reproducir el clima presente, (2) su habilidad para simular los cambios climáticos observados en las últimas décadas y (3) el grado

de acuerdo entre las proyecciones de cambio climático futuro que ofrecen. Así, se puede comprobar que los modelos climáticos globales son capaces de reproducir bastante bien la distribución a gran escala de las principales variables climáticas, que simulan de forma muy aceptable los grandes rasgos del cambio climático observado y que una gran parte de ellos coinciden cuantitativamente sobre muchos aspectos del cambio climático futuro (*AchutaRao et al., 2004; IPCC, 2007 c*).

El Quinto Informe de Evaluación del IPCC o AR5 por sus siglas en inglés (*IPCC, 2013*), considera como válidos los modelos que poseen el más bajo error relativo, en la *tabla 1.1* se citan los modelos más confiables. En el referido informe se hace referencia a que en las predicciones de modelo climático del clima futuro surgen de tres fuentes particulares: incertidumbre en las emisiones futuras de GEI, incertidumbre en la respuesta del modelo y la variabilidad del sistema climático. En cuanto a la incertidumbre en las futuras emisiones de GEI, el autor hace referencia a que estas emisiones se basan en suposiciones claves acerca de las relaciones entre la población futura, el desarrollo socioeconómico y los cambios tecnológicos. Los modelos climáticos generan una incertidumbre basada en sus distintas respuestas para el mismo forzamiento radiativo; estas diferencias entre modelos se deben a representaciones matemáticas variantes del sistema terrestre.

Sobre las incertidumbres de los modelos *Collins (2007)* explica que el conjunto de debilidades de los modelos climáticos no invalida la valiosa información que ofrecen, pero obliga a tratarla acompañada de una cuantificación objetiva sobre su inherente grado de incertidumbre, para lo que ha de utilizarse un conjunto o “*ensemble*” de modelos.

Tabla 1.1 Algunos de los modelos climáticos globales de mejores resultados según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

Nombre del GCM	Instituto	País
BCC-CSM1	Centro del Clima de Beijing y la Administración Meteorológica China	China
CCSM4	Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas	USA
HadGEM2-AO	Instituto Nacional de Investigación en Meteorología y la Administración Coreana de Meteorología	Corea del Norte
HadGEM2-ES	Oficina de Meteorología, Centro Hadley	Reino Unido
IPSL-CM5A-LR	Instituto Pierre Simon Laplace	Francia
MIROC5	Universidad de Tokio, Instituto Nacional para estudios de desarrollo y la Agencia Japonesa de las ciencias del Mar-Tierra y Tecnología	Japón
MRI-CGCM3	Instituto de Investigaciones Meteorológicas de Japón	Japón
NorESMI-M	Centro del Clima de Noruega	Noruega

En la actualidad en Cuba no existen resultados de modelos de cambio climático para los escenarios de emisiones RCP, sin embargo, existen estudios regionales como “*Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México y el Caribe*” **Fernández et al. (2015)** para Centro América y el Caribe, que por la metodología empleada permiten realizar predicciones que apliquen a Cuba.

El escenario base es cualquier conjunto de datos contra los que el cambio se mide, puede ser la línea base actual, en la que se representan las condiciones observables actuales (**IPPC, 2007 a**). Se construyen utilizando al menos 30 años de datos, para que sean representativos de las condiciones climáticas promedio. Se considera que en ese lapso hubo, para la localidad o región de estudio, una amplia gama de años con condiciones climáticas muy variadas. Con base en lo publicado por la Organización Meteorológica Mundial (**Williams, 2014**) se recomienda el uso del periodo climatológico 1981-2010, conocido como normales climáticas, esto debido a que representa el periodo donde el crecimiento de los gases de efecto invernadero se han disparado más rápidamente, por lo que permite realizar un análisis más confiable de eventos extremos y proyecciones futuras.

CAPÍTULO 2
MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Caracterización del área de estudio

El municipio Los Palacios, se localiza en la parte sureste de la provincia de Pinar del Río. Limita al Norte con los municipios de La Palma, al Sur con las aguas del golfo de Batabanó, al Oeste con el municipio Consolación del Sur y La Palma y al Este con San Cristóbal (*figura 2.1*). Posee una extensión territorial de 764.51km², el 64.3 % de la superficie es agrícola y el 35.7 % no agrícola. (*MOA, 2016*). Es un territorio eminentemente agrícola, el renglón fundamental es el cultivo del arroz con 43 610 ha destinadas a este cultivo, que representan el 55% del área de la provincia y el 14% del país, convirtiéndolo en el 4to Polo Productivo arrocero de Cuba (*BASAL, 2016*).

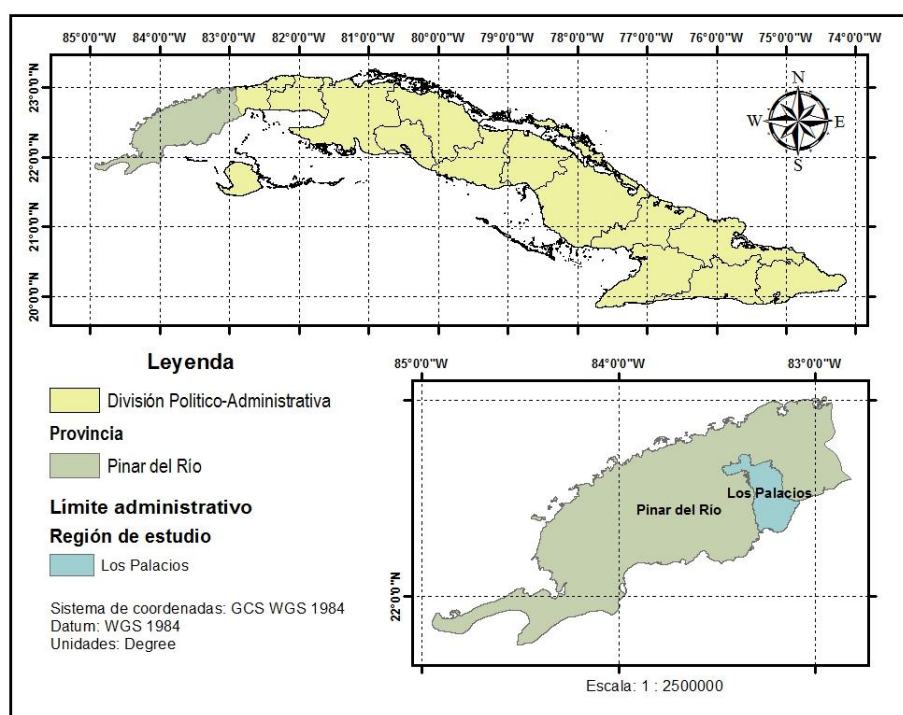


Figura 2.1 Mapa de ubicación de la región de estudio.

El territorio del municipio Los Palacios abarca cuatro cuencas hidrográficas: Herradura, San Diego, Los Palacios y Bacunagua, con ríos permanentes de igual nombre. En la *tabla 2.1* se resumen las características de las cuencas y de la red fluvial.

Tabla 2.1 Características de las cuencas y ríos principales en el área de estudio.
Fuente: MOA (2016)

Cuenca	Extensión (km ²)	Pendiente media (m/m)	Altura máxima (m)	Longitud de los ríos (km)
Herradura				
San Diego	441.75	0.0863	671	87.5
Los Palacios	245.15	0.103	674	61.9
Bacunagua	153.25	0.0631	593	39.6

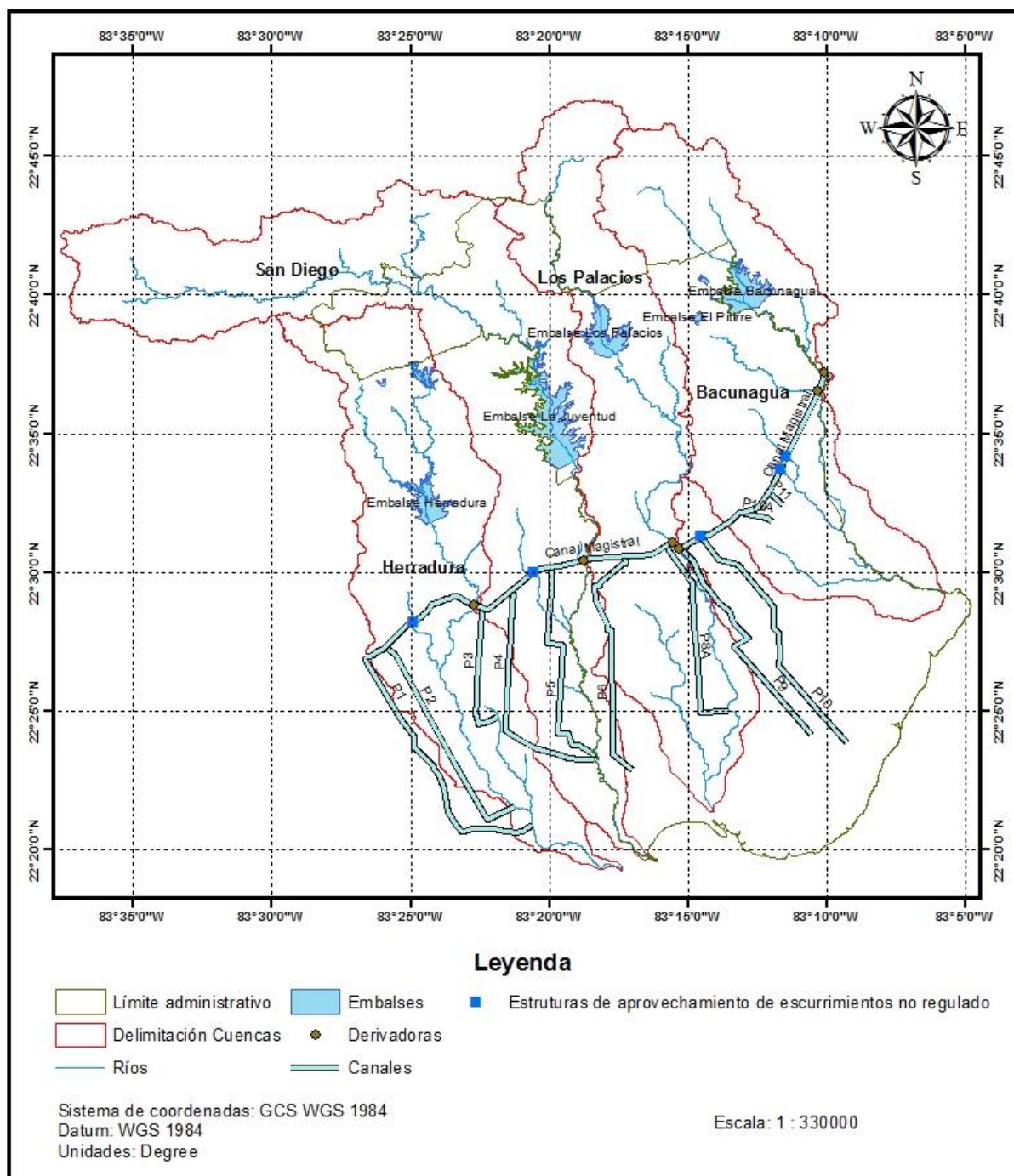


Figura 2.2 Esquema del sistema hidráulico Sur-Centro de la Provincia de Pinar del Río, aparecen en la figura el límite administrativo y la delimitación por cuencas, los embalses, las derivadoras en los ríos, el canal magistral y las estructuras de aprovechamiento de escurrimientos no regulados. **Fuente:** INRH.

2.1.1. Infraestructura hidráulica. Fuentes de agua

La infraestructura de aprovechamiento de los recursos hídricos construida en el Municipio Los Palacios es operada por el Grupo Empresarial de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos (GEARH) y forma parte del Sistema hidráulico denominado Sur-Centro. Este sistema es una obra colosal resultado del Programa de Desarrollo Hidráulico (Voluntad Hidráulica) iniciado en el año

1967 y la conforman embalses, derivadoras en los ríos, tramos de canal magistrales y sistemas de canales para riego (ver *Anexo 1, figuras A1.1, A1.2, A1.3, A1.4 y A1.4*).

Los escurrimientos de los ríos principales se encuentran regulados por los embalses hiperanuales: Herradura, La Juventud, Los Palacios y Bacunagua, en orden de las cuencas enunciadas anteriormente. Además, el territorio cuenta con otras fuentes superficiales como arroyos, lagunas y manantiales y con 2 micropresas, estas fuentes son administrados por el Ministerio de la Agricultura (MINAG) y permiten contar aproximadamente con 4 millones de metros cúbicos de agua adicionales. En la *tabla 2.2* se resumen algunos parámetros técnicos y de explotación de los embalses, en el *Anexo 1, tabla A1.1* se presenta más información.

Tabla 2.2 Algunos parámetros técnicos y de explotación de los embalses.

Fuente: GEARH, Pinar del Río.

Embalse	Volumen útil (hm³)	Garantía (hm³)	Año de creación de capacidad	Área tributaria (km²)	Entrega por obra de toma (m³/s)
Herradura	53.31	36.20	1986	103	24.91
La Juventud	91	115	1973	254	22.69
Los Palacios	41.27	65	1975	103	7.50
Bacunagua	43.5	47	1981	51	24.91

Existen tres tramos de canales magistrales: Herradura-San Diego, San Diego-Los Palacios y Los Palacios-Bacunagua ubicados en el sur de las cuencas, estos canales reciben el agua que sale de los embalses a través de cuatro derivadoras. Los canales magistrales fueron diseñados con pendiente cero, de forma que puede entregarse agua desde el embalse Herradura, límite oeste del municipio, a una zona agrícola en el extremo este del mismo; todo este proceso supone la operación del sistema para hacer llegar el agua de una cuenca a otra. Al construir el canal se interrumpió los afluentes de los ríos, para lo cual se construyeron estructuras de protección y alivio, que permiten ingresar las aguas de esos afluentes al canal y evacuar los excesos.

Para abastecer la zona agrícola al sur del canal magistral existe un amplio sistema de canales primarios, que alimentan a través de los canales secundarios y terciarios, las diferentes áreas agroproductivas.

2.1.2. Características climáticas

La temperatura media anual en la región es de 25°C, siendo agosto el mes más caluroso con 27.1°C y enero el más frío con 20.9°C. Los vientos predominantes son del Este Noroeste, con una velocidad promedio de 10.3 Km/h (*MOA, 2016*).

La precipitación media anual es de 1 426 mm y la evaporación media anual de 1 763 mm. Su período lluvioso se extiende desde el 20 de mayo hasta el 30 de octubre con el 77% de la lluvia

anual, mientras que en junio y septiembre son los meses donde más llueve. La humedad relativa del 82% (*BASAL, 2016*).

2.1.3. Estaciones de medición de variables del ciclo hidrológico

La zona de estudio dispone de una red de medición de la lluvia con 30 estaciones (pluviómetro estándar) distribuidas en toda la región con una cobertura estimada de 25.25 km² por estación. Las series tienen una extensión media de 35 años. Durante el proceso de recopilación de las series de precipitación se comprobó la inconsistencia en cuanto a continuidad en las mediciones de muchos de los equipos, debido al cierre de la estación, desperfecto técnico del equipo o bien carencia de la medición en muchos de los equipos. Las series de lluvia y la ubicación espacial de las estaciones fueron suministradas por GEARH en el *Anexo 1, figura A1.6 y tabla A1.1*, se presenta el mapa de las estaciones pluviométricas y un resumen de la longitud y estado de la serie de precipitación de cada estación, respectivamente.

La serie de evaporación fue suministrada por el Grupo Empresarial de Aprovechamiento Hidráulico de Pinar del Río. En toda la provincia solo existe un evaporímetro ubicado en la Presa Ramírez (en la cercanía del área de estudio) y la serie de evaporación mensual cuenta con información desde 1970-2014.

En cuanto a hidrometría en el cauce de los ríos, se dispone de las series de caudales medios mensuales en cuatro estaciones de aforo, dos ubicadas en la cuenca San Diego y las restantes en las cuencas Los Palacios y Bacunagua, la cuenca Herradura no cuenta con registros hidrométricos (ver *Anexo 1, figura A1.8*). De las cuatro estaciones de aforo solamente se encuentra activa la estación Los Gavilanes, ubicada en la zona alta de la cuenca San Diego, el resto fueron establecidas con el propósito de registrar los escurrimientos medios sobre el cauce de los ríos para el diseño de los embalses y al concluir la construcción de las obras desaparecieron y con ello la medición de la variable en esa cuenca. En la *tabla 2.3* se presentan los datos de las estaciones de aforo y la longitud de la serie de caudales.

Tabla 2.3 Datos de estaciones de aforo en el cauce de los ríos y longitud de la serie.

Fuente: GEARH, Pinar del Río.

Estación	Río	Área (Km ²)	Año inic.	Año fin	Motivo del cierre
Los Gavilanes	San Diego	157	1962	-	-
Paso Quemado	San Diego	257	1961	1969	Presa Juventud
Sto. Domingo	Bacunagua	53	1963	1980	Presa Bacunagua
El Rosario	Los Palacios	102	1963	1976	Presa Los Palacios

En cuanto a la disponibilidad de datos hidrométricos, es importante hacer referencia a que no existen estaciones hidrométricas en los tramos no regulados del río principal, ni en afluentes. En resumen, la disponibilidad de mediciones de caudales en los ríos para enfrentar la calibración y validación de modelos matemáticos a nivel del sistema de cuencas es aceptable.

2.2. Modelo de evaluación y planeamiento de los recursos hídricos (WEAP)

2.2.1. Funcionamiento del modelo

El modelo WEAP (*Water Evaluation And Planning system*) presenta una estructura de cinco vistas diferentes: Esquema, Datos, Resultado, Explorador de Escenarios y Notas. Estas se encuentran organizadas de acuerdo con el proceso de trabajo en el modelo, en el *Anexo 3, figura A3.1* y *tabla A3.1*, se describe la estructura del modelo.

La herramienta permite la planificación de recursos hídricos balanceando la disponibilidad de agua y la demanda, para esto emplea un grupo de elementos y procedimientos para analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores de recursos hídricos, incluyendo aquellos relacionados con el clima, condiciones de la cuenca, proyecciones de demanda y análisis de las demandas sectoriales, políticas de conservación del agua, derechos de agua y prioridades de asignación y operación de embalses bajo condiciones regulatorias (*Lee et al., 2005, Sieber et al., 2007*).

La disponibilidad u oferta de agua es generada a través de modelos hidrológicos a escala de subcuenca (aunque puede introducirse los datos directamente de modelos hidrológicos que se corran independientemente a WEAP). La demanda de agua es caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal con diferencias en las prioridades de demanda. La distribución de agua se realiza para el mismo tiempo de corrida, donde las restricciones relacionadas con las características de los embalses y la red de distribución, las regulaciones ambientales y a la vez las prioridades y preferencias asignadas a diferentes puntos de demanda son usadas como condiciones de operación de un algoritmo de programación lineal que maximiza la satisfacción de demanda hasta el mayor valor posible.

WEAP trabaja bajo enfoque de escenarios y ha sido ampliamente recomendado para estudios de disponibilidad de los recursos hídricos y planeamiento hidrológico considerando escenarios de cambio climático.

2.2.2. Enfoque del modelado y configuración del problema para la investigación

La aplicación de WEAP en el municipio Los Palacios se enfoca en el planeamiento de los recursos hídricos para la producción agropecuaria a escala local a largo plazo, considerando escenarios de cambio climático. En la concepción de la aplicación se consideran las zonas agrícolas como un usuario que demanda un volumen que dependerá de los requerimientos netos de agua de

los cultivos y su calendario de siembra, es decir, no se trata de una modelación biofísica del balance hídrico pues no se tiene en cuenta el balance entre demanda climática de los cultivos y aporte de la lluvia; esta es la situación más desfavorable para el planeamiento, pues la satisfacción de la demanda dependerá únicamente de la disponibilidad de agua en los embalses.

El enfoque de modelado referido en el párrafo anterior requiere un esquema de menor detalle que permita agrupar a los usuarios teniendo en cuenta un sistema de distribución de agua en que todos están dentro de una región definida.

El enfoque de modelado condiciona el resto de los procesos que intervienen en la implementación del modelo WEAP, teniendo en cuenta la configuración del problema a modelar, se desarrollaron 5 etapas: (1) Procesamiento y generación de la información básica para la modelación de la gestión del agua, (2) Modelación hidrológica, (3) Generación de escenarios climáticos, (4) Modelación de la gestión de los recursos hídricos en WEAP y (5) Análisis de escenarios base y futuros.

2.2.3. Aspectos metodológicos para la calibración y validación

El proceso metodológico de calibración en WEAP propuesto por *Escobar et al. (2009)* implica tres partes fundamentales: (1) Calibración de las subcuencas aportantes o zonas de régimen natural, (2) Calibración de las subcuencas intermedias y (3) Calibración de la operación de los recursos hídricos. Las dos primeras partes son enfocadas a la calibración hidrológica (sin diferenciar si se emplea el modelo hidrológico de WEAP o uno externo) y la última parte del proceso se refiere a la calibración de la operación de las fuentes, que puede realizarse de forma independiente o asociada a la calibración hidrológica, dependiendo de la disponibilidad de datos.

En función de la disponibilidad de datos se establece para la región la estrategia de calibración y validación. La calibración de las subcuencas aportantes puede desarrollarse en las cuencas San Diego, Los Palacios y Bacunagua, a partir de los datos disponibles de caudales medidos en los ríos; para el caso de la cuenca Herradura puede enfocarse asociada con la operación de los recursos hídricos. La calibración de las subcuencas intermedias puede en la cuenca San Diego y en la cuenca Herradura desarrollarse asociada a la operación de los recursos hídricos, en las cuencas Los Palacios y en la cuenca Bacunagua no existen datos suficientes para afrontar esta fase.

2.3. Etapa 1: Procesamiento y generación de la información básica para la modelación de la gestión del agua

La primera etapa de la investigación es el procesamiento y generación de la información básica para la modelación de la gestión del agua: variables hidrológicas, los usuarios del agua y sus niveles de consumo históricos, así como las características técnicas y de explotación de la

infraestructura para el aprovechamiento de los recursos hidráulicos. Las actividades desarrolladas dentro de esta etapa fueron divididas en dos fases que se desarrollan en los siguientes subacápites.

2.3.1. Fase A: Análisis estadísticos de las variables hidrológicas

La fase A se centró en el análisis estadístico de las variables hidrológicas: precipitación y caudales medidos en los ríos comprobando la calidad de los datos fundamentales para etapas posteriores, la *figura 2.3* describe los tratamientos dados a las variables.

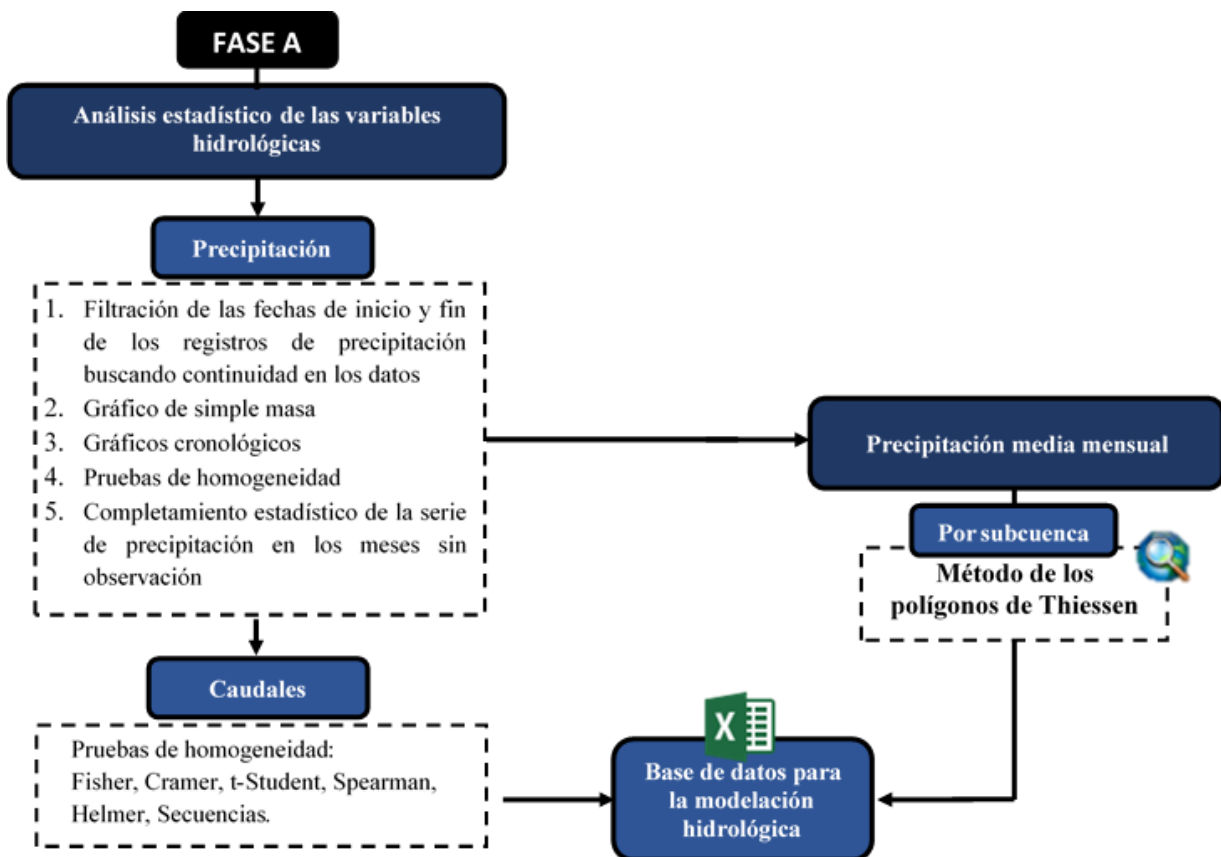


Figura 2.3 Flujo de procesos de la fase A, etapa 1 en la investigación.

La serie de cada estación pluviométrica fue procesada estadísticamente en busca de datos erróneos, datos faltantes, mediciones alteradas e inconsistencia en los datos. A continuación, se enumeran los tratamientos realizados a la información de lluvias mensuales:

- Filtración de las fechas de inicio y fin de los registros: buscando continuidad en los datos.
- Gráficos cronológicos de cada equipo en los intervalos de tiempos más grandes de la serie: comparando los gráficos cronológicos para dos equipos cercanos, uno de ellos confiable de acuerdo con el análisis de zona estadísticamente homogénea. Los resultados de este proceso se presentan en el *Anexo 2, figura A2.1*.
- Gráfico de simple masa: Construido para el período más largo de datos continuos, para analizar visualmente la homogeneidad de la serie. Los resultados de este proceso se presentan en el *Anexo 2, figura A2.2*.

- Pruebas de homogeneidad: Fisher, Cramer, t-Student, Spearman, Helmer, Secuencias o corridas, Autocorrelación y Kruskal-Wallis, descritos por *Campos (1992)*. Se consideró homogénea aquella serie que tuviese un resultado positivo en al menos tres pruebas incluyendo t-Student y Cramer. Los resultados de este proceso se presentan en el *Anexo 2, tabla A2.1*.

Como patrón para seleccionar las estaciones pluviométricas se buscó que existiera coincidencia de registros de precipitaciones con los registros de caudales en las estaciones de aforo, además de cumplir con el análisis estadístico y de depuración.

Después del análisis estadístico y de depuración, se procedió al completamiento de los registros faltantes; para ello se utilizó el método de las Distancias, descrito en *Campos (1992)*. Para caracterizar la precipitación en las diferentes partes de las cuencas estudiadas (parte alta, media y baja), se determinó de la lluvia media por subcuenca. En este proceso se determinó el área de influencia de las estaciones pluviométricas con datos confiables y se ponderó la precipitación por el método de Thiessen, descrito por *Rodríguez y Marrero (2014)*. En el *Anexo 2, figura A2.3*, se presentan el mapa de los polígonos de Thiessen y el área de influencia de las estaciones pluviométricas para cada cuenca.

De manera similar que las series de precipitación se aplicaron las pruebas de homogeneidad a las series de escurrimiento disponibles de las tres estaciones hidrométricas. Los resultados de este proceso se presentan en el *Anexo 2, tabla A2.2*.

2.3.2. Fase B: Inventario de las demandas históricas de agua

La fase B se centró en el inventario de las demandas históricas de agua dividida en tres procesos: inventario de los usuarios del agua y fuentes asociadas, ubicación espacial de los usuarios del agua e inventario de los cultivos agrícolas bajo riego. En la *figura 2.4*, se resumen esquemáticamente las actividades de esta fase.

Para definir los usuarios del agua y sus fuentes asociadas fueron procesados los balances de agua, suministrados por el Grupo Empresarial de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos (*GEARH*) de la provincia de Pinar del Río. Para la ubicación espacial de los usuarios del agua se empleó el mapa de tenencia de la tierra, definido en un estudio antecedente de la zona desarrollado por *BASAL (2016)*, esta información sirvió como base para la construcción del esquema de gestión del agua en la **etapa 4** de la modelación.

El inventario de los cultivos agrícolas bajo riego se obtuvo a partir del procesamiento de los balances de agua, desagregando la información histórica de cultivo, área de siembra y tasa de consumo. Es importante señalar que el acondicionamiento de las demandas de agua de los cultivos

agrícolas bajo riego fue el paso más complejo en el procesamiento de datos debido a que la demanda de agua se tiene a nivel trimestral, sin embargo, el modelo la requiere a nivel mensual. Por otra parte, los cultivos agrícolas se presentan en familias genéricas (arroz, granos, hortalizas, viandas y pastos) englobando distintas variedades solo reconocibles en las bases de datos por sus distintas normas netas de riego definidas en la *Resolución 287* del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos para la región estudiada *INRH (2015 a)*. A esta situación se une que para simular correctamente la demanda real en la cuenca es necesario representar los calendarios históricos de siembra para cada usuario definido. Para abordar las problemáticas referidas fue necesario realizar simplificaciones en el procesamiento de la información.

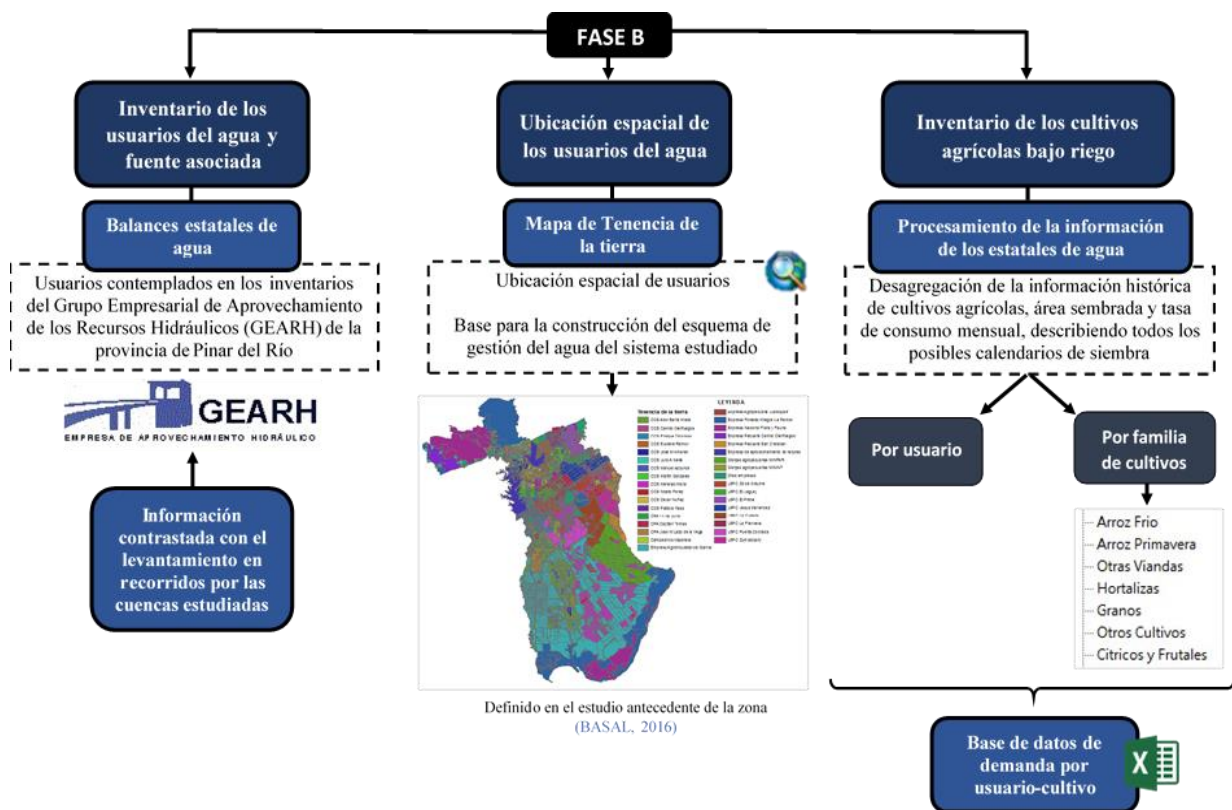


Figura 2.4 Flujo de procesos de la fase B, etapa 1 en la investigación.

Como vía para representar los calendarios históricos de siembra de los cultivos fueron definidos grupos de demanda, abarcando las posibles variantes de solicitar el agua en los cuatro trimestres del año, por ejemplo, el Grupo 2 representa la demanda para los dos primeros trimestres del año y en el último, llegando así a 15 combinaciones posibles (ver *Anexo 2, tabla A2.3*). A continuación, se explica el procesamiento una vez tomado el criterio de agrupación:

1. Las demandas históricas fueron organizadas por familia genérica de cultivos (ver ejemplo en *Anexo 2, figura A2.3 a*).

2. Fueron analizadas las bases de datos, identificando individualmente el grupo de demanda que representaba el calendario histórico de siembra para cada familia de cultivo (ver ejemplo en *Anexo 2, figura A2.3 b*).
3. La distribución trimestral histórica para el grupo de demanda fue ponderada (ver ejemplo en *Anexo 2, figura A2.3 c*).
4. Con el resultado del paso anterior se realizó la distribución mensual de la demanda (ver ejemplo en *Anexo 2, figura A2.3 d*).

De este proceso se genera la base de datos con la demanda histórica de agua desagregada por usuarios y por familia genérica de cultivos, insumo necesario para la **etapa 4** de la investigación.

2.4. Etapa 2: Modelación hidrológica

La etapa 2 de la investigación se centró en la modelación hidrológica a partir de la implementación del Método de la Curva Número (Servicio de Conservación de los Suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos; *NCR, 2009*) para la generación matemática de la serie de escurrimiento medios mensuales para cada cuenca analizada y el ajuste de parámetros como vía para calibrar y validar el modelo que será empleado en futuras fases para generar los escurrimientos medios mensuales para los escenarios climáticos que serán evaluados en la investigación. La *figura 2.4* describe las etapas seguidas en la modelación hidrológica, información que se amplía a continuación.

2.4.1. Generación matemática de la serie de escurrimiento medios mensuales

El método de la Curva Número fue implementado en el Sistema de Información Geográfico *ArcGIS versión 10.2* a partir de la herramienta *HEC-GeoHMS versión 10.1* que genera de forma automatizada un valor de *CN* para cada fragmento de área, teniendo como insumos el *Mapa de Suelo y Uso del Suelo* de las cuencas estudiadas. El procedimiento implementado por subcuencas, es descrito por *Portuguez y Verano (2016)*. Los grupos hidrológicos a los que pertenecen los suelos en el área de estudio fueron definidos a partir de los estudios de *López et al. (1998)*. El número de la curva para las distintas coberturas del suelo y en función del grupo hidrológico fueron definidos teniendo en cuenta los criterios de *NRCS (1986)* (ver *Anexo 2, tabla A2.4 y tabla A2.5*).

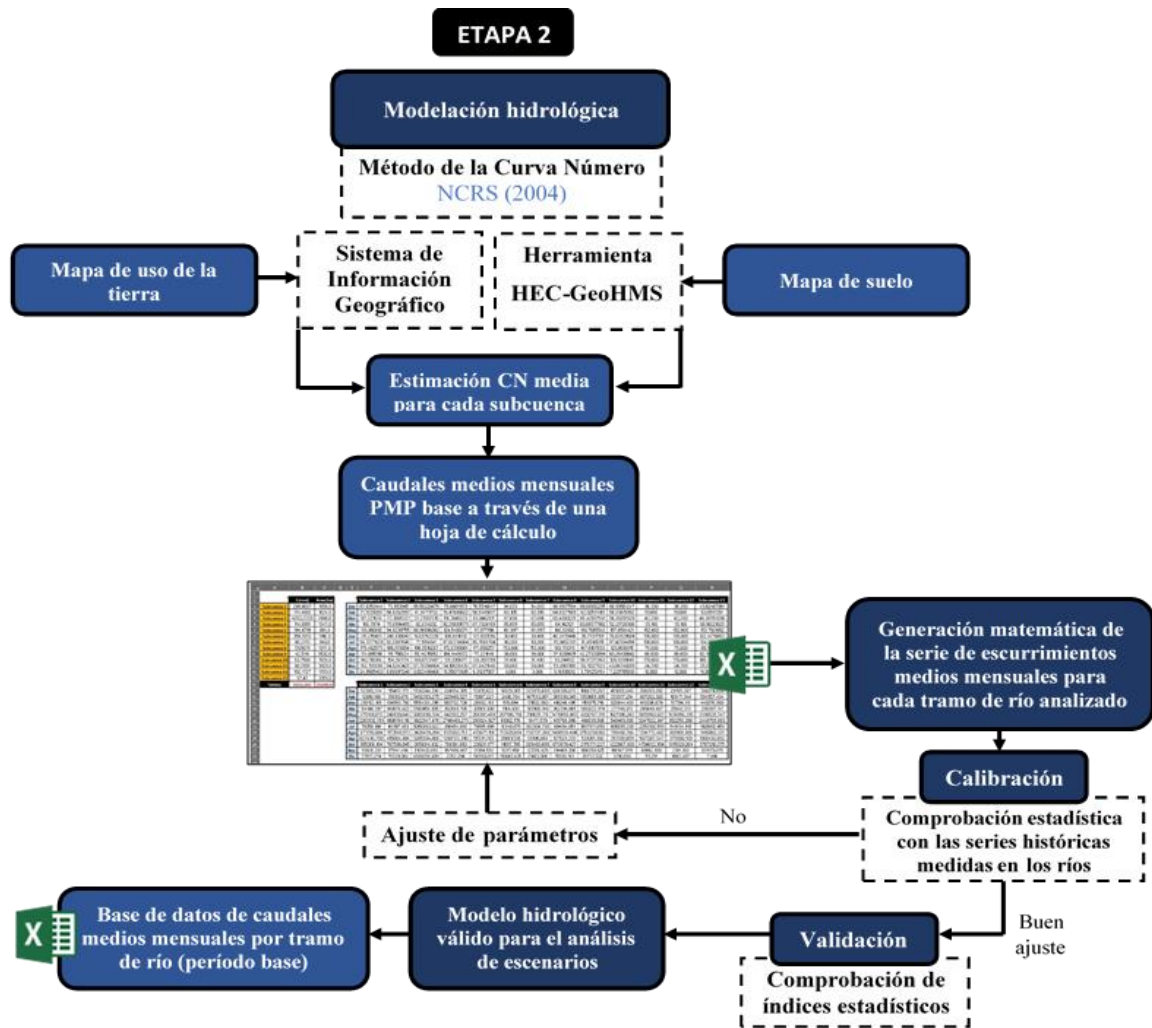


Figura 2.5 Flujograma de procesos de la fase B, etapa 1 en la investigación.

Se determinó un valor ponderado de *CN* por subcuencas, aplicando la *ecuación 2.1*. Se elaboró un Libro Excel denominado “*Módulo CN*”, que utiliza la información generada por la herramienta *HEC-GeoHMS* para realizar la ponderación explicada anteriormente y estimar el escurrimiento en cada cuenca, aplicando las ecuaciones descritas en el método de la Curva Número (*ecuaciones 2.2 y 2.3*).

$$CN_{ponderada} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i * CN_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.1)$$

donde:

CN ponderada: es el valor de *CN* de la subcuenca (adimensional)

i: es el número de subdivisiones hechos a la cuenca en función del tipo y uso de los suelos.

CNi: es el valor de *CN* para cada subdivisión (adimensional)

Ai: es el área de cada subdivisión (ha)

$$S = \frac{25400}{CN_{ponderada}} - 254 \quad (2.2)$$

donde:

S : es la capacidad potencial de lluvia que puede retener la subcuenca (mm)

$CN_{ponderada}$: es el valor de CN de la subcuenca (adimensional)

$$Q_{medio} = \frac{(L - nS)^2}{L^2 + LS(1 - n)} \quad (2.3)$$

donde:

Q_{medio} : es el escurrimiento medio en forma de lámina (mm)

L : es la lámina de lluvia caída (mm)

S : es la capacidad potencial de lluvia que puede retener la subcuenca (mm)

n : factor que depende de la permeabilidad del suelo, usualmente se toma como valor fijo igual a 0.2

2.4.2. Calibración y validación del modelo hidrológico

La calibración y validación hidrológica se desarrolló para las subcuencas con información hidrométrica de los ríos Bacunagua, Los Palacios y San Diego. En el caso de la cuenca Herradura, aunque se aplicó la misma metodología para la generación matemática de la serie de escurrimiento medios mensuales, la calibración hidrológica se realizó asociada a la calibración de la operación de los recursos hídricos, de igual manera que las subcuencas aguas abajo de la estación de medición en la cuenca San Diego. La metodología para la calibración asociada se describe en el describe en el **acápite 2.5.3**.

En la calibración hidrológica se buscó lograr un valor del número de la curva (CN) de cada cuenca que permita obtener una representación de caudales que asemeje los datos históricos de la forma más cercana posible. El valor inicial del parámetro se fijó como un valor único para el año, igual al CN ponderado descrito en el apartado anterior. El período de calibración se seleccionó individualmente dividiendo la serie de caudales medidos en el río, para posteriormente validar el ajuste de parámetros realizado. Los períodos de calibración seleccionados tienen en cuenta la disponibilidad de la información de datos de precipitación y escurrimientos; por esta razón, no existe coincidencia entre los períodos de calibración de una cuenca a otra.

Para evaluar el grado de similitud entre los valores simulados y observados en el período de calibración y la validación del modelo hidrológico fueron calculados los indicadores estadísticos propuestos por **Weglarczyk (1988)** para este tipo de modelo: índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe

(*NSE*), sesgo o desviación relativa (*PBIAS*) y desviación estándar (*RSR*), descritos por las **ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6**, respectivamente.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (2.4)$$

$$Sesgo = 100 * [(\bar{Q}_s - \bar{Q}_o) / \bar{Q}_o] \quad (2.5)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q})^2}} \quad (2.6)$$

donde:

Q_{si} : Caudales simulados para cada paso de tiempo i ($m^3 s^{-1}$)

Q_{oi} : Caudales observados para cada paso de tiempo i ($m^3 s^{-1}$)

\bar{Q}_s : Caudal medio simulados ($m^3 s^{-1}$)

\bar{Q}_o : Caudal medio observados ($m^3 s^{-1}$)

n : número de pares de valores

El índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (*NSE*) es un medidor estadístico de la magnitud de la varianza residual en comparación con la varianza observada, definido por *Nash y Sutcliff (1970)*, puede interpretarse que un valor más cercano a la unidad representa una mayor correspondencia entre los datos observados y simulados. El sesgo (*PBIAS*), definido por *Gupta et al. (1999)* representa la desviación relativa a la media expresado en porcentaje, el valor óptimo es cero, un sesgo positivo indica subestimación y un sesgo negativo indica sobrestimación. Y la desviación estándar de las observaciones (*RSR*), definido por *Singh et al. (2004)*, se calcula como el cociente entre el error medio cuadrático (*RMSE*) y la desviación estándar de los datos observados. El valor óptimo del estadígrafo es cero, considerando una simulación perfecta, por tanto, mientras más pequeño el valor de *RSR* mejor representación del proceso real por el modelo de simulación.

Para evaluar cualitativamente el desempeño del modelo hidrológico se siguieron los criterios establecidos por *Moriasi et al. (2007)* presentados en la **tabla 2.4**.

Tabla 2.4 Interpretación cualitativa de los parámetros estadísticos para calibración y validación.

Fuente: Moriasi et al. (2007)

PBIAS	NSE	RSR	Interpretación cualitativa
$PBIAS < \pm 10$	$0,75 < NSE < 1,0$	$0,00 < RSR < 0,50$	Muy Bueno
$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$	$0,65 < NSE < 0,75$	$0,50 < RSR < 0,60$	Bueno
$\pm 15 < PBIAS < \pm 25$	$0,50 < NSE < 0,65$	$0,60 < RSR < 0,70$	Satisfactorio
$PBIAS > \pm 25$	$NSE < 0,50$	$RSR > 0,70$	No satisfactorio

2.5. Etapa 3: Generación de escenarios de cambio climático

La etapa 3 en la investigación se dedica a la generación de escenarios climáticos para la modelación de la gestión del agua. En la **figura 2.5** se resumen esquemáticamente las actividades de esta etapa que comprende tres procesos: el procesamiento de anomalías de cambio climático, la generación de la precipitación y escurrimientos futuros.

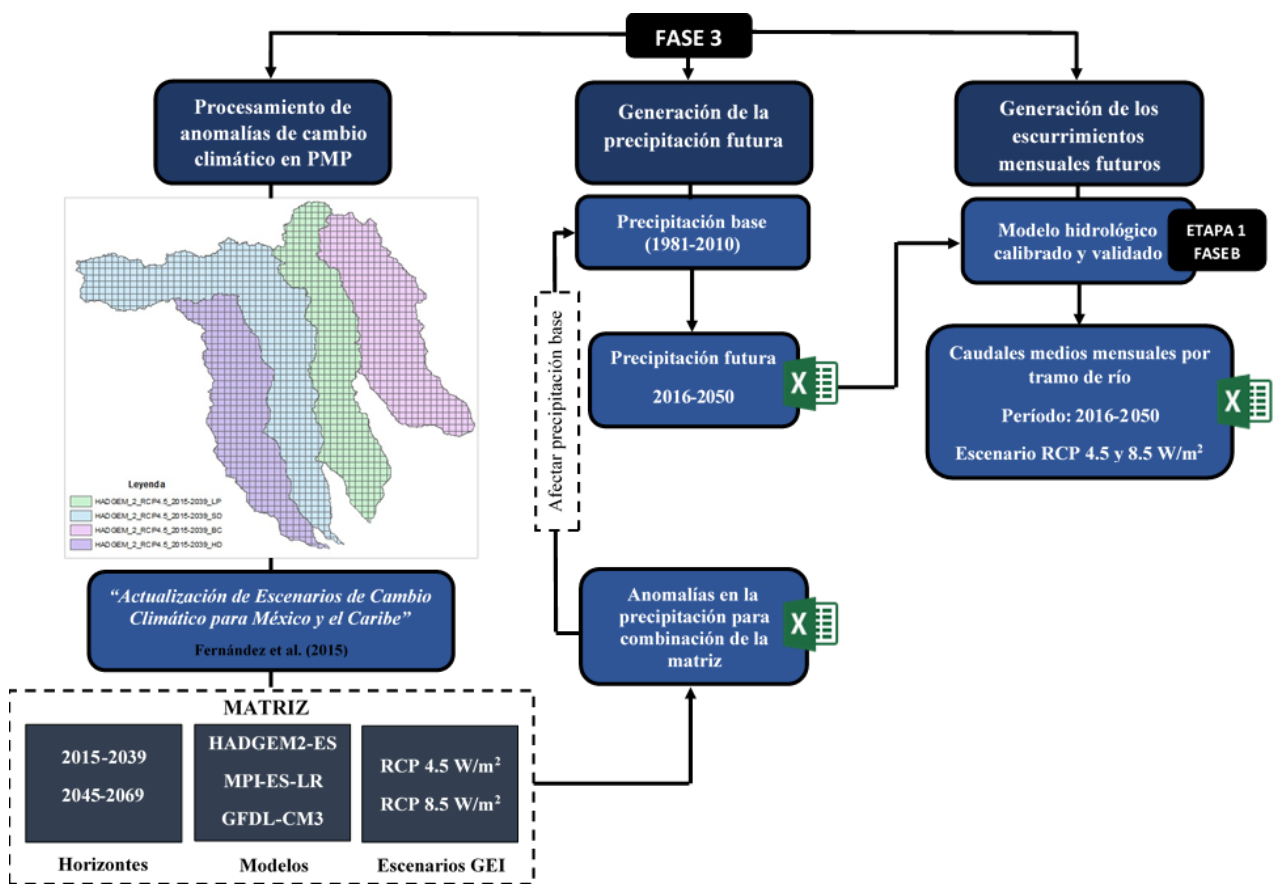


Figura 2.5 Flujograma de procesos de la etapa 3 en la investigación.

Las anomalías de cambio climático en la precipitación fueron tomadas de **Fernández et al. (2015)**¹. En el referido estudio se emplearon los modelos HADGEM2-ES, MPI-ES-LR y GFDL-CM3, considerados como válidos por el Quinto Informe de Evaluación del IPCC o AR5 por sus siglas en inglés (**Caminos et al., 2014**), pues poseen un bajo error relativo. Los escenarios de

¹ Disponibles en la página web del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático de México, <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>

emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) analizados permiten evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos para un comportamiento del clima futuro medio y otro extremo. El RCP 4.5 W/m² es un escenario de mitigación que considera una estabilización en las emisiones de gases de efecto invernadero a causa de la influencia de las políticas climáticas, y el RCP 8.5 W/m² es el mayor escenario radiativo que considera altas emisiones de gases de efecto invernadero en ausencia de políticas climáticas.

Para cada uno de los modelos citados se tiene información de las corridas para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 W/m² en los horizontes de planeación 2015-2039, 2045-2069 y 2075-2099. Para cada combinación de la matriz modelo, horizonte y escenario de *GEI* se extrajeron las anomalías en la precipitación mensual, con resolución espacial de 30" x 30" (aproximadamente 1 km x 1 km), para su aplicación práctica se obtuvo una anomalía ponderada para toda la región.

En la generación de la precipitación futura se empleó como clima base 30 años de registros mensuales históricos de precipitación, que según a las indicaciones de la Organización Meteorológica Mundial (*OMM*) (*William, 2014*) para este tipo de estudios, permite representar períodos húmedos, secos y normales. La precipitación base (1981-2010) fue afectada por las anomalías en la precipitación mensual para la combinación de la matriz, obteniendo así la precipitación futura para el período desde 2016-2050. En la generación de los escurrimientos medios mensuales futuros se empleó el modelo hidrológico calibrado y validado y la base de datos de precipitación futura.

Siguiendo los criterios definidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (*IPCC*) para reducir la incertidumbre en la evaluación del impacto del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos (*Mastrandrea et al., 2010*), la base de datos de caudales medios mensuales se conformó ponderando los caudales generados por la información de cada modelo de cambio climático.

2.6. Etapa 4: Modelación de la gestión de los recursos hídricos en WEAP

La etapa 4 en la investigación se centró en la modelación de la gestión de los recursos hídricos en el sistema de cuencas estudiado. En la *figura 2.6* se presenta el flujograma con las actividades de esta etapa que comprende cuatro procesos: la construcción del modelo esquemático de la gestión del agua, la entrada de los datos, las corridas iniciales del modelo y la calibración de la operación de los recursos hidráulicos del sistema. A continuación, se describen cada uno de los procesos.

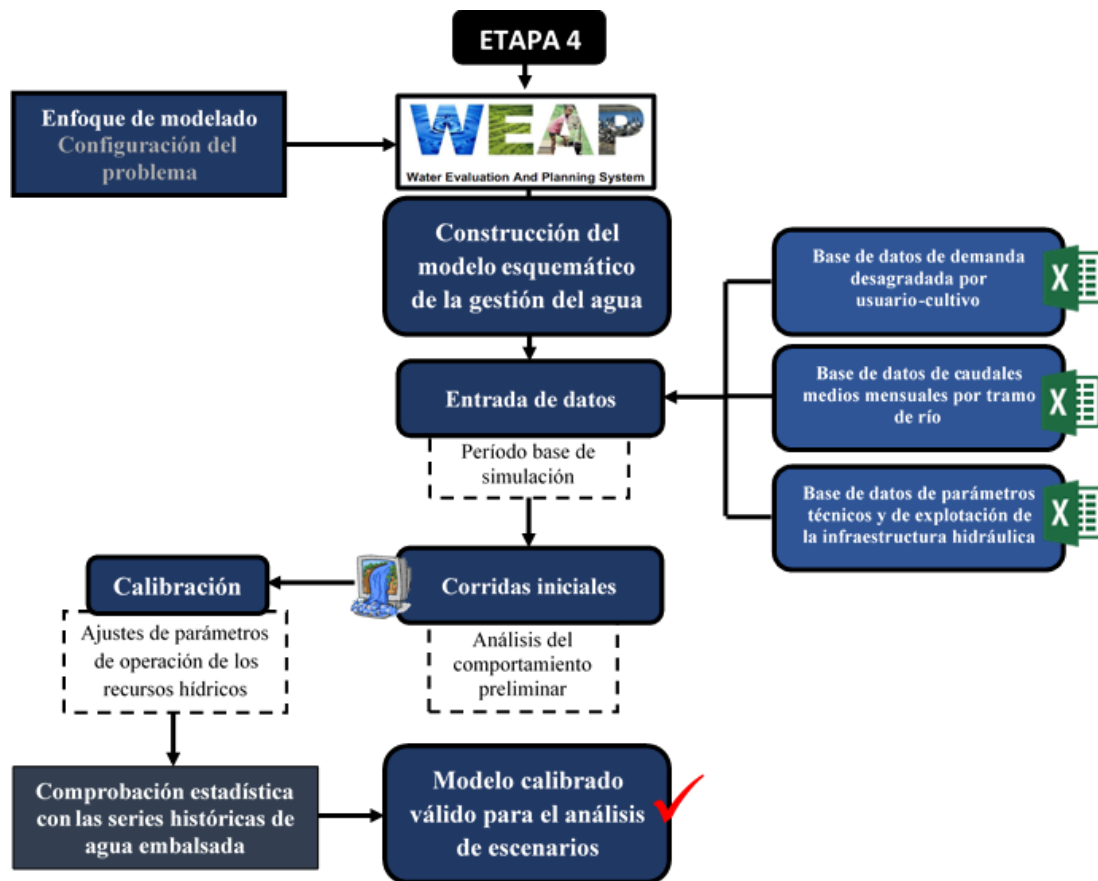


Figura 2.6 Flujograma de procesos de la etapa 4 en la investigación.

2.6.1. Construcción del modelo esquemático de la gestión del agua. Entrada de datos

El esquema simplificado del sistema de cuencas fue construido en el modelo *WEAP* empleando el conjunto de elementos esquemáticos, que permiten caracterizar a grandes rasgos las condiciones hidrológicas, la infraestructura para el aprovechamiento de los recursos hídricos y los usuarios del agua, en el *Anexo 3, tabla A3.2* se describe cada elemento esquemático.

En la construcción del esquema se emplearon las capas vectoriales generadas por *BASAL (2016)*: cuencas, subcuencas, tramos de ríos, embalses, canales o infraestructura hidráulica y usuarios del agua; estos fueron usados como plantilla de fondo para la esquematización. En el *Anexo 3, figura A3.2*, se presenta el flujograma de procesos en la construcción del modelo esquemático de la gestión del agua y la descripción de los elementos que emplea el modelo *WEAP* en la construcción del esquema simplificado de las cuencas, respectivamente.

Las condiciones hidrológicas se esquematizaron a partir de tramos de ríos que definen los cauces del río principal y sus afluentes, teniendo en cuenta que el drenaje natural ha sido modificado después de la construcción del sistema de aprovechamiento de los recursos hídricos. Por otra parte, la infraestructura de aprovechamiento de los recursos hídricos se representó a partir de los elementos embalse (▲) y derivación (→); en el caso particular de las derivaciones, se

representó lo más fiablemente posible el funcionamiento de las derivadoras en los ríos y del canal magistral, explicado en la *sección 2.1.1*.

Por último, se representaron los usuarios del agua como sitios de demanda (●), agrupando usuarios que comparten un sistema de la distribución de agua y que se encuentran en una región definida; los sitios de demanda se conectaron a las fuentes a través de conducciones (→) y el agua que no es empleada en el proceso de consumo y regresa al sistema se representó a través de flujos de retorno (↩). En la representación de los usuarios del agua se emplea la información procesada en la *Etapa 1, fase B* de la investigación.

Los datos requeridos para construir un modelo en *WEAP*, organizados por elementos del esquema, se presentan en el *Anexo 3, tabla A3.1*. Para la entrada de datos se dispuso de la información procesada en las *Etapas 1 y 2*: base de datos de demanda agregada por usuarios-cultivo, la de caudales medios mensuales por tramo de río y la de parámetros técnicos y de explotación de los recursos hidráulicos.

Los datos técnicos y de explotación de los embalses y de las derivaciones fueron suministrados por *GEARH*, los volúmenes observados en el período base de simulación 2010-2015 y el volumen inicial para la simulación fueron extraídos de los boletines hidrológicos del *INRH*². El índice de pérdidas en las conducciones se fijó considerando la eficiencia del sistema de canales para el riego del arroz estimada por *Jerez (2014)*, *Ruiz (2014)*, *Martínez (2014)* y *Pérez (2014)* en una investigación conjunta, los autores estimaron una eficiencia global del sistema de conducción en un 40%. La reutilización del agua dentro de las empresas arroceras fue estudiada por *Trujillo et al. (2015)* definiendo tasa de reutilización del agua asignada de un 15%, valor empleado para definir este factor.

La tasa de pérdidas de los sitios de demanda, entendiéndose como la eficiencia de riego a nivel parcelario, se estableció en un 30% de pérdidas considerando la normativa de *INRH (2015 b)*. Para establecer el sistema de prioridades de los usuarios se tuvo en cuenta lo legislado en la Ley de las Aguas Terrestres (*ANPP, 2018*) cuando la disponibilidad no logra satisfacer totalmente la demanda. El orden de prioridad definido en la modelación fue: (1) abasto a la ganadería y a la piscicultura, (2) gasto ecológico y (3) riego agrícola (en este caso se estableció que el arroz tendría una prioridad superior al resto de los cultivos). El suministro de preferencia fue empleado cuando un usuario tenía asociada más de una fuente, la fuente de preferencia y el porcentaje de demanda que satisface se definió teniendo en cuenta la información extraída de los balances estatales de agua en la *etapa 1, fase B* de la investigación.

² Boletines hidrológicos: Análisis de lluvia, embalses y acuíferos. Dirección de Uso Racional del Agua, Servicio hidrológico Nacional. Disponible en: <http://www.hidro.inrh.cu/>

2.6.2. Calibración de la operación de los recursos hidráulicos

El proceso de calibración de la operación de los recursos hidráulicos se realiza a partir de un balance de entradas y salidas de agua desde los embalses, considerando las entregas reales y ajustando los parámetros operacionales y de funcionamiento de la infraestructura hidráulica descritos en la **tabla 2.5** para lograr que los volúmenes medios mensuales observados se semejen de la forma más cercana posible a los simulados por el modelo *WEAP*.

El período de calibración de la operación de los recursos hídricos abarca los años desde 2010 a 2015, pues la información desagregada de demanda de los usuarios del agua y entregas del embalse solo se tiene en este período.

Tabla 2.5 Parámetros operacionales de los embalses para la calibración del modelo *WEAP*.

Parámetros	Rango	Observaciones
Coficiente de amortiguamiento (C_a)	0-1	Porcentaje del agua contenida por debajo de la LIEG (Línea Inferior de Entrega Garantizada) disponible para la asignación
Coficiente de escurrimiento (C_e)	0-1	El ajuste del coeficiente de escurrimiento solo es válido si se realiza una calibración asociada, en su defecto es un dato de la calibración hidrológica

Para establecer los valores iniciales de los parámetros a calibrar se siguieron un grupo de criterios que a continuación se relacionan:

Coficiente de amortiguamiento: Este parámetro forma parte de los gráficos de explotación de las fuentes y refleja la restricción a la entrega de los embalses hiperanuales. En la información suministrada por los operadores de las fuentes no está definido el valor de este coeficiente, por tanto, el ajuste de este parámetro está sujeto al criterio de los autores teniendo en cuenta la teoría de operación de embalses de *Martínez (1997)*, que explica que la selección de un porcentaje de reducción se hace con el fin de mantener una reserva en el embalse que permita, al menos, llegar al final del período deficitario con una entrega menor pero controlada.

Coficiente de escurrimiento: Este parámetro forma parte de la ecuación de pérdidas por evaporación (**ecuación 2.9**). En el caso de las cuencas que fueron calibradas hidrológicamente el valor del coeficiente de escurrimiento es el número de la curva calibrado. Para la cuenca Herradura donde no es posible realizar la calibración hidrológica, el coeficiente de escurrimiento forma parte de la calibración de la operación de los recursos hídricos; considerándose una calibración asociada de hidrología y operación.

$$Ev(neta) = [Ev - (1 - Ce) \cdot Lr] \quad (2.9)$$

donde:

E_v (*neta*): evaporación neta mensual (mm)

E_v : evaporación (mm)

C_e : coeficiente de escurrimiento (adimensional)

L_r : lámina de precipitación sobre el embalse (mm)

Una vez ajustados los parámetros se realizaron comparaciones entre series de volúmenes históricos de agua embalsada y los simulados por el modelo, para evaluar el grado de similitud se realizó un análisis gráfico a partir de una regresión lineal forzada al origen de coordenadas, evaluando el valor de la pendiente de la recta, que mientras más cercana a uno indica el mayor grado de similitud entre los volúmenes simulados y observados. Además, se evaluó el coeficiente de determinación para evaluar la explicación del modelo.

2.1. Etapa 5: Análisis de escenarios base y futuros

Una vez concluido todo el proceso de calibración, se cuenta con un modelo hidrológico y un modelo de planeamiento de los recursos hídricos que permite el análisis de escenarios. Como ilustra el flujograma de la **figura 2.8**, para el análisis de escenarios se empleó la base de datos de caudales medios mensuales por tramos de río para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 W/m² combinados con escenarios de demanda.

Los escenarios de demanda probados para el período 2016-2050 consideran: **(1)** Demanda de agua para el cultivo de arroz equivalente al promedio mensual de las solicitudes de los usuarios en la región y **(2)** Aumento en la demanda de agua para el cultivo de arroz en un 12 por ciento en toda la región, de acuerdo con el “*Programa de Desarrollo Integral del Municipio Los Palacios*” (ENPA, 2012).

Para facilitar el entendimiento de los escenarios probados se presenta en la **figura 2.10** la matriz del análisis, con el propósito de organizar la presentación y discusión de los resultados se nombrarán las combinaciones de la matriz como sigue:

Escenario 1: Demanda de agua para el cultivo de arroz equivalente al promedio mensual de las solicitudes de los usuarios que siembran este cultivo en la región, considerando el escenario RCP 4.5 y 8.5 W/m²

Escenario 2: Aumento en la demanda de agua para el cultivo de arroz en un 12 por ciento en toda la región, considerando el escenario RCP 4.5 y 8.5 W/m².

Para concluir se realizaron las corridas del modelo para los escenarios definidos y se generaron los indicadores por escenarios para evaluar el balance disponibilidad-demanda en el sistema de cuencas del municipio Los Palacios.

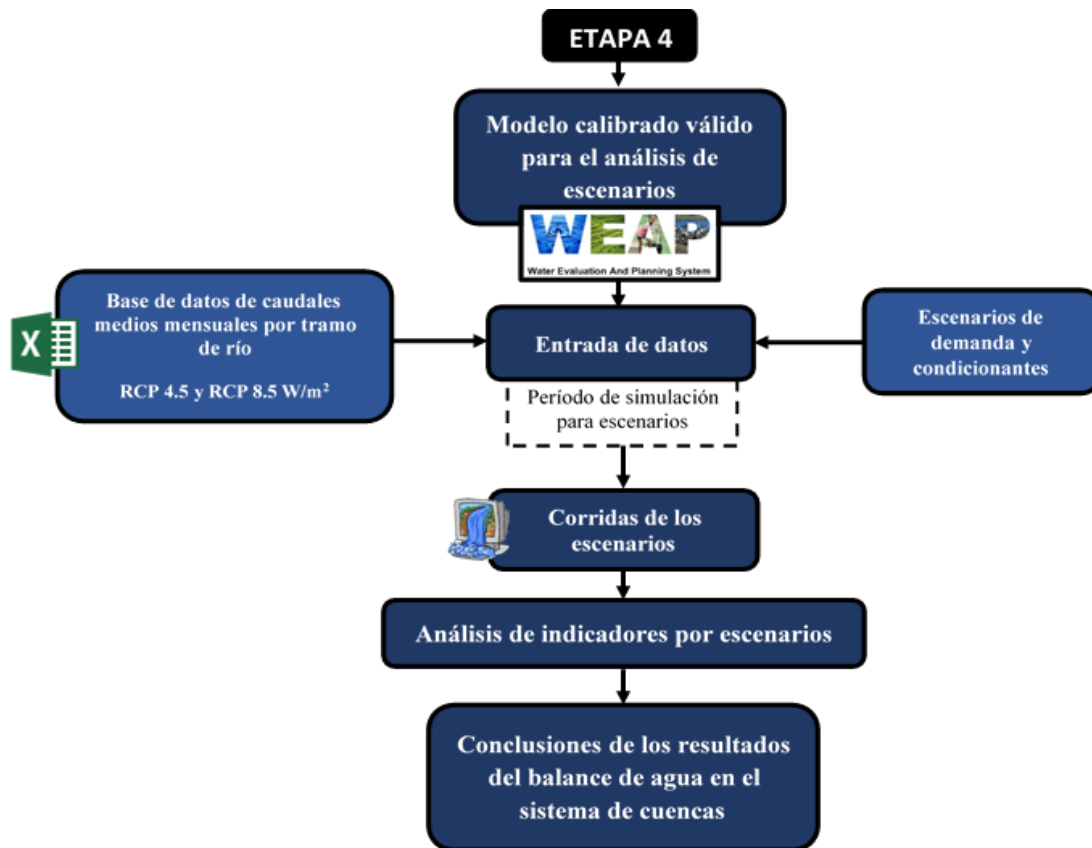


Figura 2.7 Flujograma de procesos de la etapa 4 en la investigación.

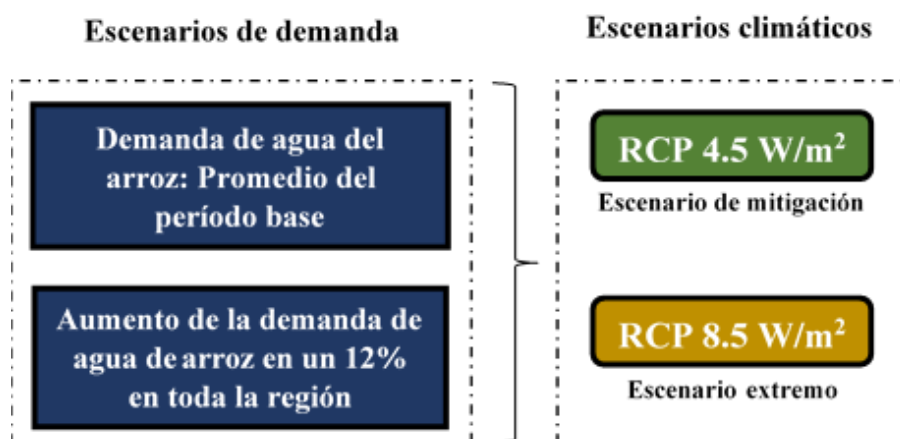


Figura 2.8 Matriz para la modelación de escenarios.

CAPÍTULO 3
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Modelo esquemático de la gestión del agua

En la *figura 3.1* se presenta el modelo esquemático de gestión del agua de las cuencas estudiadas, donde se representan los elementos de sus tres componentes:

Condiciones hidrológicas: aparecen en el esquema los tramos de ríos (→),

Infraestructura de aprovechamiento de los recursos hídricos: se representan los embalses (▲) y las derivaciones (→) desde el río hacia los canales magistrales de riego que abastece la zona sur de las cuencas.

Sitios de demandas: aparecen los sitios de demanda agrícola (●) con diferentes prioridades en la asignación de agua³. Los usuarios del agua se encuentran agrupados considerando su ubicación en una región definida y un sistema de distribución de agua compartido, de esta forma figuran 24 sitios de demanda agrícola (ver detalles en la *tabla A3.4* del **Anexo 3**).

El modelo esquemático incluye los flujos de retornos de los sitios de demanda (→) y las conducciones de los usuarios a las fuentes de suministro de agua (→). Se reflejan además en el esquema los requerimientos de suministros vistos como el caudal ecológico (⊕).

³ Las diferentes prioridades pueden observarse en la figura a través del número que aparece entre paréntesis en las etiquetas de los nombres de los sitios de demanda.

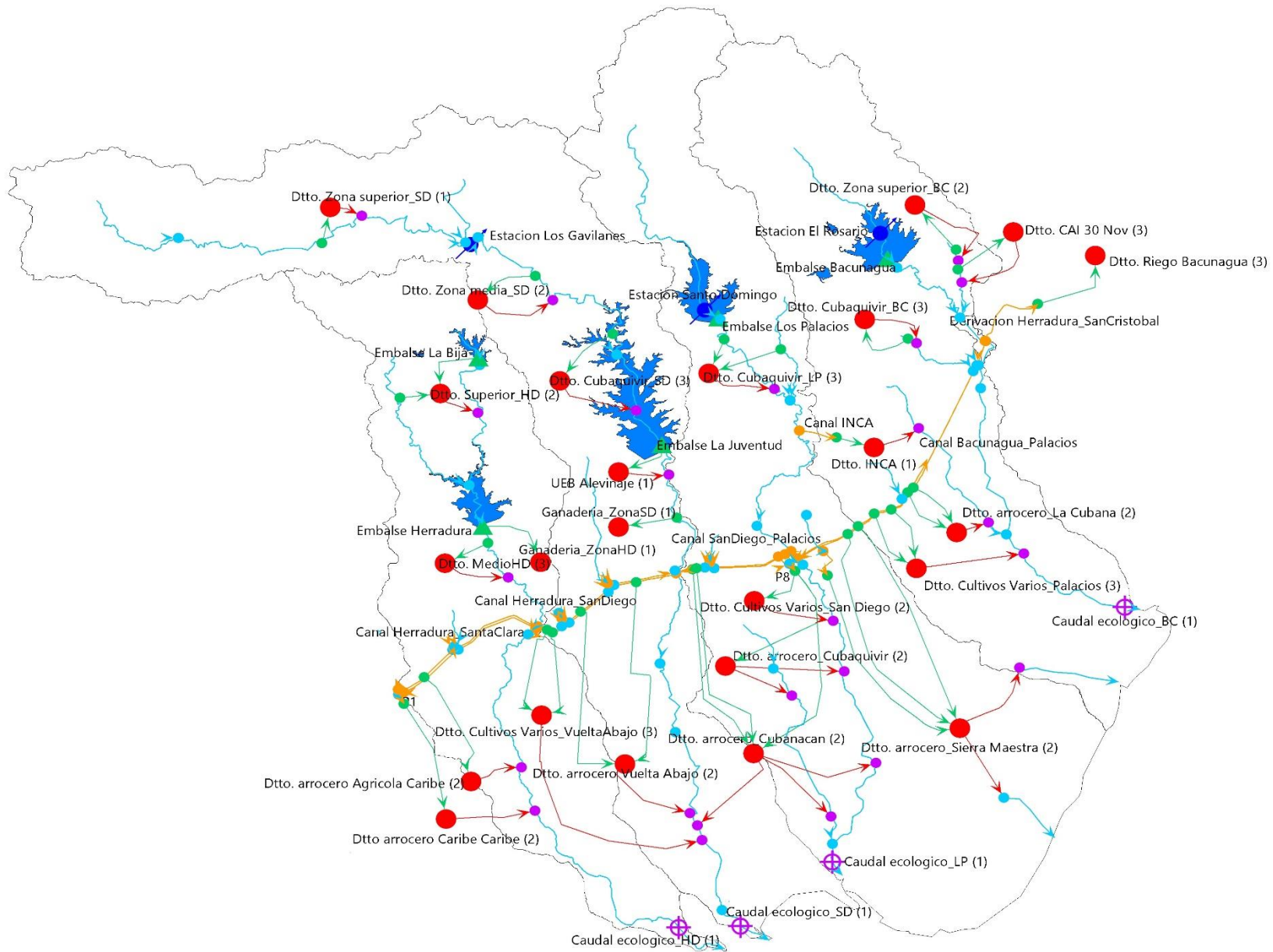


Figura 3.1 Modelo esquemático de la gestión del agua del municipio Los Palacios creado en el modelo WEAP

3.2. Calibración y validación del modelo hidrológico

El valor inicial utilizado en la primera corrida del modelo es una ponderación de los valores de *CN* para cada uso del suelo dentro de cada subcuenca (ver *sección 2.2.4*). En la aplicación del método de la curva número en áreas muy heterogéneas, como es el caso de las áreas tratadas en este trabajo, la ponderación del valor de *CN* no permite representar satisfactoriamente las propiedades de la cuenca, no obstante, sirven como punto de partida para efectuar las corridas iniciales del modelo *SCS (1986)* citado por *López (2001)*.

Es importante resaltar que el método de la curva número fue diseñado para evaluar eventos extremos de precipitaciones puntuales *NCR (2009)*, y en el caso de esta aplicación es empleado para evaluar escurrimientos medios mensuales. Al trabajar para valores mensuales, *Ponce y Hawkins (1996)* refieren que el método puede no ser lo suficientemente exacto pues no contempla los efectos que sobre la generación de escorrentía tienen la variabilidad temporal de la precipitación, la infiltración u otros mecanismos de pérdidas que se producen en otra escala temporal. Por otra parte, *Duran y González (2015)* explica que no puede despreciarse el efecto de la variabilidad espacial, tanto de la precipitación como de las propiedades físicas de la cuenca, y un factor importante, difícil de considerar a nivel de grandes territorios, es el efecto de la precipitación previa sobre el contenido de humedad del suelo.

Hjelmfelt Jr. et al. (1982) y *Hawkins (1998)*; citados por *Duran y González (2015)* refieren que los valores tabulados de *CN* como patrón para realizar el cálculo fueron obtenidos experimentalmente para los suelos y condiciones climáticas de Estados Unidos, y aunque se emplean indistintamente en cualquier parte del mundo su limitación es poco abordada en la práctica mundial de la aplicación del método. Por otra parte, los autores refieren que los valores de *CN* en ocasiones no reflejan factores que influyen en la respuesta de la cuenca ante un evento de lluvia siendo recomendada la calibración del parámetro de *CN* para cada cuenca específica.

Apyados en los criterios descritos, la calibración del parámetro *CN* se abordó considerando las diferencias de la etapa lluviosa (mayo-octubre) y la etapa seca (noviembre-abril) del año debido a que, con un valor fijo de la curva número para todos los meses, no es posible representar correctamente la relación lluvia-escurrimiento para períodos húmedo y secos del año.

En la *tabla 3.1* los valores del número de la curva inicial y calibrado en la modelación hidrológica, en las subcuencas del río Bacunagua, Los Palacios y San Diego; puede observarse en todos los casos diferencias con los valores iniciales. Adicionalmente a las explicaciones descritas para justificar la forma en que se abordó la calibración del parámetro, es importante considerar los criterios de *López (2001)* cuando refiere que los valores del número de la curva que satisfacen la ecuación del método para cada lluvia registrada en una misma cuenca pueden presentar una

importante dispersión, atribuida principalmente al complejo uso del terreno-suelo-vegetación de la misma. Sobre este particular, *Reitz et al. (2000)* refieren que la utilización de los valores de *CN* recomendados presenta el inconveniente de invariabilidad del número de curva adoptado con independencia de la magnitud de la lluvia ocurrida.

En relación a lo explicado anteriormente puede observarse en la *tabla 3.1* que para la subcuenca del río Bacunagua las diferencias entre el valor inicial del número de la curva y los valores para los períodos lluviosos y húmedos son mínimas. En esta subcuenca predominan los bosques y pastos naturales que de acuerdo con la condición hidrológica del suelo representan un valor de *CN* entre 60 y 67, a partir del parámetro calibrado es posible representar el aumento en el escurrimiento directo a causa de las condiciones de cobertura y humedad del suelo. En el caso de la subcuenca del río Los Palacios, el parámetro calibrado se aleja del valor ponderado inicial para poder representar los hidrogramas reales registrados en el río. En esta subcuenca predomina los bosques naturales sobre suelos de diferentes condiciones hidrológica con un valor de *CN* entre 36 y 76, encontrándose el parámetro calibrado entre el rango de valores referido anteriormente. De igual forma ocurre con el parámetro calibrado para las subcuencas del río San Diego, resultando valores de *CN* en el entorno de las cuencas vecinas.

Tabla 3.1 Valores del número de la curva inicial y calibrado en la modelación hidrológica de las subcuencas aforadas.

		Bacunagua Subcuenca BC-1	Los Palacios Subcuenca LP-1	San Diego Subcuenca SD-1, 2 y 3
CN _{ponderado} (inicial)	Anual	62	51	48
	May-Oct	65	75	75
CN _{calibrado}	Nov-Abr	58	61	68

En las *figuras 3.2, 3.3 y 3.4* se presentan la comparación gráfica de los caudales medios mensuales observados y simulados para los distintos períodos de calibración y validación en los ríos Bacunagua, Los Palacios y San Diego, respectivamente. Se evidencia en las diferentes figuras que existe una buena similitud entre los hidrogramas simulados por el modelo hidrológico con los parámetros calibrados para cada subcuenca y los hidrogramas observados en las estaciones de medición de los ríos. Puede observarse que, aunque no existe una sobreposición perfecta se logran representar en gran medida los picos de caudales que se producen en los distintos intervalos de tiempo.

De forma general la inspección visual de los gráficos para la etapa de validación, permite concluir que los parámetros calibrados representan los procesos hidrológicos que tienen lugar en las cuencas hidrográficas son admisibles.

Una limitación que presenta el modelo hidrológico es la representación del caudal base del río debido a que el método de la curva número, cuando la precipitación es menor que la infiltración, no se produce escurrimiento directo, sin embargo, en el río se registran caudales que pueden proceder de la alimentación subterránea. Esta limitación puede afectar en cierta medida al análisis estadístico de las variables observadas y simuladas, y es necesario una vez concluida la validación del modelo hidrológico, tomar un criterio que permita tener en cuenta esta limitación.

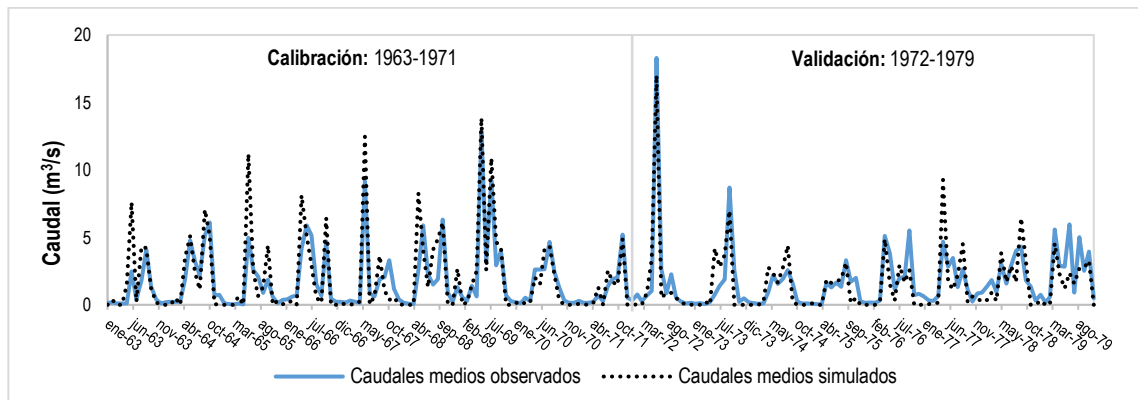


Figura 3.2 Comparación de los caudales medios mensuales observados y simulados en el tramo de río de la subcuenca BC1, cuenca Bacunagua, para el período de calibración y validación.

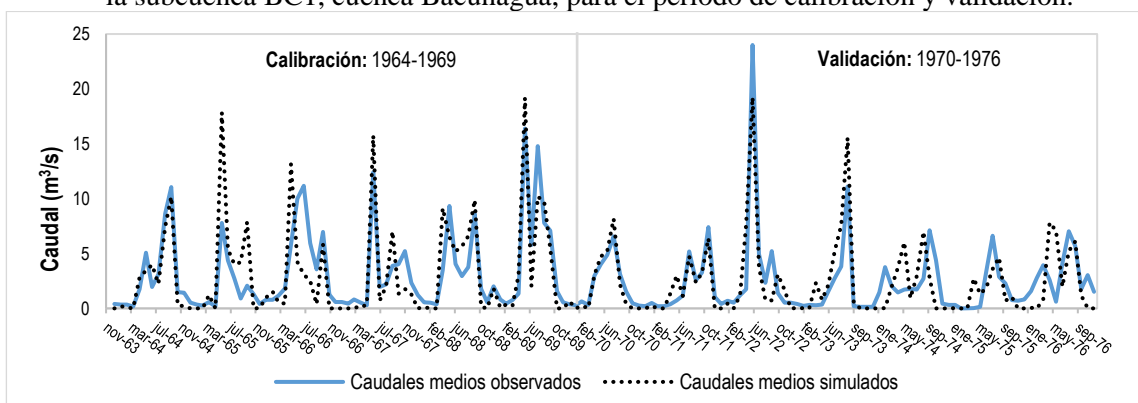


Figura 3.3 Comparación de los caudales medios mensuales observados y simulados en el tramo de río de la subcuenca LP-1, cuenca Los Palacios, para el período de calibración y validación.

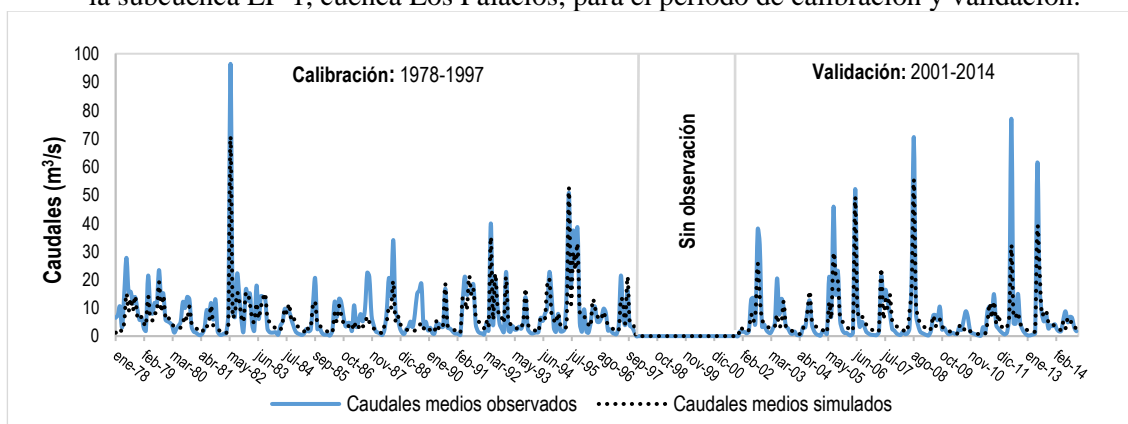


Figura 3.4 Comparación de los caudales medios mensuales observados y simulados en el tramo de río de las subcuencas SD-1, 2 y 3, cuenca San Diego para el período de calibración y validación.

Evaluando los resultados del análisis estadístico puede observarse en la **tabla 3.2** que el valor del índice *NSE* es cercano a la unidad, lo que indica que el modelo con los parámetros calibrado para cada tramo de río representa correctamente la relación lluvia-escorrentamiento. Cualitativamente el comportamiento del índice puede clasificarse de bueno de acuerdo al criterio definido por *Moriasi et al. (2007)* para este estadígrafo.

Del análisis del índice *PBIAS* puede concluirse que el modelo hidrológico para el tramo de río *LP-1* sobrestima los caudales medios mensuales en 3.74% y 1.67% en los períodos de calibración y validación respectivamente. En el caso del tramo de río *BC-1*, en el período de calibración se subestiman los caudales medios mensuales en un 11.64%, mientras que para el período de validación se sobrestiman en un 13.06%. Para el tramo de río *SDI-4* se sobrestiman y subestiman los caudales medios mensuales aproximadamente en 11% en los períodos de calibración y validación respectivamente. Cualitativamente el índice *PBIAS* puede clasificarse de muy bueno para el tramo de río *LPI* y *SDI-3*, y de bueno para el tramo de río *BC-1*, de acuerdo al criterio definido por *Moriasi et al. (2007)* para este indicador.

Por otra parte, los resultados del índice *RSR* indican el parámetro calibrado representan correctamente los caudales medios mensuales observados en todos los tramos de río, con valores cercano al valor óptimo. De acuerdo con los criterios definido por *Moriasi et al. (2007)* el indicador puede evaluarse cualitativamente como bueno.

Tabla 3.2. Resumen de los índices estadísticos de la calibración y validación del modelo hidrológico para las subcuencas aforadas.

Índices estadísticos	Bacunagua Subcuenca BC-1		Los Palacios Subcuenca LP-1		San Diego Subcuenca SD-1, 2 y 3	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación	Calibración	Validación
<i>NSE</i>	0.745	0.712	0.715	0.717	0.809	0.791
<i>PBIAS</i>	11.64	-13.06	-3.47	-1.67	-11.48	11.63
<i>RSR</i>	0.636	0.527	0.533	0.537	0.436	0.457

En la **figura 3.5** se presenta la regresión lineal forzada al origen de coordenadas entre los caudales medios observados y simulados de los tramos analizados de los ríos Bacunagua, Los Palacios y San Diego para los períodos de calibración y validación.

Puede observarse que para la subcuenca *BC-1* (ver **figura 3.5 a**) que la pendiente de la recta tiene un valor cercano a la unidad, lo que evidencia un alto grado de similitud entre las variables en ambos períodos analizados, el modelo hidrológico con los parámetros calibrados explica el 87% de los caudales medios mensuales en el periodo de calibración y el 82% en el período de validación. Por lo que puede concluirse que la validación del modelo hidrológico es satisfactoria. De igual forma para la subcuenca *LP-1* (ver **figura 3.5 b**) las pendientes de las rectas forzadas al

origen de coordenadas son cercanas a la unidad, el modelo hidrológico explica el 76% y el 73% de los hidrogramas reales en el período de calibración y validación respectivamente, concluyéndose que los parámetros calibrados representan las condiciones de la subcuenca. Por otra parte, el modelo hidrológico explica el 86% y 83% de los caudales reales procedentes de las subcuencas *SD-1-3*, medidos por la estación de aforo y la pendiente de la recta de ajuste evidencia un alto grado de similitud entre las variables comparadas en ambos períodos (ver *figura 3.5 c*).

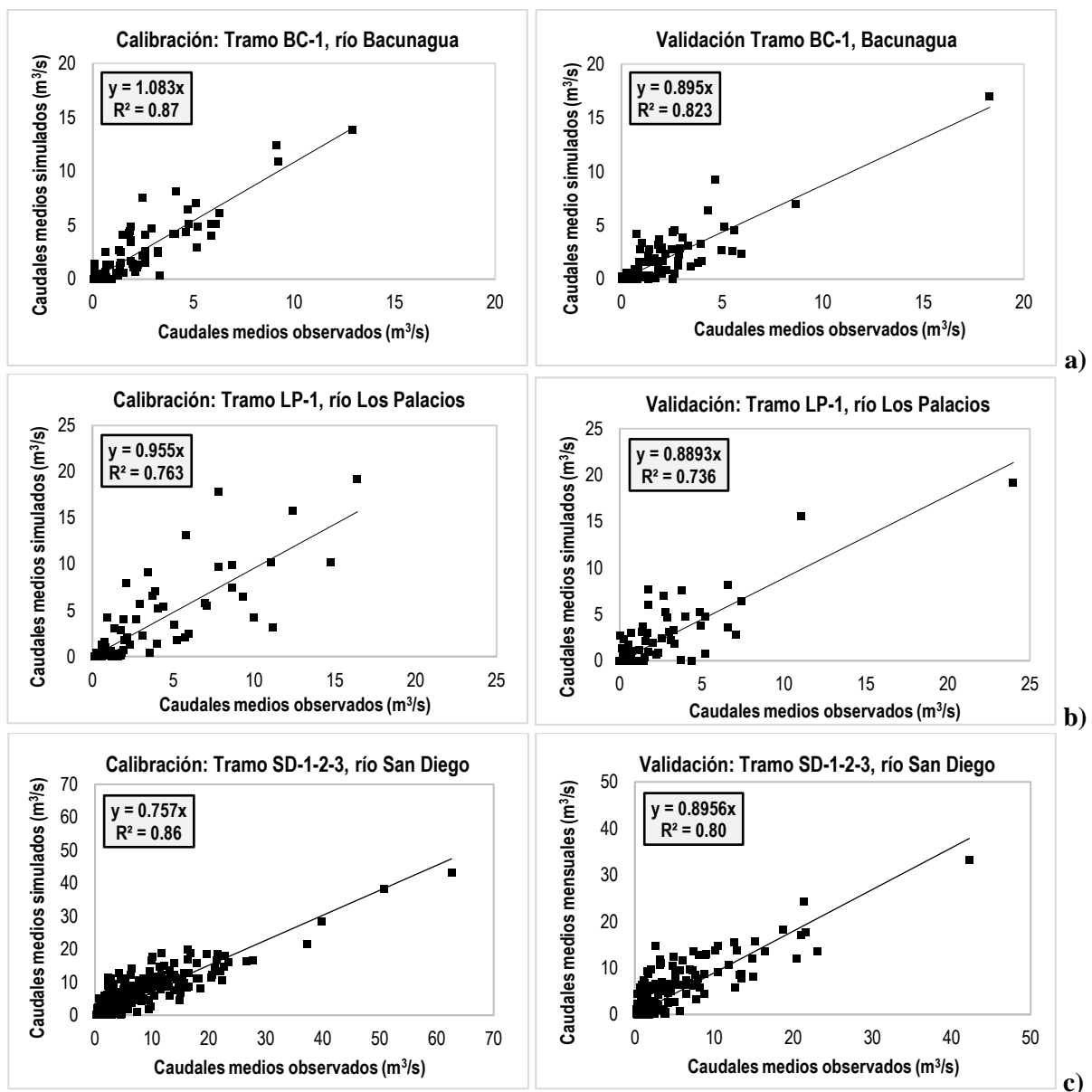


Figura 3.5 Regresión forzada al origen de coordenadas entre caudales medios mensuales observados y simulados en el período de calibración del modelo hidrológico para cada tramo de río: **a)** tramo río Bacunagua, **b)** tramo río Los Palacios, **c)** tramo río San Diego.

El análisis estadístico permite concluir que el modelo hidrológico representa con alto grado de fidelidad los hidrogramas reales en cada tramo de río y valida el enfoque abordado en la

calibración del parámetro como vía para emplear el método de la curva número para generar los escurrimientos medios mensuales en las cuencas estudiadas.

3.3. Calibración de la operación de los recursos hídricos

En la **tabla 3.3** se presentan los valores del número de la curva obtenidos a partir de la calibración hidrológica asociada a la operación de los recursos hídricos. Puede observarse que para el embalse La Bija, el valor de *CN* calibrado a partir de la operación de los embalses se encuentra en el rango de los valores existentes en otras cuencas, aunque su valor es menor. En la subcuenca aportante a este embalse, *HD-1* (ver **figura A1.7, Anexo 1**), predominan los bosques y pastos naturales sobre suelos con medio y bajo potencial de escurrimiento, clasificación hidrológica tipo A con valores de *CN* que oscilan entre 36 y 67, encontrándose el parámetro calibrado entre el rango de valores referido anteriormente.

Tabla 3.3 Valores del número de la curva obtenidos a partir de la calibración hidrológica asociada a la operación de los recursos hídricos.

	Herradura			San Diego
	Subcuenca HD-1	Subcuenca HD-2, 3 y 4	Subcuenca SD-4 y 5	
$CN_{\text{calibrado}}$	May-Oct	60	78	70
	Nov-Abr	50	65	65

Por su parte al embalse Herradura aportan 3 subcuencas, en la subcuenca *HD-2* (ver **figura A1.7, Anexo 1**) predominan los pastos y bosques naturales sobre suelos de potencial medio de escurrimiento, mientras que en la subcuenca *HD-3* y *HD-4* predominan los pastos naturales sobre suelos con potencial de escurrimiento medio y alto. Para estas tres subcuencas los rangos de valores de *CN* varían entre 48 y 83. En la **tabla 3.3** se muestra el valor promedio del parámetro calibrado para el conjunto de las subcuencas que tributan al embalse Herradura, comprobándose que este se encuentra en el rango de los valores potenciales de *CN*. Para subcuencas *SD-4* y *5* (ver **figura A1.7, Anexo 1**), que se encuentran aguas debajo de la estación de aforo en el río San Diego, los valores de *CN* obtenidos en el proceso de la calibración asociada se encuentran cercanos a los valores obtenidos para las subcuencas superiores.

En las **figuras 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9** se presenta la comparación entre los volúmenes observados y simulados en los embalses Herradura, Los Palacios, Bacunagua y La Juventud, respectivamente. Puede observarse en los gráficos que, aunque con diferencias y en algunos de los casos manteniendo una tendencia similar, el modelo es capaz de representar relativamente bien los volúmenes reales de los referidos embalses.

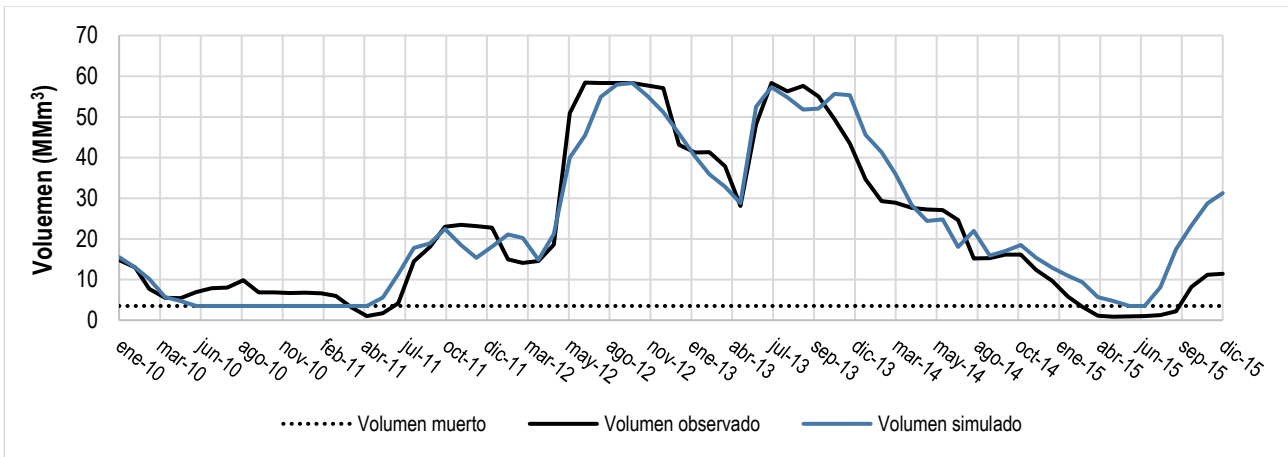


Figura 3.6 Comparación de los volúmenes observados y simulados, embalse Herradura.

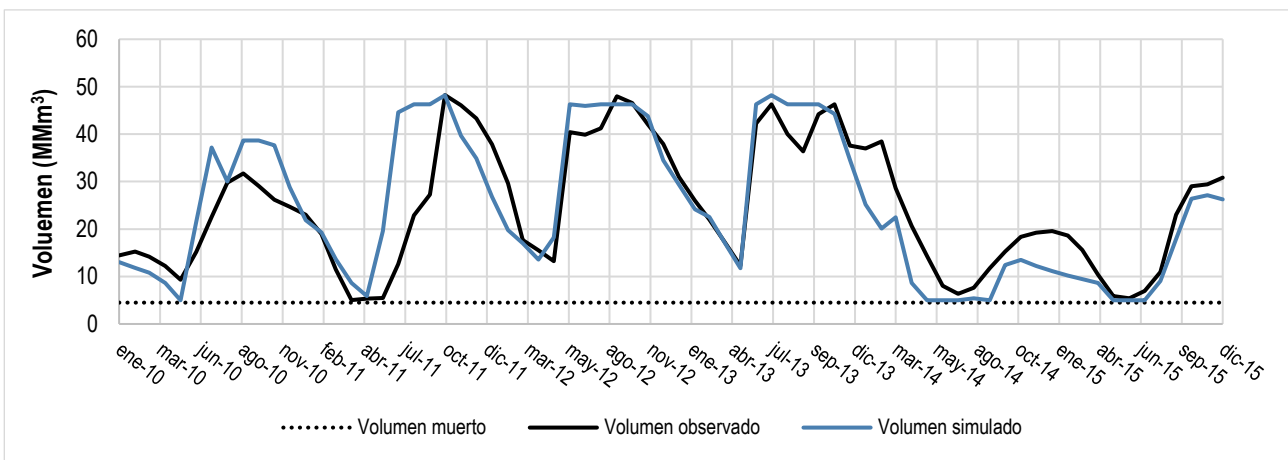


Figura 3.7 Comparación de los volúmenes observados y simulados, Embalse Los Palacios.

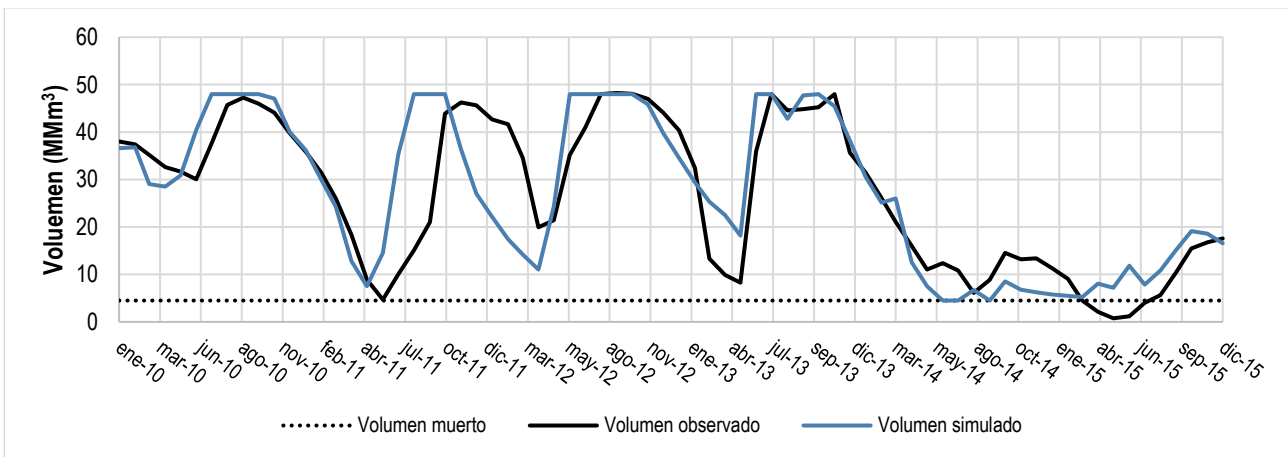


Figura 3.8 Comparación de los volúmenes observados y simulados, Embalse Bacunagua.

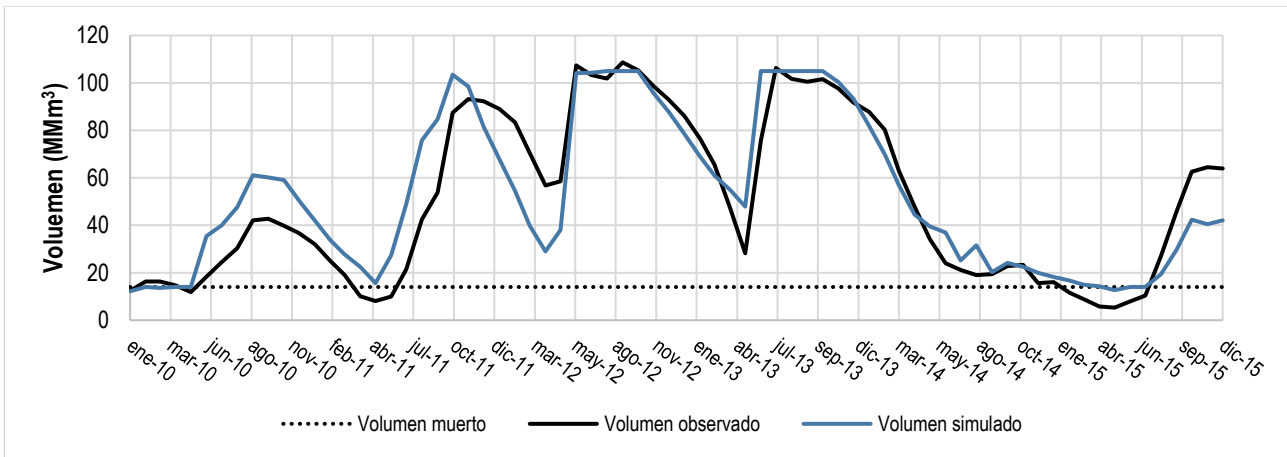


Figura 3.9 Comparación de los volúmenes observados y simulados, embalse La Juventud.

Las diferencias entre los volúmenes simulados y observados se deben a simplificaciones realizadas y a incertidumbres propias de los procesos modelados, entre las que pueden citarse: la exactitud de los datos de demanda de agua y a otras asociadas a la de la operación de los embalses en condiciones de baja disponibilidad de agua. Por otra parte, también es importante destacar que el modelo funciona con restricciones matemáticas no permitiendo que por debajo del nivel de volumen muerto (línea de puntos en las *figuras 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9*) se realicen entregas, por este motivo el volumen simulado se acerca asintóticamente al volumen muerto y los volúmenes observados continúan decreciendo por la acción de la evaporación y las pérdidas por filtración.

En cuanto a la exactitud de los datos de demanda, la información extraída de los balances estatales de agua se presenta a nivel trimestral y el modelo *WEAP* requiere esta información a nivel mensual, como se explica en el *acápite 2.3.2*. La diferencia entre la captura de los datos y las necesidades del modelo hizo necesario establecer criterios para transformar la información de demanda a las necesidades del modelo, introduciendo errores y simplificaciones en el proceso, influyendo en los desplazamientos en el tiempo que se observan en los volúmenes simulados respecto a los observados.

Como se explicó en la *sección 2.6.2*, en la información suministrada por los operadores de las fuentes no está definido el valor de las reducciones cuando los volúmenes del embalse se encuentran en la zona de entrega reducida. Para la calibración del modelo se seleccionó como valor del coeficiente de amortiguamiento igual a 0.6, es decir la reducción en un 40% de la entrega a los usuarios. El valor del coeficiente de amortiguamiento fijado, aunque logra representar aproximadamente la operación real, está sujeto a incertidumbre asociadas al carácter operativo de la entrega de agua.

Sobre este tema, *Martínez (1997)* explica que al no haber certeza absoluta en la predicción de los escurrimientos que llegan al cierre y al estar condicionada la operación de los embalses por

el estado del mismo en términos de niveles y en función de las variaciones, pueden combinarse decisiones en cuanto a la entrega. De lo anterior puede concluirse que siendo la operación de los embalses un proceso tan dinámico, donde las capacidades humanas para mitigar situaciones de baja disponibilidad de agua se ponen a juego, un valor conservador de reducción como el obtenido puede considerarse aceptable. En cualquier caso, el análisis estadístico de los volúmenes observados y simulados define si el modelo *WEAP* con los parámetros calibrados puede considerarse válido para el estudio.

En la *figura 3.5 a, b, c y d* se presenta la regresión lineal forzada al origen de coordenadas de los volúmenes simulados y observados en los embalses Herradura, Bacunagua, Los Palacios y la Juventud respectivamente.

Puede observarse en los gráficos que en todos los casos la pendiente de la recta tiene un valor cercano a la unidad, lo que evidencia un alto grado de similitud entre los volúmenes observados y simulados en el período 2010-2015. El modelo *WEAP* con los parámetros calibrados es capaz de representar el 95%, 91%, 91% y 95% de la variación real de los volúmenes de los embalses Herradura, Bacunagua, Los Palacios y la Juventud, respectivamente.

Los puntos que se resaltan en la *figura 3.5 b y c* se alejan de la tendencia general de la simulación en la operación de los embalses. En el caso del embalse Bacunagua y Los Palacios los puntos por encima de la línea de tendencia se alejan de la desviación media de la muestra debido a que el modelo simula una recuperación de los volúmenes más rápida de lo que se produce en la realidad. En ambos embalses, la situación descrita se produce en los meses desde junio a agosto de 2011 (meses del período lluvioso) después de encontrarse los embalses completamente vacíos. Como se explica en párrafos anteriores el modelo *WEAP* y en sentido general ningún modelo matemático, es capaz de simular las medidas emergentes de operación ante situaciones desfavorables en los embalses, de ahí que se produzca una clara desviación a causa de la respuesta lógica del modelo.

Por otra parte, en el embalse Bacunagua, los puntos que se encuentran por debajo de la línea de tendencia se alejan de la desviación media de la muestra debido a que el modelo entrega más agua de la que se produce en la realidad. La situación descrita se produce en los meses desde diciembre de 2011 a marzo de 2012, puede observarse en la *figura 3.8* que para el periodo citado la tendencia de los volúmenes es similar produciéndose un desplazamiento en el tiempo. En este comportamiento repercute la situación explicada en el párrafo anterior, a lo que se añaden posibles inconsistencias entre las demandas entradas al modelo para este periodo y las que realmente se produjeron.

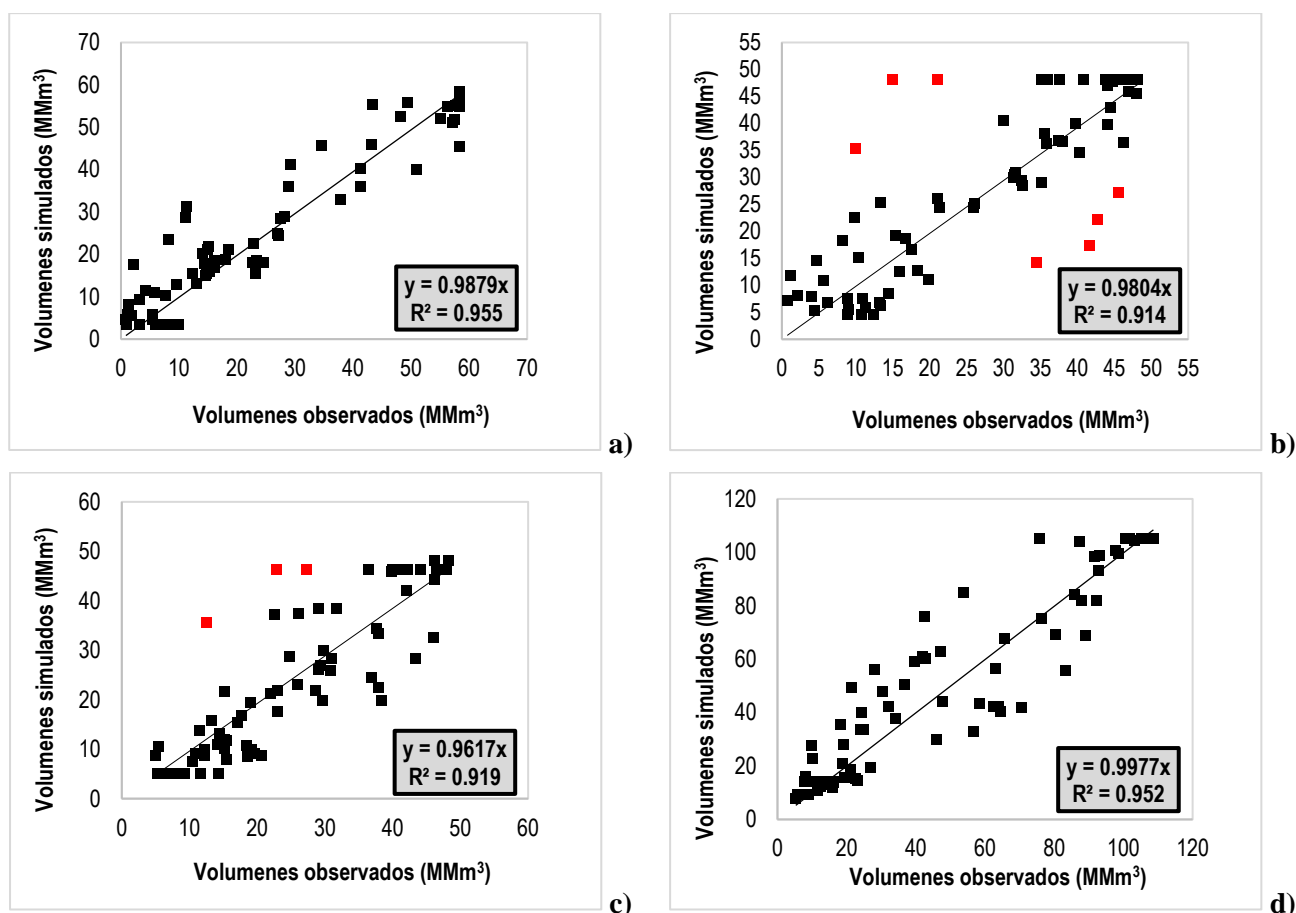


Figura 3.10 Regresión lineal forzada al origen de las coordenadas entre los volúmenes simulados y observados en los embalses: **a)** Herradura, **b)** Bacunagua, **c)** Los Palacios y **d)** La Juventud.

No obstante, a las situaciones discutidas, puede concluirse que el modelo *WEAP* con los parámetros calibrados para cada embalse puede ser empleado para el análisis de escenarios futuros. Es importante considerar en esta conclusión parcial lo referido por *Pahl-Wostl et al. (2007)*, pues el objetivo de la modelación es aumentar la capacidad adaptativa a partir de la evaluación de estrategias de adaptación en la gestión del agua en un sistema para hacer frente a los desarrollos inciertos y con elevadas incertidumbres, en lugar de tratar de encontrar soluciones óptimas.

3.4. Análisis de las anomalías de cambio en la precipitación

3.4.1. Escenario RCP 4.5 W/m²

Como resultado del procesamiento de los Modelos Globales de Cambio Climático (MGCC) para el escenario RCP 4.5, se presenta en la *figura 3.11* y *figura 3.12* las anomalías en la precipitación para los periodos 2015-2039 (cercano) y 2045-2069 (mediano).

Existe coincidencia en los resultados de los Modelos Generales de Cambio Climático, en la disminución de las precipitaciones medias mensuales en el período húmedo y en el ligero aumento en el período seco, confirmando lo expuesto en los informes del IPCC sobre la variación de la distribución estacional de las precipitaciones, a causa del impacto del cambio climático.

En el comportamiento de las anomalías de precipitación para el período 2015-2039, puede observarse que en la mayoría de los meses los modelos analizados coinciden en el impacto del cambio climático en la precipitación, aunque los porcentajes de afectación puedan ser diferentes. Para el mes de enero, los modelos discrepan en sus resultados, el modelo HADGEM_2 pronostica un aumento de la precipitación de un 30%, mientras que los modelos MPI_ESM_LR y GFDL_CM3 pronostican una disminución entre 6-13%, respectivamente. De acuerdo con los modelos, si se produjera un escenario de bajas emisiones de GEI (RCP 4.5 W/m²) no se producirían grandes afectaciones en la precipitación durante el período húmedo (mayo-octubre), aunque existe coincidencia en la tendencia a la disminución; sin embargo, no sucede lo mismo para el período seco.

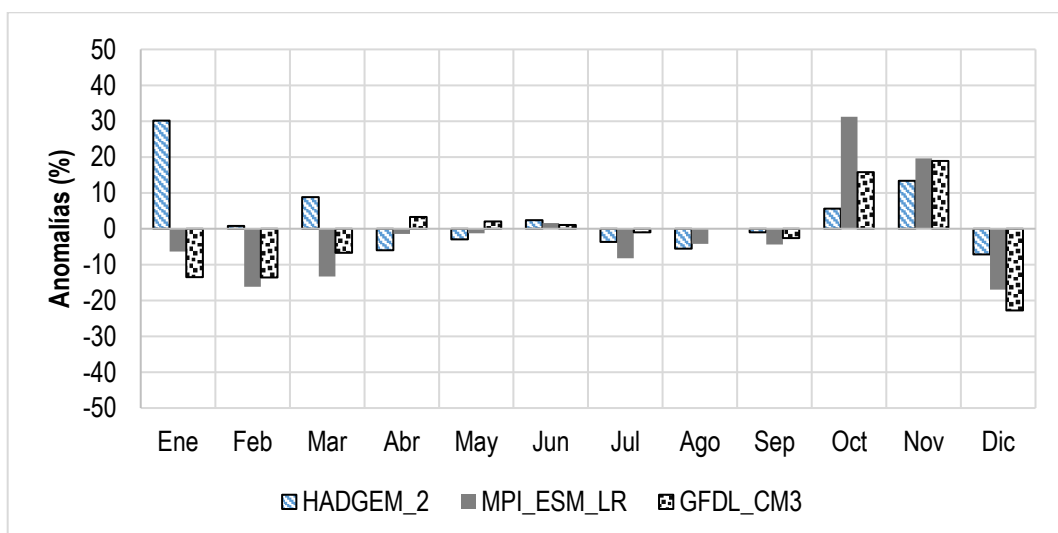


Figura 3.11 Anomalías en la precipitación mensual resultado de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 4.5 W/m² en el periodo 2015-2039.

Fuente: Elaborado a partir del procesamiento de la información de **Fernández et al. (2015)**.

En el horizonte de planeación 2015-2039 (considerado como transicional) los MGCC muestran grandes diferencias en las anomalías proyectadas para el periodo seco, sin mostrar una tendencia clara. En los meses de octubre y noviembre, los modelos coinciden en un aumento de la lluvia media mensual y en el mes de diciembre coinciden en la disminución, sin embargo, en todos los casos existen notables diferencias entre la anomalía proyectada, en este punto reside la incertidumbre de la modelación matemática de la atmósfera para predecir el comportamiento del clima futuro.

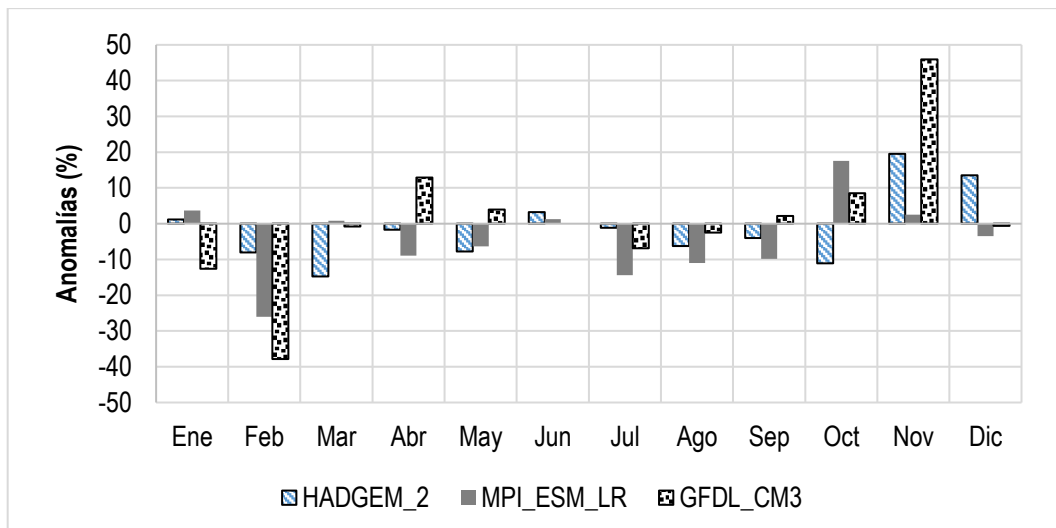


Figura 3.12 Anomalías en la precipitación mensual resultado de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 4.5 W/m² en el periodo 2045-2069.

Fuente: Elaborado a partir del procesamiento de la información de **Fernández et al. (2015)**.

Al analizar el período 2045-2069, puede observarse que el comportamiento de las anomalías es similar al período antecedente, el periodo húmedo mantiene la tendencia a la disminución, aumentando el porcentaje de la anomalía. En el período seco, para este horizonte de planeamiento, se acentúa la tendencia al aumento de la precipitación en los meses desde octubre-diciembre, y se refuerza la tendencia a la disminución en los meses desde enero-marzo, aunque sigue existiendo discrepancias en las respuestas de los MRCA para este período de precipitaciones. Las predicciones más alarmantes de producen en los meses de noviembre y febrero. El modelo GFDL_CM3 pronostica un aumento un 50%, para noviembre, mientras que el modelo MPI_ESM_LR pronostica un descenso de la precipitación de un 37% en el mes de febrero.

3.4.2. Escenario RCP 8.5 W/m²

En el periodo 2015-2039 (ver **figura 3.13**), puede observarse la coincidencia de los modelos en la proyección de anomalías negativas para el periodo húmedo del año (mayo a septiembre), con valores de reducción que oscilan entre -1 y -5%, mientras que en el periodo seco del año los modelos responden de forma diferente a las forzantes del escenario RCP 8.5 W/m². Para el mes de octubre, cambio de la estación lluviosa a la seca, los *MGCC* difieren en sus resultados, los modelos *GFDL-CM3* y *MPI-ESM-LR* proyectan un aumento de la precipitación de 7 y 16% respectivamente, mientras que el modelo *HADGEM-2* proyecta una disminución del 6%. Los modelos coinciden en el aumento significativo de la precipitación para los meses de enero y noviembre con anomalías positivas promedio entre +18 y +31% respectivamente, por otra parte, para el mes de febrero los modelos coinciden en la disminución de la lluvia con una anomalía promedio de -20%.

En el periodo 2045-2069 (ver *figura 3.14*), se refuerza la tendencia negativa de las anomalías en el periodo húmedo como respuesta del sistema climático ante el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. En los meses de julio y agosto los modelos coinciden en la disminución de la precipitación en un valor promedio de -8%, para el mes de septiembre puede observarse como el modelo *MPI-ESM-LR* proyecta una anomalía negativa de -24% respecto a la precipitación base. Es evidente que en el periodo analizado se acentúa la tendencia al aumento de la precipitación en los meses desde octubre-diciembre, y se refuerza la tendencia a la disminución en los meses desde enero-marzo, aunque sigue existiendo discrepancias en las respuestas de los modelos.

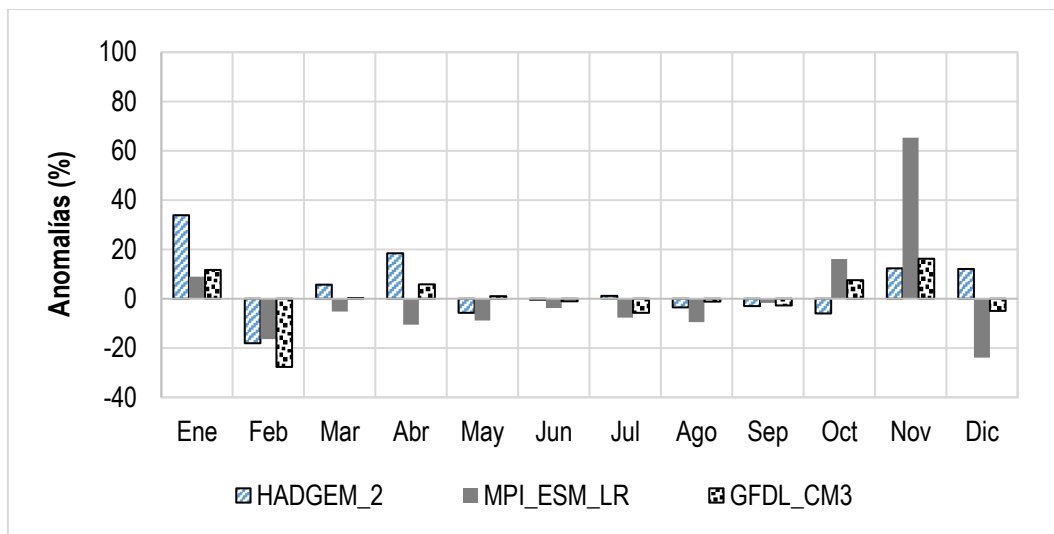


Figura 3.13 Anomalías en la precipitación mensual resultado de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 8.5 W/m² en el periodo 2015-2039.

Fuente: Elaborado a partir del procesamiento de la información de **Fernández et al. (2015)**.

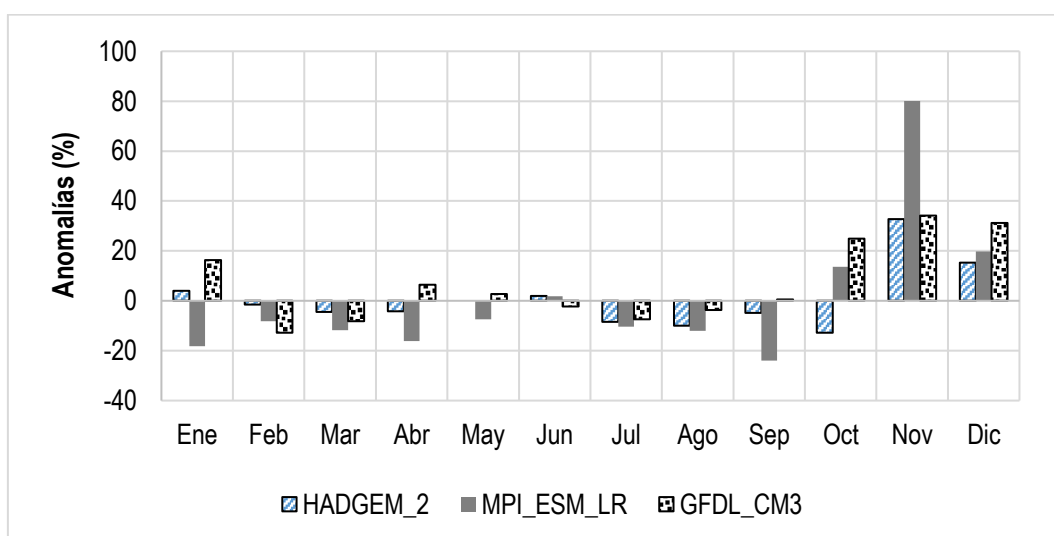


Figura 3.14 Anomalías en la precipitación mensual resultado de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 8.5 W/m² en el periodo 2045-2065.

Fuente: Elaborado a partir del procesamiento de la información de **Fernández et al. (2015)**.

3.4.3. Resultados finales del análisis de anomalías de cambio en la precipitación

No es posible discutir a profundidad las anomalías en la precipitación resultantes de cada *MGCC* pues como explica la *Organización Mundial de Meteorología OMM (2009)*, las proyecciones de impacto del clima futuro en esta variable cambia de una región a otra, y aunque en la Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático (*CITMA, 2015*) existen estudios del impacto de este fenómeno en la precipitación para la región Occidental de Cuba, estos fueron obtenidos para otros escenarios de emisiones de *GEI* y siempre refiere disminución en la variable, sin considerar el posible aumento que se obtiene en este estudio.

Aunque existen diferencias puntuales entre las anomalías en la precipitación obtenidas de los Modelos Generales de Cambio Climático (*MGCC*), todos coinciden en la tendencia a la disminución de las precipitaciones medias mensuales en el período húmedo y el aumento en el período seco, confirmando lo expuesto en los informes del *IPCC* sobre la variación de la distribución estacional de las precipitaciones, a causa del impacto del cambio climático (*Camino, et al., 2014*).

Sobre las diferencias proyectadas es explicado por *Monreal et al. (1999)* que la mayoría de estos modelos resuelven ecuaciones similares, pero entre ellos existen diferencias en cuanto a la resolución temporal, la física de las interconexiones, el tratamiento de las nubes, la representación del océano, entre otros factores, lo que explica algunas de las discrepancias en sus resultados. **García y Pulido-Velázquez (2017)** explica que las incertidumbres que se generan en este tipo de análisis pueden plantear ciertas dudas respecto al “realismo” de los resultados de impacto del cambio climático en la precipitación y la pertinencia de incorporarlos en los procesos de planeación hidrológica a corto plazo. Por su parte, **Fernández (2002)** explica que cuando estos resultados son aplicados a los a subcuencas o unidades más pequeñas suelen tener un mayor grado de fiabilidad. No obstante, coincidimos con **García y Pulido-Velázquez (2017)**, que considerar incierto un resultado no significa desconocido o falso, máxime cuando la incertidumbre puede ser cuantificada y se encuentra presente en múltiples decisiones de la vida cotidiana, haciendo que la información incierta se revele siempre de mayor utilidad que las certezas erróneas.

Por otra parte, después de revisar las anomalías de precipitación dadas por cada *MGCC*, coincidiendo con lo explicado por *Programa Científico de Cambio Climático CCSP (2008)* cuando afirma que no existe ningún modelo que sea superior a los demás, sino que cada uno tiene diferentes puntos fuertes y debilidades, resultado de este punto de vista que la media del conjunto de modelos de simulación del clima resulta claramente superior a cualquier modelo individual, lo que justifica el enfoque multimodal en los aspectos de proyección climática.

Como resultado final de este análisis de anomalías en la precipitación mensual para la zona de estudio, se presenta en la **figura 3.15** el comportamiento promedio entre las proyecciones de los tres modelos analizados. Estas anomalías promedio serán empleada para generar el clima futuro para el período 2016-2050, para estimar la disponibilidad del agua para los escenarios de cambio climático. El **Anexo 4**, se pueden revisar los valores de las anomalías para cada uno de los modelos climáticos.

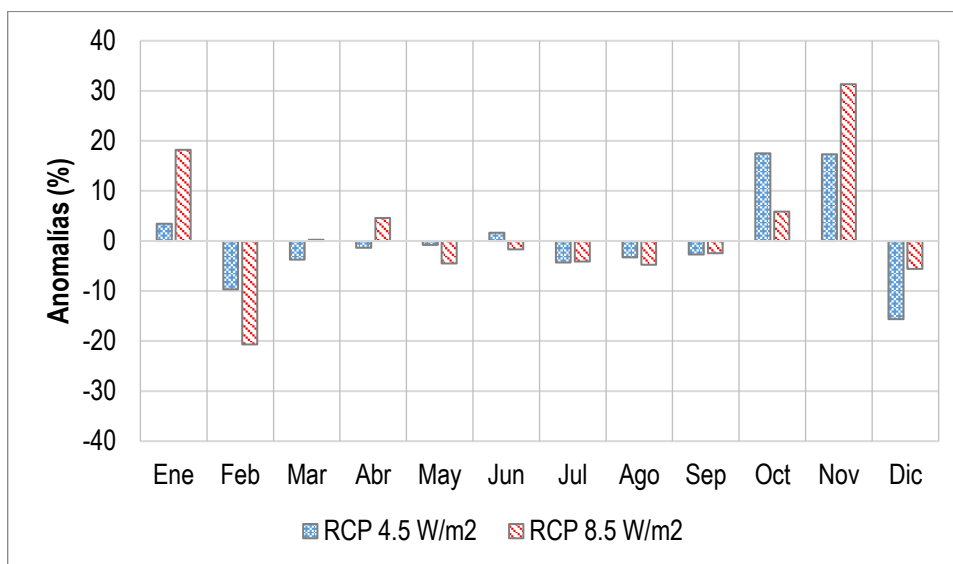


Figura 3.15 Anomalías media en la precipitación mensual resultado del promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 4.5 y 8.5 W/m² para el periodo 2016-2050.

3.5. Disponibilidad de los recursos hídricos para los escenarios de cambio climático

Como resultado de la implementación de los modelos hidrológicos calibrados para cada una de las cuencas evaluadas en esta investigación, aportando como dato de entrada la precipitación media mensual probable para el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5.

Las diferencias más significativas en los volúmenes de escurrimientos en la región, puede observarse en la **figura 3.16** se presentan en mes de octubre, consecuencia del respectivo aumento de la precipitación media mensual para este mes, referida en el **acápite 3.4.3**. De acuerdo con las proyecciones los escurrimientos en este mes pudieran aumentar bajo el escenario RCP 4.5 en cerca de 6 millones de metros cúbicos para toda la región. En sentido general los meses más lluviosos del periodo húmedo excepto agosto, se proyecta una disminución de los volúmenes de escurrimiento con reducciones que ascienden a 3.5 millones de metros cúbicos. Se evidencia una disminución en el volumen de escurrimientos en el período seco de aproximadamente 4.8 millones de metros cúbicos, proyectado principalmente en el mes de enero donde la reducción representa 36% respecto al periodo antecedente.



Figura 3.16 Diferencia entre el volumen de escurrimiento regional para el escenario RCP 4.5 en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base (1981-2010).

Se presenta en la **tabla 3.4** la variación de los volúmenes medios mensuales por cuenca en el período 2016-2050 para el escenario RCP 4.5 respecto al período base (1981-2010), tomando como criterio el promedio de los volúmenes determinados con el clima futuro dado por los tres modelos de modelos de cambio climático.

Tabla 3.4 Diferencia entre el volumen de escurrimiento por cuencas para el escenario RCP 4.5 en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base.

Mes/Cuenca	Diferencia de volumen de escurrimiento respecto al período base (hm ³)				
	<i>Los Palacios</i>	<i>San Diego</i>	<i>Bacunagua</i>	<i>Herradura</i>	Total
Ene	-0,397	-1,648	-0,440	-0,445	-2,930
Feb	-0,171	0,722	-0,200	-0,208	0,143
Mar	-0,136	-0,589	-0,154	-0,157	-1,035
Abr	0,094	0,376	0,102	0,102	0,674
May	0,258	0,782	0,246	0,225	1,512
Jun	-0,196	-0,557	-0,179	-0,160	-1,092
Jul	-0,147	-0,449	-0,141	-0,129	-0,866
Ago	0,272	0,793	0,253	0,229	1,547
Sep	-0,288	-0,822	-0,264	-0,236	-1,611
Oct	1,084	3,284	1,032	0,947	6,347
Nov	0,079	0,306	0,085	0,084	0,554
Dic	-0,038	-0,679	-0,060	-0,071	-0,847
Suma aumentos	1,787	6,263	1,718	1,587	10,777
Suma disminución	-1,373	-4,744	-1,438	-1,405	-8,381

Puede observarse las diferencias entre los aumentos de los volúmenes de escurrimientos y la disminución, obtenidos del modelo hidrológico para las forzantes del escenario RCP 4.5, evidencian una relativa compensación de los volúmenes para las cuencas Los Palacios, Bacunagua y Herradura con un aumento promedio respecto al periodo base de 0.41, 0.28 y 0.18 millones de metros cúbicos, respectivamente. La cuenca San Diego, es la que influye más en las diferencias entre los volúmenes de escurrimiento, presentando un aumento medio de aproximado de 1.5 millones de metros cúbicos.

El balance general de los recursos hídricos promedio de la región para las condiciones del escenario RCP 4.5 es positivo, con una proyección de 0.7% (2.4 millones de metros cúbicos) del volumen total de escurrimiento respecto al periodo antecedente. Estos resultados permiten afirmar que la escasez o suficiencia de agua para afrontar a las necesidades del riego agrícola en la región bajo este escenario, estarán más condicionadas por el manejo el recurso y en menor medida por los efectos del cambio climático en la disponibilidad del recurso agua.

Para el escenario RCP 8.5 (ver *figura 3.17*), se reduce el volumen de escurrimiento para el mes de octubre en cerca de 4.9 millones de metros cúbicos respecto al escenario RCP 4.5, sin embargo, la proyección del escenario es al aumento del volumen de escurrimiento en este mes respecto a los valores promedio del periodo 1981-2010. Se pronuncia la disminución de los volúmenes de escurrimiento para los meses de junio, julio y septiembre, llegando a una disminución 6.6 millones de metros cúbicos, situación que evidencia la influencia de un clima más extremo como el planteado por el escenario RCP 8.5 en la disminución de la disponibilidad de agua en los meses más lluviosos.

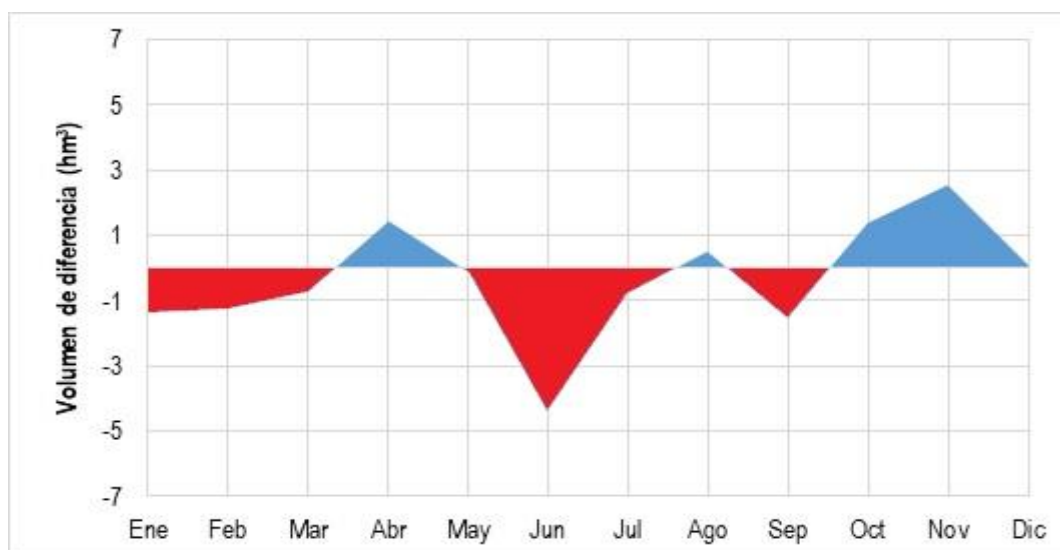


Figura 3.17 Diferencia entre el volumen de escurrimiento regional para el escenario RCP 8.5 en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base (1981-2010).

Se presenta en la **tabla 3.5** la variación de los volúmenes medios mensuales por cuenca en el período 2016-2050 para el escenario RCP 8.5 respecto al período base (1981-2010), tomando como criterio el promedio de los volúmenes determinados con el clima futuro dado por los tres modelos de modelos de cambio climático. Los bajos volúmenes de diferencia en el escenario mitigación para las cuencas Los Palacios, Bacunagua y Herradura, no se comportan de la misma forma para las condiciones del escenario extremo. En estas condiciones los déficits respecto al periodo base son de 0.81, 0.78 y 0.71 millones de metros cúbicos, respectivamente.

A diferencia del escenario RCP 4.5, el balance general de los recursos hídricos promedio que se generarían en la región bajo las condicionantes del escenario RCP 8.5 es negativo. Para estas condiciones se proyecta una cuantía de reducción en los recursos hídricos de la región cercana al 1.3%, que representa una reducción estimada de 4.27 millones de metro cúbicos de agua. Los resultados reflejan que para un forzamiento radiativo de la atmósfera de 8.5 W/m², es probable que las afectaciones del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos no se presenten progresivamente como ocurría con el escenario RCP 4.5 W/m², sino que el cambio se produzca más drásticamente.

Tabla 3.5 Diferencia entre el volumen de escurrimiento por cuencas para el escenario RCP 8.5 en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base.

Mes/Cuenca	Diferencia de volumen de escurrimiento respecto al período base (hm ³)				
	<i>Los Palacios</i>	<i>San Diego</i>	<i>Bacunagua</i>	<i>Herradura</i>	Total
Ene	-0,192	-0,762	-0,209	-0,208	-1,371
Feb	-0,238	-0,454	-0,278	-0,289	-1,259
Mar	-0,096	-0,411	-0,108	-0,11	-0,726
Abr	0,203	0,78	0,217	0,215	1,415
May	-0,024	-0,078	-0,024	-0,022	-0,148
Jun	-0,783	-2,224	-0,715	-0,637	-4,359
Jul	-0,129	-0,395	-0,124	-0,114	-0,762
Ago	0,088	0,255	0,082	0,074	0,499
Sep	-0,275	-0,785	-0,252	-0,225	-1,538
Oct	0,235	0,7	0,222	0,202	1,359
Nov	0,377	1,375	0,393	0,383	2,528
Dic	0,017	0,05	0,015	0,013	0,095
Suma aumentos	0,92	3,161	0,929	0,887	5,897
Suma disminución	-1,738	-5,109	-1,71	-1,607	-10,163

La influencia de las forzantes del cambio climático en la región de estudio no presenta similitud en la respuesta de las cuencas, esto puede deberse, entre otros factores, a las dimensiones geográficas de estas, en el caso de la cuenca San Diego su área tributaria es de 254 km²

aproximadamente el doble de la cuenca Los Palacios y Herradura, y cuatro veces de la cuenca Bacunagua.

Es importante resaltar que los resultados obtenidos también están sujetos a las limitaciones del modelo hidrológico para predecir los volúmenes medios mensuales a nivel de cuenca, en todos los casos son proyecciones, no valores absolutos. Esta modelación no pretende predecir el futuro, sus resultados intentan establecer los potenciales impactos del cambio climático sobre la región y determinar las mejores estrategias de adaptación para enfrentar los problemas de escasez de agua en un contexto de elevada incertidumbre.

Este es un proceso multifactorial en el que se realizan simplificaciones y la estimación está sujeta a un grupo de incertidumbres, entre las que encuentran la heterogeneidad del suelo (variación de la retención de agua), las condiciones iniciales de humedad al inicio de la lluvia, la cobertura vegetal, las pérdidas por almacenamiento en depresiones del terreno y el aporte subsuperficial y subterráneo. Además, se debe agregar lo explicado por **Iglesias et al. (2005)** sobre la influencia de pequeñas variaciones de precipitación o temperatura para ocasionar variaciones importantes en la disminución de las escorrentías.

Los valores obtenidos son conservadores, pues representan una cuantía promedio de reducción y/o aumento de los recursos hídricos de la región, además los volúmenes de escurrimiento obtenidos para cada escenario de cambio climático solo se presentan hasta los embalses, pues solamente el modelo hidrológico está calibrado y validado hasta estos puntos donde se tiene información suficiente y confiable. No existe información hidrométrica que permita en la actualidad mejorar las estimaciones de los caudales después del cierre de los ríos, lo que impide mejorar la estimación del impacto de los recursos hídricos en afluentes no regulados, que en este sistema también tienen una vital importancia para el abastecimiento de las zonas de riego en la zona sur de la cuenca. Esta es una situación que se deberá atender en el futuro, pues el fortalecimiento de los sistemas actuales de monitoreo y observación de los flujos en ríos, salidas de embalses, derivaciones, entrega de agua a los usuarios y en canales de riego y drenaje, sin dudas permitirá mejorar la capacidad para generar información confiable para la investigación y para el diseño de políticas de gestión de los recursos hídricos.

3.6. Análisis de escenarios

El análisis de escenarios se centrará en mostrar los resultados de la combinación de escenarios de demanda con escenarios climáticos para el periodo 2016-2050, además considerando condicionantes del sistema de distribución de agua. A continuación se presentan los resultados de cada uno de los escenarios considerados.

3.6.1. Escenario de referencia

Como parte de los análisis de escenario se presenta en la *figura 3.18* el comportamiento en el período 2010-2015 de la demanda de agua (incluyendo el exceso necesario para suplir las pérdidas por conducción) y el suministro entregado por el modelo WEAP. Puede observarse que la demanda de agua en la región en el período de 5 años se ha mantenido siempre por encima de los 200 millones de metros cúbico. Los meses de 2012, 2013 y 2015 las demandas de agua se reducen aproximadamente en un 30% (2012-2013) y hasta en un 50% (2015) respecto al año 2010.

La reducción de la demanda en los años referidos anteriormente se debe principalmente a un ajuste en los volúmenes concesionados para la producción agrícola y son la respuesta reactiva a los períodos de sequías extrema vivida en períodos 2011-2012 y 2014-2015 en toda la región.

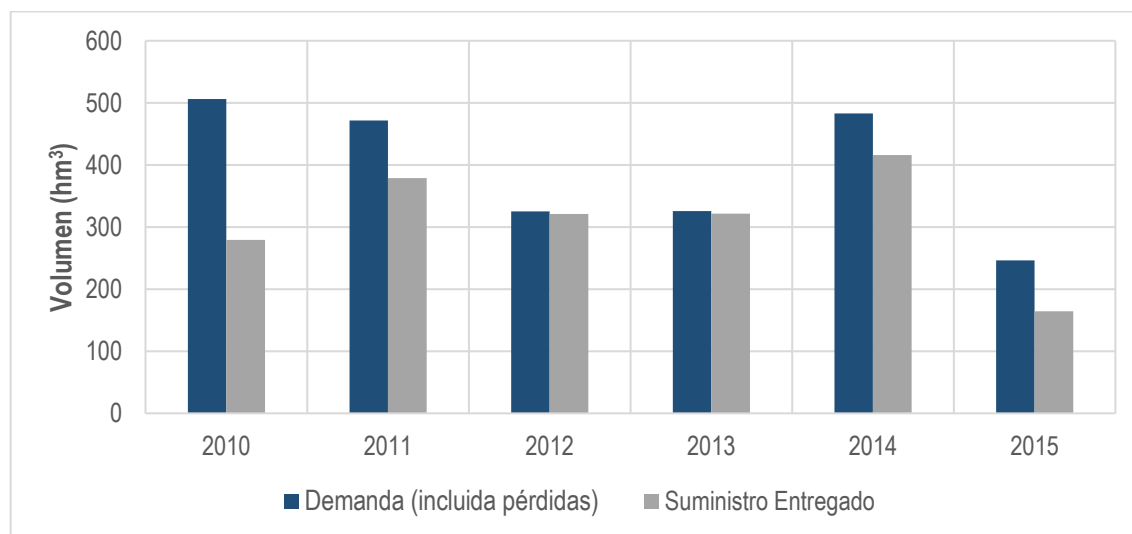


Figura 3.18 Balance entre la Demanda de Agua y el Suministro entregado para toda la región escenario de referencia, periodo 2010-2015.

Puede observarse en la *figura 3.19* que los déficits para suplir las necesidades de la producción agrícola, en el año más crítico supera los 227 millones de metros cúbicos, que representa aproximadamente el volumen útil de almacenamiento de agua de los cuatro embalses existentes en el área de estudio. En el resto de los años el déficit aunque continúa siendo grande, no supera los 100 millones de metros cúbicos (aproximadamente 56% del volumen útil de los embalses). La cobertura de la demanda de agua tiene como valor más bajo el año 2010 con un 55%

y oscilando en el resto de los años entre valores superiores al 60%, sin considerar los años 2012 y 2013 donde la cobertura de agua es cercana al 100% de la demanda de los usuarios.

La información citada anteriormente es fue contratada con el “*Resumen General de la utilización de las aguas*”, del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) con el fin de revisar que las apreciaciones hechas por el modelo WEAP en cuanto a la cobertura de la demanda y los balances reales de agua presentan coincidencia. Como se observa en la **figura 3.19** (línea gris, Cobertura oficial) existe similitud entre la cobertura de agua representada por el modelo y las reportadas por el organismo rector del agua en el país, excepto en el año 2012, donde se aprecia una diferencia de aproximadamente un 20% de diferencia.

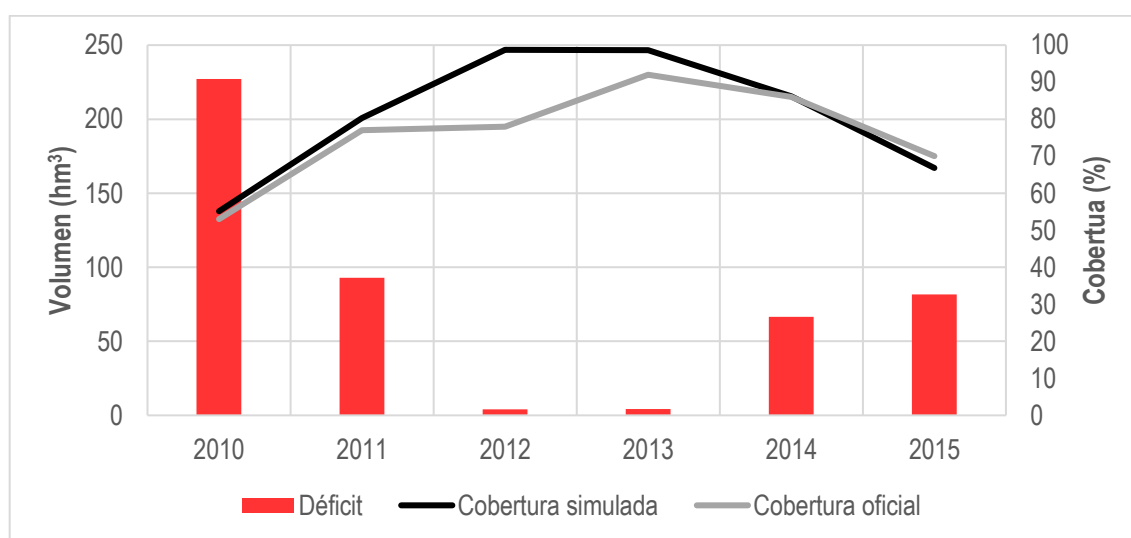


Figura 3.19 Balance entre la Demanda de Agua y el Suministro entregado para toda la región en el periodo 2010-2015, incluyendo la cobertura de la demanda simulada por WEAP y declarada por los organismos oficiales.

A nivel mensual, el balance promedio entre la demanda de agua y el suministro entregado por el modelo se presenta en la **figura 3.20**. En el periodo analizado, la máxima demanda de agua se produce en los meses de abril a mayo, con volúmenes que superan los 40 millones de metros cúbicos. Los meses de menor demanda coinciden con la etapa más húmeda del año, pues la precipitación satisface una parte de necesidades de riego de los cultivos agrícolas.

Es evidente en la información presentada en la **figura 3.20** que los meses de enero a mayo, y diciembre, son los que, como promedio presentan un balance más desfavorable entre la demanda mensual de agua y la asignación del recurso. Es habitual, por los regímenes de explotación de los embalses que en los meses más secos del año, se disponga del volumen almacenado para satisfacer las necesidades de riego del cultivo de arroz en el período de invierno, donde este tiene su mayor productividad agronómica, al tiempo que se genera la mayor demanda por las condiciones

climáticas de este período. La satisfacción de la demanda de agua de los cultivos en este período depende únicamente de la disponibilidad de agua en los embalses, es por esto por lo que cualquier situación atípica en el comportamiento del clima, entiéndase sequía o un régimen de precipitación por debajo del comportamiento promedio, puede generar una situación de déficit.

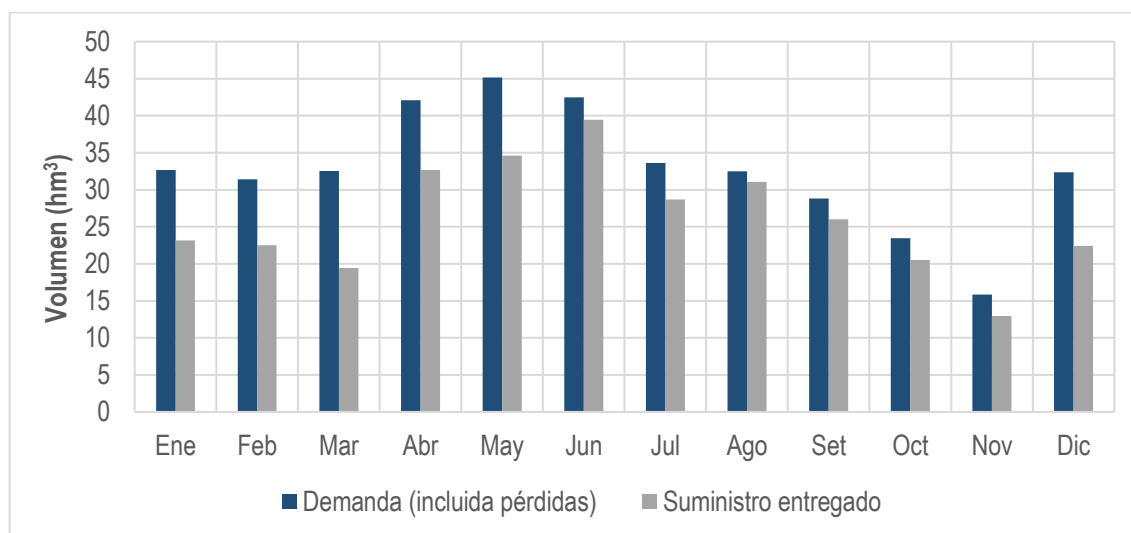


Figura 3.20 Balance mensual promedio entre la Demanda de Agua y el Suministro entregado para toda la región en el periodo 2010-2015.

Una vez concluido este período de siembra que abarca los meses desde diciembre a mayo, se espera que con las lluvias de la temporada más húmeda del año, se recuperen los volúmenes del embalse. Esta situación hace de especial importancia el manejo de los recursos hídricos en esta región. Evidencias de estas políticas de manejo de los recursos hídricos y su influencia el balance mensual entre agua demandada y agua suministrada se puede observar en la reducción de los volúmenes de almacenamiento de los embalses (ver *figuras 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9*) y la lenta recuperación, asociada a las bajas precipitaciones ocurridas en los meses más lluviosos del año sobre todo en los 2011-2012 y 2014-2015.

El déficit medio mensual y la cobertura media mensual para el período 2010-2015 que se presenta en la *figura 3.21*. Reforzando las ideas planteadas con anterioridad, puede observarse que la cobertura promedio de la demanda para los meses de enero a mayo y el mes de diciembre, se encuentra en un rango entre de 70 y 80%, mientras que para el resto de los meses supera el 80% de la demanda. El déficit medio para este período asciende a 79.4 millones de metros cúbicos distribuida en el 32.3% en el periodo más lluvioso del año (mayo-octubre) y el 67.7% en el periodo menos lluvioso del año (noviembre-abril).

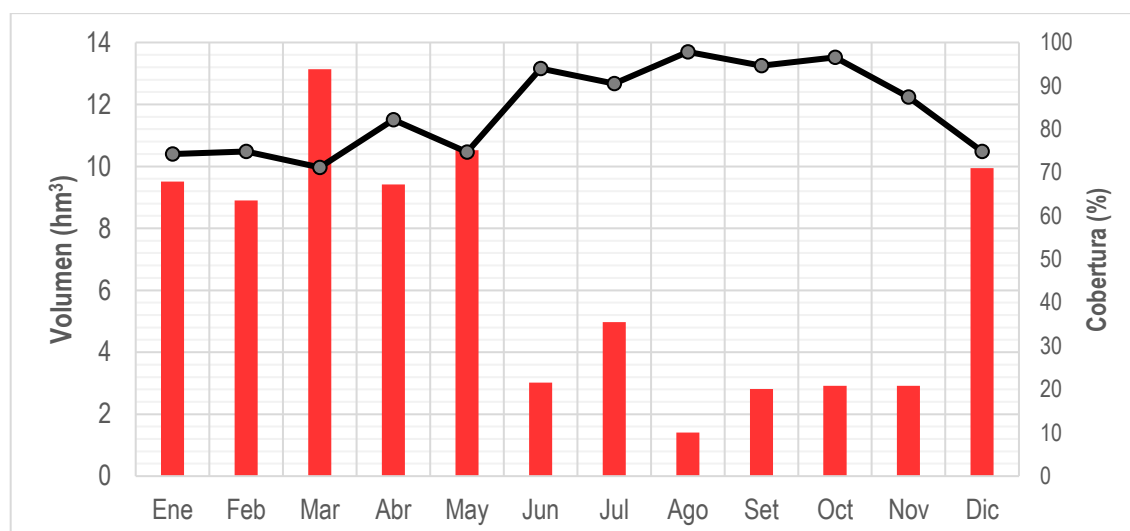


Figura 3.21 Balance entre la Demanda de Agua y el Suministro entregado para toda la región en el periodo 2010-2015, incluyendo la cobertura de la demanda.

En base a todo lo discutido en este acápite, surge la duda de si serán sostenibles los planes de desarrollo previstos en esta zona. Este cuestionamiento surge de tener en cuenta que los niveles crecientes de demanda de la agricultura, los episodios de baja disponibilidad vividos en la cuenca, y una operación de los embalses que puede comprometer la sostenibilidad de la producción agrícola a corto plazo. Bajo escenarios de baja disponibilidad de agua como los previstos por los escenarios de cambio climático surge la interrogante, ¿será posible aumentar en un 12% las áreas destinadas al cultivo de arroz en esta zona geográfica?

3.6.2. Resultados escenario 1

El escenario 1 representa los supuestos de una demanda futura de agua del cultivo de arroz igual a la demanda promedio del periodo base, considerando los escenarios climáticos RCP4.5 y 8.5. Respecto al periodo antecedente 2010-2015 este escenario presenta un aumento de 74 mil metros cúbicos de agua como demanda anual para el periodo 2016-2050. En la *figura 3.22* se muestran la diferencia mensual entre el volumen demandado entre el escenario de referencia (2010-2015) y el escenario de demanda 1. En los meses de abril a septiembre aumenta la demanda a más de 278 mil metros cúbicos, mientras que en el resto de los meses se reduce a más de 352 mil metros cúbicos.

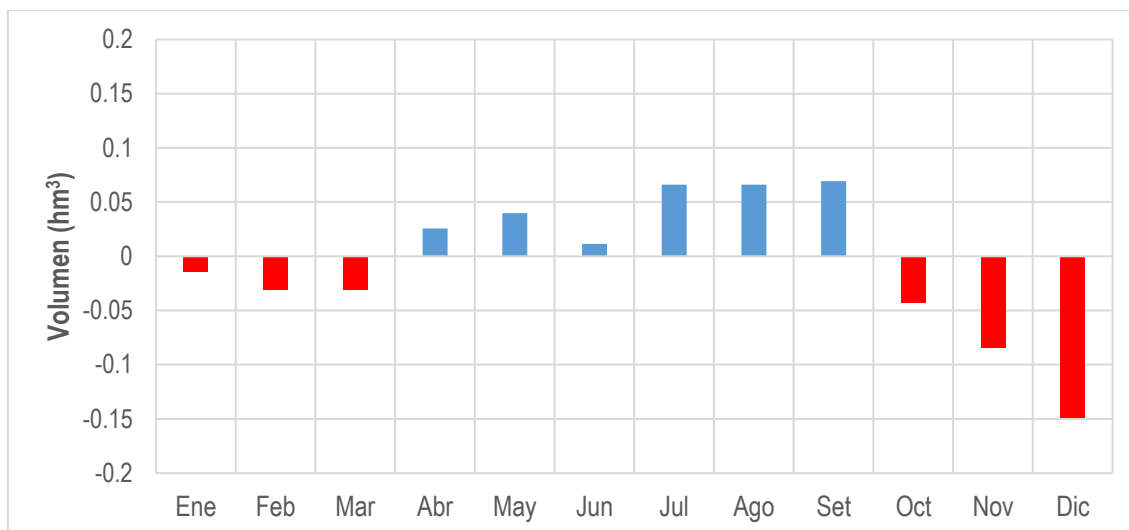


Figura 3.22 Diferencia entre el volumen mensual demandado entre el escenario de referencia (2010-2015) y el escenario de demanda 1.

El volumen de déficit mensual promedio para las condiciones del escenario de demanda 1 considerando los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 para el periodo 2016-2050 se muestran en la **figura 3.23**. Siguiendo el comportamiento explicado en el escenario de referencia, para estas condiciones de demanda y en ambos escenarios climáticos, los meses más lluviosos (junio a septiembre) se mantienen con los menores déficit respecto al resto de los meses de año. El valor de déficit en la asignación de agua se produce en el mes de abril, que considerando las forzantes del escenario RCP 8.5, llegan cerca de 10 millones de metros cúbicos del volumen demandado. En este mes se observa la mayor diferencia respecto a escenarios climáticos, pues para el escenario RCP 4.5 el déficit proyectado es 15% (1.4 millones de metros cúbicos) menor al valor del escenario RCP 8.5.

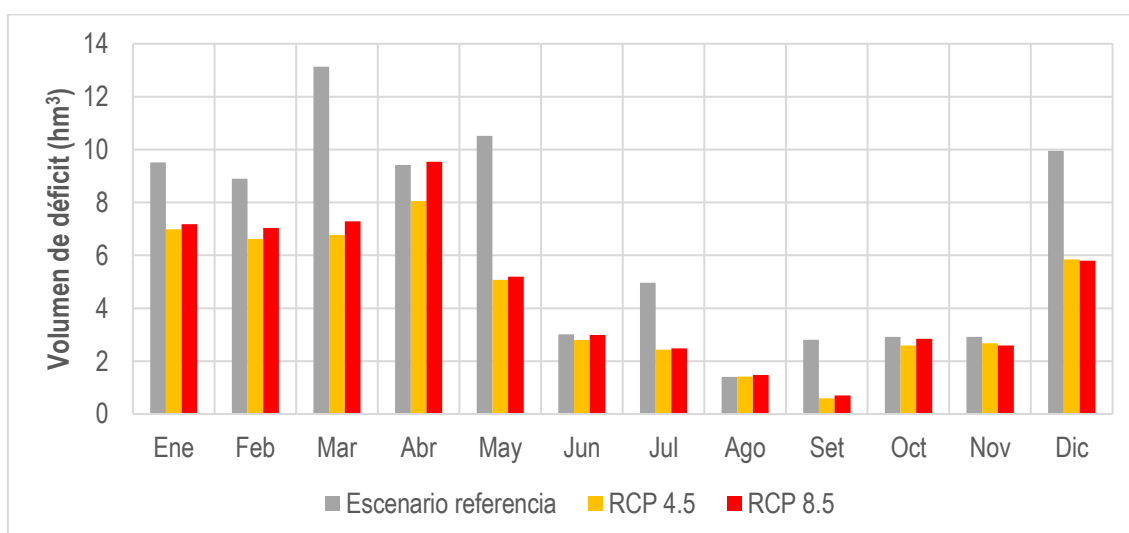


Figura 3.23 Volumen de déficit mensual promedio para las condiciones del escenario de demanda 1 considerando los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 W/m² para el periodo 2016-2050.

Una demanda futura de agua del cultivo de arroz igual a la demanda promedio del periodo base, garantiza en ambos escenarios de cambio climático una reducción de alrededor del 40% en la demanda no cubierta respecto al escenario de referencia. Los resultados de este escenario evidencian que la herramienta de planeamiento y gestión de los recursos hídricos WEAP, puede apoyar a la elaboración de planes de desarrollo agrícolas más realistas acorde a las situaciones de estrés hídrico que se esperan en gran parte del mundo por los impactos del cambio climático global en la disponibilidad natural de los recursos hídricos.

A pesar de los déficits proyectados la cobertura promedio mensual sigue manteniéndose en el orden del 70% para los primeros cuatro meses del año y el mes de diciembre, y para el resto de los meses, considerando ambos escenarios de cambio climático se llega hasta a alcanzar valores superiores al 87% de cobertura en la demanda de agua. Estos valores de cobertura mensual de la demanda son similares a los descritos en el periodo antecedente, sin embargo, para este último escenario los déficits son mayores.

El déficit de agua para cumplir con la demanda promedio del escenario 1 comparando los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 (*figura 3.24*) evidencia que para los 10 primeros meses del año se muestra una afectación sustancial en el suministro de agua, que asciende a cerca de 3.4 millones de metros cúbicos de diferencia entre escenarios. De este resultado se infiere que para las condiciones del escenario de mayor emisión de gases de efecto invernadero, las afectaciones promedio del agua para el cultivo de arroz serán mayores.

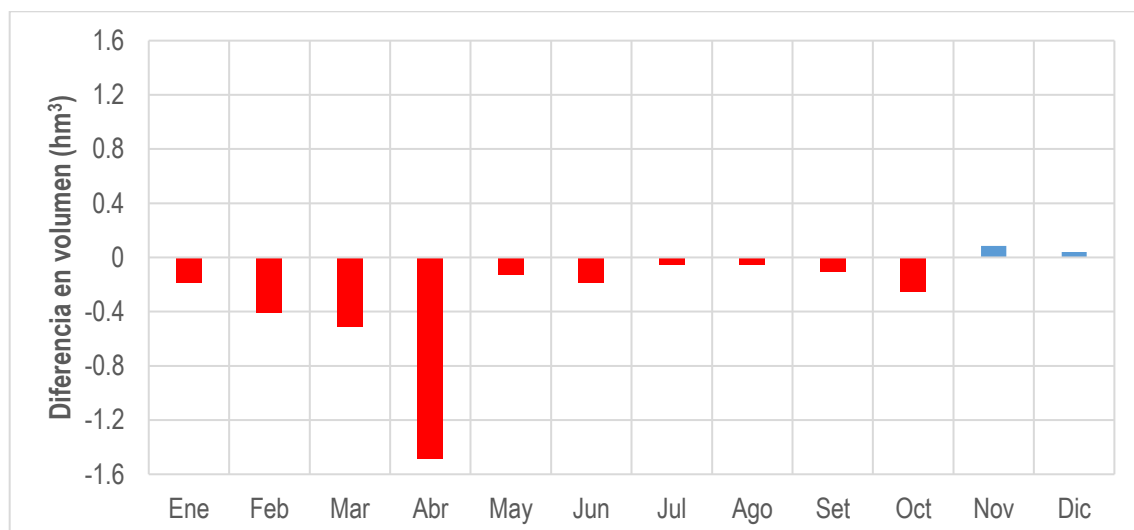


Figura 3.24 Diferencia promedio entre el volumen de la demanda no cubierta entre los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 W/m² para el periodo 2016-2050.

3.6.3. Resultados del escenario 2

El escenario 2 representa el supuesto de una demanda futura para el cultivo de arroz en un 12% en toda la región, considerando los escenarios climáticos RCP4.5 y 8.5. Para este escenario el volumen demandado es superior al escenario de referencia (ver *figura 3.25*), condicionado por el aumento de la demanda del cultivo del arroz para el periodo 2016-2050 que asciende a 21 millones de metros cúbicos adicionales. A nivel mensual este aumento se refleja principalmente en los meses de abril, mayo y junio, con aumentos en los volúmenes demandados, respecto al escenario de referencia superiores a 2.5 millones de metros cúbicos (ver *figura 3.26*). En el resto de los meses el aumento de la demanda oscila entre 0.7 y 2 millones de metros cúbicos, para el mes de noviembre se registra una reducción poco significativa de 0.2 millones de metros cúbicos.

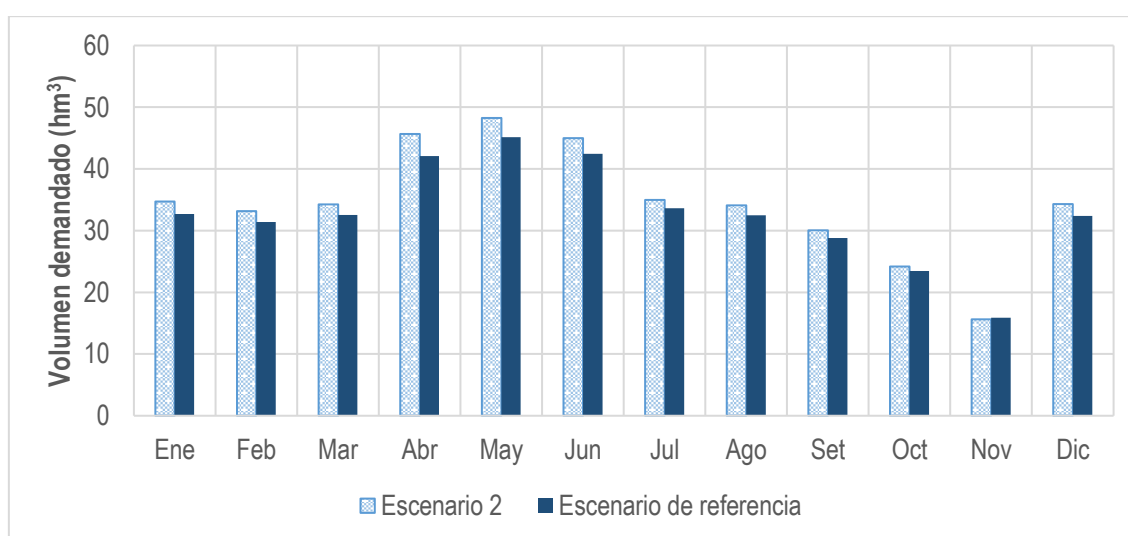


Figura 3.25 Volumen demandado entre el escenario de referencia (2010-2015) y el escenario de demanda que considera el supuesto de una demanda futura para el cultivo de arroz en un 12% en toda la región.

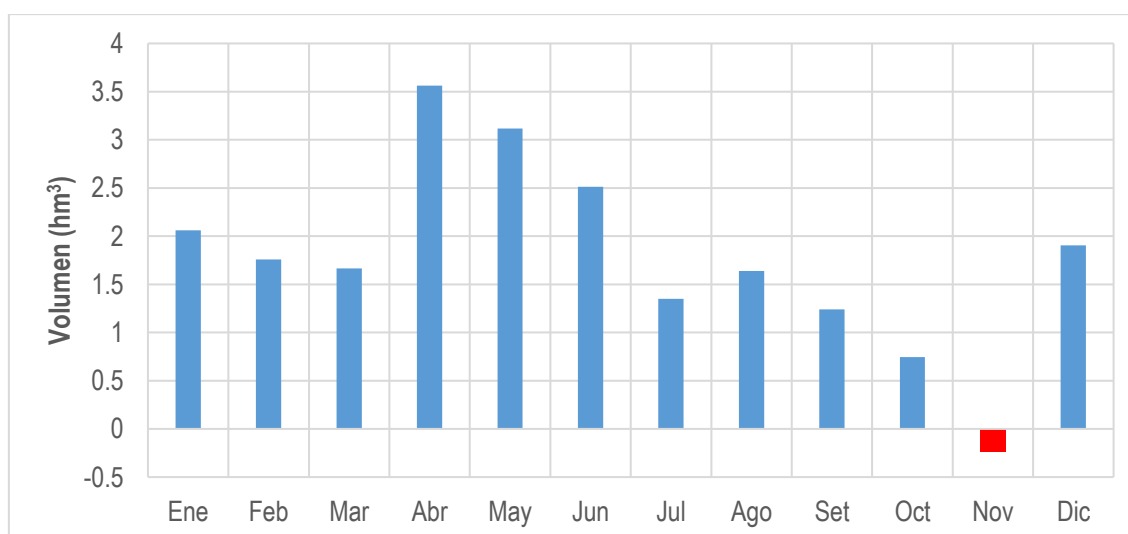


Figura 3.26 Diferencia entre el volumen demandado entre el escenario de referencia (2010-2015) y el escenario de demanda 2.

Volumen de déficit mensual promedio para las condiciones del escenario de demanda 2 considerando los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 para el periodo 2016-2050, se presenta en la **figura 3.27**. Para los primeros meses de año se proyectan los mayores déficits, en el escenario RCP 4.5 se refleja un ligero aumento en el déficit de agua en la región que asciende a 37.6 millones de metros cúbicos (870 mil metros cúbicos más que el escenario RCP 8.5). Para el resto de los meses, excepto diciembre, la afectación a la demanda de agua se proyecta mayor para las condiciones del escenario RCP 8.5 con un déficit de más de 22 millones de metros cúbicos. El déficit promedio anual en la región para las condiciones del aumento es de 70 millones de metros cúbicos, sin que se proyecten diferencias significativas entre las respuestas anuales de los dos escenarios climáticos analizados (ver **figura 3.28**).

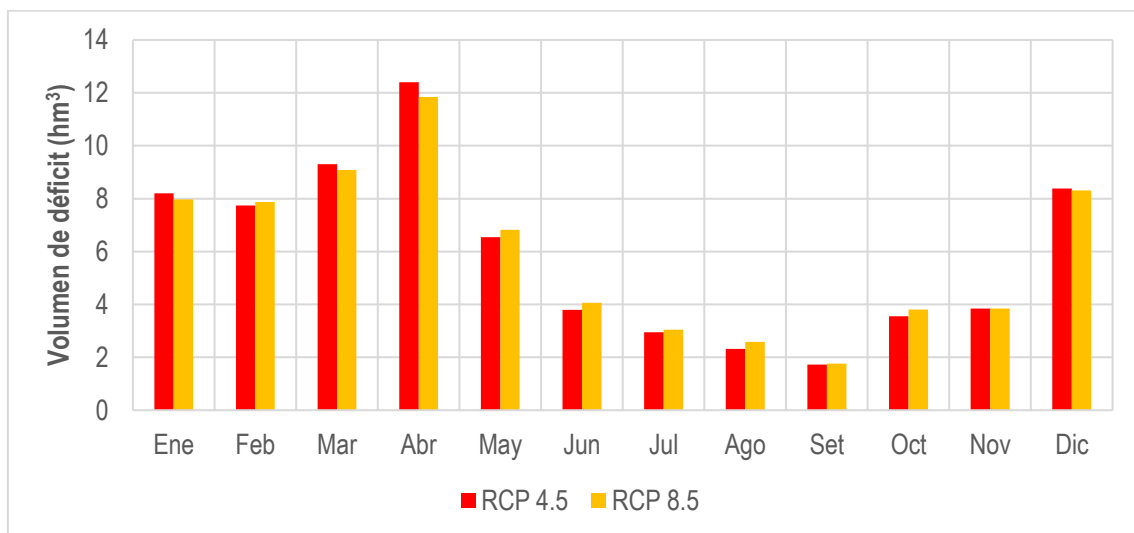


Figura 3.27 Volumen de déficit mensual promedio para las condiciones del escenario de demanda 2 considerando los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 W/m² para el periodo 2016-2050.

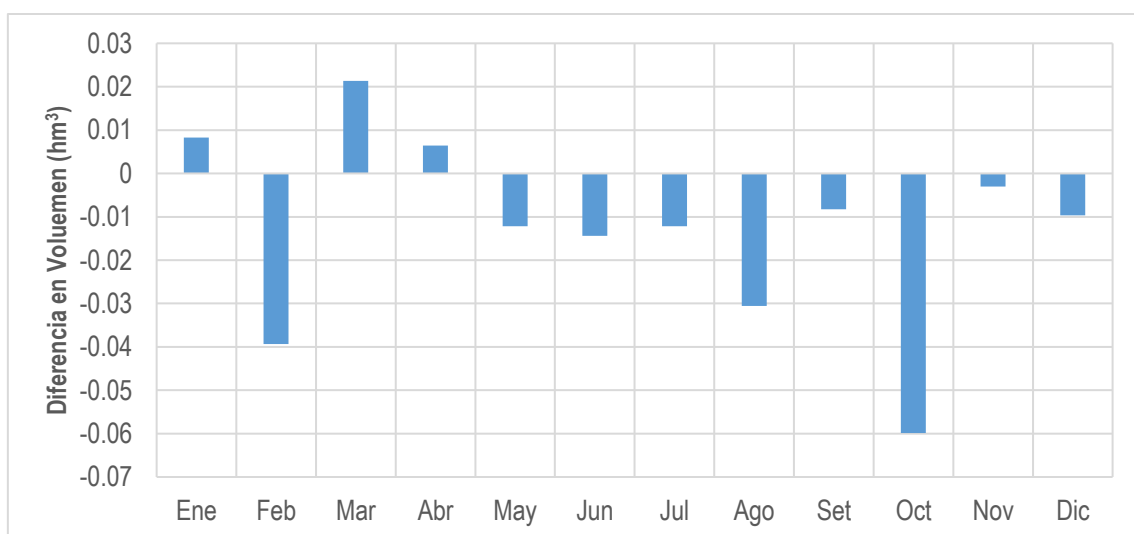


Figura 3.28 Diferencia promedio entre el volumen de la demanda no cubierta entre los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 W/m² para el periodo 2016-2050.

Se presenta en la **figura 3.29** la comparación de la cobertura de la demanda del cultivo de arroz para el escenario de referencia y para el escenario RCP 8.5 (el escenario climático más crítico). Es evidente que el aumento de la demanda del cultivo de arroz un 12% produce una disminución en la cobertura de la demanda respecto al periodo antecedente. Esta disminución es más notoria en los meses de junio a diciembre, donde como promedio se reduce la cobertura de la demanda en 4.7% respecto al escenario de referencia, existiendo meses como octubre y noviembre donde la reducción supera los 7 puntos porcentuales.

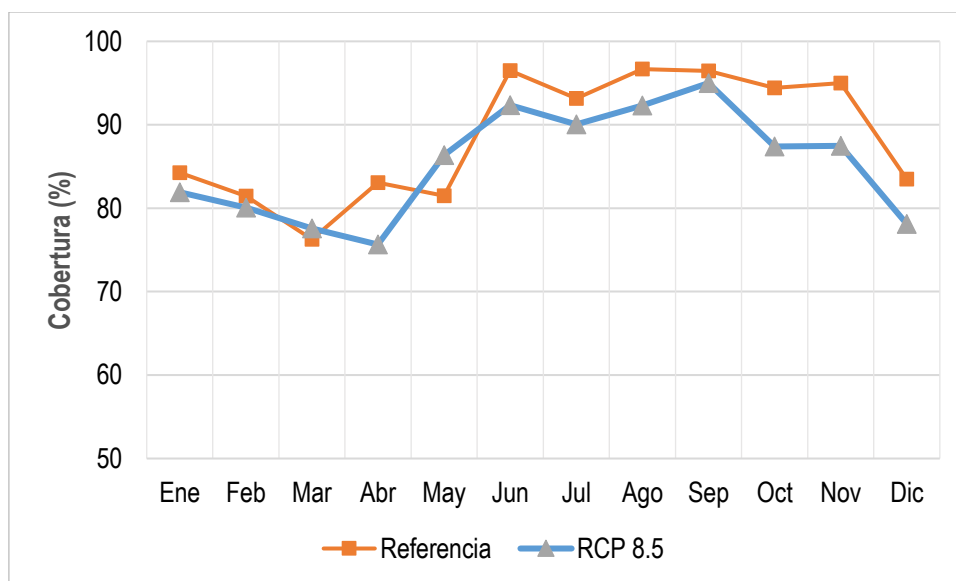


Figura 3.29 Comparación de la cobertura de la demanda mensual promedio para las condiciones del escenario de referencia y el escenario de demanda 2 con las forzantes del escenario de cambio climático RCP 8.5 W/m² para el periodo 2016-2050.

La repercusión en el estado de las fuentes debido al aumento la demanda de agua para el cultivo de arroz puede ser analizado por el modelo WEAP, ayudando a los tomadores de decisión a evaluar y trazar las proyecciones de demanda teniendo información de cómo impactan en el estado de las fuentes, revisando su recuperación y analizando distintas variantes de manejo del agua disponible. Además es posible a partir de la herramienta, optimizar y evaluar alternativas de la gestión del agua dentro de la cuenca, por solo citar algunos ejemplos: trasvases de agua, uso de fuentes alternativas, restricción de uso de fuentes o infraestructura de aprovechamiento en épocas del año, prácticas de ahorro, entre otros.

Por ejemplo, en la **figura 3.30** se muestra la comparación entre el volumen mensual promedio de los embalses en la región para el escenario de referencia y considerando el aumento en un 12% de la demanda de agua del arroz. Puede observarse para en todos los embalses el volumen mensual disminuye significativamente para el escenario RCP 8.5 respecto al escenario

de referencia para poder hacer frente al aumento de la demanda. En muchos casos, como los analizados a lo largo de las discusiones del escenario de referencia (*acápite 3.6.1*) los embalses, que constituyen la única fuente segura de abastecimiento de agua para la agricultura de la zona, pueden incluso vaciarse completamente los embalses a fin de garantizar la creciente demanda de agua. Los resultados del análisis de este escenario demuestran la necesaria coherencia que deben existir entre los planes de desarrollo del sector agropecuario, la operación del embalse y los posibles impactos del clima futuro en la disponibilidad de los recursos hídricos.

Estos resultados posicionan a la herramienta implementada en el sistema hidráulico en estudio, como una útil herramientas de modelación para facilitar el análisis de disímiles alternativas de manejo del agua para los planes de desarrollo existentes y futuros, lo que contribuirá a que estos últimos sean más realistas a partir del balance integral de la disponibilidad y la demanda.

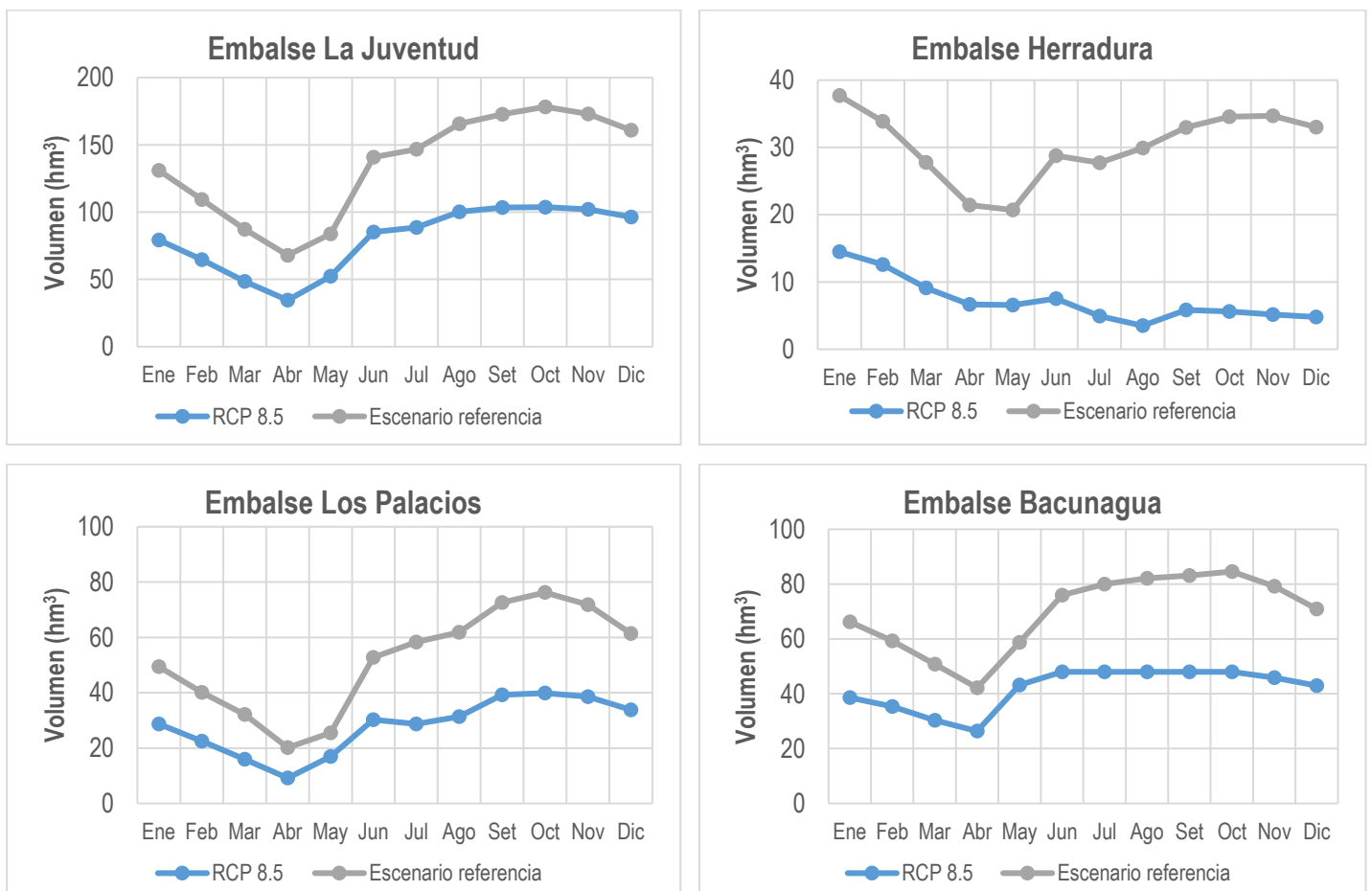


Figura 3.30 Comparación entre el volumen mensual promedio de los embalses en la región para el escenario de referencia y considerando el aumento en un 12% de la demanda de agua del arroz para las condiciones del escenario climático RCP 8.5 W/m²

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Fueron generados las bases de datos geospaciales y alfanuméricas necesarias para el desarrollo del proceso de modelación hidrológica y de la gestión de los recursos hídricos, considerando el análisis de escenarios de cambio climático.
2. Los parámetros calibrados en el modelo hidrológico permiten explicar los caudales medios mensuales en los períodos de calibración de las subcuencas BC-1, LP-1 y SD-1-3 en el orden de 87%, 76% y 86% respectivamente, y para el período de validación en el orden de 82%, 73% y 80%, respectivamente.
3. La implementación del método de la curva número, como modelo hidrológico distribuido a nivel de cuenca, representa con alto grado de fidelidad los hidrogramas reales en cada tramo de río y valida el enfoque abordado en la calibración del parámetro como vía para emplear el método en la generación de los escurrimientos mensuales.
4. El modelo WEAP con los parámetros calibrados es capaz de representar el 95%, 91%, 91% y 95% de la variación de los volúmenes de los embalses Herradura, Bacunagua, Los Palacios y La Juventud, respectivamente, por lo que es posible afirmar que el modelo de la gestión del agua generado, es capaz de representar de manera conservadora la relación entre las fuentes de agua, la infraestructura para el aprovechamiento de los recursos hídricos y los usuarios del agua.
5. El balance general de los recursos hídricos promedio de la región, para las condiciones del escenario RCP 4.5, es positivo, con una proyección de 0.7% (2.4 millones de metros cúbicos) del volumen total de escurrimiento respecto al periodo antecedente. En el caso del escenario RCP 8.5, el balance es negativo, proyectándose una reducción en los recursos hídricos cercana al 1.3% (cerca de 4.27 millones de metro cúbicos de agua).
6. Para las condiciones del escenario base (2010-2015) existe similitud entre la cobertura de agua representada por el modelo WEAP y las reportadas por el organismo rector del agua en el país, INRH. El déficit medio para este período asciende a 79.4 millones de metros cúbicos distribuida en el 32.3% en el periodo más lluvioso del año (mayo-octubre) y el 67.7% en el periodo menos lluvioso del año (noviembre-abril).
7. Los resultados mostrados, en los escenarios de demanda y de cambio climático evaluados, demuestran las potencialidades de la herramienta para el estudio de la disponibilidad de los recursos hídricos y el planeamiento hidrológico en las cuencas estudiadas, como soporte a la toma de decisión en la gestión de los recursos hídricos para la producción agrícola.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar los procedimientos seguidos para el procesamiento y generación de la información básica para la modelación hidrológica y de la gestión de los recursos hídricos, como herramienta metodológica y guía para la extensión de WEAP a otras cuencas en el país.
2. Para disminuir la incertidumbre en la generación de los escurrimientos medios mensuales en las cuencas estudiadas y los resultados del modelo de gestión, se recomienda fortalecer los sistemas actuales de monitoreo y observación de los flujos en ríos, salidas de embalses, derivaciones, entrega de agua a los usuarios y en canales de riego y drenaje, que sin dudas permitirá mejorar la capacidad para generar información confiable para la investigación y para el diseño de políticas de gestión de los recursos hídricos.
3. Integrar el modelo conceptual generado con otras herramientas como vía para ampliar el alcance y la profundidad de los resultados obtenidos.
4. Socializar con los tomadores de decisión las potencialidades de la herramienta para el apoyo a la gestión de los recursos hídricos ante escenarios diversos y en particular frente a los retos de los cambios climáticos.

**REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **ACHUTARAO, K., C. COVEY, C. DOUTRIAUX, M. FIORINO, P. GLECKLER, T. PHILLIPS, K. SPERBER, K. TAYLOR (2004)** An Appraisal of Coupled Climate Model Simulations. *Lawrence Livermore National Laboratory UCRL-TR-202550*, Disponible en: <http://pcmdi.llnl.gov/ipcc/aboutipcc.php>
2. **AHMAD ROMSHOO SHAKIL, REYAZ A. DAR, IRFAN RASHID, ASIF MARAZI, NAHIDA ALI y SUMIRA N. ZAZ (2015)** Implications of Shrinking Cryosphere Under Changing Climate on the Streamflows in the Lidder Catchment in the Upper Indus Basin, *India, Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 47:4, 627-644, DOI: 10.1657/AAAR0014-088.
3. **ALEXANDRE y PORTO (2000)** O sistema ModSimLS: um modelo de rede de fluxo para simulação de bacias hidrográficas *Journal of Water Resources Planning and Management*. 126, nro. 2, pp. 85-97.
4. **ANPP (2018)** Asamblea Nacional del Poder Popular, *Decreto 124: Ley de las aguas terrestres*, Título VII de la utilización del patrimonio hidráulico, Capítulo I de los usos de las aguas terrestres, Sección Segunda: Orden de prioridades en el uso de las aguas terrestres, artículo 46.1 y 46.2, pp. 21.
5. **ARQUIOLA ET AL. (2014)** *Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos*. Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia, España.
6. **ASSAF H., VAN BEEK E., BORDEN C., GIJSBERS P., JOLMA A., KADEN S., KALTOFEN M., LABADIE J.W., LOUCKS D.P., QUINN N.W.T., SIEBER J., SULIS A., WERICK W.J. AND WOOD D.M. (2008)** Generic simulation models for facilitating stakeholder involvement in water resources planning and management: A comparison, evaluation, and identification of future needs. In: *Environmental Modelling, Software and Decision Support: State of the Art and New Perspectives*. Jakeman A.J., Voinov A.A., Rizzoli A.E. and Chen S.H. (Eds). Disponible en: http://www.elsevier.com/wps/find/bookdescription.cws_home/716398/description
7. **BASAL (2016)** *Proyecto Bases Ambientales para la Sostenibilidad Alimentaria Local, Informes y Resultados*, Publicado en Memorias Convención Ingeniería Agrícola 2016- Publicaciones BASAL, ISBN 978-959-285-034-7, Vol. 37, Cuba.

8. **BATES B.C., KUNDZEWICZ Z.W., WU S. y PALUTIKOF J.P. (2008)** El cambio climático y el agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra: Secretaría del IPCC. 210 pp.
9. **BAUWE, A., KAHL, P., & LENNARTZ, B. (2016)**. Hydrologic evaluation of the curve number and Green and Ampt infiltration methods by applying Hooghoudt and Kirkham tile drain equations using SWAT. *Journal of Hydrology*.
10. **BID (2010)** Banco Interamericano de Desarrollo, *La ciencia del cambio climático*, Manual práctico para tomadores de decisiones en Mesoamérica, Unidad de Energía Sostenible y Cambio Climático, Departamento de Infraestructura y Medio Ambiente, Nota técnica IDB-TN-145, Washington D.C., Estados Unidos.
11. **BISWAS, A. K. (2004)**. Integrated water resources management: a reassessment: a water forum contribution. *Water international*, 29(2), pp. 248-256. **ISSN:** 0250-8060.
12. **CAMPOS, A. (2011)** *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*. Primera reimpresión, pp. 151-155, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
13. **CAMINO, E.; RUGGERONI, J. y HERNÁNDEZ, F. (2014)** Quinto informe de evaluación del IPCC: Bases físicas, *Revista Tiempo y Clima*, 5(43).
14. **Cap-Net (2009)** La GIRH como una herramienta para la adaptación al cambio climático: manual de capacitación y guía de mediador. *International Network for Capacity Building in Integrated Water Resources Management*. Disponible en: <https://gestionsostenibledelagua.files.wordpress.com/2010/10/2009-la-girh-como-herramienta-para-la-adaptacion-a-los-cambios-climaticos.pdf>
15. **CASTILLO, R. ET AL. (2017)** Proyecciones de cambio climático del Sistema Ártico basado en el análisis de multi-modelos de los escenarios de emisiones de CO₂. *Revista de climatología*, vol. 17, ISSN 1578-8768.
16. **CCSP (2008)** Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitations. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research [Bader D.C., C. Covey, W.J. Gutowski Jr., I.M. Held, K.E. Kunkel, R.L. Miller, R.T. Tokmakian and M.H. Zhang (Authors)]. Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, Washington, D.C., USA, 124 pp.
17. **CHOW, V. T. y D. R. MAIDMENT (1994)**. "Hidrología Aplicada. "Transversal 42B No. 19-77." Santafé de Bogotá, Colombia, Traducido de la primera edición en inglés de Applied Hydrology, 585pp.

18. **CITMA (2015)** *Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de la República de Cuba.
19. **COLLAZOS, G. (2018)** Sistema Soporte de Decisión H2O para planificación y gestión del uso de los recursos hídricos a escala de cuenca. <http://www.ssd-h2o.com.ar/Download/ArtFaroH2O-GC.pdf>
20. **COLINS, M. (2007)** Ensembles and probabilities: a new era in the prediction of climate change. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 1957-1970. <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsta.2007.2068>
21. **COTLER, H., RÍOS, E., PINEDA, R. F., GONZÁLEZ, I. y GALINDO, A. (2013)** Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Colección: Cuadernos de divulgación ambiental. SEMARNAT-CECADESU, Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas. 31 pp.
22. **DURÁN-BARROSO, P. y GONZÁLEZ, J. (2015)** Variabilidad de los grupos hidrológicos del método del número de curva del NRCS (NRCS-CN).
23. **ENPA (2012)** “Programa de Desarrollo Integral del Municipio Los Palacios” Ministerio de la Agricultura, Empresa de Proyectos e Ingeniería MINAG, Unidad Empresarial del Base Pinar del Río, versión 4, Inédito.
24. **ESCOBAR, M. y S. VICUÑA (2009)** Guía Metodológico: Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos Con El Modelo WEAP, Publicación conjunta del Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile y Stockholm Environment Institute.
25. **FAO (2015)** Sistema de información sobre el uso del agua, Informe Regional América del Sur, Centroamérica y Caribe. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Consultado: 15 abril de 2019, Disponible en: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/cub/printesp1.stm
26. **FAN, MIN y HIDEAKI SHIBATA (2015)** Simulation of watershed hydrology and stream water quality under land use and climate change scenarios in Teshio River watershed, northern Japan, *Ecological indicators*, 50: 79-89.
27. **FATTORELLI, S; FERNÁNDEZ, P. C. (2011)** “Diseño Hidrológico”. Instituto Nacional del Agua. Centro Regional Andino. Associazione Italiana di Idronomia, Italia. 2da Edición en Español, Edición Digital. 531pp.
28. **FERNANDEZ, A.; J. ZAVALA; R. ROMERO; A. CONDE y R. TREJO (2015)** Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional

Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. Disponibles en la página web del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático de México, <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>

29. **FEBLES, G. y T. RUIZ (2009)** El cambio climático global y sus repercusiones en Cuba. Acciones para el futuro, *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* **43**(4).
30. **FRANCÉS GARCÍA, F; ET AL. (2012)**. Manual del Usuario Programa TETIS v.8.1. España, Universidad Politécnica de Valencia, Instituto de Ingeniería del Agua y Media Ambiente. 27pp.
31. **FRANCÉSA F. y BUSSIB G. (2014)** Análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos de la cuenca del río Ésera (España) mediante un modelo hidrológico distribuido, *Revista Iberoamericana del agua (Ribagua)*, 1:1, 14-25, DOI: 10.1016/S2386-3781(15)30004-9
32. **DÍAZ, R.; HERVIS, G. y LÓPEZ, T. (2017)** *Calibración del modelo WEAP para la planificación hidrológica de la cuenca San Diego*, Tesis de diploma presentada en opción al título de Ingeniería Hidráulica, Facultad de Ingeniería Civil, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.
33. **GARREAUD, R. (2011)** Cambio Climático: Bases físicas e impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro–INIA*, 93:13-19, ISSN 1085-0938.
34. **GELLER, T. ET AL. (2016)** Gestión de los recursos hídricos utilizando el modelo WEAP (Water Evaluation and Planning System), *Memorias Convención Internacional de Ingeniería Agrícola*. ISBN 978-959-285-033. Cayo Santa María, Villa Clara, La Habana. Cuba.
35. **Giraldo, N. (2014)** Implementación del sistema de modelación WEAP como herramienta para la gestión integral del recurso hídrico en la vereda la bella
36. **GUPTA, H. V., S. SOROOSHIAN y P. O. YAPO (1999)** Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrologic Eng.* 4(2): 135-143.
37. **HERVIS, G.; REYES, J. y CID, G. (2014)** Diseño hidráulico de terrazas arroceras para las condiciones de la UEB “Sierra Maestra” de los Palacios, *Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Hidráulico*, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.
38. **HERVIS, G. G.; LÓPEZ, S. T.; VARGAS, C. R.; ROLÓN, A. J.; SÁNCHEZ, T. G. (2017 a)** *Aplicación del modelo WEAP para la planificación hidrológica de la cuenca San*

Diego, Municipio Los Palacios, Provincia Pinar del Río, Cuba, no. ser. No. RN3, Ed. Editorial Pearson, Investigaciones Actuales en Medio Ambiente ed., vol. III, 2017, ISBN: 978-607-32-4504-3.5.

39. **HERVIS, G. ET AL. (2017 b)** *Reporte: Avances en la aplicación del modelo WEAP, como herramienta para la gestión integrada de los recursos hidráulicos*. Ponencia en Congreso Internacional CUBAGUA 2017, I Taller de Gestión de Cuencas Hidrográficas, Editora Obras, ISBN: 978-959-247-156-6, La Habana, Cuba.
40. **HERVIS, G. G.; GELER, R. T.; DÍAZ, G. R.; IBAN, A. E.C. (2018)** El modelo WEAP: una herramienta de planificación hidrológica para la adaptación al cambio climático, *Revista Ingeniería Agrícola*, 8(3): 40-47, 2018, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2227-8761.
41. **HERVIS, G.; RIVEROL, L.; VARGAS, R.; SÁNCHEZ-TORREZ, G.; DUARTE, C.; GONZÁLEZ, F. y HERRERA, J. (2019)** Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca San Diego ante escenarios de cambio climático, *Revista de Ingeniería Agrícola*, Vol. 9, No. 2 (abril-mayo-junio, pp. 21-31, ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761.
42. **INRH (2015 a)** Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Resolución 287/2015, Anexo 2. Índices de consumo: Normas de Riego Netas Totales para los Cultivos Agrícolas, La Habana, Cuba.
43. **INRH (2015 b)** Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Resolución 287/2015, Anexo 3. índices de consumo: Eficiencia de los sistemas de riego, La Habana, Cuba.
44. **IPCC (2000)**. *Resumen para responsables de políticas. Escenarios de emisiones*. Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC, ISBN 92-9169-413-4.
45. **IPCC (2007 a)** Appendix I: Glossary, pp. 869–883. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). [Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J. and Hanson C.E. (Eds)]. Cambridge University Press: Cambridge, UK. Disponible: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-app.pdf>
46. **IPCC (2007 b)** *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
47. **IPCC (2007 c)**: *Climate Change, 2007, The Physical Science Basis*, WGI Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

48. **IPCC (2000)** *Resumen para responsables de políticas. Escenarios de emisiones*. Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC, ISBN 92-9169-413-4.
49. **IPCC (2013)** *Bases físicas. Resumen para responsables de políticas*, Contribución del grupo de trabajo 1 al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
50. **IPCC (2014)**. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.
51. **IPCC (2014a)**. Climate change 2014 synthesis report. contribution of working groups I, II, and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. author: Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... & Dubash, N. K.
52. **JEREZ, D. y MÉNDEZ, A. (2014)** Diseño de una obra hidrométrica como solución para la medición del agua en la red de canales primarios de los sistemas de la UEB Sierra Maestra de los Palacios, *Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Hidráulico*, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.
53. **JÁUREGUI OSTOS, E. (2003)** Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera. *Investigaciones geográficas* (50): 121-143. EISSN 2448-7279, ISSN 0188-4611.
54. **LASTRE, ARIAS P. (2015)** “Guía de Aplicaciones del HEC HMS en cuencas cubanas. Ejemplos Prácticos.” *Tesis para optar por el título de Ingeniero Hidráulico*. Departamento de Ingeniería Hidráulica. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, La Habana, Cuba. 194pp.
55. **LEE, ET AL. (2005)** WEAP. Water Evaluation And Planning System User Guide. Stockholm Environment Institute Tellus Institute 11 Arlington Street Boston, MA 02116-3411 USA. 176pp.
56. **LEONG, D. N. & DONNER, S. D. (2015)**. Climate change impacts on streamflow availability for the Athabasca Oil Sands. *Climatic change*, 133(4), 651-663.
57. **LI, H., XU, C. Y., BELDRING, S., TALLAKSEN, L. M., & JAIN, S. K. (2016)**. Water resources under climate change in Himalayan basins. *Water resources management*, 30(2), 843-859.
58. **LÓPEZ, G., J. HERRERA y A. CASTELLANOS (1998)** Agrupamiento de los suelos cubanos en clases hidrológicas para el cálculo del escurrimiento mediante el método de la

curva número, *Ingeniería Hidráulica*, 19(4), pp. 22-26, RNSP: 2066, ISSN: 1815-591X (D).

59. **LÓPEZ ALONSO, R. (2001)** Consideraciones acerca de los límites de aplicación del método del número de curva del Soil Conservation Service, *Montes: revista de ámbito forestal*, núm. 66, p. 92-97.
60. **LUDWIG F. y MOENCH M. (2009)** The impacts of climate change on water, pp. 35–50. In: *Climate Change Adaptation in the Water Sector*. Ludwig F., Kabat P., van Schaik H. and van der Valk M. (Eds). Earthscan: London, UK.
61. **MAITA, A. (2017)** Importancia de la calidad de la información hidrológica en la gestión integrada de los recursos hídricos. Cubagua, IX Seminario Internacional del uso integral del agua.
62. **MARTÍNEZ, B. (1997)** *El gráfico de despacho para la operación de embalses existentes*, Segunda reimpresión, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, La Habana, Cuba.
63. **MARTÍNEZ ÁLVAREZ, V. (1999)** *Simulación y Comprobación experimental de la escorrentía superficial en pequeñas cuencas no aforadas mediante modelos distribuidos implementados sobre SIG*. Departamento de Construcción y Vías Rurales. Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Disponible en: <http://oa.upm.es/711/1/02199908.pdf>.
64. **MARTÍNEZ, P., REYES, J. y MÉNDEZ, A. (2014)** Diseño, construcción y evaluación de una obra hidrométrica como solución para los canales terciarios de riego en la UEB “Sierra Maestra” de Los Palacios, *Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Hidráulico*, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.
65. **MASTRANDREA, M.D., C.B. FIELD, T.F. STOCKER, O. EDENHOFER, K.L. EBI, D.J. FRAME, H. HELD, E. KRIEGLER, K.J. MACH, P.R. MATSCHOSS, G.-K. PLATTNER, G.W. YOHE, y F.W. ZWIERS (2010)** *Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Disponible en: <http://www.ipcc.ch>
66. **MAURTUA, M. y ZELADA, C. (2016)** Generación de mapa de número de curva con sistema de información geográfica, *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 6(1).
67. **MCGUFFIE, K. y A. HENDERSON-SELLERS (2005)** *A Climate Modelling Primer*. John Wiley & Sons.

68. **MITTAL, NEHA, BHAVE, AJAY GAJANAN, MISHRA, ASHOK AND SINGH, RAJENDRA (2015)** Impact of human intervention and climate change on natural flow regime. *Water Resources Management*. ISSN 0920-4741
69. **MOA (2016)** Modelo de Ordenamiento Ambiental, Municipio Los Palacios, Resultados III, Proyecto Bases Ambientales para la Sostenibilidad Alimentaria Local. Publicado en memorias Convención Ingeniería Agrícola 2016, ISBN 978-959-285-034-7, Vol. 37, Cuba.
70. **MONREAL, T. E., CALVO-RUBIO, F. C., & LORENZO, F. E. (1999)**. La evaluación de los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. *Ingeniería del agua*, 6(2).
71. **MORIARTY, P., BUTTERWORTH, J., BATCHELOR, C., y BOS, A. (2006)** *Gestión integrada de los recursos hídricos y el subsector de agua y saneamiento doméstico*, IRC International Water and Sanitation Centre (Abril 2006, traducción). ISBN: 978-90-6687-063-5.
72. **MORIASI, D. ET AL. (2007)** Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Transactions of the ASABE50*, (3):885-900, ISSN 2151-0032.
73. **MEHDI, B., LEHNER, B., GOMBAULT, C., MICHAUD, A., BEAUDIN, I., SOTTILE, M. F. y BLONDLOT, A. (2015)** Simulated impacts of climate change and agricultural land use change on surface water quality with and without adaptation management strategies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 213, 47-60.
74. **NASH J. E. Y SUTCLIFF J. V. (1970)** River flow forecasting through conceptual models, part I—adiscussion of principles. *Journal Hydrology*, 10:282–290, ISSN 0022-1694.
75. **NRCS (2009)** National Engineering Handbook, section 4, Hydrology, version (1956, 1964, 1971, 1985, 1993, 2004, 2009). En: National Engineering Handbook, Engineering Division. US. Department of Agriculture.
76. **NRCS (1986)** *Urban Hydrology for Smallwatersheds*, Natural Resources Conservation Service, Soil Conservation Service Department, Disponible en: ftp://ftp.wcc.nrcs.usda.gov/downloads/hydrology_hydraulics/tr55/tr55.pdf, Consultado: 25 abril 2018.
77. **NOZARI, H., & MOHSENI, V. (2015)**. Applying system dynamics approach for simulation and optimization of the cropping pattern in Esfahan right side Abshar irrigation and drainage network. Disponible en: <https://www.sid.ir/en/Journal/ViewPaper.aspx?ID=511761>

78. **OMAR, M. (2013).** Evaluation of actions for better water supply and demand management in Fayoum, Egypt using RIBASIM. *Water Science*, 27(54), 78-90. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1016/j.wsj.2013.12.008>
79. **OMM (2009)** *Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*, World Meteorological Organization. Disponible en: www.wmo.int/ Consultado: 15 de septiembre de 2018.
80. **ORTEGA C. y SAAVEDRA M. (2013)** Propuesta de un plan para el aprovechamiento del recurso Hídrico en la microcuenca del río Pomacocho, Cantón Alausí, Provincia de Chimborazo, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente.
81. **PAHL-WOSTL C., JEFFREY P., BRUGNACH M. y SENDIMIR J. (2007)** Adaptive water management: How to cope with uncertainty. NeWater Policy Brief No. 4. <http://www.newater.info/intern/sendfile.php?id=1181>
82. **PHAM, B. Q., YUB, P. S., YANG, T. C., & TSENG, H. W. (2015)** Assessment of climate change impacts on hydrological processes and water resources by Water Evaluation and Planning (WEAP) model: case study in THAC mo catchment, VIETNAM. In *Proceedings of the 37th IAHR World Congress, Aug* (pp. 13-18).
83. **PÉREZ, Á. y LE BLAS, F. (2004)** Lineamientos para la aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integral del recurso hídrico, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Oficina Regional para América Latina y el Caribe, Red de Formación Ambiental.
84. **PÉREZ, G., Y. MARTÍNEZ y T. LÓPEZ (2014)** *Estimación de parámetros hidráulicos y eficiencia de conducción en un canal principal de riego de los sistemas arroceros del municipio Los Palacios*, Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Hidráulico, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.
85. **PÉREZ, N. y RECIO, I. (2017)** *Aplicación del modelo WEAP para obtener una política de operación óptima de un sistema de embalses*, Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Hidráulico, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.
86. **PETROSELLI , A., GRIMALDI , S., & ROMANO , N. (2013).** Curve-Number/Green-Ampt mixed procedure for net rainfall estimation: a case study of the Mignone watershed, IT. . 19, 113 – 121. *Procedia Environmental Sciences*.
87. **PLANOS, E. O (2014).**: *Síntesis Informativa sobre Impactos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba*, 26pp., Sello Editorial AMA, La Habana, Cuba, ISBN: 978-959-300-044-4.

88. **PLANOS, E.; VEGA, R. y A. GUEVARA (2013)** Impacto del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba, *Havana: Environmental Agency (CU)*.
89. **PUEBLA, J. H., LÓPEZ, S. T. Y GONZÁLEZ R. F. (2017)**. El uso del agua en la agricultura en Cuba. *Revista Ingeniería Agrícola, 1(2)*, 1-7.
90. **PUMA MJ y GOLD S. (2011)** *Formulando Escenarios de Cambio Climático para Contribuir con Estrategias de Desarrollo Adaptadas al Clima. Una Guía para Practicantes*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, NY, Estados Unidos. Disponible en: www.undp.org/.../Climate%20Strategies/.../Formulating-SPN-web-final_11Nov11.pdf Consultado: 8 de abril 2017.
91. **Pulido, M., Sahuquillo, A., Ochoa, C. & Pulido, D. (2005)**. "Modeling of Stream – Aquifer Interaction: The Embedded Multireservoir Model". *Journal of Hydrology*. Vol. XX. 1-16. *ISSN 0022-1694*.
92. **PURKEY D., JOYCE B., VICUNA S., HANEMANN M. AND DALE L., YATES D. y DRACUP J.A. (2008)** Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: A case study in the Sacramento Valley. *Climatic Change* 87(1): 109–122, Disponible en: <http://www.weap21.org/downloads/CCSacramento.pdf>
93. **RADA, A. A. (2017)** "Aplicación del Modelo de Planificación Hídrica de Cuencas Weap al Proyecto: Aducción de Recursos Hídricos Mururata."
94. **REYTOR, M. ET AL. (2016)** *Introducción al planeamiento y la operación de los Recursos Hidráulicos*, Volumen 1, Editorial Félix Varela. Universidad de Ciego Ávila, Centro de estudios hidrotécnicos.
95. **RODRÍGUEZ LÓPEZ, Y. (2011)** Modelación hidrológica de avenidas. Caso de estudio: Cuenca del río Zaza. *Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas*, Instituto Superior politécnico José Antonio Echevarría, CUJAE.
96. **RODRÍGUEZ Y. y MARRERO N. (2014)** *Hidrología básica superficial*, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería Civil, Centro de Investigaciones Hidráulicas, La Habana, Cuba.
97. **RUIZ, G. y HERRERA, J. (2014)** *Requerimientos de agua en el cultivo del arroz en la UEB "Sierra Maestra", Los Palacios, Pinar del Río*, Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Hidráulico, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.
98. **SÁNCHEZ. G. Y ZAMORA. F. (2017)** Balance de agua por cuencas hidrográficas 2017. II Taller de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas, Congreso Internacional Cubagua 2019, Congreso Internacional Cubagua 2017. La Habana, Cuba.

99. **SÁNCHEZ Y., MÉNDEZ O. y HERNÁNDEZ, A. (2019)** Bases conceptuales para la administración y evaluación del agua en la cuenca subterránea Vento, II Taller de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas, Congreso Internacional Cubagua 2019, La Habana, Cuba.
100. **SÁNCHEZ, G. y ZAMORA, F. (2017)** *Balance de agua por cuencas hidrográficas 2017*, Ponencia en Congreso Internacional CUBAGUA 2017, I Taller de Gestión de Cuencas Hidrográficas. Editora Obras, ISBN: 978-959-247-156-6, La Habana, Cuba.
101. **SERRANO BUSTOS, R. (2014)** *Proyecciones de disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del Maipo, bajo escenarios recientes de cambio climático*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
102. **SIEBER J. y D. PURKEY (2007)** WEAP. Water Evaluation And Planning system User Guide for WEAP21, Stockholm Environment Institute. U.S. Center. 219pp.
103. **SINGH, J., H. V. KNAPP y M. DEMISSIE (2004)** Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey. Available at: www.sws.uiuc.edu/pubdoc/CR/
104. **SUÁREZ A. ET AL. (2016)**. "Introducción al planeamiento y la operación de los recursos hidráulicos", Editorial Félix Varela, en edición.
105. **TAIPE, C. (2012)** Sistema de apoyo a las decisiones de gestión de recursos hídricos mediante el WEAP
106. **TAYLOR, P. (2008)** *Gestión integrada de los recursos hídricos para organizaciones de cuencas fluviales*, Manual de capacitación. Consultado el 15 de abril de 2018. Disponible en: <http://la-wetnet.org/>
107. **TEYLOR, P.; JONKER, L.; DONKOR, E.; GUIO, D.; MBODJI, I.; MLINGI, C.; HASSING J. y LÓPEZ D. (2005)** *Planes de gestión integrada del recurso hídrico*, Manual de capacitación y guía operacional, Red Internacional para el Desarrollo de Capacidades en la Gestión Integrada del Recurso Hídrico, Programa PAWD (Partnerships for African Water Development- Alianza para el desarrollo hídrico africano) Disponible en: http://www.cap-net.org/TMUploadedFiles/FileFor67/IWRM_Plan.doc
108. **TRUJILLO, S., HERRERA, J. y HERVIS, G. (2015)** Potencial de reuso de las aguas de drenaje para el riego del arroz. Caso de estudio "Sierra Maestra", *Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Hidráulico*, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.
109. **UNESCO (2013)** Año Internacional de la cooperación en la esfera del agua., ONU-Agua, El agua y la vida: cooperación en la esfera del agua (pp. 14-19). Lunwerg.

110. **UNFCCC (2012)** Materiales de capacitación del gce sobre evaluaciones de vulnerabilidad y adaptación. Capítulo 6: Recursos hídricos, United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/sites/default/files/ch6_water_resources-handbook.pdf
111. **VAN DER MOLEM, W.H.; MARTÍNEZ, J. y OSCH, W.J. (2007)** *Guidelines and computer programs for the planning and design of land drainage systems*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 62.
112. **VELÁZQUEZ-ZAPATA, JUAN ALBERTO; TROIN, MAGALI; DÁVILA-ORTIZ, RODRIGO (2017)** Evaluación del impacto del cambio climático en los indicadores hidrológicos de una cuenca del centro de México con base en un ensamble de modelos climáticos y en el modelo hidrológico SWAT. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 18 (3):341-351, ISSN 2594-0732.
113. **VILLAZÓN, G., INTURIAS, G., PARDO, P., & ZARATE, O. (2015)**. Análisis de Vulnerabilidad al Cambio Climático en Términos de Oferta Hídrica para el Proyecto Hidroeléctrico San José. In *VIII Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos* (Vol. 22).
114. **WILLIAMS, M. (2014)**. *Scientists urge more frequent updates of 30-year climate baselines to keep pace with rapid climate change*, Press Release No.997, WMO. Consultado el 9 de Julio del 2018. Disponible en: <http://www.wmo.int/>
115. **WIGMOSTA, M.S.; VAIL, L.W.; LETTENMAIER, D.P. (1994)** A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resour. Res.*, 30, 1665–1679.
116. **WEGLARCZYK, S. (1998)** The interdependence and applicability of some statistical quality measures for hydrological models. *Journal of Hydrology*, 206, 98-103.
117. **WORQLUL, A., DILE, Y. T., AYANA, E., JEONG, J., ADEM, A., & GERIK, T. (2018)**. Impact of climate change on streamflow hydrology in headwater catchments of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Water*, 10(2), 120.
118. **WU, F., ZHAN, J., WANG, Z. Y ZHANG, Q. (2015)** Streamflow variation due to glacier melting and climate change in upstream Heihe River Basin, Northwest China, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 79, 11-19.

ANEXOS

ANEXOS

Anexos 1: Información relativa a la caracterización del área de estudio.



Figura A1.2 Imagen del Canal Magistral tramo Bacunagua-Los Palacios. **Fuente:**



Figura A1.3 Derivadora Río San Diego, a la derecha tramo de canal magistral San Diego-Los Palacios y a la derecha tramo San Diego Herradura. **Tomado de:** Google Earth.



Figura A1.4 Imagen del Canal primario de riego P-9, abastece al Distrito arrozero Sierra Maestra.
Fuente:



Figura A1.5 Imagen de estructuras de aprovechamiento de los escurrimientos no regulados vista desde el satélite. **Tomado de:** Google Earth.

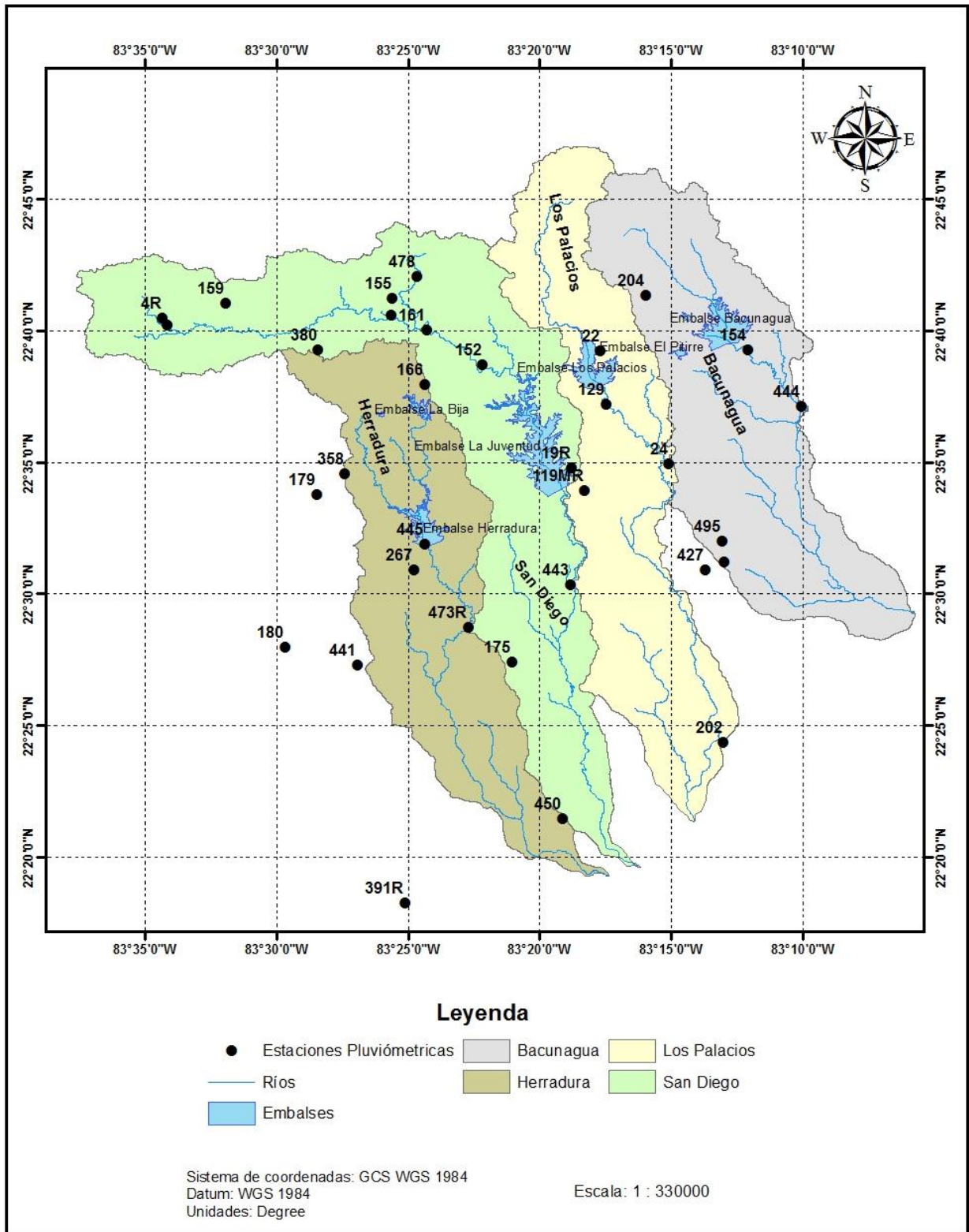


Figura A1.6 Mapa de ubicación de las estaciones pluviométricas y su distribución por cuencas. **Fuente:** Elaborado a partir de la información de **BASAL (2016)**

Tabla A1.1 Información sobre el completamiento y estado de las series de precipitación por estaciones.

Equipo	Pluviómetros	Serie	Estado
4R	San Andrés de Caiguanabo	1960-2014	Regular
408	T.C. San Andrés	1982-2014	Bueno
159	La Pimienta	1963-2014	Regular
380	Loma del Abra	1971-2014	Regular
434RZ	E.H Amistad	1978-2014	Regular
155	Bermejales	1963-2014	Regular
478	Mini Hidroeléctrica Las Catalinas	2004-2014	Mala
161	E. A Los Gavilanes	1962-2014	Bueno
166	La Güira	1961-2014	Regular
152	T.C. S. Diego de los Baños	1963-2014	Bueno
204	Agua Dulce	1965-1999; 2011-2014	Mala
22	Los Cocos	1961-2014	Regular
129	Presa Los Palacios	1963-2014	Bueno
19R	E.E Presa La Juventud	1961-2014	Bueno
119MR	Paso Real de San Diego	1949-2014	Bueno
24	T.C Los Palacios	1961-2014	Regular
495	Canal Los Palacios	2010-2014	Mala
427	T. C La Cubana	1991-2014	Regular
29R	La Cubana	1950-2014	Regular
443	Derivadora San Diego	1994-2014	Regular
445	Presa Herradura	1994-2014	Regular
267	T.C. Herradura	2000-2014	Regular
358	T.C. Ent. de Herradura	1970-2014	Bueno
473R	Derivadora Herradura	2000-2014	Regular
175	Granja Agrícola V.Abajo	1964-2014	Regular
441	Derivadora Santa Clara	No hay datos	-
202	Pta. La Catalina	1964-2014	Regular
450	Boca de San Diego	1998-2014	Mala
391R	El Roblar	No hay datos	-

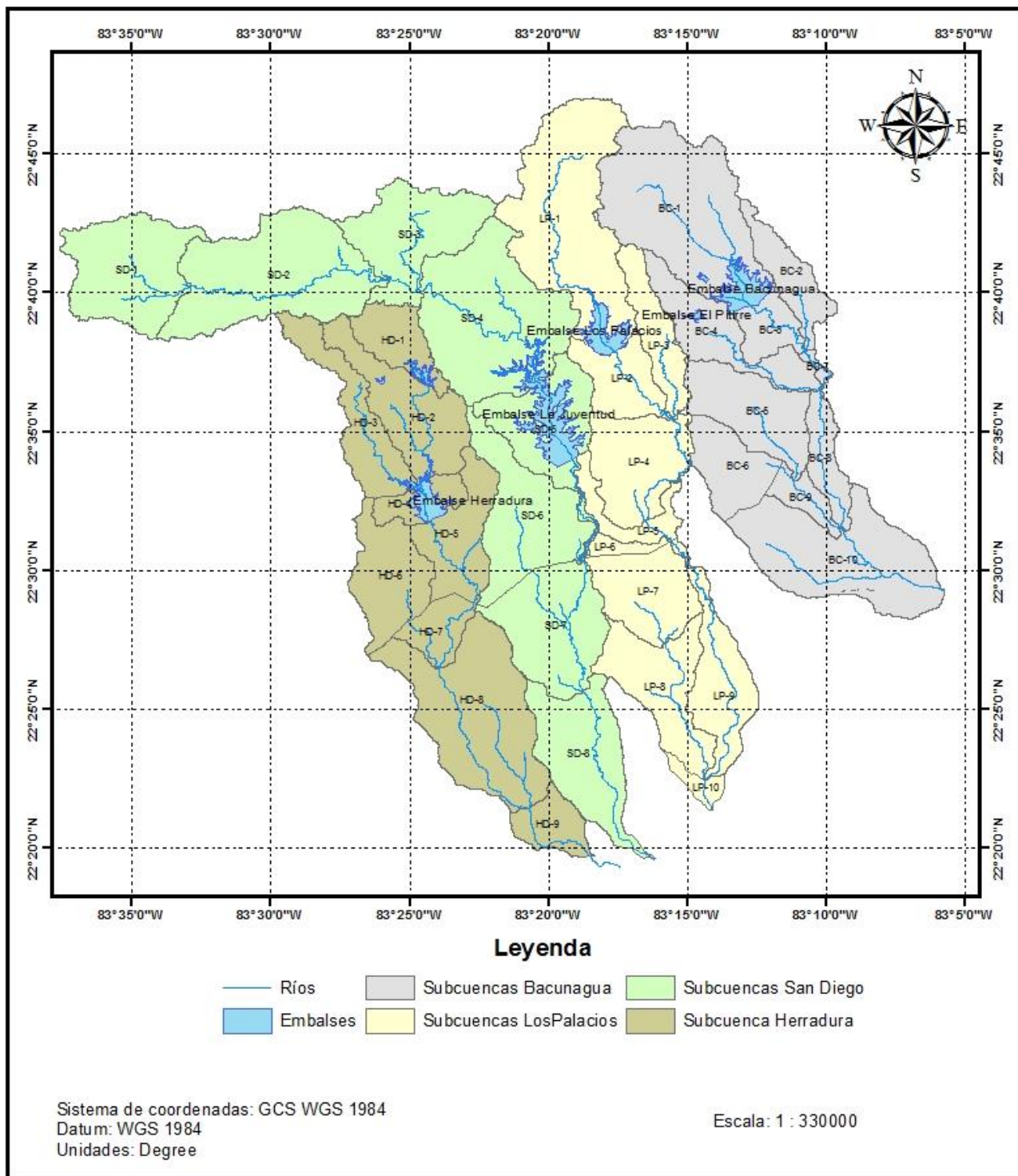


Figura A1.7 Mapa de división por subcuencas y red hidrográfica teniendo en cuenta la afectación al drenaje natural por las obras hidráulicas construidas y puntos de interés.

Fuente: Elaborado propia

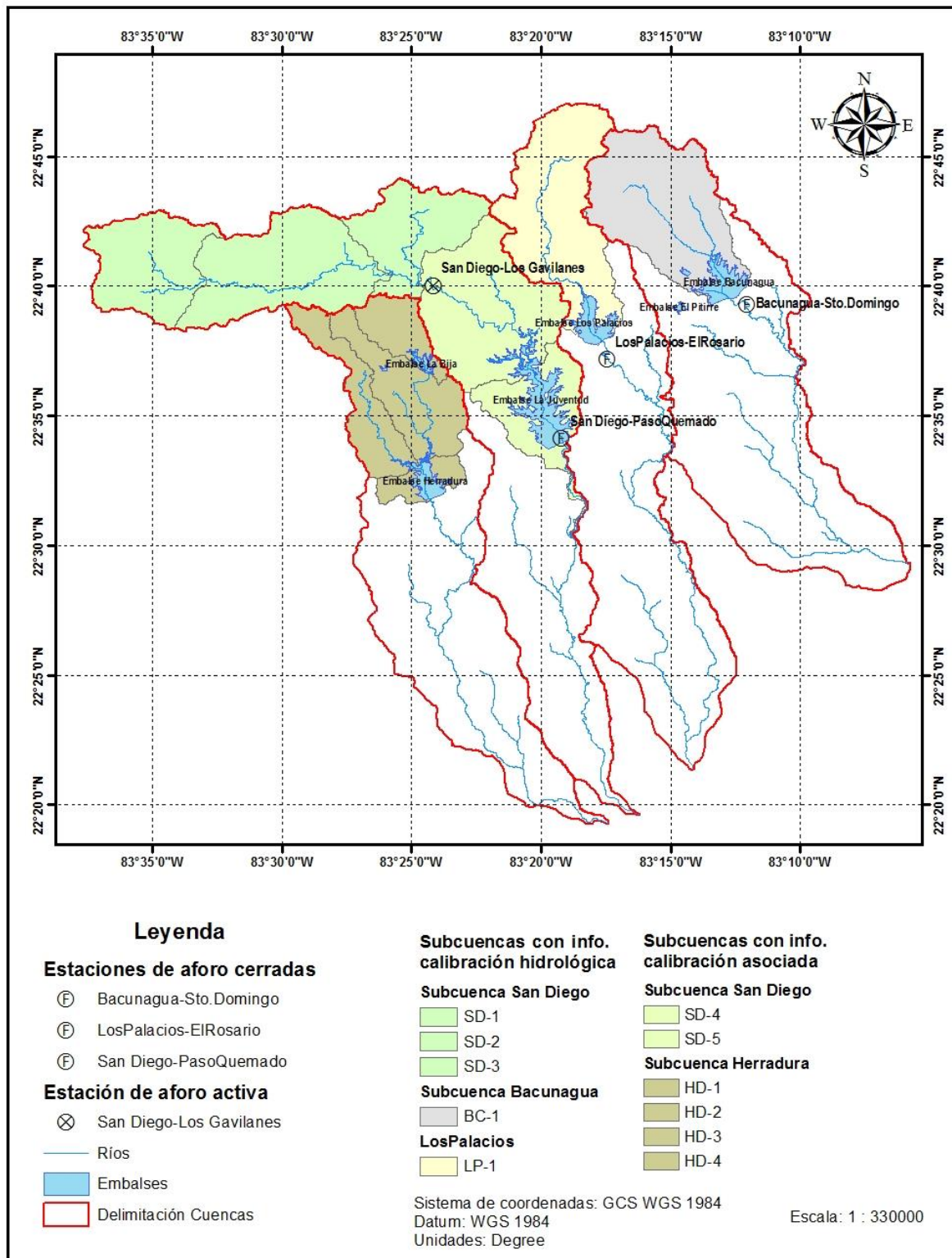
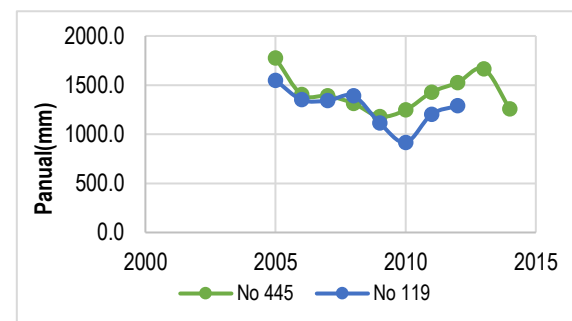
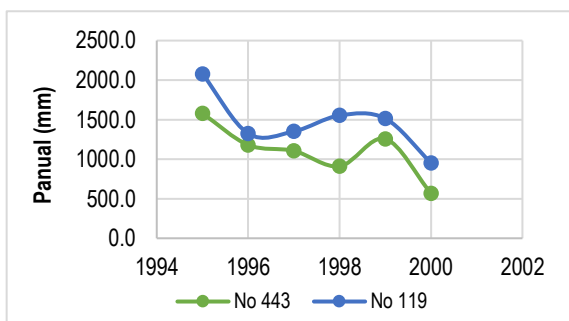
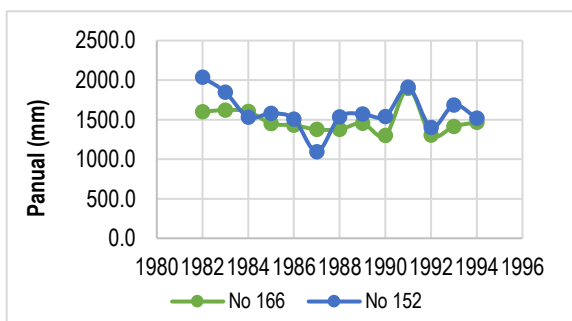
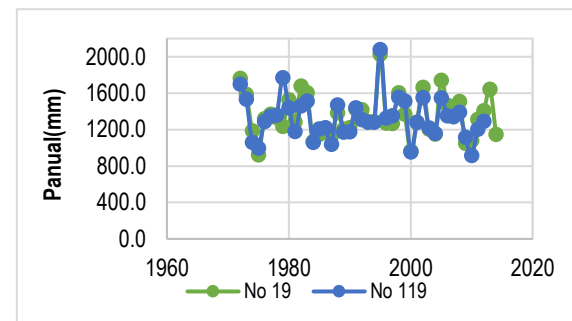
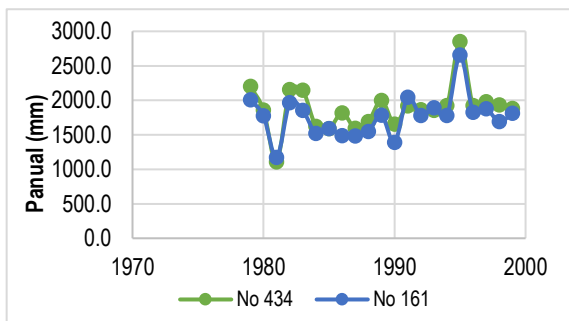
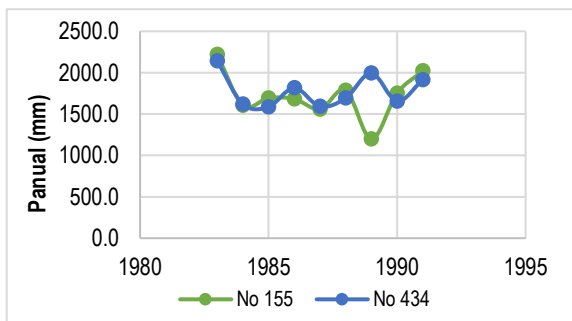
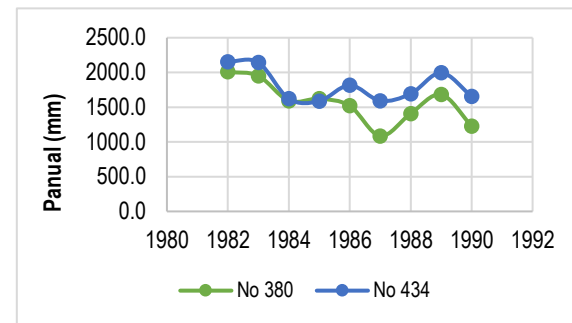
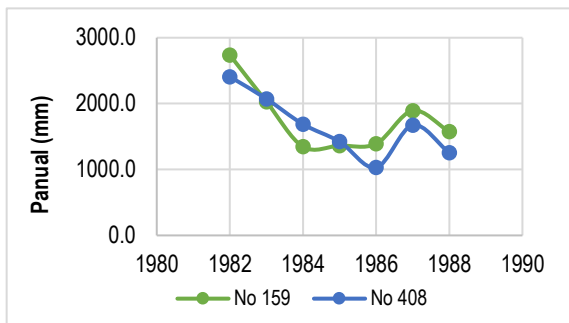
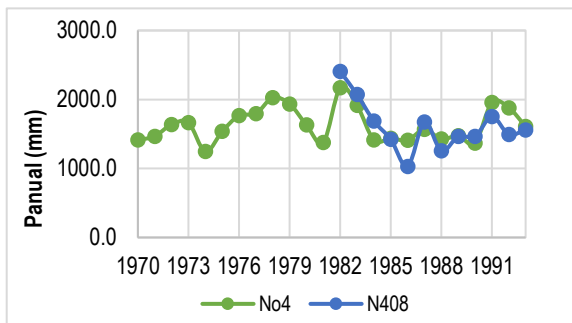


Figura A1.8 Mapa de estaciones de aforo en los ríos, evaluación preliminar de las subcuencas con información para la calibración hidrológica y con información para la calibración asociada.

Fuente: Elaborado propia

Anexos 2: Procesamiento y generación de la información básica para la modelación.



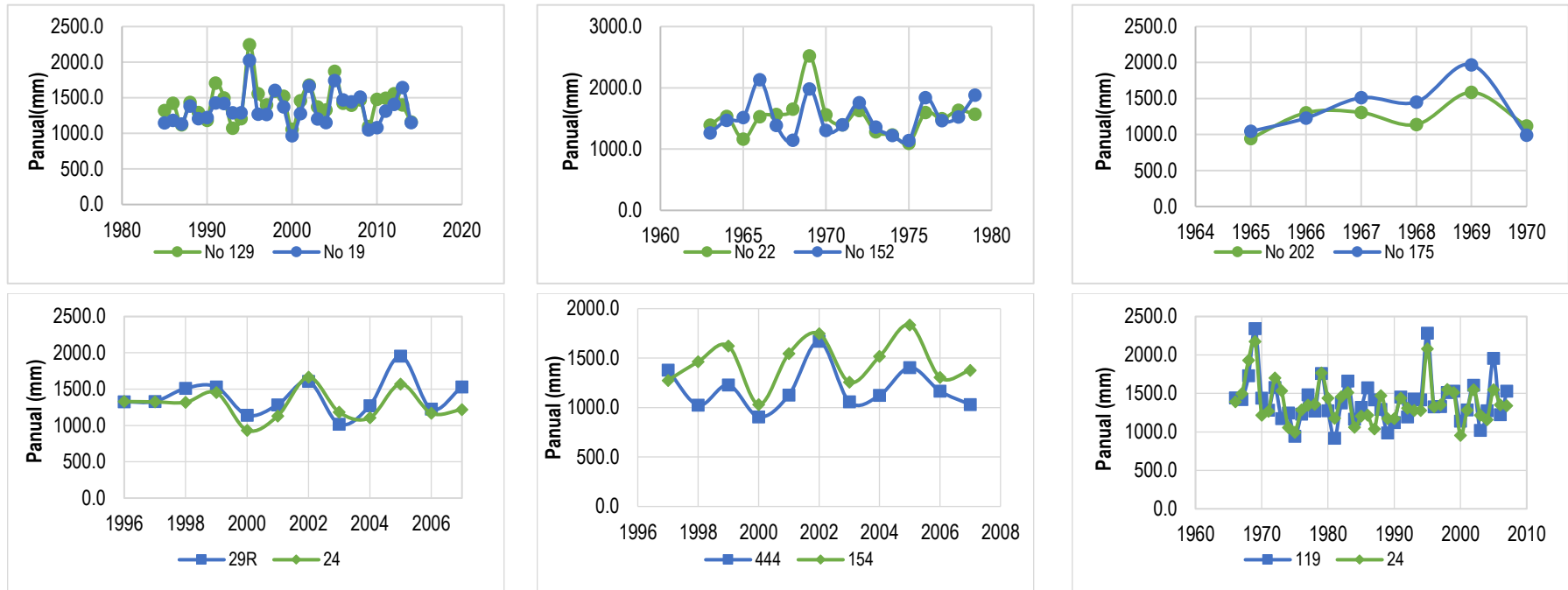
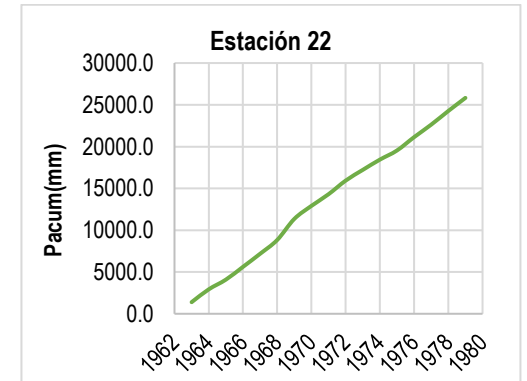
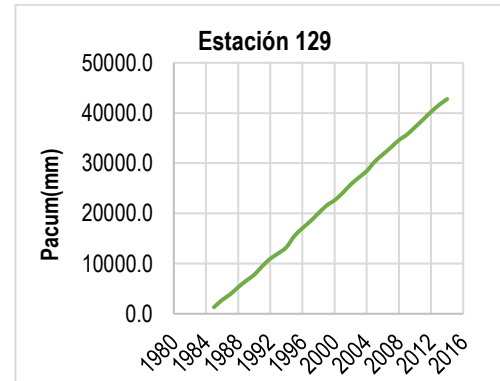
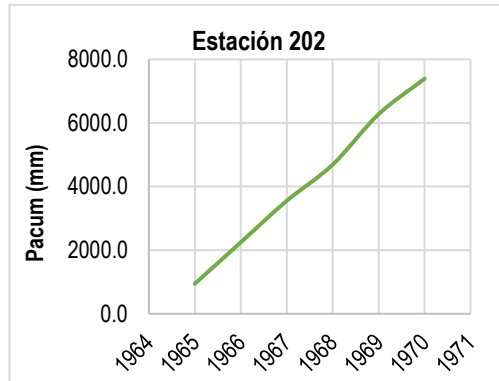
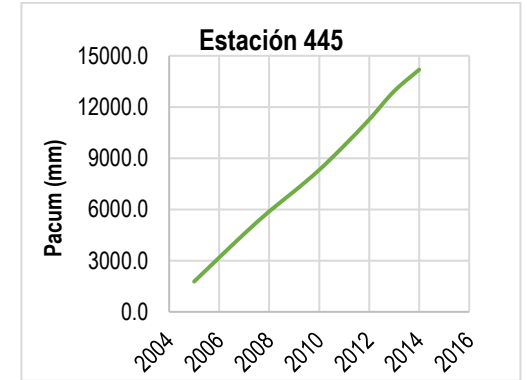
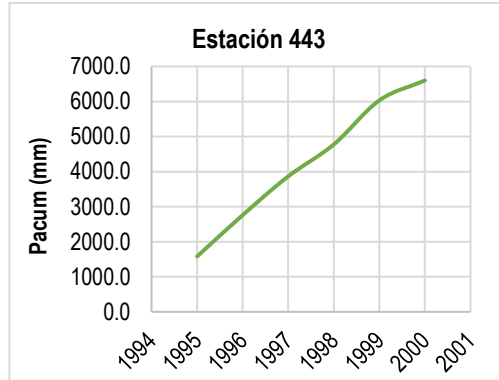
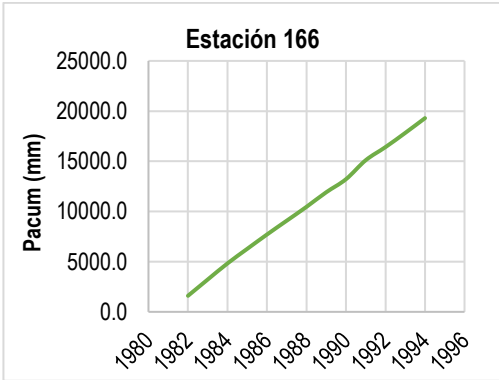
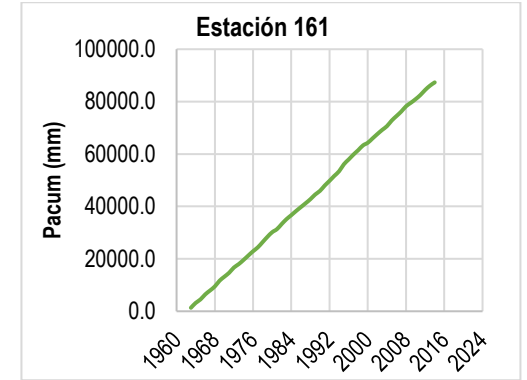
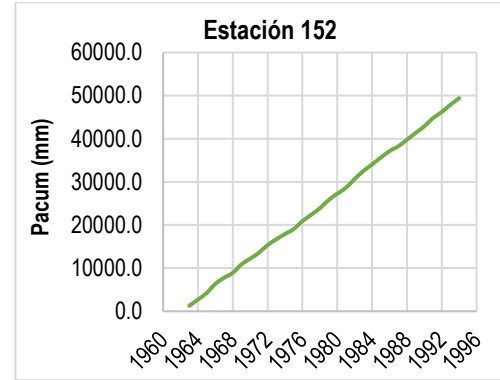
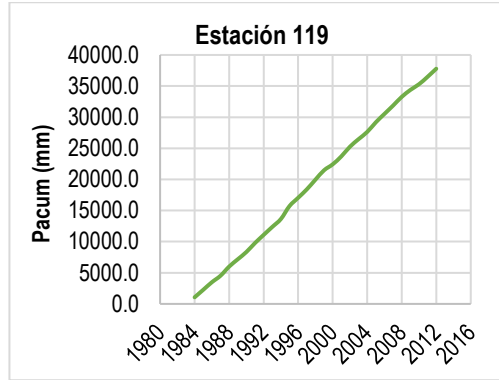
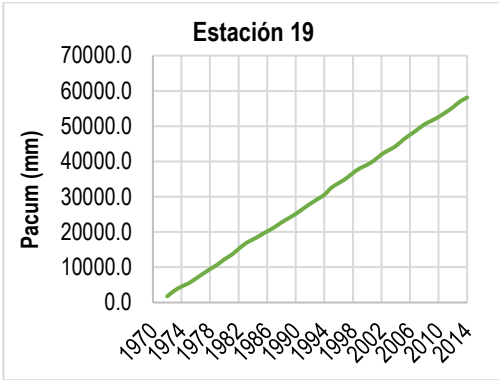


Figura A2.1 Comparación de gráficos cronológicos entre estaciones pluviométricas. En las figuras se muestra la serie de lluvias del pluviómetro considerado confiable (línea azul) y la serie del pluviómetro evaluado (línea verde), los gráficos permiten evaluar a simple vista las diferencias entre las series de precipitaciones evaluando las posibles inconsistencias.



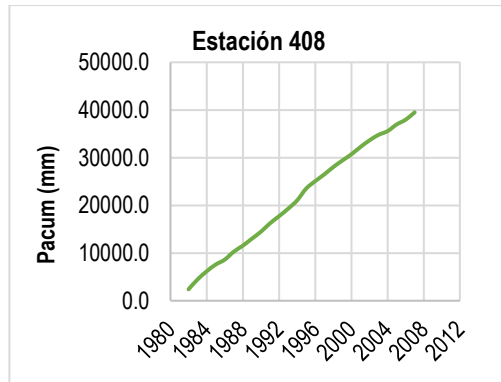
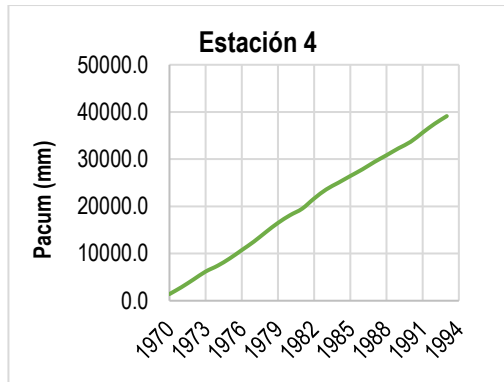
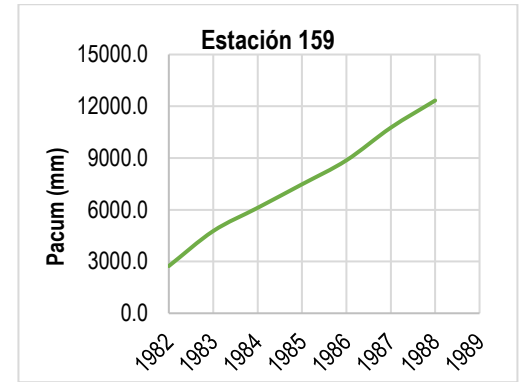
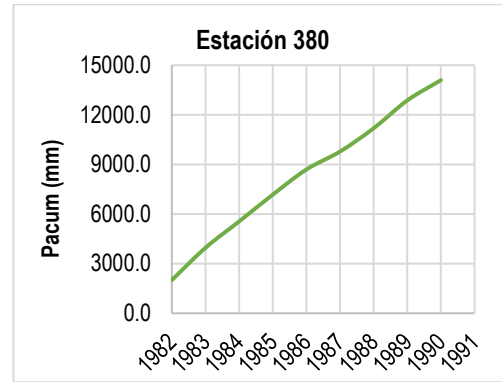
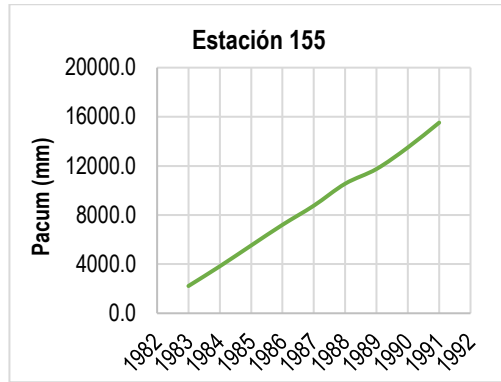
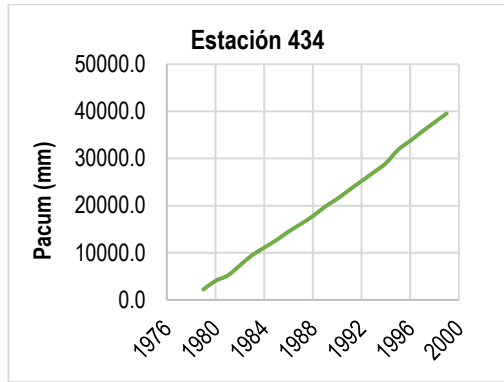


Figura A2.2 Gráficos de Simple Masa de las estaciones series de precipitación por equipo.

Tabla A2.1 Resultados de las pruebas de homogeneidad aplicadas a la serie de precipitaciones por equipo.

Equipo	N (datos)	X media (mm)	D. estándar (mm)	CV	T-Student	Cramer	F-Fisher	Spearman	Helmer	Secuencia s
4	54	1522	335	0.22	si	si	si	si	si	si
159	34	1767	384	0.22	si	si	si	si	si	si
408	33	1480	353	0.24	si	no	si	si	si	si
443	22	1234	330	0.27	si	si	si	si	si	si
434	37	1881	344	0.18	si	si	si	si	si	si
380	42	3663	366	0.10	si	si	si	si	si	si
183	33	1571	307	0.20	si	si	no	si	si	si
161	54	1635	328	0.20	si	si	si	si	si	si
155	50	1840	336	0.18	si	si	no	si	si	si
152	52	1578	291	0.18	si	si	si	si	si	si
119	66	1377	282	0.20	si	si	no	si	si	si
19	54	1383	258	0.19	si	si	si	si	si	si
154	54	1450	281	0.19	si	si	si	si	si	si
204	34	1874	395	0.21	si	si	si	si	si	si
444	26	1366	349	0.26	si	si	si	si	si	si
22	54	1481	376	0.25	si	si	si	si	si	si
24	54	1504	381	0.25	si	si	no	si	si	si
29	62	1257	270	0.21	si	si	si	si	si	si
129	54	1443	332	0.23	si	si	no	si	si	si
202	43	1225	336	0.27	si	si	no	si	si	si
427	62	1264	272	0.22	si	si	si	si	si	si
166	45	1536	285	0.19	si	si	no	si	si	si
175	54	1250	357	0.29	si	si	si	si	si	si
267	54	1337	315	0.24	si	no	si	si	si	si
358	54	1385	315	0.23	si	si	no	si	si	si
495	54	1302	300	0.23	si	si	si	si	si	si
179	54	1518	306	0.20	si	si	si	si	si	si
180	54	1358	311	0.23	si	si	si	si	si	si
441	54	1624	336	0.21	si	no	si	si	si	si

445	54	1412	299	0.21	si	si	si	si	si	si
450	54	1399	272	0.19	no	si	si	si	si	si
473	54	1199	253	0.21	si	si	si	si	si	si

Tabla A2.2 Resultados de las pruebas de homogeneidad de las series de escurrimientos por estaciones.

Estaciones	Los Gavilanes	Santo Domingo	El Rosario
N (datos)	46	17	13
X media (m3/s)	2,78	1,73	2,68
Standard (m3/s)	1,24	0,62	1
CV	0,45	0,36	0,37
t-Student	si	si	si
Cramer	no	si	si
F-Fisher	si	si	si
Spearman	si	si	si
Helmer	si	si	si
Secuencias	si	si	si

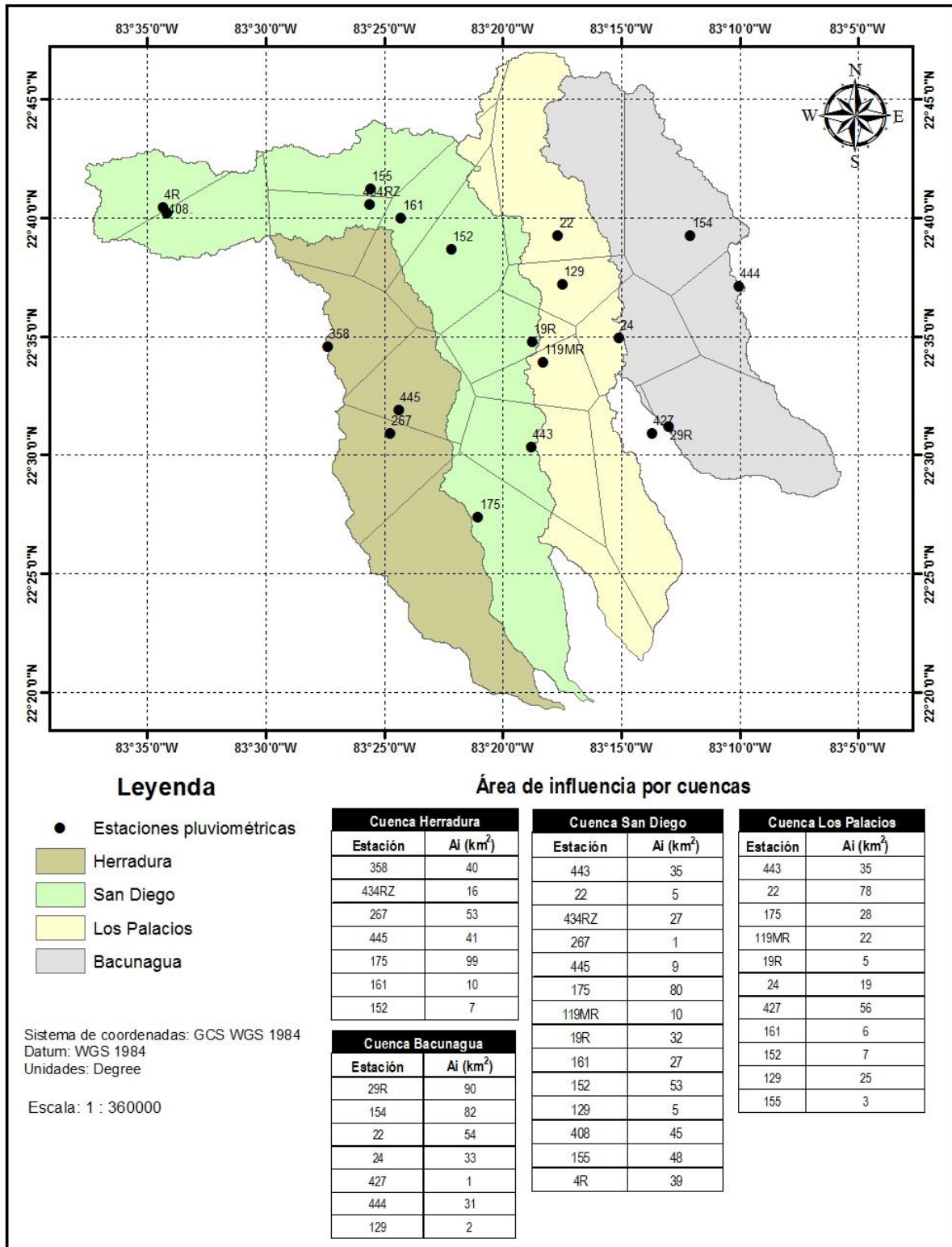


Figura A2.3 Mapa de polígonos de Thiessen para las cuencas estudiadas, con las áreas de influencia para cada una de las estaciones de precipitación.

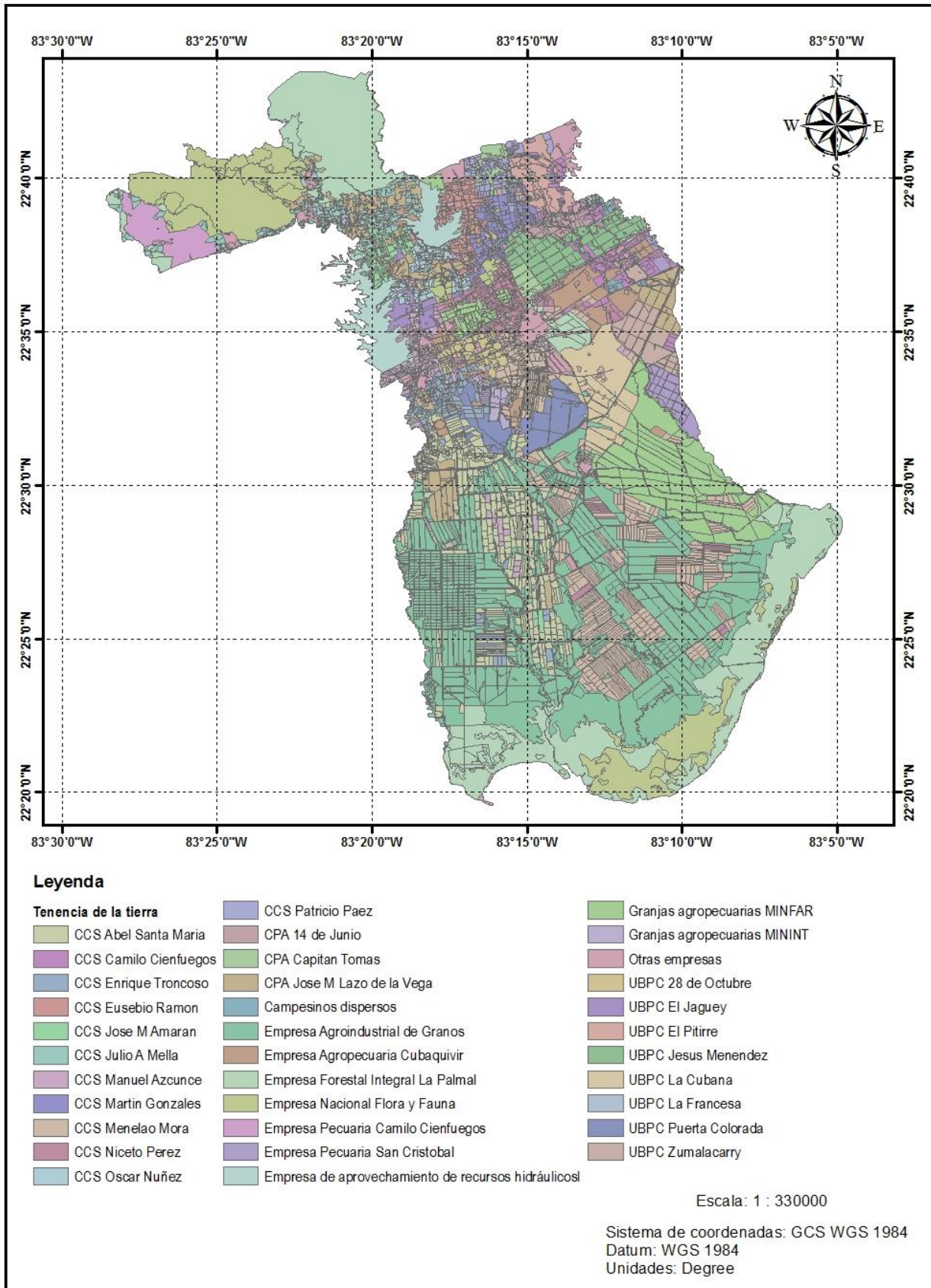


Figura A2.4 Mapa de tenencia de la tierra en el Municipio Los Palacios, empleado para la definición de los usuarios del agua y su distribución espacial dentro del área de estudio.

Fuente: Elaborado a partir de la información de **BASAL (2016)**

HORTALIZAS					Demanda trimestral			
Año	Usuario	Nivel de actividad	Norma neta	Total	I-III	IV-VI	VII-IX	X-XII
2010	CCS Eusebio Ramon	15.00	4100	0.102	0.031	0.020	0.024	0.027
	Gja Militar Integral La Cubana	134.20	4100	0.917	0.550	0.179	0.000	0.188
	UBPC La Cubana	11.00	4300	0.079	0.000	0.000	0.000	0.079
	UEB Agricola Sierra Maestra	33.60	4600	0.258	0.152	0.000	0.000	0.106
2011	CCS Eusebio Ramon	5.00	4600	0.038	0.019	0.000	0.000	0.019
	CCS Menelao Mora	3.00	4300	0.027	0.020	0.007	0.000	0.000
	CCS Menelao Mora	12.90	4600	0.099	0.052	0.036	0.011	0.000
	CCS Menelao Mora	59.40	3700	0.366	0.183	0.091	0.092	0.000
	UBPC La Cubana	11.00	4300	0.079	0.000	0.000	0.000	0.079
	UEB Agricola Sierra Maestra	33.64	4600	0.258	0.152	0.000	0.000	0.106
	UEB Agropecuaria (Cubaquivir)	6.00	4100	0.041	0.000	0.000	0.000	0.041
	Gja. Milit. Intz. Los Palacios	68.00	4100	0.465	0.163	0.116	0.000	0.186
	Gja Agrop. Ramon Lopez Peña	214.70	4200	1.503	0.551	0.551	0.000	0.401

a)

HORTALIZAS		
2010	CCS Eusebio Ramon	Grupo 6
	Gja Militar Integral La Cubana	Grupo 2
	UBPC La Cubana	Grupo 8
	UEB Agricola Sierra Maestra	Grupo 5
2011	CCS Eusebio Ramon	Grupo 5
	CCS Menelao Mora	Grupo 1
	CCS Menelao Mora	Grupo 3
	CCS Menelao Mora	Grupo 3
	UBPC La Cubana	Grupo 8
	UEB Agricola Sierra Maestra	Grupo 5
	UEB Agropecuaria (Cubaquivir)	Grupo 8
	Gja. Milit. Intz. Los Palacios	Grupo 2
	Gja Agrop. Ramon Lopez Peña	Grupo 2

b)

Hortalizas Grupo 2				
Año/Trimestre	I-III	VII-IX	X-XII	X-XII
2010	0.55	0.18	0.00	0.19
2011	0.16	0.12	0.00	0.19
	0.55	0.55	0.00	0.40
Promedio	0.42	0.28	0.00	0.26
Suma	0.96			

c)

Distribución mensual: Hortalizas Grupo 2												
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Suma
0.14	0.14	0.14	0.09	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	0.09	0.09	0.09	0.96

d)

Figura A2.5 Tablas de ejemplo del procesamiento de las bases de datos para e inventario de los cultivos agrícolas bajo riego. **a)** Ejemplo de la organización de la demanda histórica por familia genérica de cultivos, **b)** Ejemplo de la identificación de grupos de demanda para describir los calendarios de siembras, **c)** Ejemplo de ponderación de la demanda trimestral para el grupo de demanda y **d)** Ejemplo de la distribución mensual de la demanda.

Tabla A2.3 Número de la curva en función de la cobertura del suelo y grupo hidrológico.

Grupos	Demanda trimestral			
	I-III	IV-VI	VII-IX	X-XII
Grupo I	X	X		
Grupo II	X	X		X
Grupo III	X	X	X	
Grupo IV	X		X	X
Grupo V	X			X
Grupo VI	X	X	X	X
Grupo VII	X			
Grupo VIII				X
Grupo IX		X	X	X
Grupo X		X	X	
Grupo XI			X	X
Grupo XII		X		
Grupo XIII			X	
Grupo XIV	X		X	
Grupo XV		X		X

Tabla A2.4 Grupo hidrológico de los suelos en función de su clasificación.

Suelos Clasificación genética	Grupo hidrológico
Pardo mullido y litosol éutrico	A/B
Pardo mullido y pardo ócrico	B
Pardo mullido y pardo ócrico	B
Gley nodular ferruginoso petroférico	D
Histosol	D
Vertisol crómico nodular ferruginoso y gleycico	C
Ferralítico rojo compactado y rojo hidratado	B

Tabla A2.5 Número de la curva en función de la cobertura del suelo y grupo hidrológico.

Usos del suelo	A	B	C	D
Arroz	70	80	87	90
Asentamientos	89	92	94	95
Bosques naturales	36	60	73	79
Café	70	80	87	90
Canales	0	0	0	0
Caña de azúcar	70	80	87	90
Cítricos	70	80	87	90
Cultivos varios	70	80	87	90
Deforestada	48	67	77	83
Embalses	0	0	0	0
Ferrocarril	77	86	91	94
Forrajes temporales	48	67	77	83
Frutales	70	80	87	90
Herbazal de ciénaga	0	0	0	0
Hídrica natural	0	0	0	0
Instalaciones educativas	77	86	91	94

Usos del suelo	A	B	C	D
Instalaciones turístico recreativas	77	86	91	94
No aptas	48	67	77	83
Otras instalaciones	77	86	91	94
Otros permanentes	77	86	91	94
Otros temporales	77	86	91	94
Pastos naturales	48	67	77	83
Pastos y forrajes cultivados	39	61	74	80
Plantaciones forestales	48	67	77	83
Plátano	70	80	87	90
Superf. de apoyo a la prod. agropecuaria	77	86	91	94
Superficie de instalaciones industriales	77	86	91	94
Superficie de producción pecuaria	48	67	77	83
Tabaco	70	80	87	90
Tierras ociosas	48	67	77	83
Viales	77	86	91	94

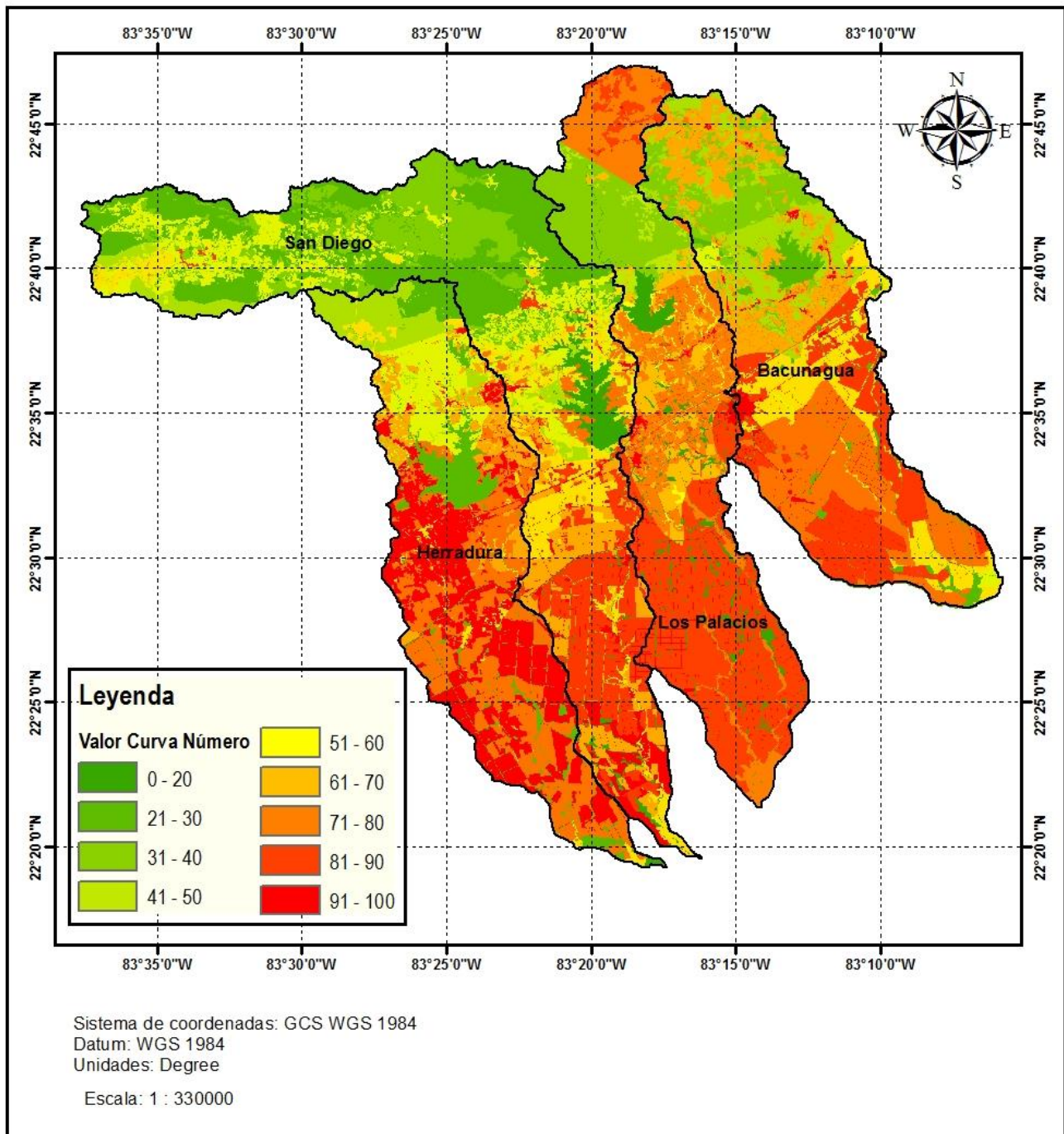


Figura A2.6 Mapa de valores de la curva número en la región de estudio, obtenido a partir del procesamiento en la herramienta HEC-GeoHMS con del tipo de suelo, uso del suelo y las tablas de parámetros del método USDA-SCS.

Anexos 3: Modelación de la gestión de los recursos hídricos. Modelo WEAP.

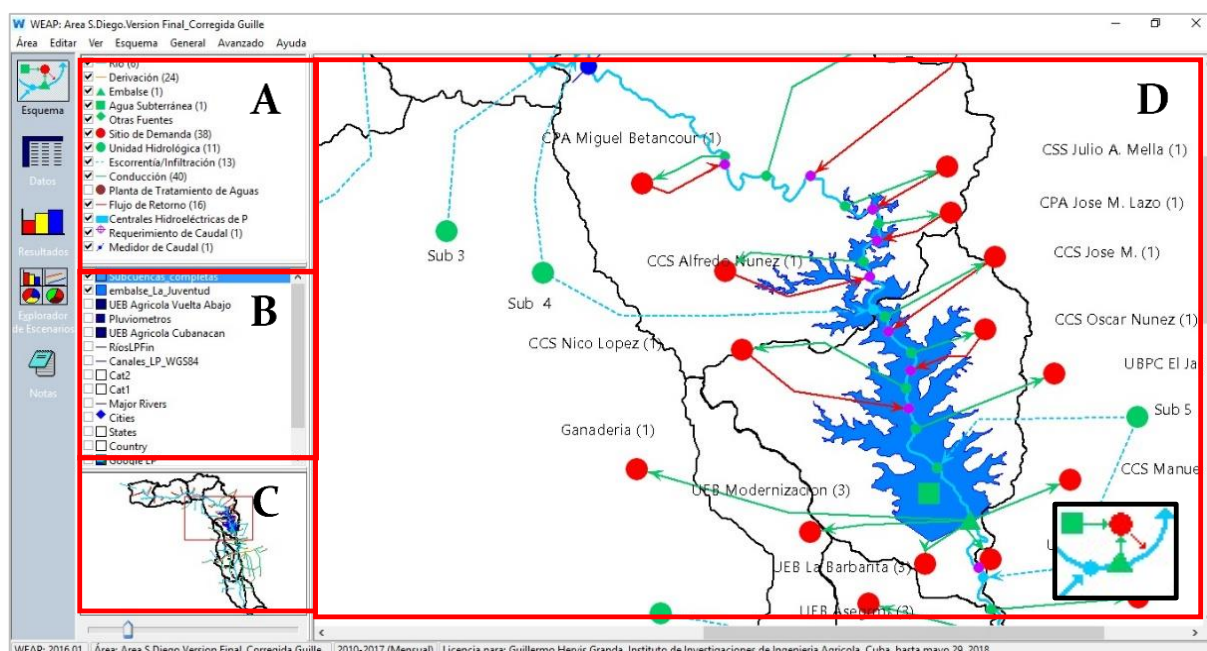
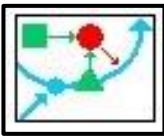
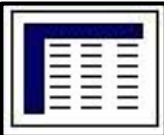


Figura A3.1 Pantalla principal de WEAP, Vista del esquema, **A:** Esquema principal, **B:** Leyenda WEAP, **C:** Mapas de fondo y **D:** Visor detallado del esquema.

Tabla A3.1 Vistas del entorno principal de los modelos WEAP.

Vistas	Nombre	Descripción
	Vista Esquemática	Es el punto de arranque para todas las actividades de WEAP. Aquí se puede crear con solo “arrastrar y dejar caer”, además de visualizar el esquema. En esta vista se encuentran los diferentes elementos del modelo esquemático, que permiten representar la cuenca y su realidad en WEAP.
	Vista de Datos	Es el lugar donde existe un árbol jerárquico en el que se crean y organizan las estructuras de los datos bajo seis categorías: <ol style="list-style-type: none"> <i>Supuestos claves:</i> en este se definen las variables que formarán parte de la calibración o que pueden ser comunes para varios de los elementos del modelo <i>Sitios de Demanda:</i> en este se encuentran los sitios de demanda de la cuenca, con su información. <i>Hidrología:</i> en este se definen aspectos hidrológicos de la modelación <i>Suministro y Recursos:</i> en este se encuentra la información de los elementos del modelo que componen los recursos (Río, embalse, aguas subterráneas, otras fuentes) y las conducciones (Derivaciones, conducciones, escorrentía e infiltración y flujos de retorno).

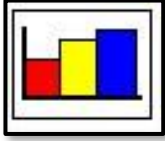
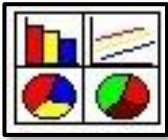

		5. <i>Otras Asunciones</i> : El usuario puede crear sus variables, definir las y referenciarlas en otros puntos de su análisis.
	Resultados	Los resultados pueden verse en forma de gráficos, mapas e informes personalizados. Además, es posible exportar los resultados generados por el modelo en formato de bases de datos y en un formato para ser cargados en Google Earth. En el caso particular de los mapas, es posible revisar el comportamiento de una variable determinada de forma dinámica y ver su comportamiento temporal.
	Explorador de Escenarios	Se ven los gráficos y diagramas de los resultados de la modelación de escenarios. Esta ventana es útil en el proceso de calibración del modelo pues permite de manera dinámica la variación de los parámetros a calibrar.
	Notas	La vista de las Notas es un procesador de texto, una herramienta simple donde se pueden realizar anotaciones de cada uno de los elementos. Sirve para llevar un registro de las decisiones tomadas, simplificaciones y otro tipo de notas.

Tabla A3.2 Descripción de los elementos que emplea el modelo WEAP en la construcción del esquema simplificado de las cuencas.

Grupo de elementos	Elemento del esquema	Descripción
Condiciones hidrológicas	<i>Río</i> (→)	Representa en líneas el cauce del río, este fluye en el sentido de la flecha, es el elemento más importante del esquema en WEAP. En el caso de existir afluentes o tramos de ríos, la unión se hace especificando cual río será el tributario. Sobre el río se colocan o conectan (según sea el caso) embalses, hidroeléctricas, requerimientos de flujo, derivaciones, flujos de retorno y otros. En el modelo el río funciona como el elemento conductor de los caudales.
	<i>Agua subterránea</i> (■)	Representa acuíferos, vistos como fuentes de suministro para sitios de demanda de cualquier tipo. Este elemento puede funcionar como fuente de agua o como receptor de flujos de retorno de procesos productivos.
Infraestructura	<i>Embalse</i> (▲)	Representa un reservorio o embalse para la regulación de los escurrimientos del río.

	<p>Las derivaciones son canalizaciones artificiales, como un canal o tubería. Los nodos de derivación retiran el agua de un río (u otra derivación), hacia el flujo superficial de otra derivación. Una derivación se planea en WEAP como un río separado, el cual desviará sólo tanta agua como necesiten satisfacer los sitios de la demanda conectados a la misma.</p>
<p><i>Derivación</i> (→)</p>	
<p><i>Sitio de Demanda</i> (●)</p>	<p>Se define como un usuario o grupos de usuarios del agua que comparten un sistema de la distribución físico en que todos están dentro de una región definida. Las demandas se definen en función de los usuarios del agua, pudiendo ser, por ejemplo: ciudades, distritos de riego, un usuario individual que maneja una superficie o punto de retiro de agua, por ejemplo, una industria. Los sitios de demanda tienen asociados una prioridad en la gestión, que dependerá de las políticas de asignación de agua de cada una de las zonas donde se implemente el modelo.</p>
<p>Usuarios del agua</p> <p><i>Conducción</i> (→)</p>	<p>Señala la unión entre las distintas fuentes de agua y los sitios de demanda. Es importante conocer las características físicas de las conducciones, pues de éstas dependerá el agua que se puede entregar a través de ellas; por esto deben definirse. Como sistemas de conducción de agua pueden definirse pérdidas, que implica un aumento en la cantidad de agua necesaria para abastecer el sitio de demanda. Si un usuario tiene más de una fuente de suministro puede seleccionarse cuál es la preferencial y/o que por ciento de la demanda suple cada una.</p>
<p><i>Flujo de retorno</i> (→)</p>	<p>Todo sitio de demanda debe tener un punto de descarga de agua residual originada por las actividades de consumo. En el caso de la población este valor puede ser estimado fácilmente, sin embargo, resulta más complejo en distritos agrícolas por su naturaleza multifactorial.</p>

Requerimiento de flujo (⊕)

Es un punto que se coloca sobre el cauce de un río y exige que pase un gasto determinado por ese punto, por ejemplo, puede ser para garantizar el gasto ecológico en un río. Funciona como un usuario más dentro de la gestión, por esta razón también deberá considerarse su prioridad, ésta puede variar dependiendo de las regulaciones o políticas ambientales vigentes.

Tabla A3.3 Resumen de datos requeridos para construir un modelo en WEAP, organizado en función del elemento del esquema.

Elemento del esquema	Datos de entrada	UM	Observaciones
Tramos de río	Caudal cabecera	$m^3 s^{-1}$	Caudal promedio mensual afluente en la cabecera del río
	Capacidad de almacenamiento	m^3	-
Embalses	Almacenamiento inicial	m^3	Cantidad de agua almacenada en el embalse al inicio de la simulación
	Curva elevación-volumen	-	Relación entre el volumen y elevación del agua en el embalse
	Pérdidas por evaporación	mm	Tasa mensual de evaporación en el embalse
	Entrega por la obra de toma	$m^3 s^{-1}$	Flujo máximo saliente del embalse dada las restricciones hidráulicas
	Pérdidas por infiltración	m^3	Infiltración desde el embalse hacia el agua subterránea
	Volumen histórico observado	m^3	-
	Línea superior de entrega garantizada (LSEG)	m^3	Volumen máximo mensual permitiendo el control de inundaciones
	Volumen muerto	m^3	Volumen de agua no disponible para la asignación
	Línea inferior de entrega garantizada (LSEI)	m^3	Por debajo de este nivel las entregas son restringidas
	Coefficiente de amortiguamiento	0-1	Porcentaje del agua contenida por debajo de la LIEG disponible para la asignación

Derivaciones	Máxima caudal derivable	$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	Valor máximo caudal que se puede derivar en función de las características físicas del sistema de conducción
	Evaporación	%	% del flujo que circula por la derivación
Sitios de demanda	Demanda mensual	m^3	-
	Consumo	%	% de caudal afluyente consumido, determina el caudal de retorno al sistema
	Tasa de pérdida	%	Pérdidas dentro del sistema que condicionan el aumento del requerimiento de agua (pérdida que se producen en el sistema de riego)
	Tasa de reuso	%	Reuso de agua dentro del sitio de demanda, resultando en una disminución del requerimiento de agua
	Prioridad	1-99	Prioridad de asignación que dependerá de las políticas de asignación de agua vigentes
Conducciones	Máximo caudal	$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	Caudal máximo de circulación en función de las características físicas del sistema de conducción
	Suministro de preferencia	1-99	Fuente de preferencia en la entrega cuando un usuario tiene asociada más de una fuente de suministro
	Índice de pérdidas	%	Pérdidas por evaporación o fugas como porcentaje del flujo suministrado al usuario

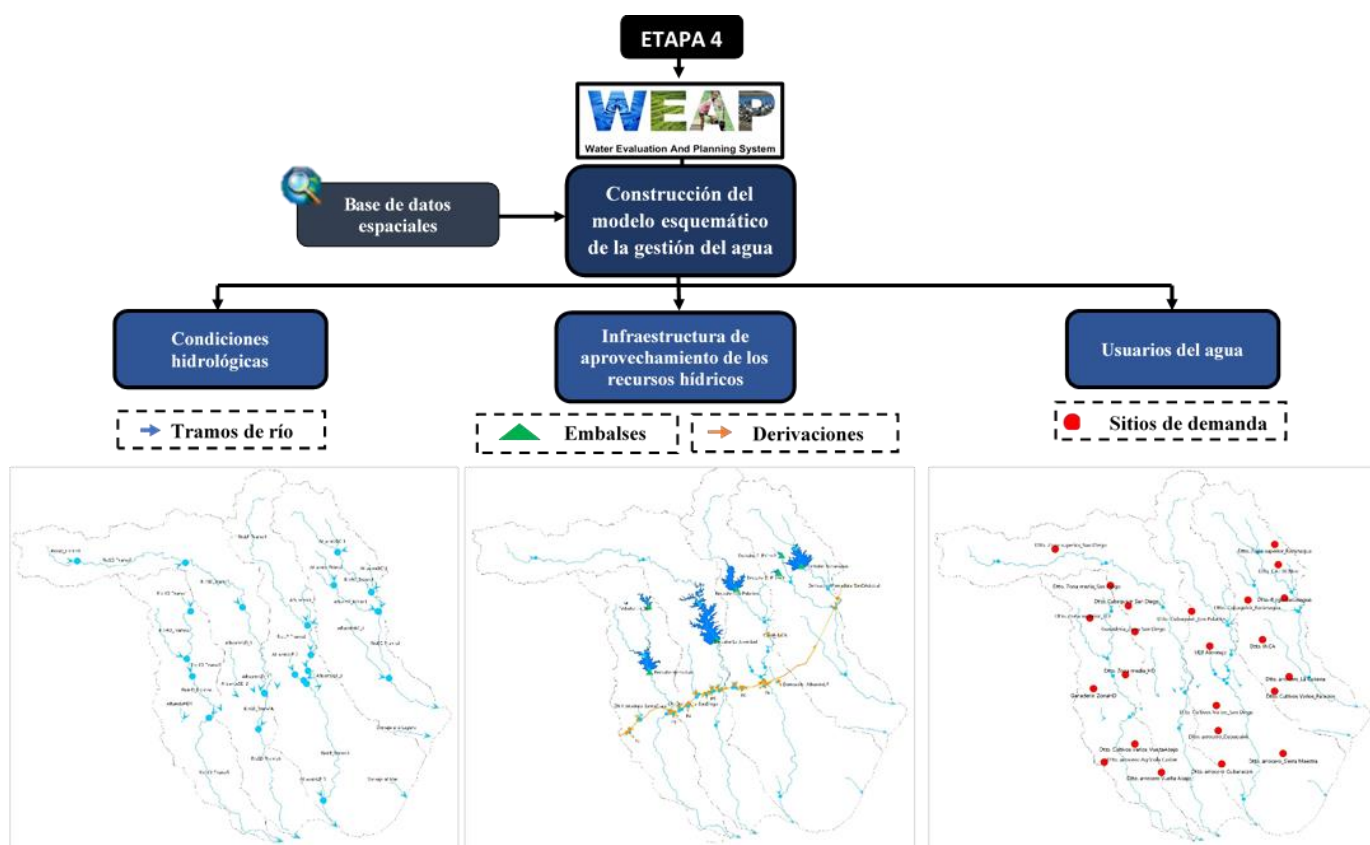


Figura A3.2 Flujo de procesos en la construcción del modelo esquemático en WEAP.

Tabla A3.3 Usuarios del agua, definidos como sitios de demanda en WEAP, estos se encuentran agrupados considerando su ubicación en una región definida y un sistema de la distribución de agua compartido

Cuenca	Sitio de demanda	Unidades que agrupa
	Dtto. Superior HD	CCS Níco López UEB Corralito UBPC La Güira Empresa Pec. Camilos Cienfuegos Empresa Citrícola Enrique Troncoso
Herradura	Dtto. Medio HD	CCS Orlando Herrera CCS Pelayo Cuervo CCS Rafael Ferro CCS Pedro Quintana CCS Alfredo Núñez CCS José Hernández León CCS Abilio Castro CCS Raúl Maqueira CCS Fructuoso Rodríguez Granja Urbana Unidad Territorial Oca PR UEB Loma de Candelaria UEB Baró CPA Alberto Delgado

	Dtto. Arroceros Agrícola Caribe	Área arrocera de la empresa UEB Agrícola Caribe
	Dtto. Arroceros Caribe Caribe	Área arrocera de la empresa UEB Caribe Caribe
	Dtto. Arroceros Vuelta Abajo	Área arrocera de la empresa UEB Agrícola Caribe
San Diego	Dtto. Zona superior SD	CCS Jesús Suárez CSS Ignacio Agramontes CSS Francisco Cruz CCS José A. Echeverría CCS Jesús Martínez CPA José Martí UEB Café
	Dtto. Zona media SD	CCS Alfredo Núñez CCS Níco López CPA Miguel A. Betancourt UEB Barbarita
	Dtto Cultivos Varios Vuelta Abajo	Áreas de cultivos varios de las empresas: UEB Agrícola Vuelta Abajo CCS Rafael Ferro UEB Algodón
	UEB Alevinaje	UEB Alevinaje
	Dtto. Cubaquivir SD	CCS Enrique Troncoso CCS Julio Antonio Mella CCS Oscar Núñez CCS José M. Amarán CCS Manuel Ascunce. UBPC El Jaguey EUB Aseguramiento UEB Algodón
	Dtto. Arroceros Cubaquivir	Áreas arroceras de las empresas: CCS Abel Santamaría CCS Manuel Ascunce CCS Enrique Troncoso CCS Menelao Mora
	Dtto. Arroceros Cubanacán	
Los Palacios	Dtto Arroceros Sierra Maestra	

	CCS Niceto Pérez CCS Eusebio Ramón CSS Menelao Mora CSS Abel Santamaría UBPC La cubana UBPC Puerta Colorada UBPC Granja Urbana Cubaquivir Los Palacios UBPC 28 Octubre
Dtto. Cubaquivir Los Palacios	
Cultivos varios Los Palacios	La cubana (cultivos varios) Sierra Maestra (cultivos varios)
Dtto. INCA	
Dtto_ Zona superior Bacnagua	CSS Antonio Guiteras Empresa Agropeciria San Cristobal CSS Irma Echeverría
Dtto CAI 30Noviembre	UBPC Jesús Menéndez UBPC Sumalacarry CPA 14 de Junio CPA Jose M. Lazo Vega
Dtto Cubaquivir_Bacunagua	UEB Arturo Pérez CPA Capitán Tomás UBCP El pitirre CSS Martín Glez CSS Patricio Páez CSS Camilo Cienfuegos
Bacunagua	
Dtto Riego_Bacunagua	UE La bayamesa UEB Corralito UBPC La sombrilla Pedro Casañas UEB Comandate Pinares Granja Ramón López Peña Empresa agropecuaria José Martí CSS Manuel Cordero UBPC Yucayo UEB Servicios Técnicos

Anexo 4: Información complementaria sobre la estimación de la disponibilidad del agua para los escenarios de cambio climático

Tabla A4.1 Precipitación media mensual para el periodo climático base (1981-2010) empleada para generar la precipitación futura en la región.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1981	30,1	58,7	33,9	28,3	120,2	252,1	137,7	192,2	206,7	68,8	36,9	60,7
1982	30,7	37,7	67,4	128,8	245,8	630,3	117,3	133,3	188,4	163,4	69,8	12,8
1983	227,4	230,1	178,4	62,3	25,6	231,7	120,0	191,4	188,7	188,6	26,2	60,7
1984	21,2	76,8	61,1	20,1	115,9	173,1	206,1	163,7	280,7	76,1	128,0	0,5
1985	38,0	26,3	50,9	116,5	193,6	121,3	138,2	261,1	199,6	59,5	97,9	33,4
1986	31,4	87,5	35,5	34,9	141,9	230,9	129,7	185,3	151,0	107,0	29,4	144,7
1987	16,7	47,4	184,5	27,4	129,6	172,3	119,1	108,8	181,4	125,9	45,8	60,8
1988	60,7	31,2	31,7	9,2	253,1	199,5	171,6	142,7	310,3	36,8	155,3	7,6
1989	12,2	49,7	66,7	116,6	112,1	118,4	173,5	162,8	211,1	131,8	62,0	93,3
1990	29,3	75,9	13,9	143,6	230,0	123,2	125,7	183,9	247,9	32,5	99,5	61,2
1991	41,6	57,6	59,5	60,4	357,2	211,7	194,0	251,3	192,2	235,4	34,8	0,7
1992	25,7	72,3	24,2	144,2	85,6	514,5	117,8	221,8	149,0	69,1	89,6	6,8
1993	258,3	25,0	104,9	112,1	196,1	101,2	95,6	142,1	141,9	252,9	25,2	27,2
1994	31,9	72,3	79,5	80,3	193,8	141,8	150,5	224,7	311,4	110,2	61,1	22,8
1995	200,7	28,7	44,8	60,0	109,4	559,4	190,9	289,9	319,3	290,6	38,9	69,7
1996	107,0	15,2	26,7	115,2	232,7	228,3	168,3	128,1	158,1	160,9	68,6	8,2
1997	112,5	50,0	62,1	92,4	103,2	344,2	169,3	149,4	301,4	41,0	63,7	81,8
1998	73,4	50,0	65,6	11,4	157,7	104,1	160,9	272,4	437,4	93,9	74,2	20,1
1999	31,5	21,9	14,9	13,8	137,8	218,6	106,5	238,7	291,9	231,1	108,8	3,3
2000	23,6	11,5	32,7	41,5	75,3	71,2	218,3	166,0	211,3	96,1	3,5	89,9
2001	33,8	39,6	12,8	71,5	244,1	105,8	129,4	135,0	470,6	100,8	29,9	87,9
2002	16,1	72,2	23,8	47,9	200,6	217,5	132,0	169,7	401,2	174,7	60,8	92,1
2003	14,1	42,2	97,2	102,6	135,2	264,7	90,0	155,4	185,4	30,4	38,4	33,6
2004	72,2	85,0	23,0	30,2	31,2	148,0	243,7	216,4	316,5	137,6	16,8	26,4
2005	32,8	29,5	144,4	47,1	87,0	407,0	237,4	345,1	258,0	304,4	50,2	18,9

2006	18,1	62,7	26,3	42,0	110,1	577,6	159,5	154,5	171,2	117,2	45,8	54,0
2007	17,5	47,5	44,3	52,7	195,6	356,5	145,8	274,2	232,2	221,6	24,7	41,7
2008	23,0	47,9	61,4	123,4	36,4	159,4	221,0	286,2	515,6	174,0	18,5	14,2
2009	59,7	24,2	69,7	11,9	154,6	242,8	79,9	132,1	202,9	68,7	99,4	56,7
2010	50,5	125,8	26,2	95,6	126,1	231,3	155,8	144,7	198,3	85,1	55,8	16,8
promedio	58,1	56,8	58,9	68,1	151,3	248,6	153,5	194,1	254,4	132,9	58,7	43,6

Tabla A4.2 Anomalías promedios mensuales para la región de estudio para los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 W/m² para los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR en los períodos 2015-2039 y 2045-2065.

Modelo de CC	Escenario RCP 4.5						Escenario RCP 8.5					
	<i>HADGEM_2</i>		<i>GFDL_CM3</i>		<i>MPI_ESM_LR</i>		<i>HADGEM_2</i>		<i>GFDL_CM3</i>		<i>MPI_ESM_LR</i>	
Mes	2015-2039	2045-2065	2015-2039	2045-2065	2015-2039	2045-2065	2015-2039	2045-2065	2015-2039	2045-2065	2015-2039	2045-2065
Ene	30,12	1,18	-13,51	-12,61	-6,32	3,73	33,92	3,95	11,74	16,27	8,97	-18,16
Feb	0,77	-8,05	-13,63	-37,85	-16,15	-26,06	-17,99	-1,51	-27,63	-12,84	-16,41	-8,13
Mar	8,82	-14,78	-6,71	-0,75	-13,35	0,77	5,74	-4,46	0,23	-8,16	-5,25	-11,82
Abr	-6,01	-1,67	3,3	12,89	-1,46	-8,94	18,39	-4,21	5,81	6,45	-10,5	-16,14
May	-2,99	-7,78	2	3,98	-1,26	-6,36	-5,68	0	1	2,77	-8,81	-7,47
Jun	2,41	3,2	1,01	0	1,57	1,25	-0,34	1,95	-1	-2,23	-3,73	1,79
Jul	-3,73	-1,14	-1	-6,87	-8,23	-14,42	1,16	-8,47	-5,7	-7,43	-7,72	-10,34
Ago	-5,56	-6,23	0	-2,46	-4,24	-10,97	-3,55	-9,95	-1,23	-3,72	-9,42	-12,09
Sep	-1	-3,98	-2,64	2,14	-4,37	-9,83	-2,96	-4,87	-2,7	0,57	-1,67	-24,01
Oct	5,57	-11,07	15,8	8,56	31,23	17,6	-6,03	-12,78	7,53	24,95	16,05	13,58
Nov	13,37	19,53	18,86	45,96	19,65	2,51	12,35	32,78	16,26	34,12	65,28	80,04
Dic	-7,13	13,53	-22,83	-0,65	-16,97	-3,48	12,12	15,28	-5	31,16	-23,87	19,84

Cueca Los Palacios

Tabla A4.3 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Los Palacios, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 4.5 W/m² para el periodo 2016-2050.

Mes	Volúmenes considerando modelos de CC (m ³)				Volumen medio histórico (m ³)	Diferencias de volúmenes entre periodos (m ³)
	HADGEM_2	GFDL_CM3	MPI_ESM_LR	Promedio		
Ene	847415,9	194189,0	309248,0	450284,3	847415,9	-397131,6
Feb	430891,9	169825,4	179355,9	260024,4	430891,9	-170867,5
Mar	509245,9	343117,7	268555,8	373639,8	509245,9	-135606,1
Abr	524039,1	750263,2	579952,6	618085,0	524039,1	94045,9
May	4622421,4	5230884,9	4789170,2	4880825,5	4622421,4	258404,1
Jun	13471752,1	13104371,7	13249847,5	13275323,7	13471752,1	-196428,4
Jul	4796201,6	4939376,7	4212261,6	4649280,0	4796201,6	-146921,6
Ago	7319027,9	8084800,7	7367766,6	7590531,7	7319027,9	271503,8
Sep	12062459,2	11945896,2	11314310,2	11774221,9	12062459,2	-288237,4
Oct	3937506,0	4912813,5	6214382,7	5021567,4	3937506,0	1084061,4
Nov	660444,4	856200,9	702329,0	739658,1	660444,4	79213,7
Dic	73053,9	10853,4	22478,1	35461,8	73053,9	-37592,1

Tabla A4.4 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Los Palacios, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 8.5 W/m² para el periodo 2016-2050.

Mes	Volúmenes considerando modelos de CC (m ³)				Volumen medio histórico (m ³)	Diferencias de volúmenes entre periodos (m ³)
	HADGEM_2	GFDL_CM3	MPI_ESM_LR	Promedio		
Ene	927802,475	594429,195	443930,095	655387,255	847415,894	-192028,63
Feb	233373,613	117564,515	229000,728	193312,952	430891,876	-237578,9
Mar	500611,624	410169,739	328056,307	412945,89	509245,93	-96300,03
Abr	1001729,31	776063,729	404704,262	727499,099	524039,076	203460,02
May	4519586,97	5125563,48	4149794,74	4598315,06	4622421,42	-24106,35
Jun	12984854	12743892,4	12336781,9	12688509,4	13471752,1	-783242,66
Jul	5199222,33	4537948,72	4264776,27	4667315,78	4796201,65	-128885,87
Ago	7547313,5	7929077,05	6745505,49	7407298,68	7319027,94	88270,745
Sep	11715713,2	11928974,2	11716590,8	11787092,7	12062459,2	-275366,48
Oct	3150034,53	4328406,6	5038382,15	4172274,43	3937505,99	234768,43
Nov	648205,094	805038,335	1658543,59	1037262,34	660444,447	376817,893
Dic	186626,519	74080,8718	9706,3099	90137,9004	73053,8709	17084,02

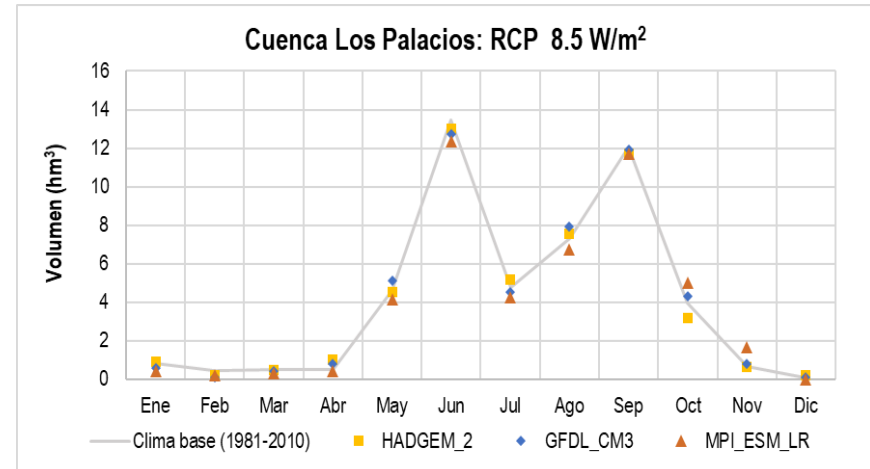
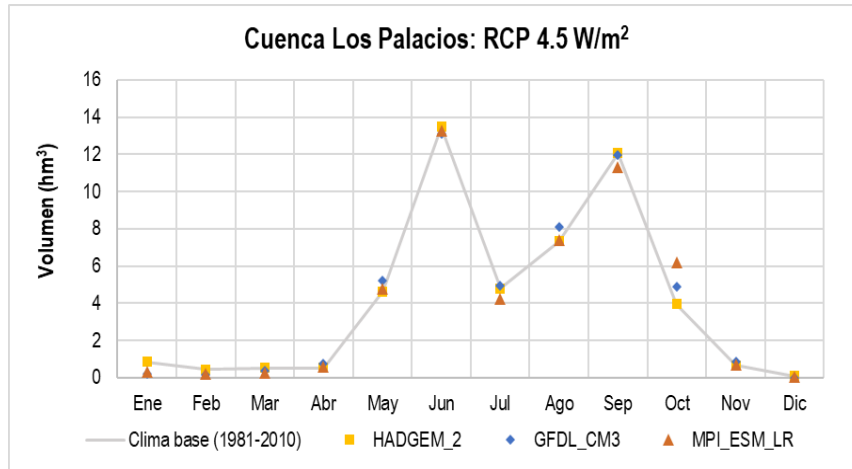


Figura A4.1 Comparación entre el volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Los Palacios considerando el comportamiento medio y los resultados obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR: **a)** escenario RCP 4.5 W/m² y **b)** escenario RCP 8.5 W/m².

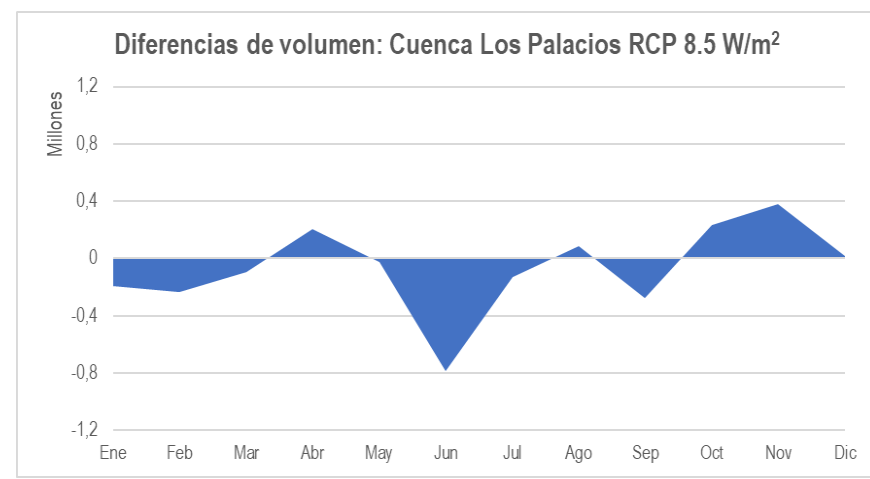
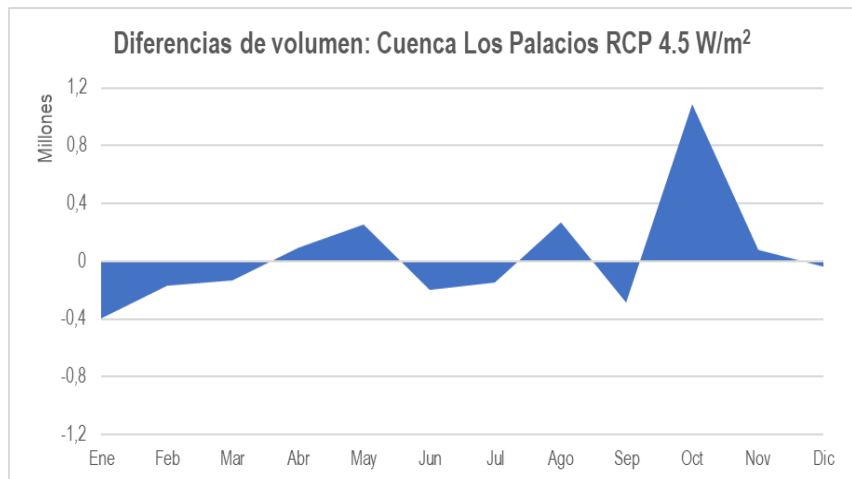


Figura A4.2 Diferencia entre el volumen de escurrimiento regional en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base (1981-2010) para la cuenca Los Palacios: **a)** escenario RCP 4.5 W/m² y **b)** escenario RCP 8.5 W/m².

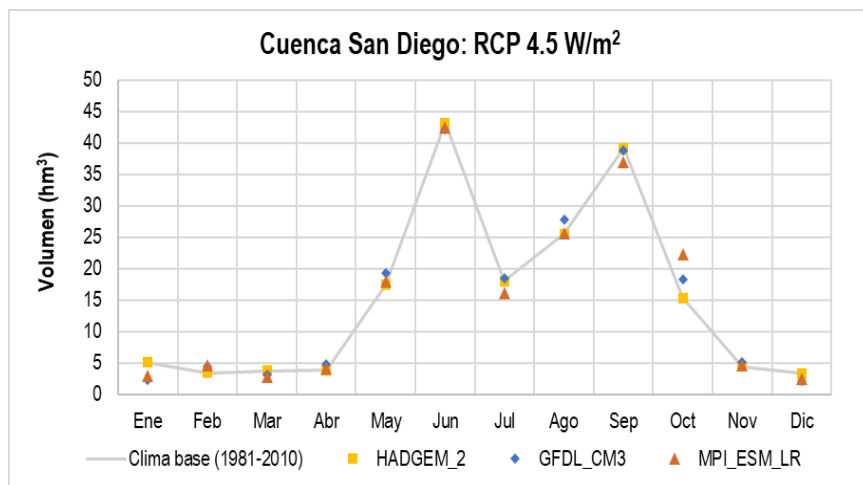
Cueca San Diego

Tabla A4.5 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca San Diego, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 4.5 W/m² para el periodo 2016-2050.

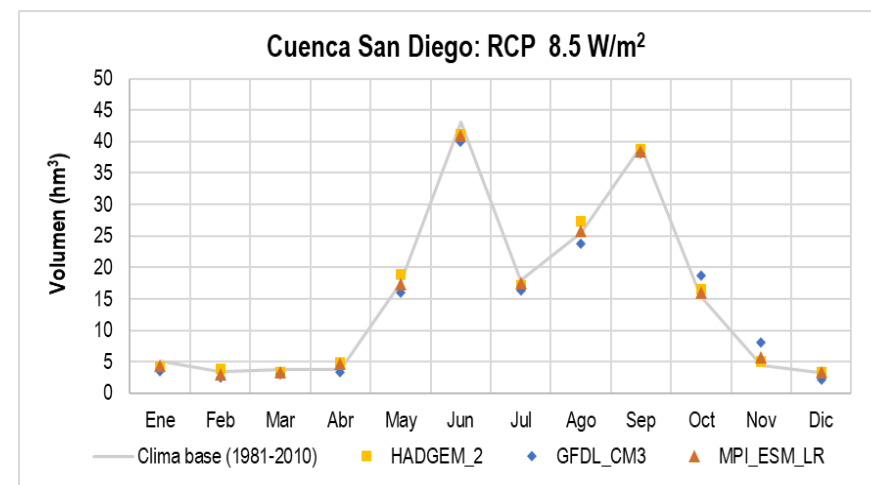
Mes	Volúmenes considerando modelos de CC (m ³)				Volumen medio histórico (m ³)	Diferencias de volúmenes entre períodos (m ³)
	HADGEM_2	GFDL_CM3	MPI_ESM_LR	Promedio		
Ene	5121345,03	2373785,26	2925419,28	3473516,52	5121345,03	-1647828,51
Feb	3461681,29	4495417,81	4595363,02	4184154,04	3461681,29	722472,75
Mar	3790751,72	3078507,25	2736644,82	3201967,93	3790751,72	-588783,79
Abr	3851752,4	4750623,64	4079507,22	4227294,42	3851752,4	375542,02
May	17438547,4	19278132,5	17944678,3	18220452,8	17438547,4	781905,35
Jun	43156129,9	42114002	42526811,7	42598981,2	43156129,9	-557148,70
Jul	17965986,2	18399268,3	16186396,2	17517216,9	17965986,2	-448769,29
Ago	25471606,7	27708935,9	25614454,9	26264999,2	25471606,7	793392,45
Sep	39151380	38819233,8	37016815,8	38329143,2	39151380	-822236,77
Oct	15341263	18318965,4	22214903,8	18625044,1	15341263	3283781,06
Nov	4400500,65	5154505,34	4564739,12	4706581,7	4400500,65	306081,06
Dic	3331798,02	2163538,77	2463499,82	2652945,54	3331798,02	-678852,48

Tabla A4.6 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca San Diego, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 8.5 W/m² para el periodo 2016-2050.

Mes	Volúmenes considerando modelos de CC (m ³)				Volumen medio histórico (m ³)	Diferencias de volúmenes entre períodos (m ³)
	HADGEM_2	GFDL_CM3	MPI_ESM_LR	Promedio		
Ene	5422749,46	4137802,84	3517193,94	4359248,75	5121345,03	-762096,28
Feb	2568296,68	3908953,9	2546986,66	3008079,08	3461681,29	-453602,21
Mar	3754993,17	3372764,17	3010843,31	3379533,55	3790751,72	-411218,17
Abr	5696213,76	4849826,19	3349164,9	4631734,95	3851752,4	779982,55
May	17125602,4	18961094,6	15994725,6	17360474,2	17438547,4	-78073,25
Jun	41774705,3	41090228,6	39932478,7	40932470,9	43156129,9	-2223659,04
Jul	19182879,3	17181527,5	16347322,7	17570576,5	17965986,2	-395409,70
Ago	26140139,4	27255136,9	23785558,4	25726944,9	25471606,7	255338,17
Sep	38162879,5	38771002,4	38165383,2	38366421,7	39151380	-784958,28
Oct	12884651,8	16542064,5	18698243,3	16041653,2	15341263	700390,18
Nov	4352164,69	4960568,9	8014423,56	5775719,05	4400500,65	1375218,41
Dic	4670437,4	3346348,67	2127615,35	3381467,14	3331798,02	49669,13

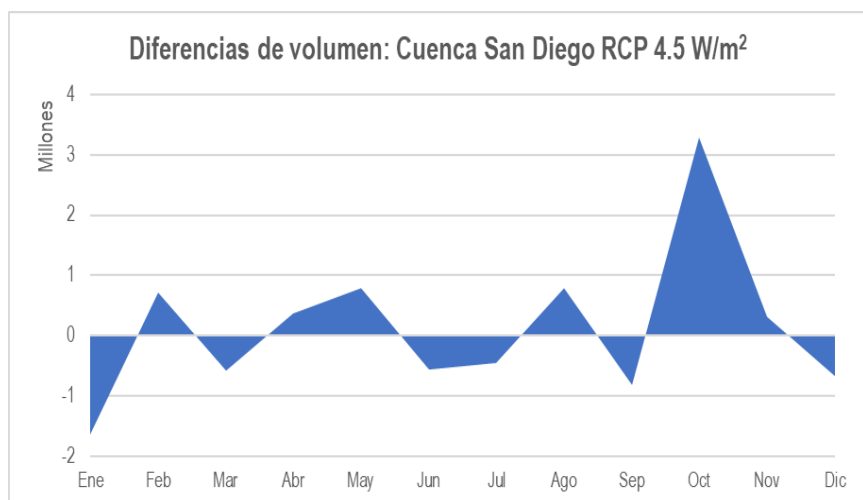


a)

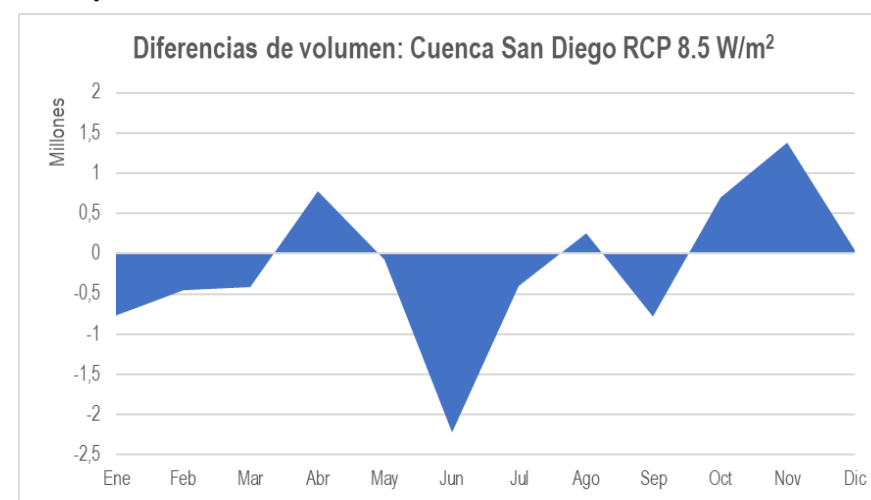


b)

Figura A4.3 Comparación entre el volumen de escurrimiento mensual de la cuenca San Diego considerando el comportamiento medio y los resultados obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR: **a)** escenario RCP 4.5 W/m² y **b)** escenario RCP 4.5 W/m².



a)



b)

Figura A4.4 Diferencia entre el volumen de escurrimiento regional en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base (1981-2010) para la cuenca San Diego: **a)** escenario RCP 4.5 W/m² y **b)** escenario RCP 4.5 W/m².

Cueca Bacunagua

Tabla A4.7 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Bacunagua, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 4.5 W/m² para el periodo 2016-2050.

Mes	Volúmenes considerando modelos de CC (m ³)				Volumen medio histórico (m ³)	Diferencias de volúmenes entre períodos (m ³)
	HADGEM_2	GFDL_CM3	MPI_ESM_LR	Promedio		
Ene	1040429,98	311316,708	448363,978	600036,89	1040429,98	-440393,09
Feb	587309,947	281189,03	293035,409	387178,129	587309,947	-200131,82
Mar	674724,335	487530,768	400693,505	520982,869	674724,335	-153741,47
Abr	691083,58	936869,424	752555,184	793502,729	691083,58	102419,15
May	4772271,19	5350981,2	4931220,13	5018157,51	4772271,19	245886,32
Jun	12981739,7	12646697,8	12779407	12802614,8	12981739,7	-179124,86
Jul	4937916,59	5074165,79	4380046,09	4797376,16	4937916,59	-140540,43
Ago	7314794,4	8028247,76	7360296,06	7567779,41	7314794,4	252985,01
Sep	11694647,6	11587957,2	11009186,6	11430597,1	11694647,6	-264050,48
Oct	4116220,97	5048902,4	6279699,58	5148274,32	4116220,97	1032053,35
Nov	840160,392	1049746,83	885384,161	925097,129	840160,392	84936,74
Dic	154076,437	53109,8578	75720,4011	94302,2319	154076,437	-59774,20

Tabla A4.8 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Bacunagua, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 8.5 W/m² para el periodo 2016-2050.

Mes	Volúmenes considerando modelos de CC (m ³)				Volumen medio histórico (m ³)	Diferencias de volúmenes entre períodos (m ³)
	HADGEM_2	GFDL_CM3	MPI_ESM_LR	Promedio		
Ene	1125415,06	768384,126	601952,378	831917,189	1040429,98	-208512,80
Feb	358828,784	214465,989	353576,63	308957,134	587309,947	-278352,81
Mar	665156,133	563950,269	470166,109	566424,17	674724,335	-108300,17
Abr	1203077,32	964470,251	557770,353	908439,309	691083,58	217355,73
May	4674104,72	5251057,19	4320144,4	4748435,44	4772271,19	-23835,75
Jun	12537629,8	12317627,3	11945587,9	12266948,3	12981739,7	-714791,33
Jul	5320951,61	4691641,12	4430368,95	4814320,56	4937916,59	-123596,03
Ago	7527805,87	7883407,94	6778331,32	7396515,04	7314794,4	81720,64
Sep	11377157,5	11572465,4	11377961,5	11442528,1	11694647,6	-252119,47
Oct	3354401,48	4491301,26	5168268,17	4337990,3	4116220,97	221769,33
Nov	826900,714	995379,587	1877990,82	1233423,71	840160,392	393263,32
Dic	302018,888	155526,364	50588,7699	169378,007	154076,437	15301,57

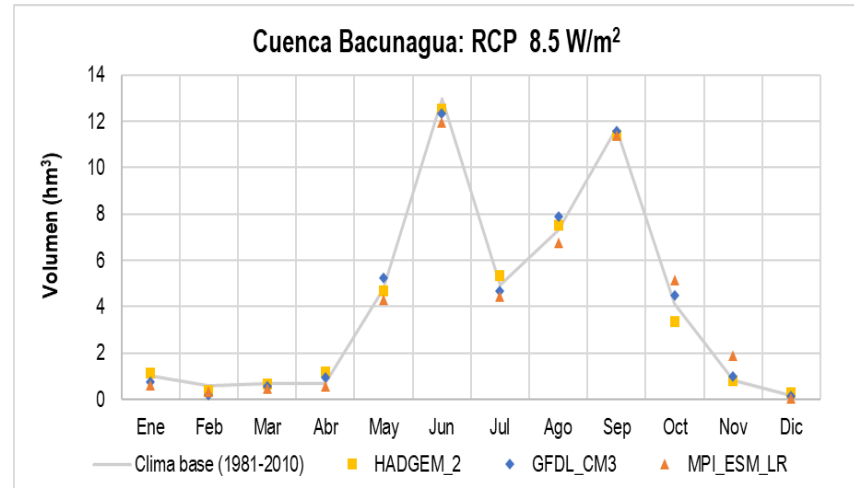
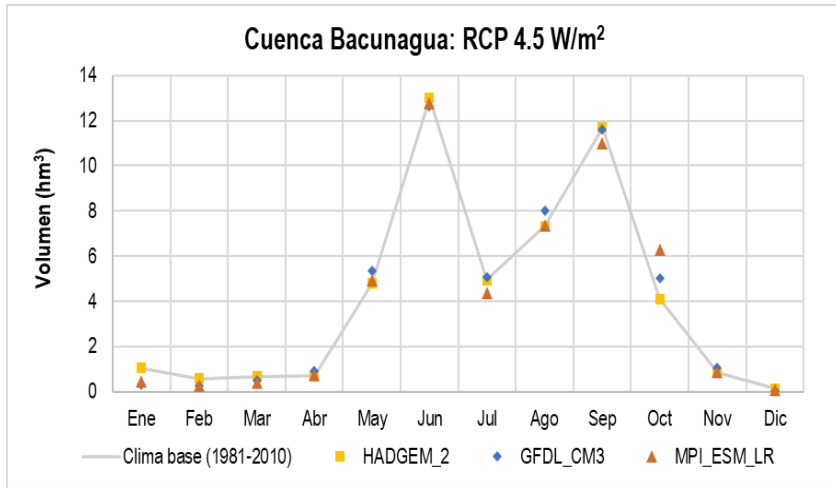


Figura A4.5 Comparación entre el volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Bacunagua considerando el comportamiento medio y los resultados obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR: **a)** escenario RCP 4.5 W/m² y **b)** escenario RCP 4.5 W/m².

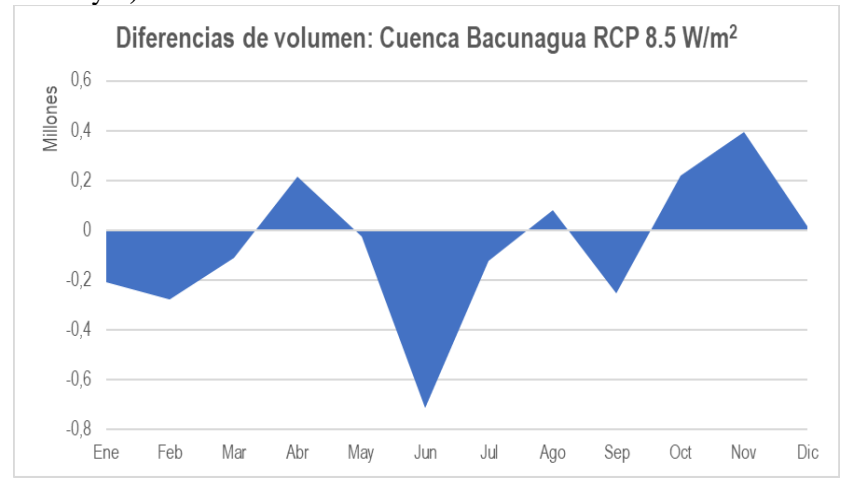
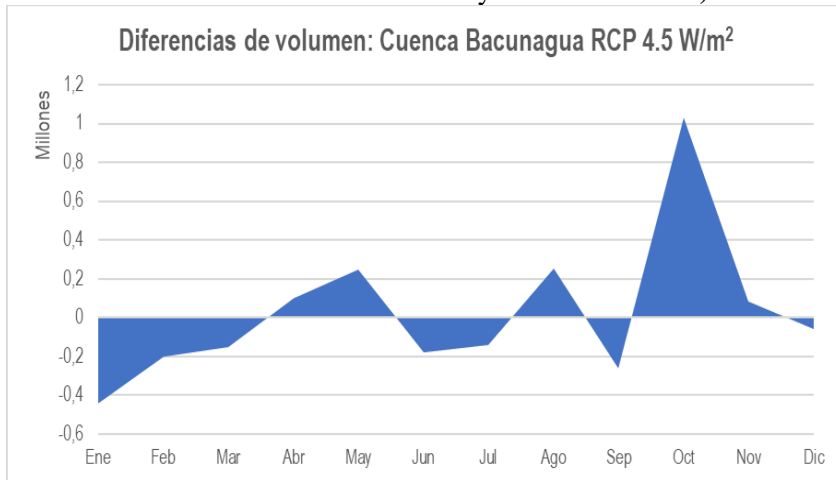


Figura A4.6 Diferencia entre el volumen de escurrimiento regional en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base (1981-2010) para la cuenca Bacunagua: **a)** escenario RCP 4.5 W/m² y **b)** escenario RCP 4.5 W/m².

Cueca Herradura

Tabla A4.9 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Herradura, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 4.5 W/m² para el periodo 2016-2050.

Mes	Volúmenes considerando modelos de CC (m ³)				Volumen medio histórico (m ³)	Diferencias de volúmenes entre períodos (m ³)
	HADGEM_2	GFDL_CM3	MPI_ESM_LR	Promedio		
Ene	1126069,16	387384,993	531134,882	681529,678	1126069,16	-444539,48
Feb	673704,653	355192,451	367882,128	465593,077	673704,653	-208111,58
Mar	762240,298	571589,892	481558,918	605129,702	762240,298	-157110,60
Abr	778727,235	1023918,65	840471,565	881039,15	778727,235	102311,91
May	4636993,29	5167524,94	4782927,69	4862481,97	4636993,29	225488,68
Jun	12038786,7	11740168,6	11858473,5	11879142,9	12038786,7	-159643,79
Jul	4789072,09	4914024,57	4276110,24	4659735,63	4789072,09	-129336,46
Ago	6954299,11	7599346,23	6995494,6	7183046,65	6954299,11	228747,53
Sep	10890520,2	10795197,9	10277692	10654470	10890520,2	-236050,16
Oct	4032696,78	4890864,97	6014831,97	4979464,57	4032696,78	946767,79
Nov	927953,945	1135230,96	972903,71	1012029,54	927953,945	84075,59
Dic	215541,228	95307,8074	123693,833	144847,623	215541,228	-70693,61

Tabla A4.10 Volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Herradura, obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el escenario RCP 8.5 W/m² para el periodo 2016-2050.

Mes	Volúmenes considerando modelos de CC (m ³)				Volumen medio histórico (m ³)	Diferencias de volúmenes entre períodos (m ³)
	HADGEM_2	GFDL_CM3	MPI_ESM_LR	Promedio		
Ene	1209480,96	856320,788	688589,821	918130,523	1126069,16	-207938,64
Feb	437668,583	282818,026	432136,298	384207,636	673704,653	-289497,02
Mar	752586,05	649908,039	553682,814	652058,968	762240,298	-110181,33
Abr	1285411,64	1051202,04	643601,949	993405,21	778727,235	214677,97
May	4546776,85	5076071,82	4220892,5	4614580,39	4636993,29	-22412,90
Jun	11642915,9	11446681,7	11114634,3	11401410,6	12038786,7	-637376,09
Jul	5140047,42	4562898,09	4322476,41	4675140,64	4789072,09	-113931,45
Ago	7147083,21	7468542,09	6467976,88	7027867,4	6954299,11	73568,28
Sep	10606792,3	10781354,9	10607511,1	10665219,4	10890520,2	-225300,78
Oct	3326293,12	4378591,72	5000254,68	4235046,51	4032696,78	202349,72
Nov	914748,517	1081704,52	1936280,59	1310911,21	927953,945	382957,26
Dic	377477,594	217182,984	92048,3615	228902,98	215541,228	13361,75

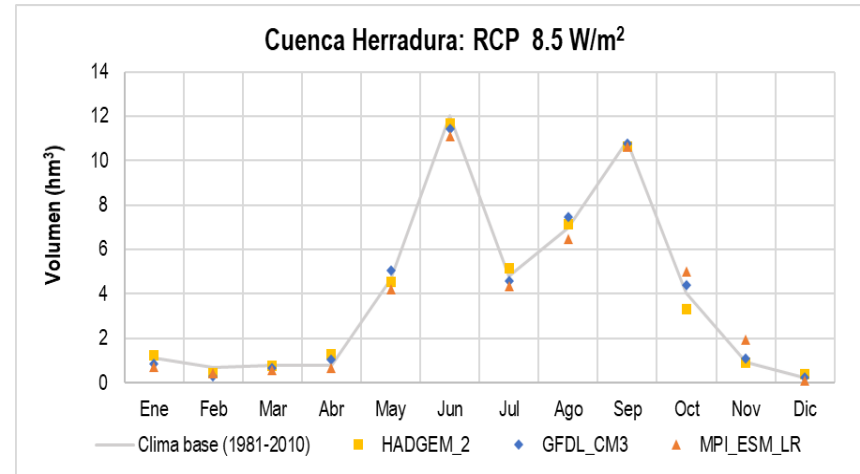
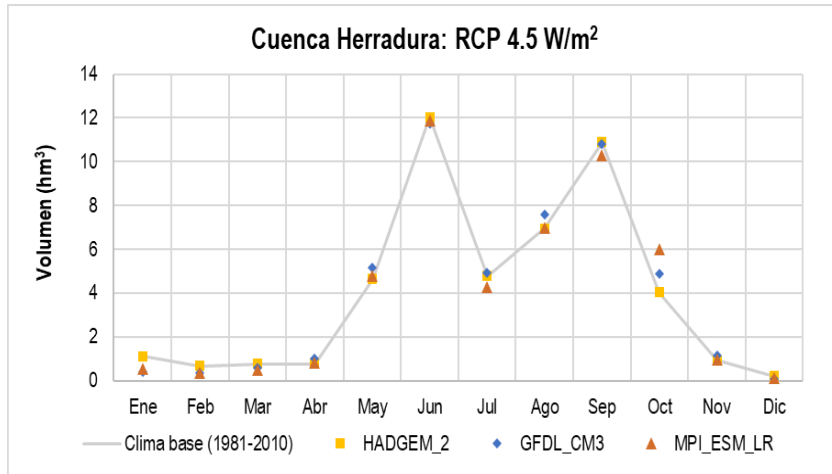


Figura A4.7 Comparación entre el volumen de escurrimiento mensual de la cuenca Herradura considerando el comportamiento medio y los resultados obtenido de la implementación del modelo hidrológico para la precipitación mensual promedio de los resultados de los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR: **a)** escenario RCP 4.5 W/m² y **b)** escenario RCP 8.5 W/m².

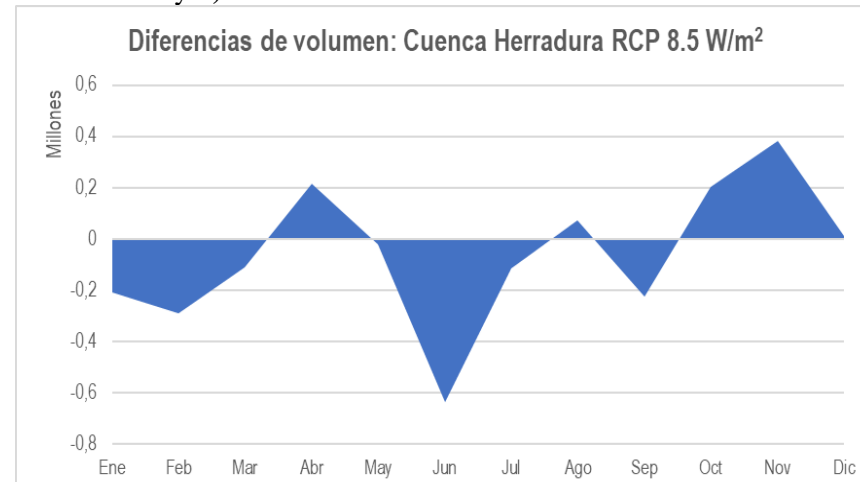
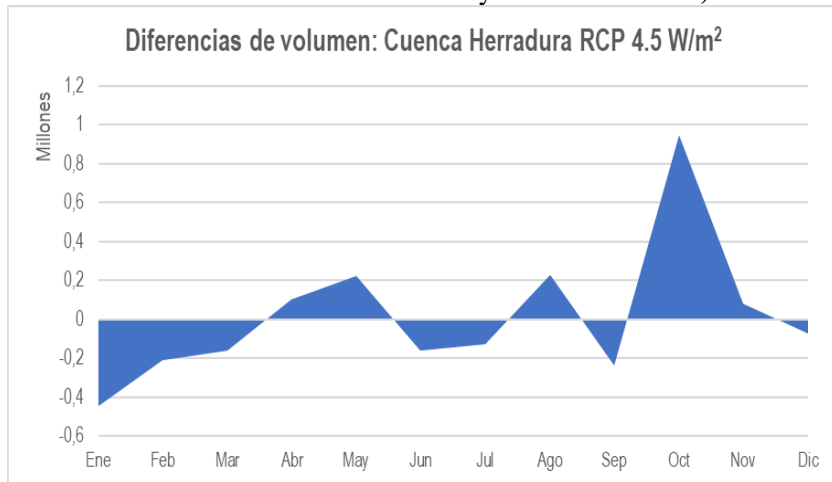


Figura A4.8 Diferencia entre el volumen de escurrimiento regional en el período base 2016-2050 y el volumen de escurrimiento del periodo base (1981-2010) para la cuenca Herradura: **a)** escenario RCP 4.5 W/m² y **b)** escenario RCP 8.5 W/m².

