



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**Programa de Doctorado en Ingeniería del Agua y
Medioambiental**

TESIS DOCTORAL

**Impacto del cambio climático en la
seguridad alimentaria de climas tropicales.
Aplicación a la Demarcación Hidrográfica
de Manabí - Ecuador**

DOCTORANDO:

Jonny Fernando Rivadeneira Vera

DIRECTOR:

Dr. Miguel Ángel Pérez-Martín

Valencia, febrero 2020

RESUMEN

Se espera que el cambio climático aumente las precipitaciones y la temperatura en las zonas tropicales de la costa ecuatoriana. El aumento de la temperatura también aumentará la evapotranspiración, por lo tanto, el futuro balance hídrico en la costa ecuatoriana tendrá una ligera variación. Los cambios en los patrones de precipitación y la evapotranspiración producirán un aumento significativo en los requerimientos de agua para los cultivos actuales, por lo que se espera un desequilibrio en los sistemas de recursos hídricos entre los recursos naturales y las demandas de agua lo que compromete la seguridad alimentaria.

Esta investigación presenta los cambios futuros en los requerimientos de agua de los principales cultivos de la Demarcación Hidrográfica de Manabí mediante la identificación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y establece medidas de adaptación mediante un modelo gestión de recursos hídricos para garantizar la disponibilidad de agua y por ende la producción agrícola.

El efecto del cambio climático en los recursos hídricos de la Demarcación Hidrográfica de Manabí, en la región costera del Ecuador, se evaluó en las cuencas de los ríos Chone y Portoviejo en el período 1964 – 2012 mediante el Modelo Hidrológico Agregado de Témez y el uso de doce proyecciones climáticas con corrección de sesgo, a partir de dos modelos de circulación general AR5, dos escenarios RCP 4.5-8.5 y tres períodos, a corto (2010-2039), a mediano (2040- 2069) y a largo plazo (2070-2099).

Los modelos CCSM4 y ECHAM6 indican una intensificación progresiva de la temperatura a corto, mediano y largo plazo en todos los escenarios, siendo el RCP4.5 más ligero y el RCP8.5 más severo. En las cuencas de estudio, se observan aumentos de lluvia de menos del 5%, de acuerdo con el modelo climático CCSM4 en el escenario RCP4.5, mientras que en los escenarios RCP8.5 hay un aumento de hasta 29% a largo plazo. Según el modelo ECHAM6, se proyectan aumentos en la precipitación de hasta 36% a largo plazo. Ambos modelos coinciden con el aumento de las variables en la estación seca,

mientras que en la estación húmeda se proyecta una ligera disminución con el modelo CCSM4 y un aumento con el modelo ECHAM6.

Los cálculos de ETP de los métodos Thornthwaite (ETP Th) y Penman Monteith (ETP P-M) muestran resultados similares en el clima actual. Sin embargo, bajo el cambio climático, el método Thornthwaite da resultados significativamente más altos con respecto al método Penman Monteith.

Basado en ETP Th, el modelo CCSM4 muestra una reducción en la aportación de -8%, mientras que el modelo ECHAM6 indica un aumento hasta un 16%. Los resultados basados en ETP P-M indican un aumento en la aportación de 25% y 30% acorde a los modelos CCSM4 y ECHAM6 respectivamente.

Esta investigación muestra que, en las regiones tropicales, los sistemas de recursos hídricos actualmente viables podrían volverse insostenibles en escenarios de cambio climático. Para garantizar el suministro de agua en el futuro se requieren medidas adicionales como las reglas de operación del embalse y la mejora de la eficiencia del riego del sistema de 0,43 a 0,65; lo que implica mejorar el sistema de distribución y aplicación.

Resum

S'espera que el canvi climàtic augmenta les precipitacions i la temperatura a les zones tropicals de la costa equatoriana. L'augment de la temperatura també augmentarà l'evapotranspiració, per tant, el futur balanç hídric a la costa equatoriana tindrà una lleugera variació. Els canvis en els patrons de precipitació i l'evapotranspiració produiran un augment significatiu en els requeriments d'aigua per als cultius actuals, per la qual cosa s'espera un desequilibri en els sistemes de recursos hídrics entre els recursos naturals i les demandes d'aigua el que compromet la seguretat alimentària.

Aquesta investigació presenta els canvis futurs en els requeriments d'aigua dels principals cultius de la Demarcació Hidrogràfica de Manabí mitjançant la identificació de l'impacte de l'canvi climàtic en els recursos hídrics i estableix mesures d'adaptació mitjançant un model gestió de recursos hídrics per a garantir la disponibilitat de aigua i per tant la producció agrícola.

L'efecte de l'canvi climàtic en els recursos hídrics de la Demarcació Hidrogràfica de Manabí, a la regió costanera de l'Equador, es va avaluar en les conques dels rius Chone i Portoviejo en el període 1964-2012 mitjançant el model hidrològic agregat de Témez i l'ús de dotze projeccions climàtiques amb correcció de biaix, a partir de dos models de circulació general AR5, dos escenaris RCP 4.5-8.5 i tres períodes, a curt termini (2010-2039), a mitjà termini (2040- 2069) i a llarg termini (2070-2099).

Els models CCSM4 i ECHAM6 indiquen una intensificació progressiva de la temperatura a curt, mitjà i llarg termini en tots els escenaris, sent el RCP4.5 més lleuger i el RCP8.5 més sever. A les conques d'estudi, s'observen augments de pluja de menys de el 5%, d'acord amb el model climàtic CCSM4 a l'escenari RCP4.5, mentre que en els escenaris RCP8.5 hi ha un augment de fins el 29% a llarg termini. Segons el model ECHAM6, es projecten augments en la precipitació de fins el 36% a llarg termini. Segons el model ECHAM6, es projecten augments en la precipitació de fins el 36% a llarg termini. Tots dos models coincideixen amb l'augment de les variables en l'estació seca, mentre

que a l'estació humida es projecta una lleugera disminució amb el model CCSM4 i un augment amb el model ECHAM6.

Els càlculs de ETP dels mètodes Penman Monteith i Thornthwaite mostren resultats similars en el clima actual. No obstant això, sota el canvi climàtic, el mètode Thornthwaite dóna resultats significativament més alts pel que fa a l'mètode Penman Monteith. Aquest estudi mostra que, en conques tropicals, l'ús de Thornthwaite pot donar resultats excessius.

Basat en ETP Th, el model CCSM4 mostra una reducció en l'aportació de -8%, mentre que el model ECHAM6 indica un augment fins a un 16%. Els resultats basats en ETP P-M indiquen un augment en l'aportació de 25% i 30% d'acord amb els models CCSM4 i ECHAM6 respectivament.

Aquesta investigació mostra que, en les regions tropicals, els sistemes de recursos hídrics actualment viables podrien tornar insostenibles en escenaris de canvi climàtic. Per garantir el subministrament d'aigua en el futur es requereixen mesures addicionals com les regles d'operació de l'embassament i la millora de l'eficiència de l'reg de el sistema de 0,43-0,65; el que implica millorar el sistema de distribució i aplicació.

Abstract

Climate change is expected to increase rainfall and temperature in the tropical areas of the Ecuadorian coast. The increase in temperature will also increase evapotranspiration therefore, future water balance on Ecuadorian coast will have a slight variation. Changes in precipitation patterns and evapotranspiration will produce an increase in the water requirements for current crops, so an imbalance in the water resources systems between natural resources and water demands is expected. This study present water resources management as an adaptation measure to climate change for reducing vulnerability in tropical areas.

This research presents the future changes in the water requirements of the main crops of the Manabí River Basin District by identifying the impact of climate change on water resources and establishes adaptation measures through a water resources management model for the availability of water and therefore agricultural production.

The effect of climate change on water resources was evaluated in the Chone and Portoviejo river basins in the period 1964 – 2012 by Lumped Témex Hydrological Model. and twelve bias-corrected climate projections from two AR5 General Circulation Models, two Representative Concentration Pathways, 4.5-8.5 scenarios, and three periods, short (2010-2039), medium (2040-2069) and long-term (2070–2099).

The models CCSM4 and ECHAM6 indicate a progressive intensification of temperature in the short, medium and long-term term in all scenarios, being the lightest RCP4.5 and the most severe RCP8.5. In the study basins rainfall increases of less than 5% are observed, according to the CCSM4 climate model under RCP4.5 scenario, while in the RCP8.5 scenario there is an increase of up to 29% in the long term. According to the ECHAM6 model, increases in the resolution of up to 36% are projected in the long term. Both models coincide with the increase of the precipitation in the dry season, while in the wet season a slight decrease is projected with the CCSM4 model and an increase with the ECHAM6 model.

The ETP calculations by Penman Monteith and Thornthwaite methods show similar results under the current climate. However, under climate change, Thornthwaite method gives results significantly higher regarding to Penman Monteith method. This study shows that, in tropical basins the use of Thornthwaite can give results excessive.

Based on ETP Th, the CCSM4 model shows a reduction in streamflow in -8%, while the ECHAM6 model indicates an increase until 16%. The results based on ETP P-M indicate increase in streamflow in 25% and 30% according to CCSM4 and ECHAM6 models respectively.

This research shows that, in tropical regions, currently viable water resources systems could become unsustainable under climate change scenarios. To guarantee the water supply in the future additional measures are required as reservoir operation rules and irrigation efficiency improvement of system from 0,43 to 0,65; which it involves improving the distribution and application system.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Motivación y contexto	2
1.2.	Objetivos y metas	5
1.3.	Estructura del documento	6
2.	ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1.	Cambio climático	8
2.2.	Modelos climáticos globales	15
2.3.	Escenarios de emisiones de cambio climático	18
2.4.	Efecto del cambio climático en los recursos hídricos.....	21
2.5.	Efecto del cambio climático en el ciclo hidrológico	22
2.6.	Efecto del cambio climático en los requerimientos de agua de los cultivos.....	24
2.7.	Efectos del cambio climático en la planificación de los recursos hídricos.....	26
2.8.	Modelos hidrológicos en estudios del efecto del cambio climático en los recursos hídricos	28
2.8.1.	Modelo Hidrológico Agregado Témez	28
2.8.2.	Modelo Distribuido PATRICAL.....	30
3.	ÁREA DE ESTUDIO.....	32
3.1.	Características físicas de la demarcación	33
3.2.	Clima.....	35
3.3.	Hidrografía.....	37
3.4.	Infraestructuras hidráulicas	41
3.5.	Uso de suelo.....	44
3.6.	Geología.....	46
4.	METODOLOGÍA	48
4.1.	Datos Meteorológicos	51
4.2.	Modelos Hidrológicos.....	53
4.3.	Modelos y escenarios Climáticos	55
4.4.	Requerimiento hídrico de los cultivos.....	57
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN : IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS Y EN LA SEGURIDAD ALIMENTARIA DE LA DHM.....	60
5.1.	Simulación hidrológica.....	61
5.1.1.	Modelo Hidrológico Agregado de Témez	61
5.1.2.	Modelo hidrológico distribuido PATRICAL.....	67
5.2.	Modelos y escenarios de cambio climático.....	73
5.3.	Clima futuro.....	76

5.4. Efectos en la evapotranspiración y la demanda de agua del cultivo.....	79
5.4.1. Requerimiento de agua de los principales cultivos de la DHM.....	86
5.4.2. Requerimiento de agua futura para cultivos de ciclo corto	87
5.4.3. Requerimiento de agua futura para cultivos permanentes o de ciclo continuo.....	89
5.5. Cambios en los recursos hídricos	91
5.6. Gestión actual y futura de los recursos hídricos bajo el cambio climático..	97
5.6.1. Evaluación de proyectos de expansión de riego	101
6. CONCLUSIONES	104
7. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	119
8. REFERENCIAS.....	122
ANEXOS.....	134
ANEXO 1 RESUMEN ESTADÍSTICO DE LAS ESTACIONES CLIMÁTICAS	135
ANEXO 2 APORTACIONES ANUALES SIMULADAS CON MODELO DISTRIBUIDO PATRICAL EN LA DHM	138
ANEXO 3 MAPAS CLIMÁTICOS DE TEMPERATURA CON EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	143
ANEXO 4 MAPAS CLIMÁTICOS DE PRECIPITACIÓN CON EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	156
ANEXO 5 CÁLCULO DE LA ETP	169
ANEXO 6 CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS HIDRICOS DE LOS CULTIVOS ACTUALES Y FUTUROS	172

Índice de figuras

<i>Figura 2-1 Evidencias globales de cambio climático en el período 1850 hasta 2012.</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2-2 .- Mapas del cambio de precipitación observado desde 1901 hasta 2010 y desde 1951 hasta 2010.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2-3 Múltiples indicadores observados de un ciclo global cambiante del carbono.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2-4 Múltiples indicadores observados de un clima global cambiante</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2-5 Características de las trayectorias de emisiones globales de CO₂ en las trayectorias que limitan el calentamiento global a 1,5 °C.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2-6 Evolución de los modelos climáticos globales en los últimos 40 años.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2-7 Forzamiento radiativo de los escenarios RCP</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2-8 Emisiones mundiales de CO₂ para escenarios RCP y sus ECP.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2-9 Esquema conceptual del Modelo Hidrológico Agregado Témez.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2-10 Esquema conceptual del Modelo distribuido PATRICAL</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3-1 Demarcaciones hidrográficas del Ecuador</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3-2 Ubicación de las cuencas de la Demarcación hidrográfica de Manabí.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3-3 Temperatura media DHM 1964-2012.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3-4 Precipitación media anual de la DHM 1964-2012</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3-5 Cuenca del río Portoviejo.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3-6 Cuenca del río Chone</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3-7 Sistemas de trasvases de la DHM.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3-8 Usos de suelo de la DHM.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3-9 Formaciones geológicas de la DHM.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4-1 Metodología para identificar el impacto del cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de la DHM.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4-2 Estaciones climáticas que registran temperatura</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4-3 Estaciones climáticas que registran precipitación.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5-1 Calibración del modelo agregado de Témez en la subcuenca del río Carrizal en la cuenca del río Chone.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5-2 Validación del modelo agregado de Témez en la subcuenca del río Carrizal en la cuenca del río Chone</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5-3 Contraste de serie histórica de caudales mensuales del modelo con caudales observados en la subcuenca del río Carrizal en la cuenca del río Chone.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5-4 Contraste de aportaciones anuales del modelo con aportaciones observadas en la subcuenca del río Carrizal en la cuenca del río Chone.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5-5 Contraste de aportaciones medias mensuales del modelo con aportaciones observadas en la subcuenca del río Carrizal en la cuenca del río Chone.....</i>	<i>63</i>

<i>Figura 5-6 Calibración del modelo agregado de Témez en la subcuenca del río Chico en la cuenca del río Portoviejo.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5-7 Validación del modelo agregado de Témez en la subcuenca del río Chico en la cuenca del río Portoviejo.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5-8 Contraste de serie histórica de caudales mensuales del modelo con caudales observados en la subcuenca del río Chico en la cuenca del río Portoviejo.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5-9 Contraste de aportaciones anuales del modelo con aportaciones observadas en la subcuenca del río Chico en la cuenca del río Portoviejo.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5-10 Serie histórica de caudales mensuales del modelo en la cabecera de la cuenca del río Portoviejo.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5-11 Aportaciones anuales del modelo en la cabecera de la cuenca del río Portoviejo.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5-12 Aportaciones medias mensuales del modelo en la cabecera de la cuenca del río Portoviejo.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5-13 Aportaciones anuales en la DHM obtenidas de la simulación hidrológica del modelo PATRICAL.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5-14 Contraste de aportaciones anuales del modelo distribuido PATRICAL y el modelo Agregado de Témez en la cuenca del río Chone</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5-15 Correlación entre aportaciones de los modelos PATRICAL y Témez en la cuenca del río Chone</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5-16 Contraste de aportaciones anuales del modelo distribuido PATRICAL y el modelo Agregado de Témez en la cuenca del río Portoviejo</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5-17 Correlación entre aportaciones de los modelos PATRICAL y Témez en la cuenca del río Portoviejo.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5-18 Anomalías de precipitación y temperatura, en escenarios RCP4.5 y RCP8.5, para el período de simulación 2010-2099.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5-19 Cambios en la temperatura media por efecto del cambio climático.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5-20 Cambios en la precipitación media por efecto del cambio climático.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5-21 Cuencas pilotos para identificación de cambios en los recursos hídricos por efecto del cambio climático.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5-22 Esquema del sistema de explotación La Esperanza de la cuenca del río Chone</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5-23 Demanda de agua futura mensual para riego de cultivos en escenarios de cambio climático.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5-24 Mapa base para el cálculo de requerimientos hídricos futuros en la Demarcación Hidrográfica de Manabí.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5-25 Cambios porcentuales futuros en los requerimientos hídricos para el cultivo de maíz, sobre las necesidades hídricas actuales.....</i>	<i>88</i>

<i>Figura 5-26 Cambios porcentuales futuros en los requerimientos hídricos para el cultivo de Bananas, sobre las necesidades hídricas actuales.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5-27 Cambios porcentuales futuros en los requerimientos hídricos para el cultivo de pastos, sobre las necesidades hídricas actuales.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5-28 Cambios anuales en las variables hidrológicas de la cuenca de estudio bajo situación de cambio climático.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5-29 Cambios estacionales futuros en la temperatura, precipitación, ETP (Th) y caudales.</i>	<i>96</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 1 Alcance de la planificación de la DHM.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 2 Área de drenaje de los ríos de las cuencas hidrográficas de la DHM.</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 3 Tipos de infraestructuras existentes en la DHM.</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 4 Área de uso agrícola por tipo de cultivos en la DHM.</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 5 Valores de coeficiente de cultivos para los cultivos de mayor producción en la DHM.</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 6 Tiempo de desarrollo vegetativo del cultivo por etapas para los cultivos de mayor producción en la DHM.</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 7 Resultados estadísticos de la calibración y simulación del modelo de Témez en la Demarcación Hidrográfica de Manabí.</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 8 Valores de Hmax utilizados para la simulación de aportaciones por el modelo distribuido PATRICAL en la DHM.</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 9 Valores de Imax utilizados para la simulación de aportaciones por el modelo distribuido PATRICAL en la DHM.</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 10 Puntos de drenaje establecidos para la simulación de aportaciones mediante PATRICAL en la DHM.</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 11 Cambios futuros medios por modelo, escenario y período para la DHM.</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 12 Incrementos en la demanda agrícola neta y bruta en el sistema de explotación La Esperanza con el método de ETP thornthwaite.</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 13 Incrementos en la demanda agrícola neta y bruta en el sistema de explotación La Esperanza con el método de ETP Penman - Monteith.</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 14 Cambios futuros de la ETP calculada por el método de Penman-Monteith.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 15 Cambios en las variables hidrológicas usando ETP (Th) en el balance de agua.</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 16 Cambios en las variables hidrológicas usando ETP (PM) en el balance de agua.</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 17 Evaluación del cumplimiento de los criterios de garantía para el abastecimiento de demandas en el contexto del cambio climático. Los valores indican que se cumplen los criterios de garantía (verde) o que no se cumplen (naranja).</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 18 Medida de adaptación considerando el efecto del cambio climático en la demanda agrícola histórica (7250 ha), los colores indican la simulación c (azul), d (naranja) y e (verde) de la Tabla 17.</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 19 Expansión máxima del área agrícola con eficiencia de riego de 0.73 para el área de estudio. Valores en hectáreas (ha).</i>	<i>102</i>

Siglas y acrónimos

AR4:	Cuarto informe de evaluación del IPCC
AR5:	Quinto informe de evaluación del IPCC
CMNUCC:	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
DHG:	Demarcación Hidrográfica del Guayas
DHM:	Demarcación Hidrográfica de Manabí
FAO:	The Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)
GCM:	Modelo Climático Global
GEI:	Gases de Efecto Invernadero
IGM:	Instituto Geográfico Militar (Ecuador)
INAMHI:	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador
IPCC:	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
MAG:	Ministerio de Agricultura y Ganadería (Ecuador)
MCR:	Modelo Climático Regional
PATRICAL:	Precipitación aportación en tramos de red integrados con calidad del agua
RCP:	Representative Concentration Pathway (Trayectorias de Concentración Representativas)
SENAGUA:	Secretaría Nacional del Agua (Ecuador)
SIMPA:	Simulación Precipitación-Aportación
SNI:	Sistema Nacional de Información (Ecuador)
SRES:	Special Report on Emissions Scenarios (Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones)



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación y contexto

Investigaciones muestran que el calentamiento global podría afectar el ciclo hidrológico global causando cambios en los patrones de precipitación (Allen & Ingram, 2002; Held & Soden, 2006). Las tendencias mundiales y regionales en materia de evaporación, evapotranspiración y contenido de vapor de agua atmosférico, así como los estudios de balance hídrico, respaldan este hecho (Huntington, 2010).

Se espera que el cambio climático intensifique la frecuencia y la gravedad de los eventos hidrológicos extremos como las inundaciones (Mosquera-Machado & Ahmad, 2007) y las sequías (Puri et al., 2011), lo que afecta la disponibilidad de los suministros locales de agua, la descarga de los ríos y las fuentes de agua estacional . (Arnell et al., 2011). Esto se traduce en graves consecuencias sociales, ambientales y económicas, con mayores repercusiones en los países subdesarrollados.

Los recursos de agua dulce de Ecuador son generados principalmente por la estación húmeda. Como consecuencia, en las zonas bajas el cumplimiento de los requisitos de agua para la agricultura, los fines domésticos y los ecosistemas dependen de la temporada de invierno. Más del 80% de la precipitación anual ocurre durante el período de invierno, es decir, entre diciembre y mayo (Zambrano Mera et al., 2018). Por lo tanto, cualquier cambio en el clima tendría un impacto significativo en la producción agrícola, lo que supone un desafío para la gestión de los recursos hídricos (Georgakakos et al., 2012; Majone et al., 2012).

La sostenibilidad de los recursos hídricos depende, en gran medida, de la gestión adecuada y el uso eficiente del agua (Fasakhodi et al., 2010), por lo que las decisiones de planificación sobre los recursos hídricos futuros deben basarse no solo en la demanda sino también en el suministro futuro y proyecciones de cambio climático (García-Ruiz et al., 2011). En los últimos años, existe un mayor interés de la comunidad científica en la adaptación al cambio climático debido a su creciente relevancia (Arnell, 2010). La mayoría de los estudios sobre adaptación (Kirby et al., 2014; Kling et al., 2014) han

evaluado los impactos de los posibles cambios, y solo unos pocos han abordado específicamente las medidas de adaptación para hacer frente a los impactos del cambio climático por ejemplo Bhave et al., (2014).

La Demarcación Hidrográfica de Manabí (DHM) está formada por 17 cuencas hidrográficas, siendo las más importantes, la cuenca del río Chone, la cuenca del río Portoviejo y la cuenca del río Jama, representan el 54% del territorio total de la DHM. Las cuencas de los ríos Chone y Portoviejo, ubicadas en la zona centro de la demarcación, están equipadas con la infraestructura esencial (embalses, trasvases, sistemas de riego) para la gestión del agua, aunque históricamente se han visto afectadas por frecuentes inundaciones y sequías. Los embalses son uno de los componentes de infraestructura más cruciales para integrar el desarrollo y la gestión de los recursos hídricos (Liu et al., 2015).

Se necesitan medidas de adaptación en ambas cuencas fluviales para abordar los impactos del cambio climático. Las evaluaciones de la variación y vulnerabilidad de los recursos hídricos debido al cambio climático son esenciales para la planificación futura en la agricultura (Nkomozepi & Chung, 2014). La proyección de cambios en los factores relacionados con el agua es fundamental para controlar y mitigar eventos extremos (Jiménez Cisneros et al., 2014; van den Hurk et al., 2016), gestionar los recursos hídricos, garantizar la seguridad alimentaria (Mall et al., 2017; Porter et al., 2014; Suárez-Almiñana et al., 2017) y facilitando el desarrollo regional.

Esta investigación responde a las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son los cambios futuros en las variables climáticas precipitación y temperatura en el área de estudio?
- ¿Qué impacto genera el cambio climático a los requerimientos hídricos de los cultivos en el área de estudio?
- ¿Cuál es el impacto del cambio climático en los recursos hídricos en el área de estudio?
- ¿Qué medidas de adaptación se deben implementar en el área de estudio para minimizar el impacto en los recursos hídricos?

Por lo tanto, presenta los cambios futuros en los requerimientos de agua de los cultivos de mayor de producción en la Demarcación Hidrográfica de Manabí mediante la identificación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos bajo escenarios RCP (Representative Concentration Pathway), y establece medidas de adaptación mediante un modelo gestión de recursos hídricos para garantizar la seguridad alimentaria a través de la producción agrícola.

1.2. Objetivos y metas

El objetivo general de esta tesis doctoral es identificar los cambios futuros en los requerimientos de agua de los cultivos de la Demarcación Hidrográfica de Manabí mediante la evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos para garantizar la seguridad alimentaria a través de la producción agrícola. Para ello se han establecido los siguientes objetivos específicos:

Los objetivos que cumplir serán los siguientes:

- Realizar la calibración y validación de modelos hidrológicos para la modelación de series históricas de aportaciones en la Demarcación Hidrográfica de Manabí.
- Identificar los cambios futuros en las variables climáticas precipitación y temperatura bajo escenarios RCP en el período 2010-2100.
- Evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos de la demarcación.
- Identificar los requerimientos de agua de los cultivos de mayor producción en la demarcación bajo un contexto de cambio climático.
- Establecer medidas de adaptación para reducir la vulnerabilidad al cambio climático.

1.3. Estructura del documento

La presente tesis se estructura en 6 capítulos que se describen brevemente a continuación:

- **Capítulo 1. Introducción.** Se describe el contexto y motivación de la investigación, los objetivos y la estructura del documento.
- **Capítulo 2. Estado del Arte.** Se plasman los aportes de la literatura internacional en la conceptualización del cambio climático global, modelos climáticos globales, escenarios de emisiones de cambio climático, efecto del cambio climático en los recursos hídricos, en el ciclo hidrológico, en los requerimientos de agua de los cultivos, y en la planificación de los recursos hídricos, modelos hidrológicos en estudios del efecto del cambio climático y seguridad alimentaria.
- **Capítulo 3. Área de estudio. Demarcación Hidrográfica de Manabí.** Se caracteriza el área de estudio: descripción física de la demarcación, clima, hidrografía, infraestructuras hidráulicas, uso de suelo y geología.
- **Capítulo 4. Metodología.** Se describen las etapas realizadas y las herramientas utilizadas para el desarrollo de la investigación.
- **Capítulo 5. Resultados.** Se detallan los resultados obtenidos en cada una de las etapas realizadas para el logro del objetivo de la investigación.
- **Capítulo 6. Conclusiones.** Se detallan las principales conclusiones obtenidas de la investigación.



2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Cambio climático

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) establecido en 1988, menciona que el término “cambio climático” denota un cambio en el estado del clima identificable a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado. El cambio puede ser debido a la variabilidad natural o como consecuencia de la actividad humana.

Esta definición difiere de la empleada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en su Artículo 1, que lo define como “El cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”.

El calentamiento en el sistema climático es inequívoco, la atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado (IPCC, 2013).

Cada una de las últimas tres décadas ha sido sucesivamente más cálida en la superficie de la tierra que cualquier otra década anterior desde 1850 (Figura 2-1). En el hemisferio norte, 1983–2012 probablemente fue el período más cálido de 30 años de los últimos 1400 años. Es prácticamente seguro que a nivel mundial la tropósfera se ha calentado desde mediados del siglo XX.

Observaciones más completas permiten una mayor confianza en las estimaciones de los cambios de temperatura troposférica en el hemisferio norte extratropical que en otros lugares. Existe una confianza media en la tasa de calentamiento y su estructura vertical en la tropósfera del hemisferio norte extratropical y baja confianza en otros lugares.

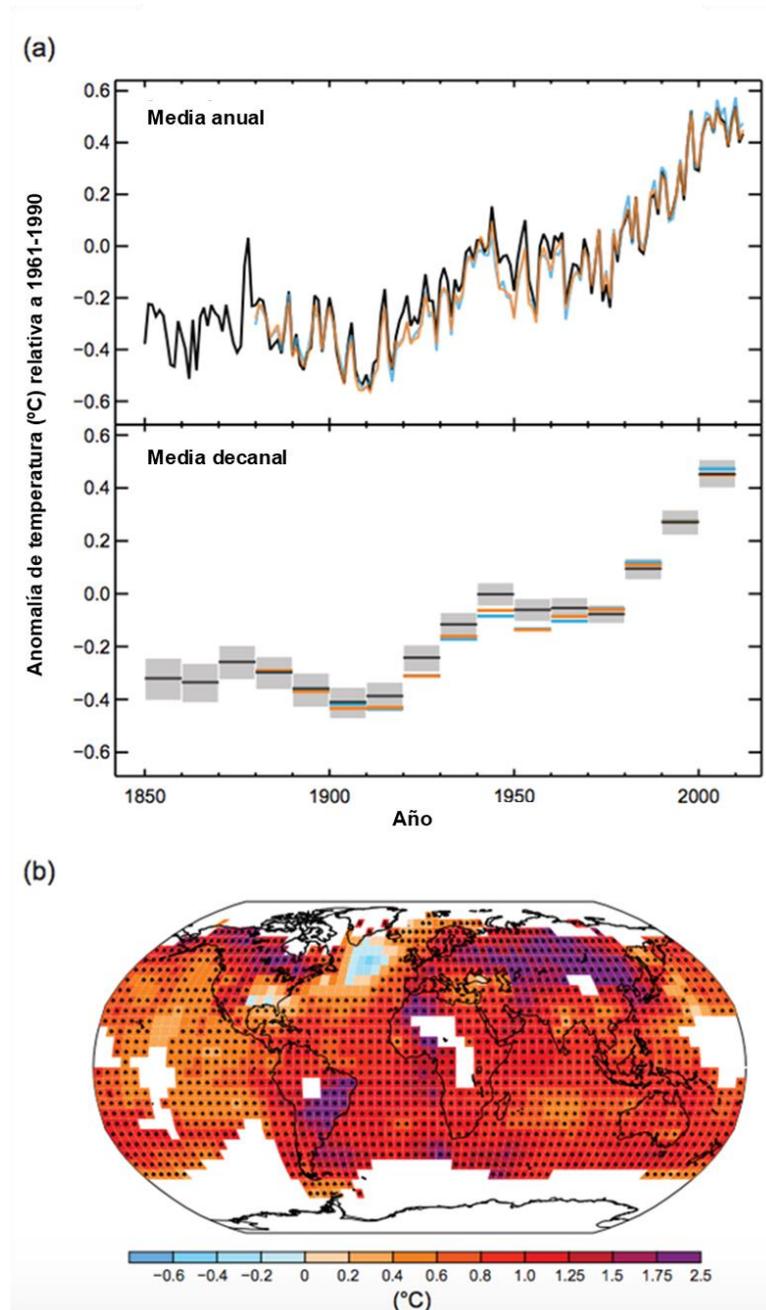


Figura 2-1 Evidencias globales de cambio climático en el período 1850 hasta 2012. (a) Anomalías globales medias observadas en la temperatura de la superficie terrestre y oceánica, desde 1850 hasta 2012 a partir de tres conjuntos de datos. (b) Mapa del cambio de temperatura superficial observado desde 1901 hasta 2012 derivado de tendencias de temperatura determinadas por regresión lineal de un conjunto de datos (línea naranja en el panel a). (Fuente: IPCC, 2013)

La confianza en el cambio de precipitación promediado sobre las áreas terrestres mundiales desde 1901 es baja antes de 1951 y media después (Figura 2-2). Promediada en las áreas terrestres de latitud media del hemisferio norte, la precipitación ha aumentado desde 1901 (confianza media antes y alta confianza después de 1951).

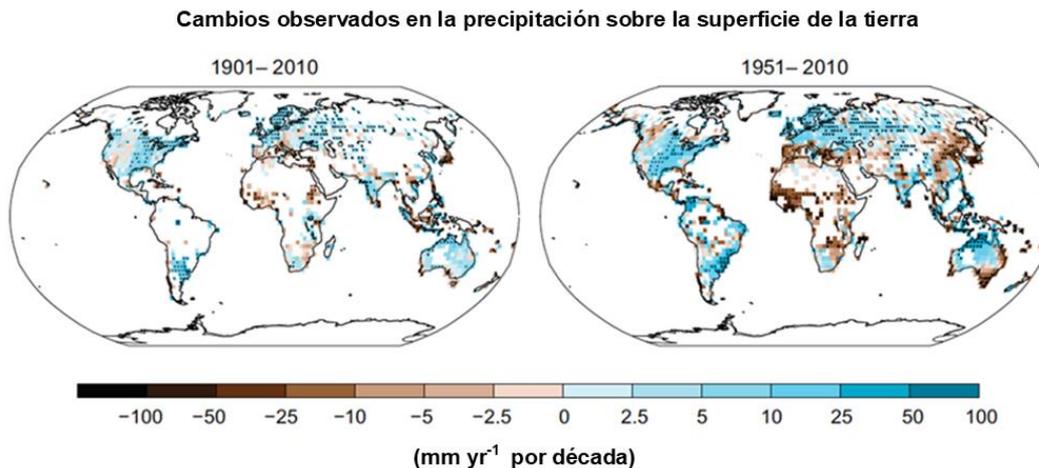


Figura 2-2 .- Mapas del cambio de precipitación observado desde 1901 hasta 2010 y desde 1951 hasta 2010. (Fuente: IPCC, 2013)

Las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso aumentó a niveles sin precedentes en al menos los últimos 800.000 años. Las concentraciones de dióxido de carbono han aumentado en un 40% desde tiempos preindustriales, principalmente a partir de emisiones de combustibles fósiles y, en segundo lugar, por el cambio neto en el uso del suelo. El océano ha absorbido alrededor del 30% del dióxido de carbono antropogénico emitido, que causa la acidificación del océano (Figura 2-3).

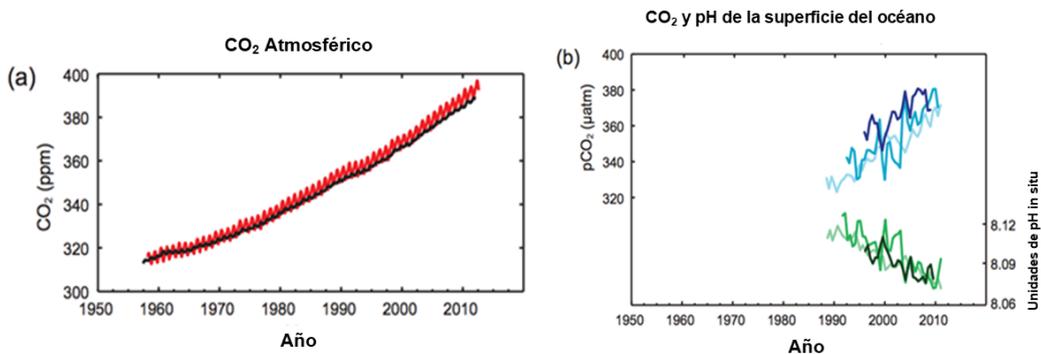


Figura 2-3 Múltiples indicadores observados de un ciclo global cambiante del carbono (a) concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2) de Mauna Loa ($19^{\circ} 32'N$, $155^{\circ} 34'W$ - rojo) y Polo Sur ($89^{\circ} 59'S$, $24^{\circ} 48'W$ - negro) desde 1958; (b) presión parcial de CO_2 disuelto en la superficie del océano (curvas azules) y pH in situ (curvas verdes), una medida de la acidez del agua del océano. Las mediciones son de tres estaciones del Atlántico ($29^{\circ} 10'N$, $15^{\circ} 30'W$ - oscuro azul / verde oscuro; $31^{\circ} 40'N$, $64^{\circ} 10'W$ - azul / verde) y los océanos Pacífico ($22^{\circ} 45'N$, $158^{\circ} 00'W$ - azul claro / verde claro). (Fuente: IPCC, 2013)

El calentamiento del océano domina el aumento de la energía almacenada en el sistema climático, contabilizando más del 90% de la energía acumulada entre 1971 y 2010. Es prácticamente seguro que el océano superior

(0–700 m) se calentó de 1971 a 2010 (Figura 2-4) y probablemente se calentó entre 1870 y 1971.

En las últimas dos décadas, las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida han estado perdiendo masa, los glaciares han seguido disminuyendo casi en todo el mundo, y el hielo marino de la capa de nieve de primavera del hemisferio del Ártico y el norte han seguido disminuyendo en extensión. La tasa de aumento del nivel del mar desde mediados del siglo XIX ha sido mayor que la tasa media durante los dos milenios anteriores. Durante el período 1901 a 2010, el nivel medio del mar global aumentó en 0,19 m [0,17m a 0,21 m] (Figura 2-4) (IPCC, 2013).

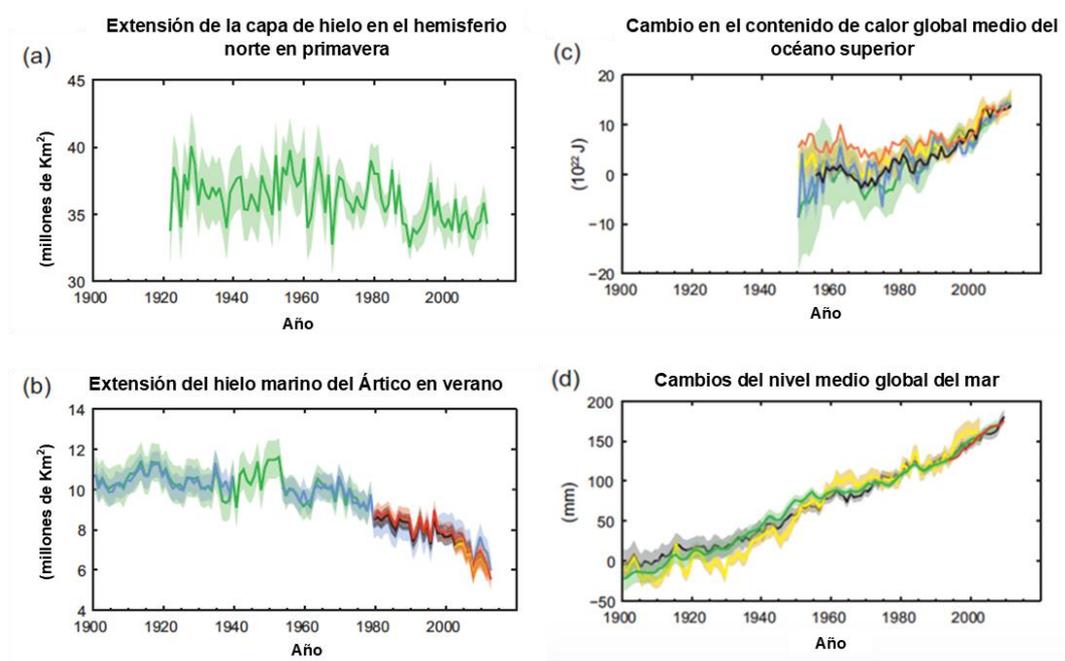


Figura 2-4 Múltiples indicadores observados de un clima global cambiante. (a) Extensión de la capa de nieve promedio del hemisferio norte de marzo a abril (primavera); (b) extensión del hielo marino promedio del ártico julio-agosto-septiembre (verano); (c) cambio en el contenido de calor global medio del océano superior (0–700 m) alineado a 2006-2010, y relativo a la media de todos los conjuntos de datos para 1970; (d) nivel medio global del mar en relación con la media 1900-1905 del conjunto de datos más antiguo, y con todos conjuntos de datos alineados para tener el mismo valor en 1993, el primer año de datos de altimetría satelital. Todas las series temporales (líneas de colores que indican diferentes conjuntos de datos) muestran los valores anuales y, cuando se evalúan, las incertidumbres se indican mediante sombreado de color. (Fuente: IPCC, 2013)

El informe especial sobre los impactos que produciría un calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones globales de gases de

efecto invernadero realizado por el IPCC (Masson-Delmotte et al., 2018), muestra que los modelos climáticos prevén diferencias robustas en las características regionales del clima entre el momento actual y un calentamiento global de 1,5 °C, y entre un calentamiento global de 1,5 °C y de 2 °C. Esas diferencias comprenden un aumento de la temperatura media en la mayoría de las regiones terrestres y oceánicas, de los episodios de calor extremo en la mayoría de las regiones habitadas, de las precipitaciones intensas en varias regiones, y de la probabilidad de sequía y de déficits de precipitación en algunas regiones.

Para 2100, se prevé con un nivel de confianza medio que el aumento del nivel medio global del mar sea aproximadamente 0,1 m inferior con un calentamiento global de 1,5 °C que con uno de 2 °C. En la superficie terrestre, se prevé que los impactos en la biodiversidad y en los ecosistemas, entre ellos la pérdida y la extinción de especies, sean menores con un calentamiento global de 1,5 °C que con uno de 2 °C. Se prevé que los riesgos relacionados con el clima para la salud, los medios de subsistencia, la seguridad alimentaria, el suministro de agua, la seguridad humana y el crecimiento económico aumenten con un calentamiento global de 1,5 °C, y que esos riesgos sean aún mayores con un calentamiento global de 2 °C (IPCC, 2018).

Existe un alto nivel de confianza que la mayoría de las necesidades de adaptación serán inferiores con un calentamiento global de 1,5 °C que, con uno de 2 °C, un nivel de confianza medio que la adaptación y la capacidad de adaptación de algunos sistemas naturales y humanos son limitadas con un calentamiento global de 1,5 °C, con pérdidas asociadas, así como que el número de opciones de adaptación y su disponibilidad varían en función del sector.

En las trayectorias de los modelos en las que el calentamiento no sobrepasa 1,5 °C o lo sobrepasa de forma reducida, las emisiones antropógenas globales netas de CO₂ disminuyen en un 45% aproximadamente de aquí a 2030 con respecto a los niveles de 2010 y son iguales a cero en torno a 2050. Para que el calentamiento global no rebase el límite de 2 °C se calcula que las emisiones de CO₂ tienen que reducirse aproximadamente en un 25% de aquí a 2030 en

la mayoría de las trayectorias y ser iguales a cero en torno a 2070. En las emisiones distintas de CO₂ de las trayectorias que limitan el calentamiento global a 1,5 °C se observan reducciones drásticas que son similares a las de las trayectorias que limitan el calentamiento a 2 °C. (Figura 2-5: El gráfico principal muestra las emisiones antropógenas netas globales de CO₂ en las trayectorias que limitan el calentamiento global a 1,5 °C con sobrepaso nulo o reducido (menos de 0,1 °C) y las trayectorias con mayores sobrepasos). Tomado de (IPCC, 2018).

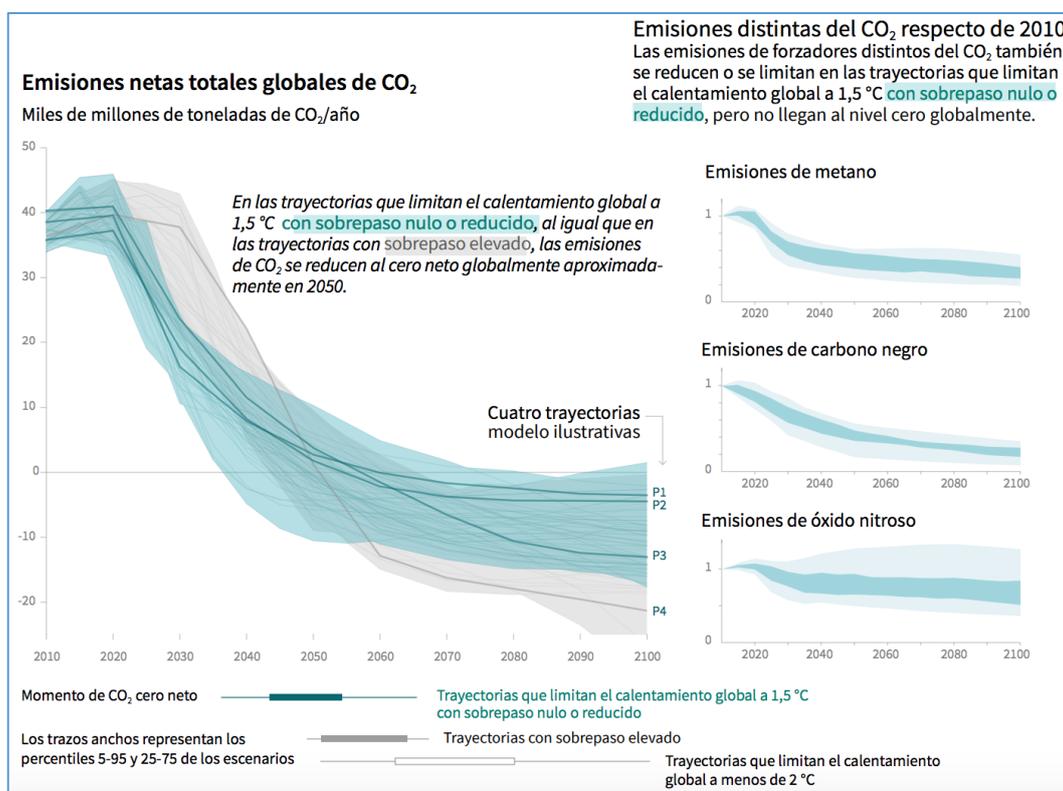


Figura 2-5 Características de las trayectorias de emisiones globales de CO₂ en las trayectorias que limitan el calentamiento global a 1,5 °C con sobrepaso nulo o reducido (menos de 0,1 °C) y las trayectorias con mayores sobrepasos. (Fuente: IPCC, 2018)

En América Latina, se anticipa que hasta mediados del siglo XXI los bosques tropicales del Amazonas serían reemplazados gradualmente por sabanas y vegetación semiárida, por vegetación de tierras áridas. Además, se podrían experimentar pérdidas de diversidad biológica, con extinciones de especies, y disminuciones en la productividad agrícola y ganadera con consecuencias adversas para la seguridad alimentaria, aumentando el número de personas amenazadas por el hambre. Con respecto al agua, los cambios en

los patrones de precipitación y la desaparición de los glaciares afectarían significativamente la disponibilidad del recurso para el consumo humano, agrícola e hidroeléctrico (IPCC, 2007).

2.2. Modelos climáticos globales

Los modelos de circulación general o modelos climáticos globales (MCG) son herramientas importantes en la evaluación del cambio climático (Fowler et al., 2007). Los MCG se basan en los principios generales de la dinámica y la termodinámica de fluidos, los modelos representan diversos sistemas de la Tierra, incluyendo la atmósfera y la superficie terrestre (Moradkhani et al., 2010).

Los MCG se utilizan generalmente para simular el clima actual y proyectar el clima futuro con forzamiento de gases de efecto invernadero y aerosoles. Los modelos suelen dividir en una rejilla horizontal la atmósfera y el océano, con una resolución horizontal de 2 a 4 ° de latitud y longitud, con 10 a 20 capas en la vertical. La mayoría de estos modelos simulan los procesos a escala global con una representación bastante exacta del clima planetario promedio. En la última década se ha trabajado arduamente en los modelos para mejorar su capacidad de simulación de climas presentes (Dibike & Coulibaly, 2005).

La mejora de núcleos dinámicos y resoluciones; y la incorporación de más componentes físicos como la superficie de la tierra y los procesos de hielo de mar, y parametrizaciones de procesos físicos, han conllevado a la evolución de los modelos climáticos globales (DeMott et al., 2007) (Figura 2-6). Sin embargo, estos modelos solo son de gran utilidad en la proyección y la comprensión de los futuros cambios climáticos globales, su baja resolución les impide resolver a escala de cuenca (Moradkhani et al., 2010) con alta variabilidad espacial.

Por esta razón se reducen de escala los modelos climáticos globales resultando así los llamados modelos climáticos regionales (MCRs). Para la reducción de escala se utilizan comúnmente los métodos estadísticos y dinámicos. Los métodos estadísticos emplean funciones de transferencia estadística o empíricas para relacionar el clima local a las salidas de los modelos climáticos globales. Mientras que los métodos dinámicos, utiliza salidas de modelos climáticos globales como sus condiciones iniciales y de

contorno (Fujihara et al., 2008). Los modelos climáticos regionales estadísticos y dinámicos pueden proporcionar resultados significativos a nivel local o regional (Block et al., 2009).

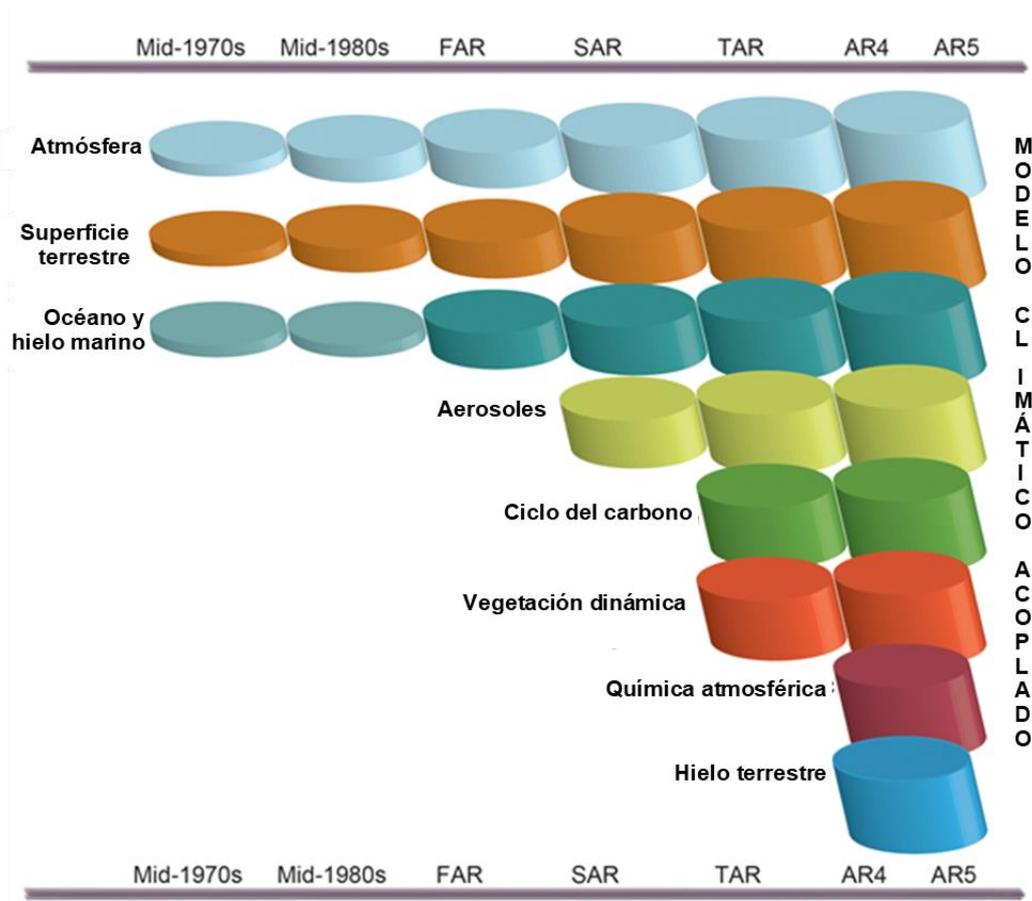


Figura 2-6 Evolución de los modelos climáticos globales en los últimos 40 años.

Con el fin de evaluar la incidencia del cambio climático sobre el sistema hidrológico se recurre al uso de modelos climáticos para proveer una visión futura de la disponibilidad del agua, lo que permite a los responsables de la toma de decisiones proyectarse a un futuro plausible. Aunque hay que considerar que todavía hay incertidumbres en los controladores climáticos futuros, y en cómo los sistemas hidrológicos globales responden a su comportamiento (Harding et al., 2011).

La captura de la variabilidad climática interanual en lugar de las propiedades estadísticas del clima aún constituye un reto para los modelos

(Kyselý & Dubrovský, 2005) lo que impide la exactitud de estimación de la disponibilidad del recurso hídrico.

En este objetivo varios modelos de circulación general atmosférica de quinta generación se han desarrollado: ECHAM5, fue desarrollado por Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), actualizado en su última versión como ECHAM6 (Stevens et al., 2013). CCSM3 fue desarrollado por el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas, consiste en componentes de atmósfera, tierra, océano y hielo marino que están unidos a través de un acoplador que intercambia información de estado y flujos entre los componentes, actualizado en su última versión como CCSM4 (Gent et al., 2011), que es un subconjunto de CESM1.

2.3. Escenarios de emisiones de cambio climático

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en los años 1990 y 1992, desarrolló varios escenarios de emisiones a largo plazo que consideraban variables sociales y económicas, que servirían de base para los modelos de la circulación mundial. Estos escenarios fueron publicados en 1992 denominándolos “escenarios IS92”, siendo entonces la primera familia de escenarios mundiales que proporcionaron estimaciones de los gases de efecto invernadero. Los escenarios fueron evaluados en 1995 considerando los cambios en cuanto a la comprensión de las fuerzas que rigen las emisiones, así como las metodologías. En 1996 en reunión plenaria el IPCC decidió desarrollar escenarios que representaran las fuerzas determinantes de las emisiones y su evolución, solicitando así un Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (Special Report on Emissions Scenarios, SRES) (Gregory et al., 2000). Dicho informe fue aceptado en marzo de 2000 por el Grupo de trabajo III (GTIII). Los nuevos escenarios fueron publicados por el IPCC en el 2001, siendo desde entonces ampliamente utilizados para modelar las emisiones futuras.

Los escenarios SRES están agrupados en cuatro familias que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando toda una serie de fuerzas originantes demográficas, económicas y tecnológicas, junto con las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) resultantes. Las familias se denominan A1, A2, B1 y B2, (IPCC, 2000).

“La línea evolutiva y familia de escenarios A1, presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos, que reflejan tres direcciones alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B)”.

“La familia de líneas evolutivas y escenarios A2, describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico y cambio tecnológico lento”.

“La familia de líneas evolutivas y escenarios B1, describe un mundo convergente, con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información”.

“La familia de líneas evolutivas y escenarios B2, describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental”.

La comunidad científica definió en el quinto informe de evaluación del IPCC, un conjunto de cuatro escenarios nuevos, denominados Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathway, RCP) (Figura 2-7). RCP2.6 representa niveles muy bajos de concentración de gases de efecto invernadero (~490 ppm CO₂ eq). Es un escenario de “pico y declive”; su nivel de forzamiento radiativo alcanza inicialmente un valor aproximado de 3,1 W/m² antes de 2100, y luego disminuye a 2,6 W/m² para el 2100 (Van Vuuren et al., 2007). RCP4.5 y RCP6.0 representa los niveles de concentración promedio de gases de efecto invernadero (~450 ppm de CO₂ eq). Es un escenario de estabilización donde el forzamiento radiativo total se estabiliza, poco después del año 2100, sin superar el forzamiento radiativo proyectado a largo plazo (4,5 W/m²) y (6,0 W/m²) respectivamente (Clarke et al., 2007). RCP 8.5 exhibe niveles muy altos de concentración de gases de efecto invernadero (~1370 ppm de CO₂ eq); su forzamiento radiativo alcanza 8,5 W/m² para el año 2100 (Riahi et al., 2007).

Los escenarios de RCP pueden representar una variedad de políticas climáticas del siglo XXI, frente a los Escenarios del SRES (IPCC, 2013).

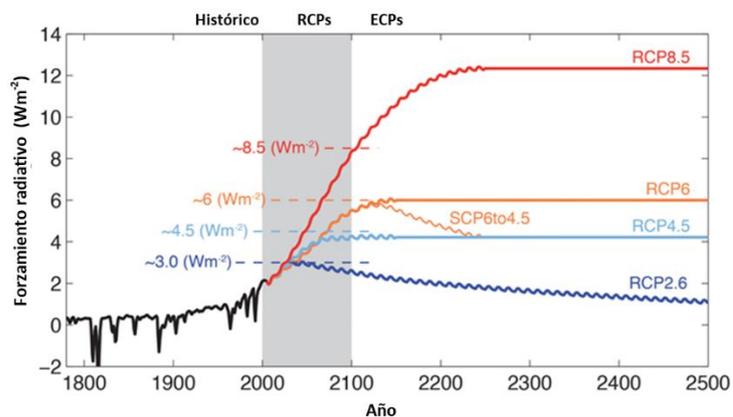


Figura 2-7 Forzamiento radiativo de los escenarios RCP

Los escenarios de RCP no están directamente basados en argumentos socioeconómicos como los escenarios de SRES; éstos especifican las concentraciones y las emisiones correspondientes. Los escenarios de RCP incluyen de manera más consistente los gases de vida corta y cambios de uso del suelo (IPCC, 2013) (Figura 2-8).

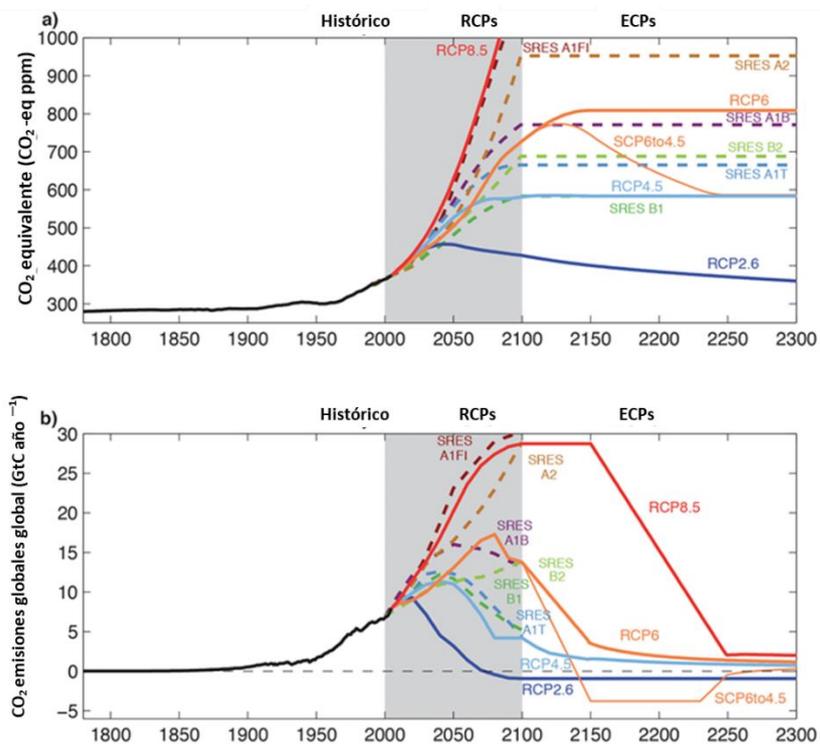


Figura 2-8 Emisiones mundiales de CO₂ para escenarios RCP y sus ECP.

2.4. Efecto del cambio climático en los recursos hídricos

Se espera que el cambio climático intensifique el estrés que ya padecen los recursos hídricos, acelere las pérdidas de masa de los glaciares y las reducciones de la cubierta de nieve, disminuya la disponibilidad de agua en zonas semiáridas, aumente significativamente las lluvias en numerosas regiones, y disminuya los valores medios de precipitación en otras (IPCC, 2007). Por lo tanto, Los recursos hídricos están sujetos a sufrir cambios significativos debido a la variabilidad en los períodos de lluvias y a los cambios estacionales, lo que afecta la disponibilidad local de agua, la descarga de los ríos y las fuentes de agua estacional (Arnell et al., 2011). Esto se traduce en graves consecuencias sociales, ambientales y económicas, con mayores repercusiones en los países subdesarrollados.

La mayoría de los estudios sugieren que se espera un clima más cálido para desplazar los tiempos de deshielo a principios de año y causar escasez de agua durante los meses secos del verano. Además, se espera un aumento en la frecuencia y gravedad de los fenómenos hidrológicos extremos, como las inundaciones (Mosquera-Machado & Ahmad, 2007) y las sequías (Puri et al., 2011). Estos fenómenos pueden afectar directamente el bienestar humano a través de daños catastróficos, o indirectamente a través de los efectos adversos sobre la productividad de los cultivos. Estas amenazas pueden producirse de manera desmedida en los países en vías de desarrollo ya que tienen pocos recursos para la mitigación y la adaptación (Manabe et al., 2004). Los cambios en los recursos hídricos son particularmente relevantes en las áreas donde la disponibilidad de agua es un factor limitante para el desarrollo económico (Cudennec et al., 2007). El IPCC (2014) espera que, por cada grado Celsius que aumente la temperatura global, al menos el 20% del suministro de agua se reduzca en regiones áridas y semiáridas en latitudes subtropicales y latitudes medias, y (González-Zeas et al., 2019), afirman que en las zonas montañosas tropicales la demanda de agua está aumentando rápidamente.

2.5. Efecto del cambio climático en el ciclo hidrológico

La contribución a la red fluvial no solo depende de la precipitación sino también del comportamiento de todas las variables hidrológicas. Kundzewicz et al., (2007) sostienen que la precipitación, la temperatura y la demanda de evaporación son los principales factores climáticos que determinan la disponibilidad de agua.

Se espera que el calentamiento climático intensifique y acelere el ciclo hidrológico mundial, los resultados de diferentes salidas de modelos climáticos globales lo evidencian (IPCC, 2007). Los estudios del balance hídrico de cuencas hidrográficas y las tendencias mundiales y regionales en la evaporación, evapotranspiración y el contenido de vapor de agua atmosférico apoyan dicha intensificación (Huntington, 2010).

El efecto en los sistemas hidrológicos puede variar a nivel mundial. Por ejemplo; Gebrechorkos et al., (2019) estudiaron los impactos del cambio proyectado en el clima sobre el balance hídrico en las cuencas de Etiopía (EthShed), Kenia (KenShed) y Tanzania (TanShed). Los resultados muestran un aumento en la precipitación, en relación con el período de referencia (1961–1990), en EthShed (14% - 50%) y KenShed (15% - 86%) y una disminución en TanShed (1.3% - 6.3%) en los años 20 (2011–2040), los años 50 (2041–2070) y los años 80 (2071–2100) bajo las tres vías de concentración representativas (RCP; RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5). La temperatura máxima (anomalías de hasta 3,7 °C) y la temperatura mínima (anomalías de hasta 2,76 °C) serán más cálidas que el período de referencia a lo largo del siglo XXI en las tres cuencas. Se proyecta un aumento (disminución) en el flujo de la corriente estacional y anual, el agua del suelo y la evaporación en EthShed y KenShed (TanShed) en los años 20, 50 y 80.

En el suroeste de Australia se proyecta que el cambio climático cause condiciones secas en la región, y en otras regiones de clima mediterráneo (Barron et al., 2012). En Quebec, Canadá la fase de precipitación y en consecuencia la relación de la nieve/precipitación y el volumen de agua almacenada en la capa de nieve se verá afectada por el aumento de la

temperatura prevista durante las temporadas de invierno y primavera (Boyer et al., 2010). En el Noroeste del Pacífico, el impacto del cambio de temperatura influencia el balance lluvia/nieve (Elsner et al., 2010). En la cuenca Lago Winnipeg de Canadá, se espera que el aumento de la precipitación y temperatura anual influyan en el volumen de la acumulación de nieve y fusión; y en el tiempo y la intensidad de la escorrentía (Shrestha et al., 2012). En la mayoría de los sectores de Iberia se espera un aumento de las precipitaciones en invierno y una pequeña disminución para las temporadas de primavera y otoño para el futuro 2041-90 (Trigo & Palutikof, 2001).

Las alteraciones que supone el cambio climático en el ciclo hidrológico crean incertidumbre en la gestión de los recursos hídricos, lo que plantea un reto para los gestores del agua.

2.6. Efecto del cambio climático en los requerimientos de agua de los cultivos

Debido al cambio climático se predice que en la mayoría de las regiones en desarrollo, el estrés hídrico aumentará; sin embargo, en la mayoría de las regiones industrializadas, descenderá (Alcamo et al., 2007). Fischer et al., (2007) afirman que, en las regiones en desarrollo, los requisitos netos de riego aumentan en más del 50% y en las regiones desarrolladas en un 16%. (Gondim et al., 2012) proyectaron que la demanda de agua de riego aumentaría entre un 8% y un 9% a mediados del siglo XXI en una cuenca brasileña. Savé et al., (2012) determinaron que la demanda de riego aumentaría en un 40-250%, dependiendo de los cultivos (maíz, manzana y alfalfa) para fines del siglo XXI en una cuenca española. Nkomozepe & Chung (2012) mencionan que, aunque existe una incertidumbre significativa en las proyecciones, se espera que la demanda de agua de riego para los cultivos de maíz aumente un 66% en la década de 2050 y un 99% en la década de 2090 en Zimbabwe. Del mismo modo, la demanda de riego para los cultivos de arroz en Corea aumentará en un 2,4% y 7,9% en la década de 2050 y 99% en la década de 2090; respectivamente.

Investigaciones afirman que, bajo el efecto del cambio climático, los requisitos de agua de riego aumentarían en áreas tropicales, por ejemplo, Knox et al., (2010) han evaluado los impactos espaciales y temporales del cambio climático en los requisitos de agua de riego y el rendimiento de la caña de azúcar cultivada en Swazilandia. Los resultados muestran que, para producir un peso unitario de sacarosa equivalente a los niveles óptimos de producción actuales, se pronostica que las necesidades futuras de riego aumentarían en un 20-22%, y que, con el cambio climático, la capacidad máxima actual de los esquemas de riego existentes podría no cumplir con los aumentos pronosticados en la demanda de riego en casi el 50% de los años, suponiendo una disponibilidad de agua sin restricciones. De Silva et al., (2007) afirman que, en la mayor parte de Sri Lanka, los impactos del cambio climático

aumentarán los requisitos de riego de la estación húmeda (Maha) en los escenarios considerados y que el cultivo de arroz tendrá más estrés hídrico.

El análisis global del impacto del cambio climático y la variabilidad climática en los requisitos de agua de riego muestra que, se calcula que el total global de los requisitos netos de agua de riego aumentará entre un 3% y un 5% hasta la década de 2020 y entre un 5% y un 8% hasta la década de 2070 (Döll, 2002). Fujihara et al., (2008) afirman que, si el área regada se expande en el futuro bajo la expectativa del flujo actual, se producirá escasez de agua. El cambio climático no solo afecta los recursos hídricos sino también la demanda de agua. La seguridad futura del agua y los alimentos dependerá, entre otros factores, del impacto del cambio climático en la demanda de agua para riego.

2.7. Efectos del cambio climático en la planificación de los recursos hídricos

Las decisiones de planificación de los recursos hídricos futuros deben basarse además de la demanda de agua, en los escenarios futuros del clima y el caudal (García-Ruiz et al., 2011).

El cambio climático afecta la funcionalidad y el funcionamiento de la estructura hidrológica existente y las prácticas de gestión del agua (Kundzewicz et al., 2007), por lo tanto, deben considerarse en el diseño y planificación de los sistemas de recursos hídricos. La gestión del agua es una opción para garantizar la preparación adecuada para la escasez de agua (Magrin et al., 2014) a través de las reglas de operación del embalse (Ahmadi et al., 2015). Las curvas de diseño o la eficiencia del riego pueden utilizarse como una herramienta fácil y confiable para mitigar los impactos del cambio climático (Guo & Shen, 2016; Zhang et al., 2019).

Park et al., (2009) evaluaron el impacto del cambio climático en la variación temporal de los niveles de agua en los reservorios de riego de arroz con cáscara, y ajustaron las liberaciones de los reservorios en agosto y septiembre como una estrategia de adaptación futura. Los resultados del impacto futuro mostraron que los futuros depósitos de reservorios de la temporada de otoño e invierno después de la finalización del período de riego disminuyeron para 2080. Por lo tanto, como estrategia de adaptación futura, el control de la liberación del reservorio, al disminuir en agosto y septiembre, podría garantizar el nivel del agua del embalse en la temporada de otoño e invierno al alcanzar el nivel del agua a casi el 100% de la gestión actual del nivel del agua del embalse. Ncube et al., (2011) evaluaron la operación del yacimiento bajo escenarios climáticos variables. Los resultados muestran que el reservorio puede satisfacer las demandas actuales, pero no podrá hacer frente al aumento previsto de la demanda. El nivel previsto de cambio climático dará como resultado una escasez de hasta el 30% para los usuarios intermedios, necesitando revisar cómo se opera el depósito.

Para hacer frente a los efectos del cambio climático en la gestión de los recursos hídricos se deben aplicar medidas operativas en la gestión de los recursos hídricos de los sistemas de explotación y mejorar la eficiencia del riego. De lo contrario, el recurso de agua subterránea debería incorporarse a la gestión del sistema de explotación, o deberían agregarse nuevas estructuras de almacenamiento en el sistema (Gutiérrez et al., 2014; Paola et al., 2013). Otra opción es la sustitución de cultivos estacionales en la estación seca, por cultivos que requieren una cantidad de agua menor para su producción. Por ejemplo; en el área de estudio, el banano y el plátano requieren menos agua para su producción que el café y el cacao.

2.8. Modelos hidrológicos en estudios del efecto del cambio climático en los recursos hídricos

La respuesta hidrológica al cambio climático se ha estudiado a través de la aplicación de modelos hidrológicos a escala de cuencas, por ejemplo; Chirivella et al., (2015); Estrela et al., (2012); Forbes et al., (2011); Toth et al., (2006).

En las cuencas del río Tajo y río Guadiana en España, Kilsby et al., (2007) evalúan el efecto del cambio climático en la producción de escorrentía, caudales de los ríos y la disponibilidad del recurso, utilizando el modelo conceptual precipitación - escorrentía UP2. Mientras que, en la cuenca Lago Winnipeg en Canadá, Shrestha et al., (2012) evalúan los cambios hidrológicos inducidos por el cambio climático empleando el modelo hidrológico Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (por sus siglas en inglés SWAT). Para modelar los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos en la cuenca del Siruana en España se utilizó el modelo hidrológico de base física HEC-HMS para evaluar la precipitación y la escorrentía de la cuenca y el modelo distribuido VisualBALAN para estimar la recarga natural (Candela et al., 2012). Para la evaluación de los posibles impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos en la cuenca Ngerengere, Tanzania se empleó el modelo de HBV debido a su capacidad para adaptarse a los datos limitados disponibles para el modelado. Otro modelo ampliamente utilizado en España, para estudios de impactos del cambio climático es el modelo distribuido SIMPA (Simulación Precipitación-Aportación) (Estrela & Quintas, 1996).

2.8.1. Modelo Hidrológico Agregado Témez

El modelo de Témez (Témez, 1977) es un modelo agrupado de lluvia-escorrentía que utiliza una simulación continua y conceptual que modela valores mensuales promedio en un régimen natural en cualquier punto dado de la red hidrológica (Figura 2-9). El modelo pertenece al grupo de modelos de simulación de cuencas hidrográficas agregadas (Estrela, 1992). Los aportes al

modelo provienen de datos potenciales de precipitación y evapotranspiración, topología, clasificación de subcuencas y mapas de unidades hidrogeológicas. El modelo de Témez calcula la evolución de la descarga total del sistema hidrológico para una discretización temporal dada. La precipitación se considera la única entrada de agua al sistema y agrega humedad al suelo. La intercepción y la detención no se consideran. La evapotranspiración reduce la cantidad de humedad del suelo. El excedente de precipitación se divide en escorrentía superficial y flujo de recarga del acuífero (Témez, 1977). Interflujo no se considera. Además, el acuífero produce un flujo de descarga que es función de la profundidad del agua almacenada. Finalmente, la descarga total es la suma de la escorrentía superficial y la descarga del acuífero (Jódar et al., 2017).

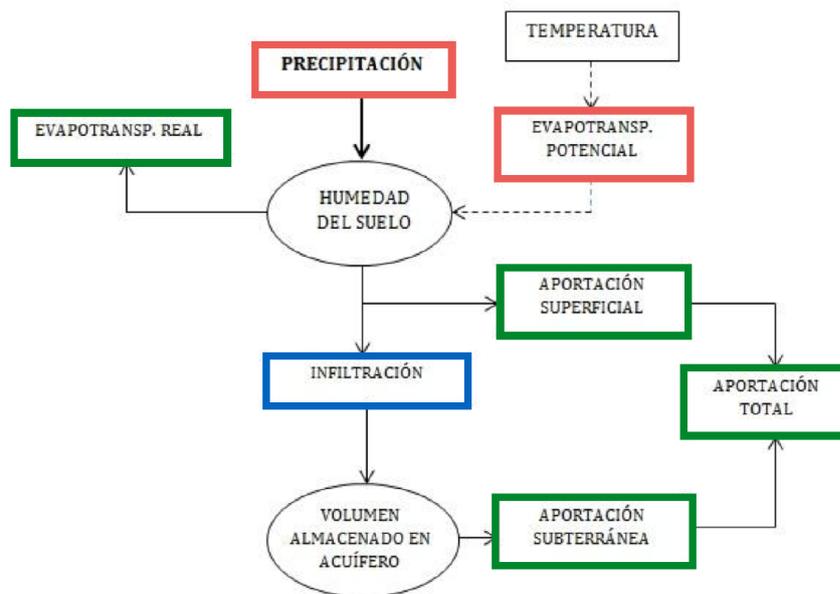


Figura 2-9 Esquema conceptual del Modelo Hidrológico Agregado Témez.

El modelo de Témez depende de los siguientes cuatro parámetros: H_{max} , que es la profundidad máxima de humedad retenida por el suelo; I_{max} , que es el parámetro que limita la tasa máxima de infiltración de agua del suelo; C , que es el parámetro de proporcionalidad entre el umbral de escorrentía y el déficit de humedad del suelo cuando se supone que estas dos variables están relacionadas linealmente; y α , que es el coeficiente de agotamiento del

acuífero. El modelo Témez se ha utilizado en otros estudios por ejemplo Jódar et al., (2017); Marcos-Garcia et al., (2017); Yeste et al., (2018); Zambrano-Mera et al., (2018).

2.8.2. Modelo Distribuido PATRICAL

El módulo PATRICAL precipitación aportación en tramos de red integrados con calidad del agua (Pérez-Martín, 2005; Pérez-Martín et al., 2014) permite construir modelos especialmente distribuidos con paso de tiempo de simulación mensual del ciclo hidrológico, obteniendo los flujos de agua que se producen en los diferentes puntos de la cuenca y los niveles piezométricos medios en los acuíferos. Además, incluye la simulación del contenido de nitrato y de la conductividad eléctrica del agua en el suelo, en el medio saturado, en los acuíferos y en las aguas superficiales. Este modelo realiza la simulación del ciclo hidrológico en régimen natural o en régimen alterado, por la actividad antrópica, aplicando la formulación de Témez, (1977) en cada pequeño elemento (por ejemplo resolución de 1 km x 1 km) en que discretiza la cuenca hidrográfica, incluyendo la menor posibilidad de evapotranspiración de la vegetación con contenidos bajos de humedad en el suelo, las transferencias laterales entre acuíferos, las relaciones río-acuífero (incluyendo la posibilidad de pérdidas en cauces) y la evolución de la piezometría media de los acuíferos (Pérez-Martín, 2005). El modelo PATRICAL puede funcionar, como se ha indicado, en régimen natural o en régimen alterado antrópicamente. En este último caso incluye la evolución temporal y distribución espacial de los retornos de riego que recargan los acuíferos, y las extracciones de aguas subterráneas (agrícolas y urbanas), y adicionalmente, para el caso de simulación de la calidad del agua, también los retornos de riego superficiales y los retornos urbanos superficiales. Debe tenerse en cuenta que el modelo reproduce el ciclo hidrológico natural y parte del ciclo hidrológico alterado, ya que no incluye la gestión de embalses ni las modificaciones que se producen en el régimen de caudales por los mismos. El esquema conceptual del modelo distribuido PATRICAL se muestra en la Figura 2-10.

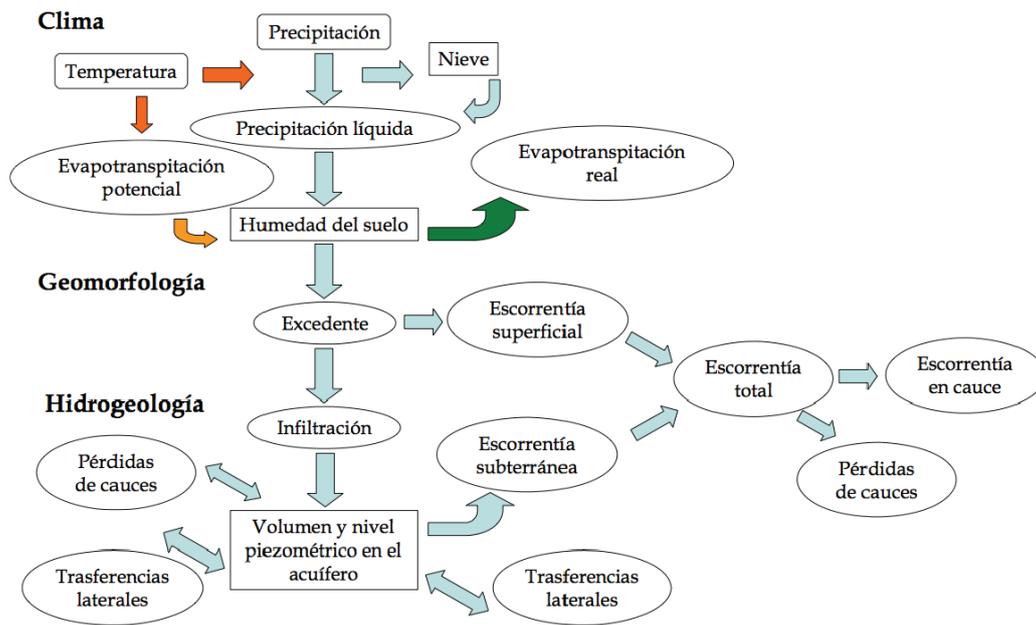


Figura 2-10 Esquema conceptual del Modelo distribuido PATRICAL



3. ÀREA DE ESTUDIO

3.1. Características físicas de la demarcación

La Demarcación Hidrográfica de Manabí (DHM) es parte de la división política administrativa para la gestión de los recursos hídricos en el Ecuador establecido por la Secretaría del Agua (SENAGUA) organismo encargado de dirigir la gestión integral e integrada de los recursos hídricos en todo el territorio del Ecuador. Ecuador está constituido por 9 demarcaciones hidrográficas: Esmeraldas, Manabí, Guayas, Mira, Jubones, Puyango-Catamayo, Napo, Pastaza y Santiago (Figura 3-1).

La DHM se localiza al noroccidente de Ecuador, entre las coordenadas geográficas $1^{\circ}5' W- 79^{\circ}44'W$ y $1^{\circ}50'S - 0^{\circ}26'N$; limita al norte con la demarcación hidrográfica de Esmeraldas, con los ríos Muisne y Balzar; al sur con la demarcación hidrográfica del Guayas (DHG) con los ríos Manglar Alto y Valdivia; al este con los ríos Daule y Blanco de la DHG y al oeste con el océano Pacífico. Tiene una extensión longitudinal de 190 km de norte a sur y de este a oeste de 80 Km.



Figura 3-1 Demarcaciones hidrográficas del Ecuador

La DHM está formada por 17 cuencas hidrográficas, siendo las más importantes, la cuenca del río Chone, la cuenca del río Portoviejo y la cuenca del río Jama, las que cubren una extensión de 6.202 km² de un total de 11.502 km², es decir un 54% del territorio total de la DHM, el resto de las cuencas de menor tamaño para efectos de planificación en la gestión de los recursos hídricos se las han agrupado en 3 grupos (Figura 3-2), teniendo así, la cuenca del río Coaque (1.714 km²), cuenca del río Briceño (827 km²) y la cuenca del río Jipijapa (2.757 km²). Un resumen de los cantones que forman parte de cada cuenca se muestra en la Tabla 1.

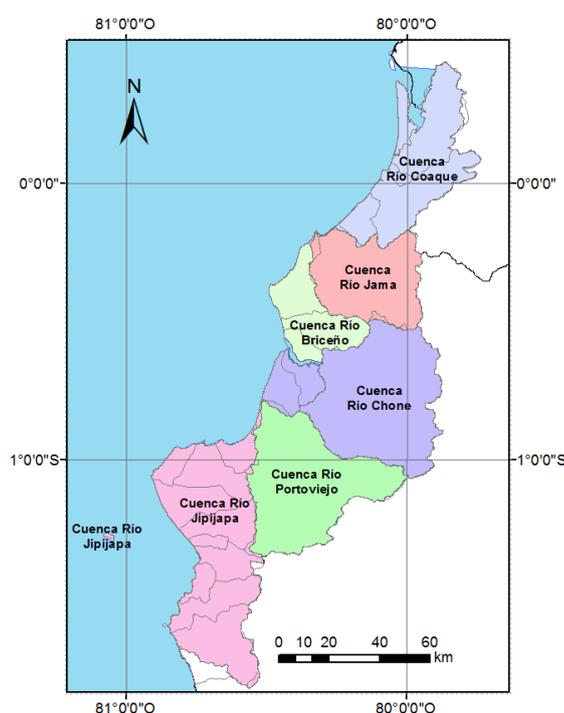


Figura 3-2 Ubicación de las cuencas de la Demarcación hidrográfica de Manabí

Código de cuenca	Nombre de la cuenca	Cantones	Área (Km ²)
MA-01	Jipijapa	Portoviejo, Jipijapa, Manta, Puerto López, Jaramijó, Santa Elena	2757,53
MA-02	Portoviejo	Portoviejo, Jipijapa, Montecristi Pichincha, Rocafuerte, Santa Ana, Sucre, 24 De Mayo	2089,59
MA-03	Chone	Portoviejo, Chone, Junín, Pichincha, Rocafuerte, Sucre, Tosagua, Bolívar, San Vicente	2733,71
MA-04	Briceño	Chone, Jama, San Vicente	827,87
MA-05	Jama	Chone, Flavio Alfaro, Sucre, Jama, San Vicente.	1379,10
MA-06	Coaque	Muisne, Pedernales, Jama	1714,31

Tabla 1 Alcance de la planificación de la DHM. (Fuente: SENAGUA, IGM)

3.2. Clima

La DHM, es de clima tropical, está influenciado por climas de origen montañoso, oceánico y tropical; presenta dos estaciones pronunciadas, una seca y una lluviosa. La estación seca es similar a la combinación de las estaciones de primavera y verano de los trópicos, mientras que la estación lluviosa es similar a estaciones de otoño e invierno, siendo la ausencia o presencia de lluvias la principal característica. La temperatura media anual de la DHM (Figura 3-3) varía desde los 24 °C hasta los 26 °C, encontrando la temperatura relativamente más alta en las zonas altas de la cuenca del río Chone y río Portoviejo, mientras que las más bajas se encuentran al sur de la demarcación en la cuenca del río Jipijapa. La precipitación media anual en la DHM (Figura 3-4) varía entre los 600 y los 1.600 mm por año.

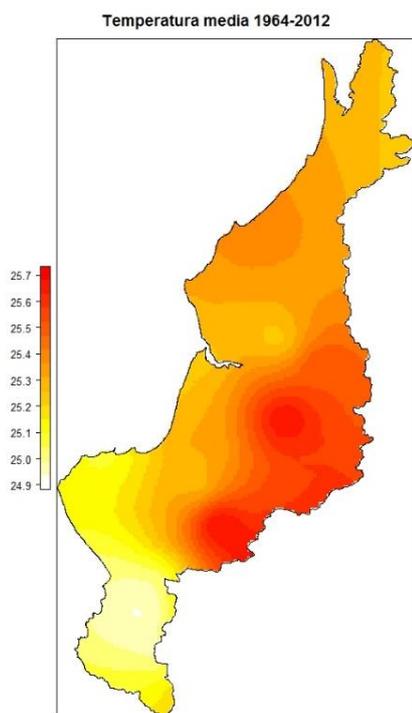


Figura 3-3 Temperatura media DHM 1964-2012

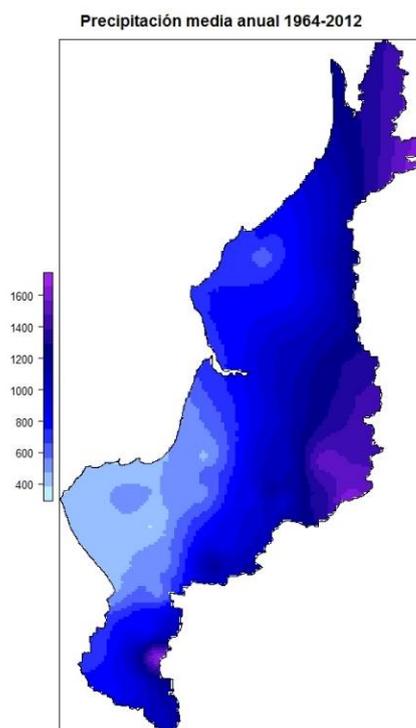


Figura 3-4 Precipitación media anual de la DHM 1964-2012

La distribución espacial de las precipitaciones en la DHM se produce con mayor intensidad al norte y al este, en contraste con el sur y el oeste. Las lluvias más elevadas se dan al este de la demarcación, con valores que superan

los 1.500 mm, las más bajas se dan en el suroeste, con lluvias menores a los 400 mm por año. Temporalmente la precipitación se presenta con mayor intensidad en los meses de diciembre a mayo, meses en que la precipitación anual puede alcanzar valores de hasta un 85%, los meses de mayor intensidad son febrero y marzo; en los meses de junio a noviembre la precipitación es representativamente menor a los meses anteriores, en esta temporada las menores precipitaciones se dan en los meses de agosto o septiembre con valores menores al 2% de la precipitación anual.

3.3. Hidrografía

Los recursos hídricos en la DHM son de origen superficial y subterráneo, dependen de las precipitaciones que se presentan y de la capacidad de almacenamiento de agua subterránea. Los recursos hídricos superficiales se utilizan generalmente en las zonas ribereñas, donde el fácil acceso permite satisfacer la demanda urbana y agrícola.

La cuenca del río Jipijapa (MA-01), se localiza al sur de la provincia de Manabí, comprende la totalidad de las cuencas de los ríos Jaramijó, Manta, San Mateo, Cañas, Río Bravo, Canta Gallo, Jipijapa, Salaite, Buenavista y Ayampe. La extensión total de todas estas cuencas de menor tamaño es de 2.757 Km² con una altitud máxima de e involucra a los cantones Portoviejo, Jipijapa, Manta, Puerto López, Jaramijó, de la provincia de Manabí y parte del cantón Santa Elena de la provincia de Santa Elena. Este grupo de pequeñas cuencas son producto de la presencia de la cordillera de Chongón y Colonche, que se extiende desde la provincia del Guayas hasta Esmeraldas, cruzando por Santa Elena y Manabí, la altitud máxima de las colinas que forman estas cuencas es de aproximadamente 800 metros sobre el nivel de mar (m.s.n.m), todas estas cuencas desembocan en el Océano Pacífico.

La cuenca del río Portoviejo (MA-02) (Figura 3-5), se ubica en la zona centro sur de la DHM y tiene una extensión de 2.130 Km², su principal masa de agua es el río Portoviejo con una longitud de 143 Km, el mismo que nace en las colinas occidentales de la cordillera de los Andes, en su parte sur oriental alcanza los 480 m de altura. En la cabecera del río se ubica el embalse Poza Honda, luego fluye hasta las zonas de alta montaña del suroeste y toma un nuevo rumbo hacia el noroeste bordeando el cantón de Santa Ana y atravesando la ciudad de Portoviejo, para luego unirse con el río Chico (proveniente del margen derecho de la cuenca) en una planicie de inundación, donde fluye por los cantones de Rocafuerte y Sucre para desembocar al oeste en el Océano Pacífico.

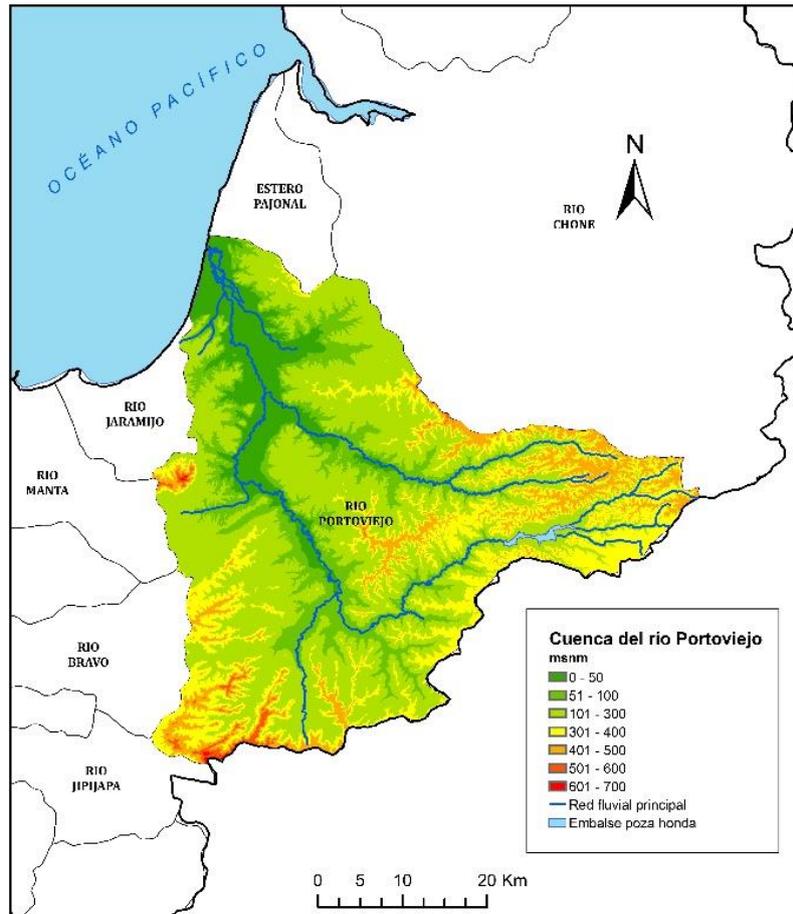


Figura 3-5 Cuenca del río Portoviejo

La cuenca del río Chone (MA-03) (Figura 3-6), es única en la zona centro de la DHM y tiene una extensión de 2.690 Km² aproximadamente, contiene uno de los ríos más importantes de la DHM, el río Chone con una extensión de 127 Km de longitud. El río Chone nace en el occidente de la cordillera de Balzar en una zona de alta montaña, desde el este hasta desembocar en el océano Pacífico, formando un estuario entre los cantones de Chone, Bahía de Caráquez y San Vicente, sus afluentes aguas arriba por su margen derecho son el río Grande, río Garrapata y río Mosquito, los mismos que se unen en la periferia de la ciudad de Chone, de ahí el nombre del mismo; aguas abajo de esta unión, se encuentran las aguas provenientes del margen izquierdo de la cuenca, el río Carrizal es uno de los mayores afluentes del río Chone, con una extensión de 86 Km y un área de drenaje aproximada de 1.338 Km², nace en las cabeceras montañosas del cantón Bolívar, pasa por el cantón Tosagua y llega hasta el cantón Chone, durante su recorrido es alimentado por los ríos Canuto y Mosca;

el río Carrizal es el mayor aportante al río Chone. Para efectos de planificación en la gestión de los recursos hídricos a la cuenca de río Chone se le ha sumado la cuenca del estero Pajonal, una cuenca vecina de 205 Km².

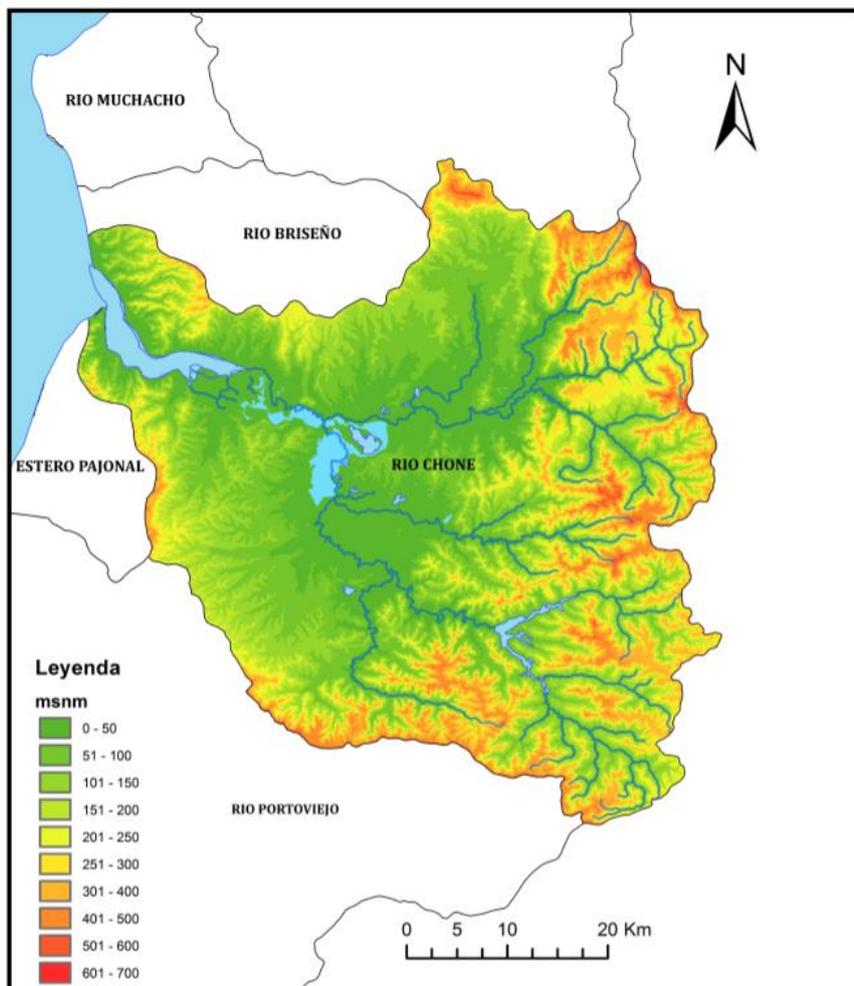


Figura 3-6 Cuenca del río Chone

La cuenca del río Briceño (MA-04) es de 828 km². El principal río de esta cuenca es el Briceño, además del río Muchacho que está agrupado a esta cuenca, ambos ríos desembocan en el mar de manera individual, gran parte del territorio de estos dos ríos se ubican en el cantón San Vicente.

La cuenca del río Jama (MA-05) tiene un área de drenaje de 1.379 Km² aproximadamente, está formada principalmente por el río Jama y Don Juan, nace en las partes altas del cantón Chone, pasa por los cantones sucre donde es alimentados por los ríos Mariano y Venado hasta desembocar en el Océano Pacífico bordeando la ciudad de Jama.

La cuenca del río Coaque (MA-06) tiene una superficie de 1.714 km², siendo los ríos Coaque y Chebe los más importantes. Integrada por más de 10 ríos individuales que desembocan en el Océano Pacífico, el mayor número de estos ríos se ubican en el cantón Pedernales, en la zona norte de la demarcación.

Los principales ríos de la DHM han sido recogidos en la Tabla 2 agrupados por cuenca, según la planificación de la Secretaría del Agua del Ecuador.

Código de cuenca	Agrupación de ríos por cuencas	Área de drenaje (Km ²)
MA-01	Cuenca Río Jipijapa	2757,6
	Río Jaramijó	166,2
	Río Manta	361,0
	Río San Mateo	134,6
	Río Canas	354,8
	Río Bravo	325,6
	Río Canta Gallo	65,9
	Río Jipijapa	253,9
	Río Salaite	122,1
	Río Buenavista	351,6
	Río Ayampe	621,7
MA-02	Cuenca Río Portoviejo	2089,6
MA-03	Cuenca Río Chone	2733,7
	Río Chone	2528,4
	Estero Pajonal	205,3
MA-04	Cuenca Río Briceño	827,9
	Río Muchacho	436,8
	Río Briceño	391,1
MA-05	Cuenca Río Jama	1379,1
MA-06	Cuenca Río Coaque	1714,3
	Río Cojimés	811,5
	Río Marcos	41,8
	Río Coaque	683,7
	Estero Don Juan	177,3
	Río Jama	1379,1

Tabla 2 Área de drenaje de los ríos de las cuencas hidrográficas de la DHM. (Fuente: SENAGUA)

3.4. Infraestructuras hidráulicas

En la DHM existen varias infraestructuras hidráulicas, la mayor parte de estas infraestructuras se encuentran en la zona centro de la demarcación en las cuencas del río Chone y río Portoviejo.

Existe un sistema de trasvases (Figura 3-7) construido ante la necesidad de abastecer demandas en períodos secos, este sistema está hecho en tres tramos: 1) Nace en el embalse Daule - Peripa perteneciente a la Demarcación hidrográfica del Guayas y termina en el embalse La Esperanza. El trasvase funciona gravitacionalmente utilizando un sistema de apertura de compuertas de túneles. 2) Empieza en el embalse La Esperanza y termina en el embalse Poza Honda. El trasvase se realiza mediante un sistema de bombeo que conduce el agua por un acueducto y luego por un túnel hasta su destino final. 3) Inicia en el embalse Poza Honda hasta el río Mancha Grande ubicado en la cabecera de la subcuenca del río Chico. El trasvase se realiza por gravedad (túnel).



Figura 3-7 Sistemas de trasvases de la DHM. (Fuente: Memorias del Gobierno Provincial de Manabí - Descripción de sistemas de riego de la provincia de Manabí).

Con el objetivo de regulación de caudales para control de inundaciones, dotación de agua para consumo humano y riego, se han construido 3 embalses en la demarcación hidrográfica de Manabí:

- Embalse La Esperanza, con capacidad de almacenar 450 Hm³, fue construido en 1995, recoge el agua de las cabeceras de la cuenca del río Carrizal, ubicado al margen izquierdo de la cuenca del río Chone y principal afluente de éste.

- Embalse Poza Honda, con 100 Hm³ de capacidad total y 75 Hm³ de volumen útil, con una cola de embalse de 12,5 Km de longitud, está ubicado en la cabecera del río Portoviejo, en la parte alta de la cuenca del río Portoviejo en un área de 490 ha, fue construido en 1971.
- Embalse Río Grande, almacena 113 Hm³, fue construido en 2017, almacena el agua de las cabeceras de la cuenca del río Chone, se ubica en la subcuenca del río Grande al margen derecho de la cuenca del río Chone.

Para cubrir las áreas de cultivo regables en la demarcación, existen 2 sistemas de riego principales que en conjunto están diseñados para irrigar 30.500 ha, estos sistemas son:

- Sistema de riego Carrizal – Chone, 400 Km de tuberías a presión que son alimentados desde el embalse La Esperanza, diseñado para irrigar 13.000 ha de los cantones Bolívar, Tosagua, Junín y Chone, en dos fases de construcción la primera por 7.250 ha y una segunda fase que irrigaría 5.750 ha, ubicado en la cuenca del río Chone.
- Sistema de riego Poza Honda, dividido en 3 fases es el sistema de riego de la cuenca del río Portoviejo; la fase 1, se ubica en la cuenca del río Portoviejo una que nace en la ciudad de Santa Ana como una derivación del río Portoviejo mediante canales abiertos y se extiende hasta el cantón Rocafuerte cruzando la ciudad de Portoviejo, tiene una longitud de 61,2 km; la fase 2 se extiende desde la ciudad de Portoviejo hasta el cantón Rocafuerte con una extensión de 89 Km; la fase 3 se extiende por 88,7 Km desde el cantón Rocafuerte hasta el cantón Sucre; en total el sistema tiene una extensión de 214 Km y cubre un área de riego potencial de 12.135 ha.

Otras infraestructuras se han estudiado para desarrollar sistemas multipropósitos en cuencas del norte y sur de la DHM. Un resumen de todas las infraestructuras hidráulicas se muestra en la Tabla 3.

Cuenca	Tipo de infraestructura	Descripción
MA-02 Cuenca del río Portoviejo	Embalse	Poza honda , 100 Hm ³ de capacidad.
	Sistema de riego	Poza honda , Sistema de riego de canales abiertos diseñado para irrigar 12.135 ha.
	Trasvase II	Emb. La Esperanza - emb. Poza honda , II tramo del sistema de trasvase de la DHM, 17,7 km de recorrido (sistema de bombeo, sifón y túnel).
	Trasvase III	Emb. Poza honda - río Mancha Grande , III tramo del sistema de trasvase de la DHM, 4,1 km de recorrido (túnel).
MA-03 Cuenca del río Chone	Embalse	La Esperanza , 450 Hm ³ de capacidad.
	Embalse	Río Grande , 113 Hm ³ de capacidad.
	Sistema de riego	Carrizal - Chone , sistema de riego presurizado, diseñado para irrigar 13.500 ha.
	Trasvase I	Emb. Daule Peripa (DHG) - emb. Poza honda (DHM) , I tramo del sistema de trasvase de la DHM desde la DHG, 8,3 km de recorrido (túnel).
	Acueducto	Emb. la Esperanza - Refinería del Pacífico , diseñado para 144.000 m ³ /día, uso industrial y agua potable, 94 km de longitud.

Tabla 3 Tipos de infraestructuras existentes en la DHM.

3.5. Uso de suelo

La DHM tienen un área de 1'150.212 ha, según lo reportado por el Ministerio de Agricultura el principal uso de suelo de la demarcación es agropecuario, a razón de que el 23% del área total corresponde a tierras para cultivos permanentes o transitorios es decir 265.002 ha; luego 362.495 ha son de pastos ya sean naturales o cultivados que corresponden al 31,5% del área de la DHM; el 42% está ocupado por bosques naturales abarcando un área de 483.817 ha; lagos, embalses, ríos y otros cuerpos de agua cubren 19.641 ha que representan el 1,7%; las zonas urbanas ocupan 6.929 ha (0,6%), y otros tipos de usos de suelo 12.329 ha que representan el 1,1%. La Figura 3-8 muestra el mapa de usos de suelo de la DHM.

Al ser la agricultura el principal sector económico de la DHM que tiene un uso representativo de suelo es importante destacar que los principales tipos de cultivos presentes en la demarcación. El Censo Nacional Agropecuario del Ecuador del año 2000 desarrollado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador identificó que en la DHM los principales cultivos permanentes son café, cacao, plátano y banano, ocupado un área de 142.108 ha; mientras que los cultivos transitorios o anuales con mayores áreas de cultivo son arroz y maíz, con un área total de 70.496 ha. La cuenca baja del río Portoviejo y río Chone son las zonas donde existe la mayor producción de arroz de la DHM, debido a sus llanuras de inundación naturales. A lo largo de las cuencas medias y altas de la demarcación se da la mayor producción de maíz. La Tabla 4 muestra las áreas totales por tipo de cultivo en cada una de las cuencas de la DHM.

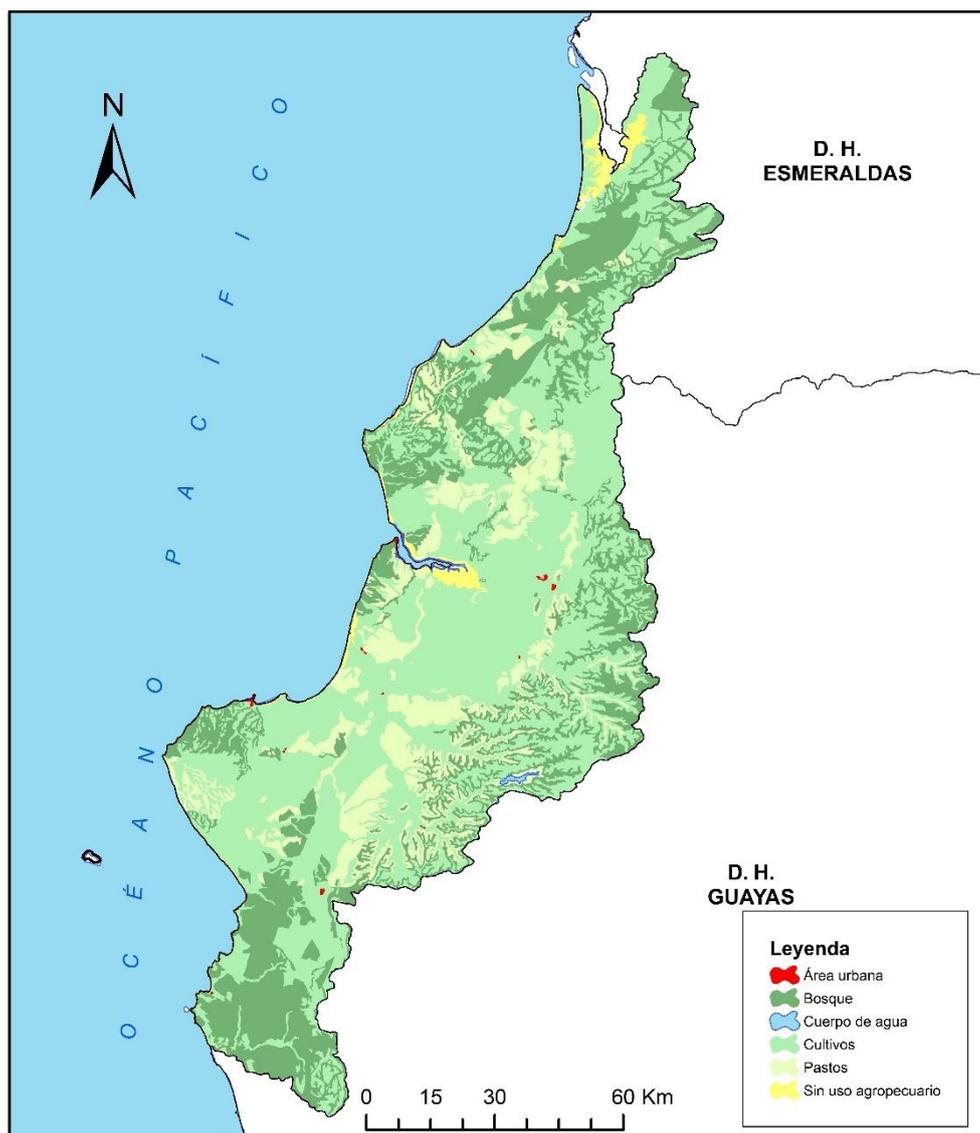


Figura 3-8 Usos de suelo de la DHM. (Fuente: SNI, MAGAP)

Tipo de cultivo	Superficie de cultivos en cuencas de la DHM (hectáreas)					
	MA-01	MA-02	MA-03	MA-04	MA-05	MA-06
Café	193	7.343	25.271	161	9.512	4.040
Cacao	14.170	14.556	14.125	719	4.667	2.618
Plátano	431	2.700	3.920	271	1.997	906
Banano	1.561	1.210	4.749	396	2.820	3.480
Arroz	186	3.011	2.277	50	506	278
Maíz	8.909	15.075	16.328	302	4.418	1.756
Otros cultivos Permanentes	1.312	3.920	7.904	636	3.924	1.145
Otros cultivos Transitorios	4.990	7.255	4.009	38	978	130

Tabla 4 Área de uso agrícola por tipo de cultivos en la DHM

3.6. Geología

La geología de la DHM es muy diversa, con formaciones geológicas que afloran y desaparecen a lo largo de la demarcación, en la Figura 3-9 se muestra el mapa de formaciones geológicas existentes en la DHM. A continuación, se hace una breve reseña de las formaciones su ubicación y sus características litológicas.

En la zona norte de la demarcación, en las zonas centrales de los cantones de la cuenca del río Coaque y Jama se localizan formaciones de rocas volcánicas (basaltos y gabros) pertenecientes al período cretácico, esta formación en el registro geológico es conocida como formación piñón.

En el centro de la demarcación en las zonas de la cuenca del río Portoviejo y río Chone, predominan las formaciones Charapotó, Tosagua, Borbón Angostura y Onzole, formaciones que se han originado en el Mioceno. En el centro de las cuencas del río Chone y Portoviejo hay una importante presencia de arcillas, arenisca, lodolitas y lutitas; además hay una representativa acumulación de depósitos aluviales en las llanuras de inundación de la cuenca hidrográfica, formados en el período cuaternario compuesto por limos, arenas y clastos, provenientes de las partes altas de la cuenca por efecto de la erosión en las zonas altas.

En los límites de la cuenca del río Portoviejo y Jipijapa se da la presencia de la formación Canoa, originada en el Plioceno, formada por limos y arcillas arenosas y conglomerados, ubicada principalmente en el cantón Montecristi.

En el sur de la demarcación, en la cuenca del río Jipijapa encontramos la formación Cayo, localizada en los cantones Jipijapa y Puerto López compuesto por limolitas, arcillas, lutitas, areniscas y grauvacas. Formaciones como San Mateo compuestas por areniscas y conglomerados al igual que las formaciones Cerro y Punta Blanca, que además de encontrarse en los dos cantones mencionados se encuentran también en el cantón Manta.

La DHM se extiende desde las estribaciones occidentales de la cordillera de Los Andes hasta las planicies costeras del occidente del país, con pendientes de terreno que disminuyen, de este a oeste; posee montañas de alrededor de 800 m de altura en promedio que se extienden de norte a sur y sus elevaciones van hasta el nivel del mar, formando una cadena montañosa de baja altitud, al este de la demarcación hidrográfica. La DHM se caracteriza por cambios en el terreno, montañas y colinas alargadas, ríos, cuencas, tierras bajas, terrazas y valles fluviales. La demarcación es mayormente montañosa y solo los ríos Carrizal-Chone y Chico-Portoviejo presentan grandes áreas de valles.

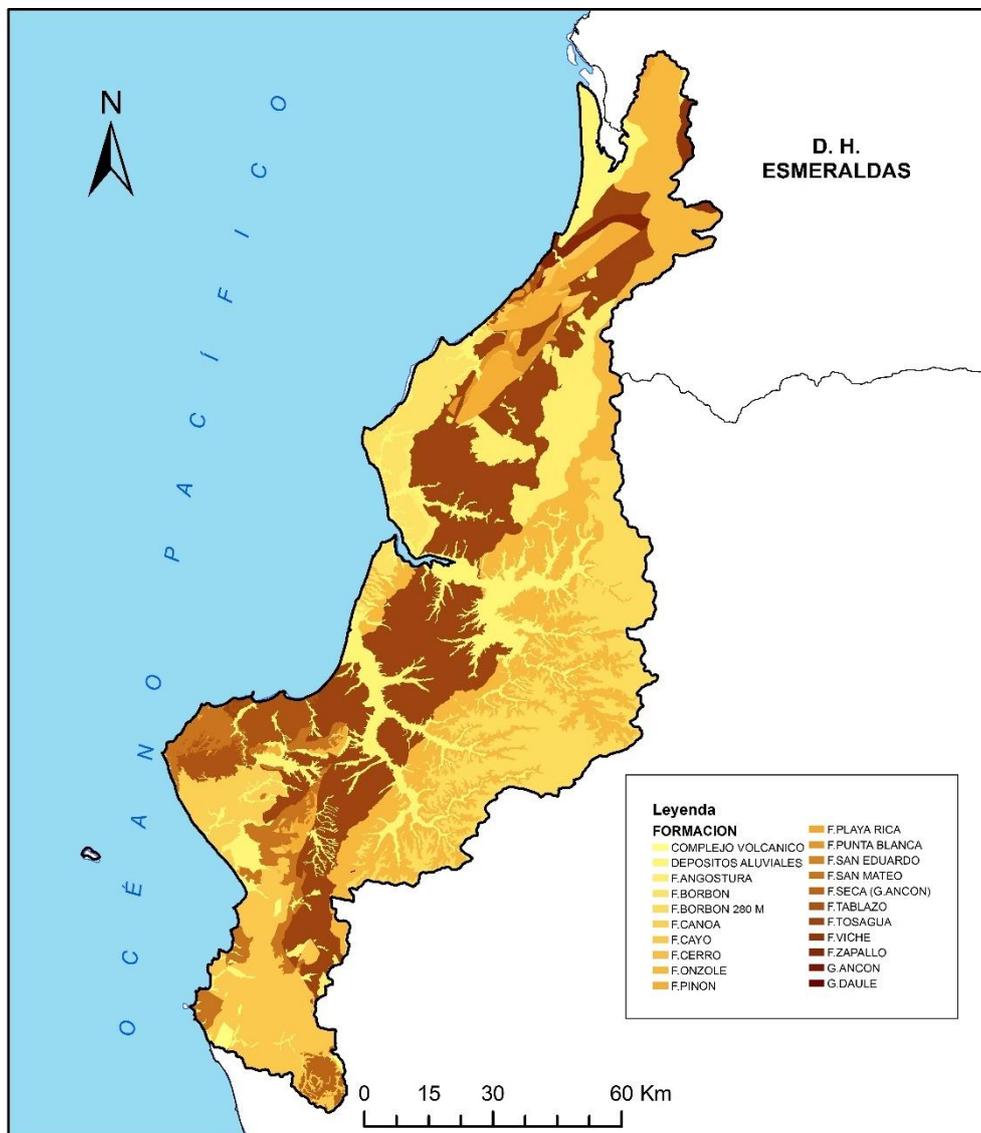


Figura 3-9 Formaciones geológicas de la DHM



4. METODOLOGÍA

La evaluación de los impactos del cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de la Demarcación Hidrográfica de Manabí comprende una serie de procesos que involucra el análisis de datos climáticos históricos, la obtención de anomalías futuras de variables climáticas, simulaciones hidrológicas históricas y futuras, identificación de demandas históricas y futuras y simulaciones para la gestión de embalses con el efecto del cambio climático. El esquema metodológico aplicado en este estudio se muestra en la Figura 4-1.

Para iniciar, es necesario recolectar los datos básicos para desarrollar los procesos posteriores, entre ellos, los datos climáticos históricos de las estaciones climáticas existentes en la Demarcación hidrográfica de Manabí (DHM) en el período 1964-2012 otorgados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), cartografía básica de uso de suelo, litología y modelo digital del terreno del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y del Instituto Geográfico Militar (IGM) del Ecuador.

Luego se establecen los modelos climáticos a utilizar para identificar los cambios futuros, así como seleccionar los escenarios de emisiones RCP desarrollados por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) en el quinto informe de evaluación (AR5) (IPCC, 2014); de estos escenarios de cambio climático se obtienen las variables climáticas de precipitación y temperatura para los períodos futuros, estableciendo tres períodos para analizar el clima futuro en este estudio, 2010-2039 (corto plazo), 2040-2069 (mediano plazo) y 2070-2099 (largo plazo); aplicando la técnica de corrección de sesgo Delta change (Räisänen & Rätty, 2013), se cambian las condiciones actuales de las variables hidrológicas de precipitación y temperatura para obtener nuevas series que simulan condiciones bajo cambio climático.

Para observar el comportamiento de los recursos hídricos con el efecto del cambio climático, es necesario realizar una simulación hidrológica del área de estudio, para ello se ha utilizado el Modelo Hidrológico Agregado de Témez (Témez, 1977) y el Modelo Distribuido PATRICAL (Pérez-Martín, 2005); una vez que el modelo hidrológico ha sido calibrado y validado, se realizan las

simulaciones hidrológicas con las series de las variables climáticas modificadas por efecto del cambio climático para obtener las nuevas aportaciones. A medida que se van realizando las simulaciones con los cambios futuros, se obtiene el balance de agua en cada escenario, lo que permite calcular los cambios en las demandas principalmente de uso agrícola.

Con un modelo de simulación de gestión de embalses, se puede identificar si las aportaciones en cada escenario son suficientes para abastecer a las diferentes demandas, mediante la evaluación del cumplimiento de criterios de garantía de abastecimiento mensuales (GM), anuales (GA) y volumétricas (GV) (Estrada, 1994) y criterios de garantía UTAH DWR (Lall & Miller, 1988), en el caso de incumplimientos de los criterios de garantía se comienza establecer reservas mínimas en el embalse para cumplir los criterios. Adicional a esto se hace un análisis de cómo la mejora en los sistemas de riego puede ayudar al cumplimiento de los criterios de garantías y abastecer más áreas de riego de lo que permite el sistema en escenarios de cambio climático. Por último, se realiza un análisis de cómo el cambio climático puede afectar a la seguridad alimentaria de la DHM, con base a los resultados del caso de estudio.

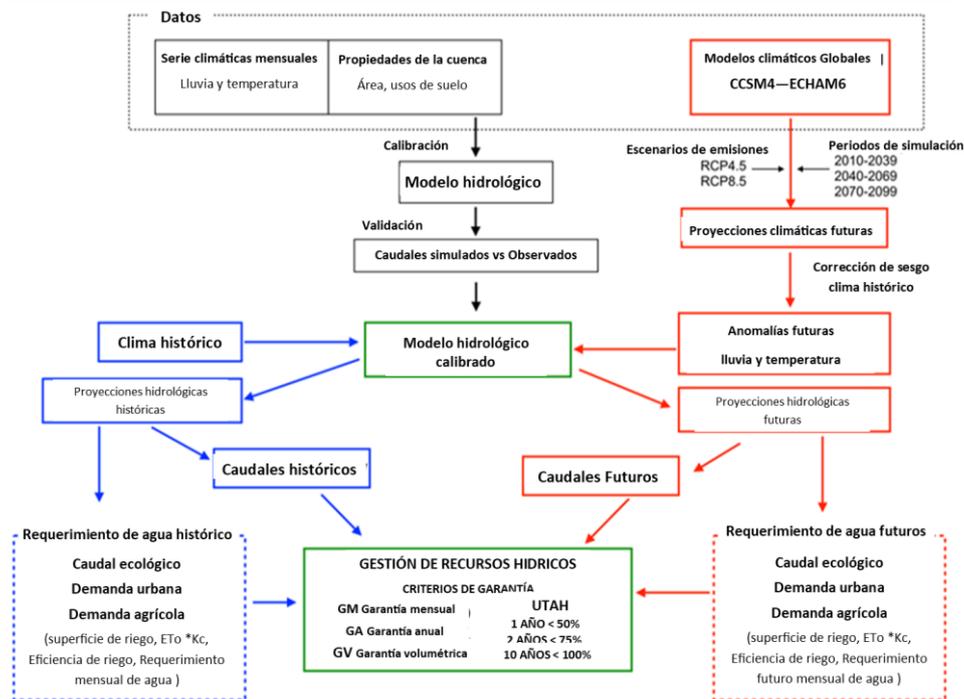


Figura 4-1 Metodología para identificar el impacto del cambio climático en la gestión de los recursos hídricos de la DHM.

y un máximo de 56, respectivamente. Dado que los datos históricos de aforos de caudales presentaban series discontinuas, solo se utilizó series de años hidrológicos completos, es decir, que tengan 12 meses de registro. Además, no se consideró los períodos donde se produjo el fenómeno de El Niño.

Una vez que se han procesado los datos brutos de las estaciones climáticas, mediante interpolación se pueden obtener mapas mensuales distribuidos de precipitación y temperatura.

Los datos hidrológicos fueron proporcionados por la Oficina Administrativa de la Demarcación Hidrográfica de Manabí en la Secretaría del Agua del Ecuador. Las estaciones hidrológicas, utilizadas para la calibración y validación del modelo, fueron Santa Ana, río Chico y Carrizal, con datos registrados desde 1962-82, 1983-2011 y 1962-2010, respectivamente.

Se calculó la evapotranspiración potencial (ETP) como entrada al modelo para simulaciones históricas y futuras de variables hidrológicas. El cálculo se basó en el método Penman-Monteith (ETP P-M) aprobado por la FAO (ALLEN, 1994) y el método modificado de (Thornthwaite, 1948) (ETP Th) a escala mensual. El método Penman-Monteith utiliza datos sobre radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento (ALLEN, 1994). El método Thornthwaite utiliza solo datos sobre las temperaturas mensuales promedio (T_i) y las horas diarias de sol (b_i), que varían según el mes y las condiciones geográficas.

4.2. Modelos Hidrológicos

Dado que, la investigación ha estado condicionada a la poca disponibilidad de información y a la generación de ésta, se optó por emplear el Modelo Hidrológico de Témez porque no requiere grandes recursos computacionales por su simplicidad para abordar la escasez de parámetros hidrológicos y el monitoreo reducido, y el Modelo Distribuido PATRICAL para procesar las series mensuales de temperatura y precipitación.

El caudal se calibró (split-sample test, SST) en dos cuencas hidrográficas estableciendo los valores en los parámetros Hmax, Imax, C y Alpha del Modelo Témez. El período de calibración se define para cubrir todos los datos históricos disponibles y una parte de los últimos 20 años. Seleccionamos los valores de Hmax según el predominio del suelo y la vegetación en las cuencas. El período de calibración fue de 17 años (1964-1977) para el río Carrizal y 16 años (entre 1983-2011) para el río Chico. La cabecera del río Portoviejo se extrapoló con los datos del río Carrizal por tener características similares para las simulaciones hidrológicas. Solo los años cuyos datos registrados incluyen todos los meses y un régimen natural se consideraron en la calibración.

La validación del modelo abarca el período 1985/1991. La validación de los datos se realizó con el análisis de calibración, sesgo porcentual (PBIAS) que mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grandes o más pequeños que sus contrapartes observadas (Gupta Hoshin Vijai et al., 1999), Eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) que es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la varianza de datos medida ("información") (Nash & Sutcliffe, 1970), y el coeficiente de determinación (R^2) que describe la proporción de la varianza en los datos medidos explicada por el modelo. R^2 varía de 0 a 1, valores cercanos a 1 0 -1 indican una menor varianza, y típicamente los valores mayores de 0,5 se consideran aceptables (Moriasi et al., 2007; Santhi et al., 2001).

Los datos históricos de precipitación y temperatura en ambas cuencas se obtuvieron del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) para el período de 1964-2012 a escala mensual. Estas series se insertaron en el Modelo Distribuido PATRICAL (Gómez-Martínez et al., 2018; Pérez-Martín et al., 2014) con el objetivo de obtener información climática espacial del distrito de la cuenca para su uso de acuerdo con el área de interés. Los datos se utilizaron para identificar las condiciones climáticas en ambas cuencas, calibrar y validar el Modelo Agregado de Témex, y como punto de partida para simular el clima futuro.

4.3. Modelos y escenarios Climáticos

En este estudio se analizó 14 modelos, que se incluyen en el cuarto (AR4) y el quinto (AR5) informe del IPCC a corto (2010-2039), mediano (2040-2069) y largo plazo (2070-2099). Luego de analizar los gráficos incluidos en el AR4 (IPCC, 2007) y AR5 (IPCC, 2013) y la resolución para el área de estudio, se se eligió 6 modelos, para quienes se analizó el patrón climático mensual de los modelos con los datos mensuales observados.

Después de identificar su mayor correlación entre los patrones climáticos históricos (precipitación y temperatura) observados en el período de control del área de estudio y los patrones climáticos del período de control del modelo, finalmente fueron seleccionados 2 modelos. Estos son los Modelos Climáticos Globales (GCM) CCSM4 (Gent et al., 2011) de $0,94^\circ$ de latitud y $1,25^\circ$ de longitud, y ECHAM6 (Stevens et al., 2013) de 1° de latitud y 1° de longitud, bajo las vías de concentración representativas (RCP). Un RCP es una trayectoria de concentración de gases de efecto invernadero (no emisiones) adoptada por el IPCC para su quinto Informe de Evaluación (AR5).

Se utilizó los escenarios 4.5 y 8.5 para proyecciones de escenarios climáticos futuros. RCP4.5 representa los niveles de concentración promedio de gases de efecto invernadero (~ 650 ppm de CO_2 eq). Es un escenario de estabilización donde el forzamiento radiativo total se estabiliza, poco después del año 2100, sin superar el forzamiento radiativo a largo plazo proyectado ($4,5 \text{ W/m}^2$) (Clarke et al., 2007) RCP 8.5 exhibe niveles de concentración muy altos de gases de efecto invernadero (~ 1.370 ppm de CO_2 eq); su forzamiento radiativo alcanza $8,5 \text{ W/m}^2$ para el año 2100 (Riahi et al., 2007).

Los escenarios se eligieron asociando las concentraciones de CO_2 de la RCP hasta el año 2100 con las emisiones de CO_2 de los modelos de desarrollo socioeconómico establecidos en el Informe especial sobre escenarios de emisiones (SRES) (IPCC, 2007).

La variabilidad espacial de la lluvia y la temperatura mensual en el área de estudio es inferior al 10% (media máxima - min T, media máxima - min P).

Por lo tanto, este estudio incluye solo corrección de sesgos. En el caso de una alta variabilidad espacial, es necesario incluir la corrección de sesgo y la técnica de reducción de escala. La técnica de corrección de sesgo utilizada en este estudio es el enfoque Delta Change (Räsänen & Rätty, 2013).

4.4. Requerimiento hídrico de los cultivos

Para el cálculo de los requerimientos de cultivos se ha utilizado el software CROPWAT suministrado por la FAO, y se han sido extraído del software CLIMWAT los datos climáticos. El método aplicado para el cálculo de la evapotranspiración potencial fue el de Penman –Monteith. La precipitación efectiva se calculó por el método de la USDA Soil Conservation Service, de la siguiente manera:

- $P_{ef} = (P * (125 - 0,2 * 3P)) / 125$ para $P \leq 250/3$ mm
- $P_{ef} = 125/3 + 0,1 * P$ para $P \geq 250/3$ mm

El tipo de suelo sobre el que se han realizado los cálculos es de textura limo-arenoso, con las siguientes características:

- Humedad del suelo disponible: 140 mm/m
- Tasa máxima de infiltración de la precipitación: 30 mm/día
- Profundidad radicular máxima: 900 cm

La evapotranspiración de referencia (E_{to}), indica la cantidad de agua que se transfiere a la atmósfera de un suelo permanentemente húmedo, por ejemplo, un pasto con suficiente riego, en desarrollo y buenas condiciones fitosanitarias. La evapotranspiración de cultivo (E_{tc}), indica la evapotranspiración que resulta de un cultivo, libre de enfermedades, cultivado en un área extensa, en un suelo apropiado, fertilizado y con agua suficiente, y que alcanza su potencial de producción en el medio vegetal dado. Este valor resulta del producto de la E_{to} con el coeficiente de cultivo (K_c). El Coeficiente de cultivo (K_c), es la relación que existe entre la E_{tc} y la E_{to} . Las necesidades o requerimientos hídricos son la diferencia entre la E_{tc} y la precipitación efectiva, calculado de forma mensual. Para efectos de sintetizar resultados, en este estudio se muestran las necesidades hídricas totales de cada cultivo durante un período completo de siembra y cosecha.

Entre la selección de los cultivos para el cálculo de los requerimientos hídricos, se han escogido cultivos transitorios o de ciclo corto y cultivos permanentes o de producción anual. Para comprender los resultados de

forma rápida, se ha dedicado un color específico a cada período de cada escenario de la siguiente forma:

RCP4.5 2010-39
RCP4.5 2040-69
RCP4.5 2070-99
RCP8.5 2010-39
RCP8.5 2040-69
RCP8.5 2070-99

La Tabla 5 muestra los valores de Coeficiente del cultivo para cada tipo de cultivo usados en el cálculo de requerimiento de agua. Así mismo se muestra en la Tabla 6 la duración de cada etapa del desarrollo vegetativa del cultivo.

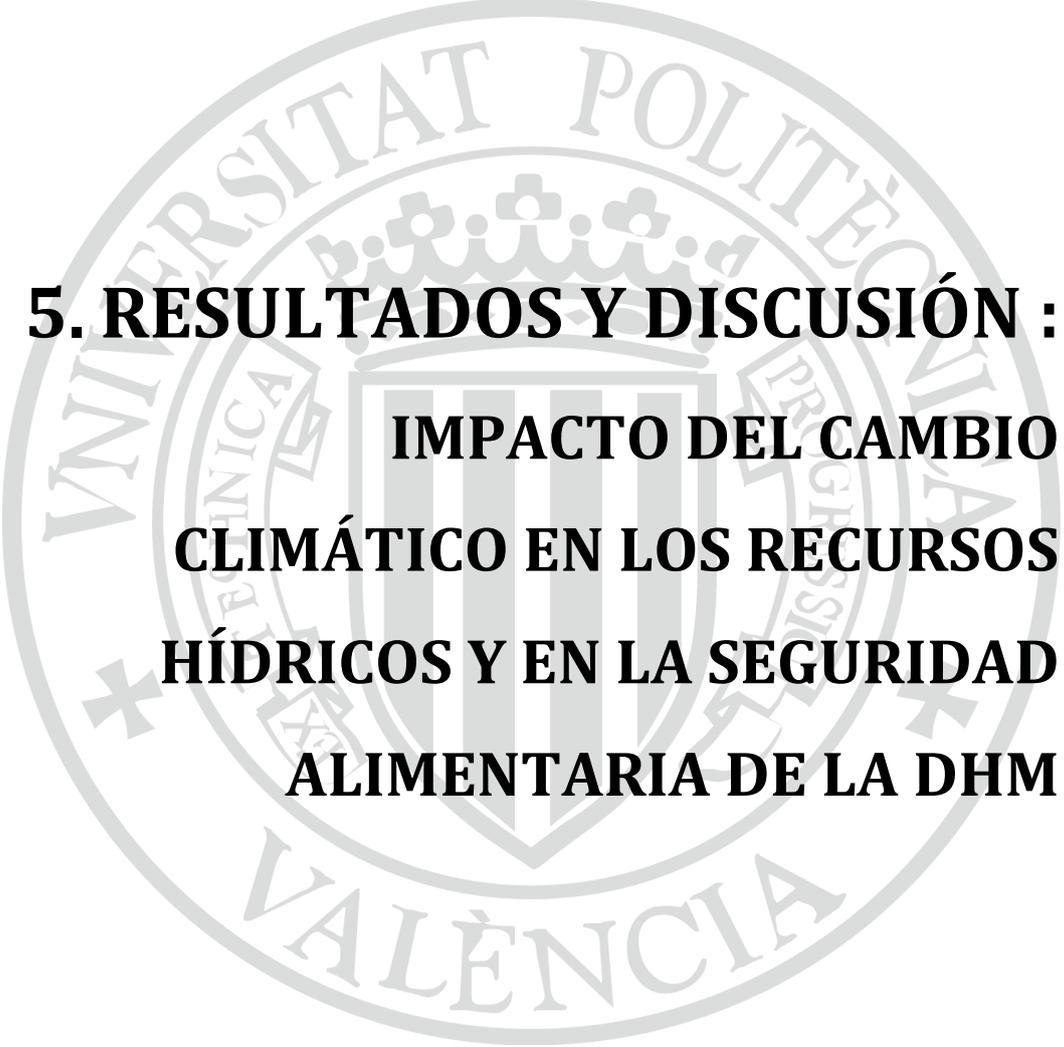
Cultivo	Coeficiente de cultivo (Kc)		
	Inicial	Medio	Final
Maíz	0,30	1,20	0,35
Tomate	0,60	1,15	0,80
Pimiento	0,60	1,05	0,90
Fréjol - Habas	0,40	1,15	0,35
Maní	0,40	1,15	0,60
Café	1,00	1,05	1,05
Cacao	1,00	1,05	1,05
Banano	0,50	1,10	1,00
Pastos	0,85	0,95	0,85

Tabla 5 Valores de coeficiente de cultivos para los cultivos de mayor producción en la DHM

Cultivo	Etapa de la temporada				TOTAL
	Inicial	Desarrollo	Medio	Final	
Maíz	20	35	40	30	125
Tomate	30	40	45	30	145
Pimiento	30	35	40	20	125
Fréjol - Habas	20	30	40	20	110
Maní	25	35	45	25	130
Café	30	60	180	95	365
Cacao	30	60	180	95	365
Banano	90	165	45	30	330
Pastos	140	60	120	45	365

Tabla 6 Tiempo de desarrollo vegetativo del cultivo por etapas para los cultivos de mayor producción en la DHM

Se simula un sistema de gestión de recursos hídricos para la subcuenca del río Chone a través de un modelo de gestión de embalses que proporciona información sobre la respuesta al cambio climático en un escenario de emisiones a corto plazo (2010-39) y mediano plazo (RCP4.5). El modelo busca el volumen mínimo requerido para garantizar el suministro de agua necesario con una probabilidad fija o con la demanda consuntiva de agua reconocida (Paredes et al., 2008). Las entradas al modelo corresponden a datos de embalses (demanda ambiental, demanda urbana y demanda agrícola), series de flujo histórica y series de flujo futura bajo el cambio climático. Las simulaciones se han realizado con la priorización de la demanda urbana y ambiental. Por lo tanto, es necesario utilizar curvas de reserva para satisfacer las demandas urbanas y curvas para racionar las demandas agrícolas.



5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN :
IMPACTO DEL CAMBIO
CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS
HÍDRICOS Y EN LA SEGURIDAD
ALIMENTARIA DE LA DHM

5.1. Simulación hidrológica

5.1.1. Modelo Hidrológico Agregado de Témez

Para la calibración del Modelo Agregado de Témez se utilizó los caudales mensuales del río Carrizal en la cuenca del río Chone y río Chico en la cuenca del río Portoviejo. La calibración se la realizó buscando valores de ajuste a los parámetros Hmax, Imax, C y ALFA del Modelo de Témez, utilizando valores de 0,3 para C (Témez, 1977) y de 0,4 para ALFA, se escogieron los valores de Hmax según la predominancia de las características del suelo y la vegetación en la cuenca.

En la cuenca del Río Chone, se realizó la calibración del Modelo de Témez en la subcuenca del río Carrizal. Para la calibración se consideró solo los años que registraron datos todos los meses y en régimen natural, en la estación hidrológica de la subcuenca. El período de calibración fue de 11 años entre 1964-1977. La Figura 5-1 muestra el período de calibración del Modelo Hidrológico Agregado de Témez en la subcuenca del río Carrizal de la cuenca del río Chone.

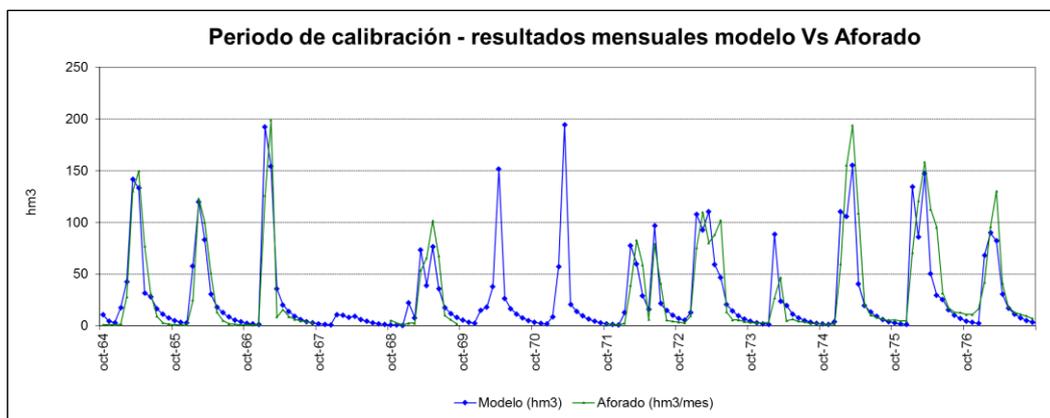


Figura 5-1 Calibración del modelo agregado de Témez en la subcuenca del río Carrizal en la cuenca del río Chone

Una vez que se realizó la calibración mencionada, se realizó la validación de la simulación realizada. Esta validación se realizó en un período de 8 años entre 1980-1991. Así como para la calibración solo se consideró solo los años completos, en la validación se lo realizó de igual forma, observando los resultados del análisis estadístico de la calibración. La Figura 5-2 muestra el período de validación del Modelo Agregado De Témez en la subcuenca del río Carrizal de la cuenca del río Chone.

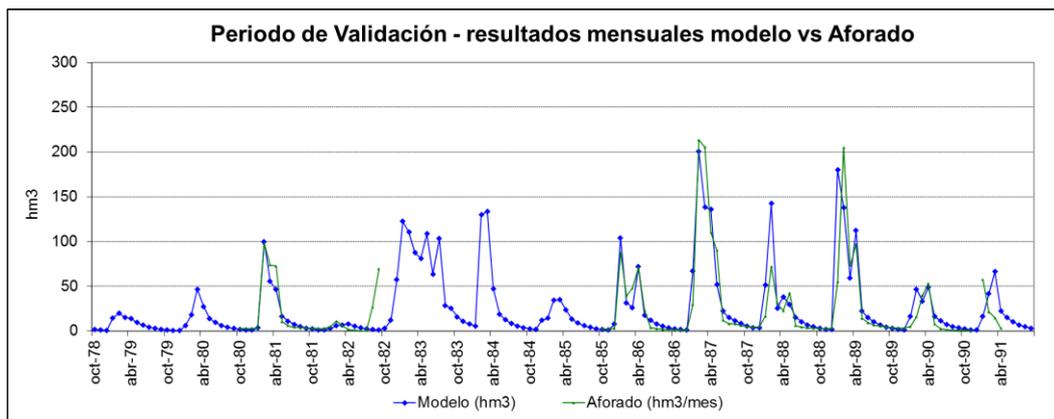


Figura 5-2 Validación del modelo agregado de Témez en la subcuenca del río Carrizal en la cuenca del río Chone

Luego de haber comprobado que el modelo se ajusta a los datos observados, con los resultados de los siguientes criterios estadísticos: PBIAS=4%, Nse=0,75 y $R^2=0,76$; se indica que la calibración del modelo tuvo un rendimiento muy bueno (Moriasi et al., 2015) en la simulación de series históricas mensuales y anuales.

El período resultante de la simulación hidrológica histórica fue de 48 años 1964-2012, a escala mensual. La Figura 5-3 muestra el contraste de los resultados de la serie de caudales mensuales simulados con los caudales mensuales observados.

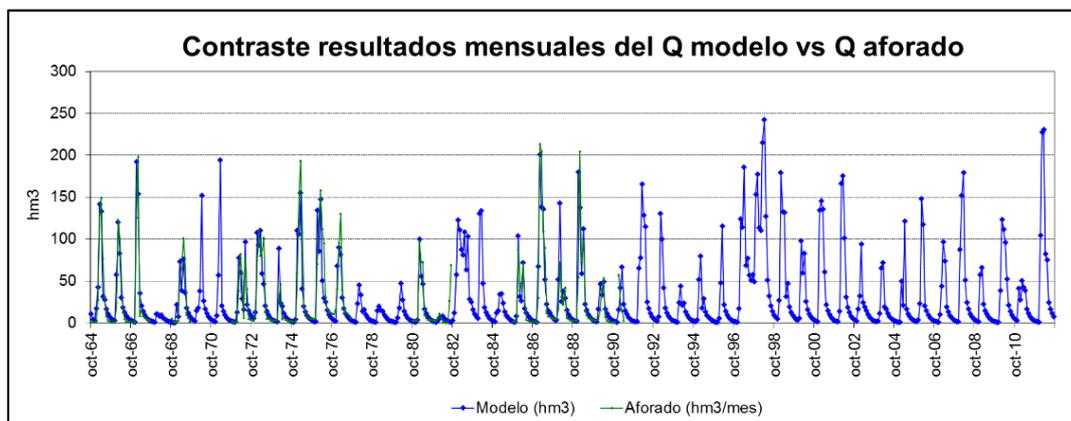


Figura 5-3 Contraste de serie histórica de caudales mensuales del modelo con caudales observados en la subcuenca del río Carrizal en la cuenca del río Chone.

Con las aportaciones mensuales simuladas se obtuvo la aportación media anual de la subcuenca del río Carrizal con un promedio de 376 Hm³. La Figura 5-4 y Figura 5-5 muestra una comparativa de las aportaciones anuales y mensuales respectivamente, resultante del modelo con las observadas en la subcuenca del río Carrizal en la cuenca del río Chone.

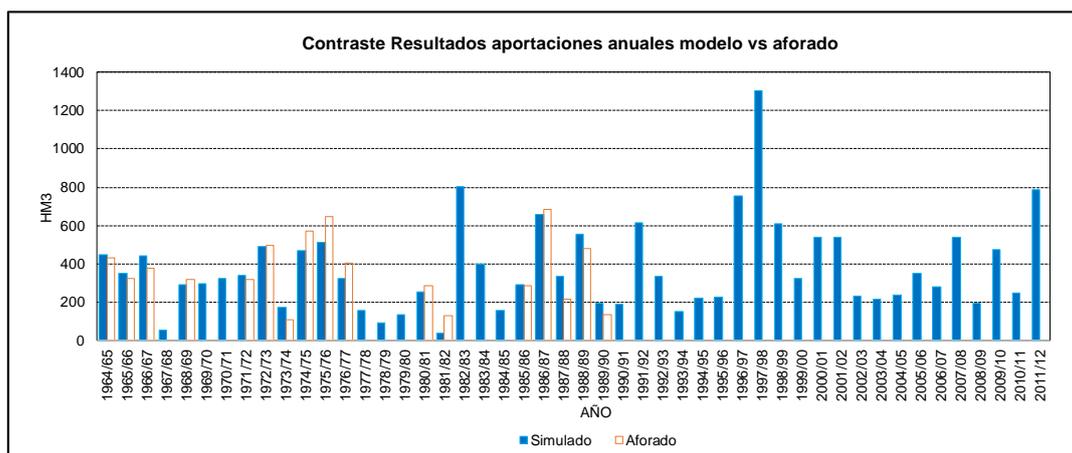


Figura 5-4 Contraste de aportaciones anuales del modelo con aportaciones observadas en la subcuenca del río Carrizal en la cuenca del río Chone.

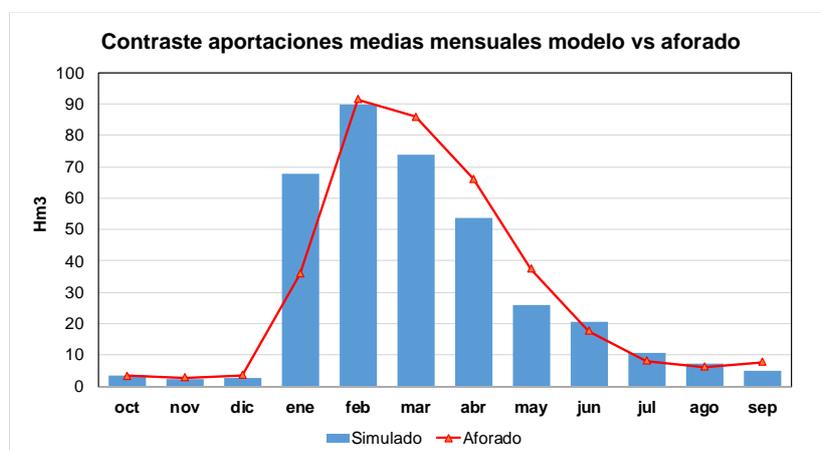


Figura 5-5 Contraste de aportaciones medias mensuales del modelo con aportaciones observadas en la subcuenca del río Carrizal en la cuenca del río Chone.

En la cuenca del río Portoviejo, se realizó la calibración del Modelo de Témez en la subcuenca del río Chico, el período de calibración fue de 11 años entre el período 1983-1994. La Figura 5-6 muestra la calibración realizada en la subcuenca mencionada. El período de validación estuvo comprendido entre los años 2004 y 2011, con un total de 7 años de validación, la Figura 5-7 muestra el período de validación de la simulación del Modelo Agregado de Témez en la subcuenca del río Chico en la cuenca del río Portoviejo.

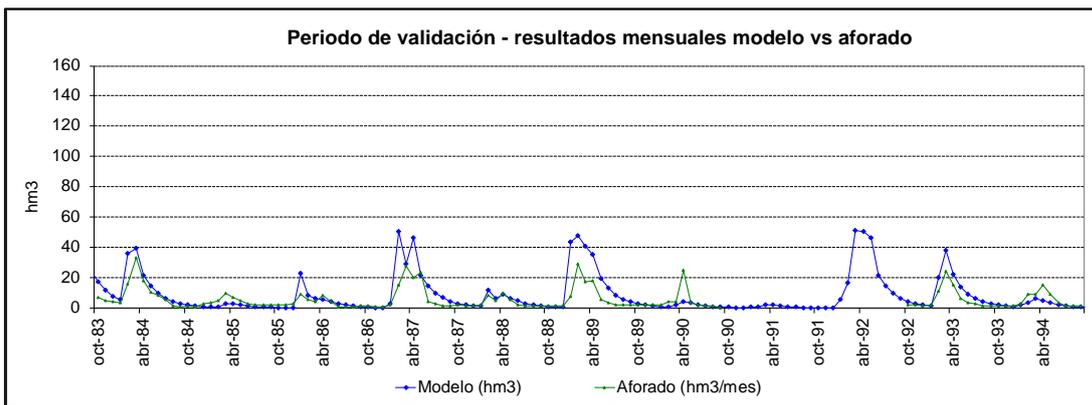


Figura 5-6 Calibración del modelo agregado de Témez en la subcuenca del río Chico en la cuenca del río Portoviejo.

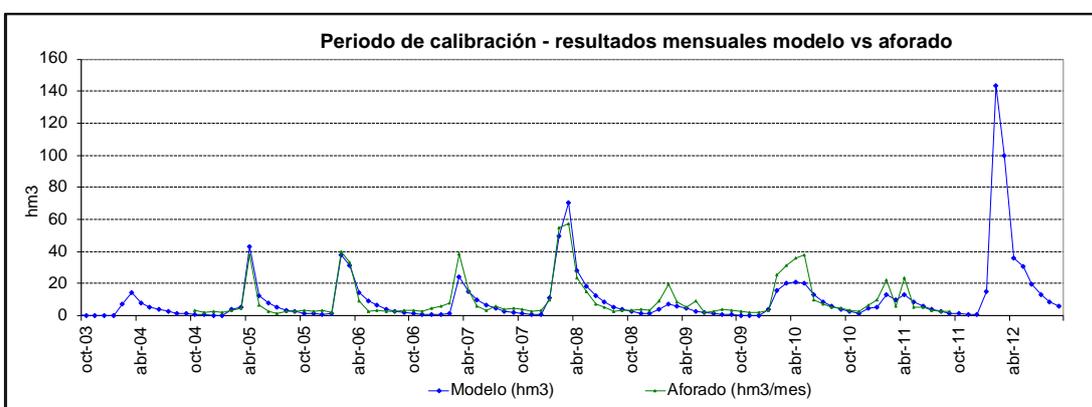


Figura 5-7 Validación del modelo agregado de Témez en la subcuenca del río Chico en la cuenca del río Portoviejo

Los resultados estadísticos de la calibración, en la subcuenca del río Chico en la cuenca del río Portoviejo, son los siguientes: PBIAS=16%, Nse=0,56 y $R^2=0,87$, los mismos que indican resultados de rendimiento satisfactorios (Moriassi et al., 2015). La Figura 5-8 muestra la serie histórica mensual modelada en contraste con los datos mensuales observados.

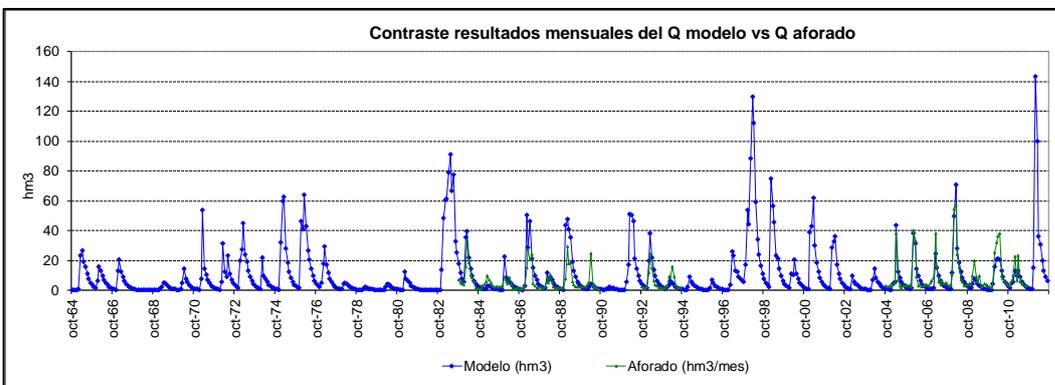


Figura 5-8 Contraste de serie histórica de caudales mensuales del modelo con caudales observados en la subcuenca del río Chico en la cuenca del río Portoviejo.

Luego de la simulación mensual, se obtuvo las aportaciones anuales de la cuenca de estudio, dando como resultado una aportación media anual de 89,5 Hm³ anuales para la subcuenca del río Chico en la cuenca del río Portoviejo. La Figura 5-9 muestra un contraste de las aportaciones anuales obtenidas del modelo con las aportaciones anuales observadas en la subcuenca del río Chico.

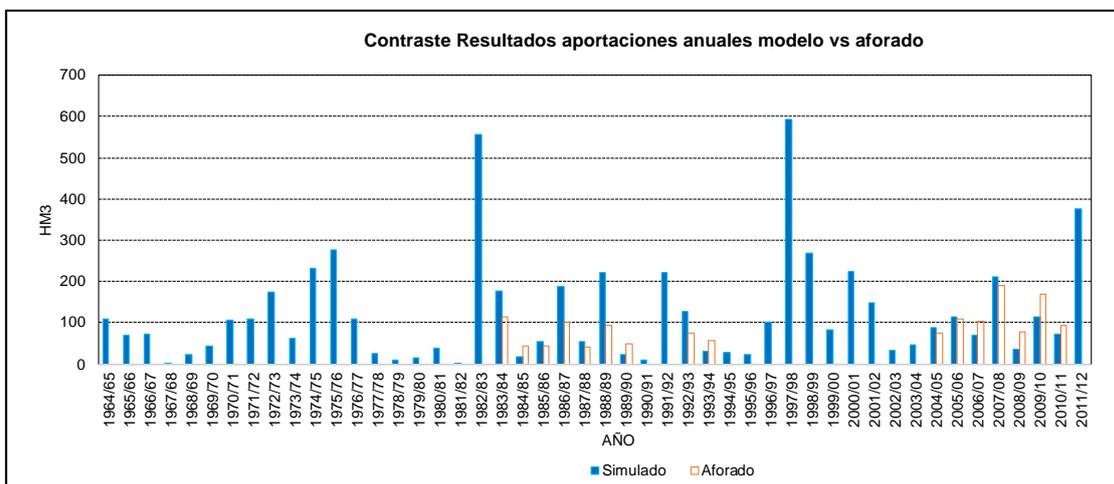


Figura 5-9 Contraste de aportaciones anuales del modelo con aportaciones observadas en la subcuenca del río Chico en la cuenca del río Portoviejo.

A la cabecera de la cuenca del río Portoviejo también se le realizó la simulación hidrológica para obtener las aportaciones mensuales y anuales, la única diferencia respecto a las otras dos simulaciones es que ésta no tuvo una calibración y validación, sino que se extrapolaron los parámetros de calibración de la subcuenca del río Carrizal, esto debido a no contar con datos aforados, y considerando la similitud entre las subcuencas (condiciones geológicas y usos de suelo). Figura 5-10 muestra la serie histórica mensual resultante del modelo, mientras que la Figura 5-11 muestra los resultados anuales de las aportaciones en la simulación realizada, en la subcuenca de cabecera del río Portoviejo la aportación media anual fue 227 Hm³. La Figura 5-12 presenta la distribución mensual de las aportaciones, para el período de simulación hidrológica 1964-2012.

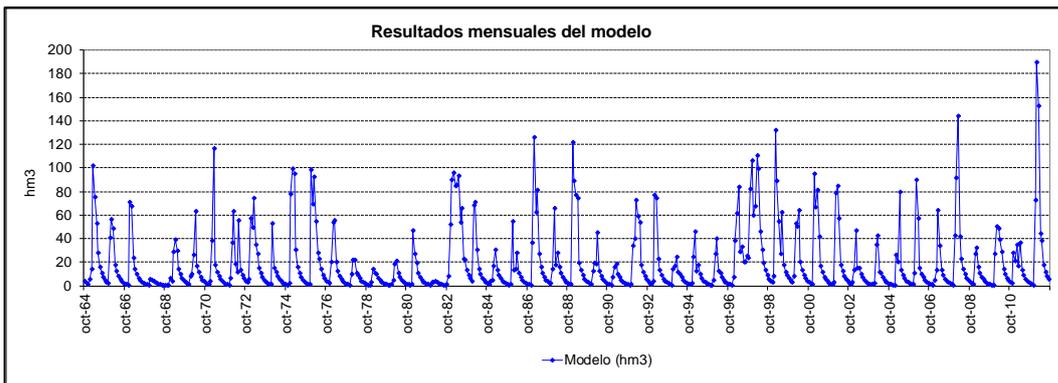


Figura 5-10 Serie histórica de caudales mensuales del modelo en la cabecera de la cuenca del río Portoviejo.

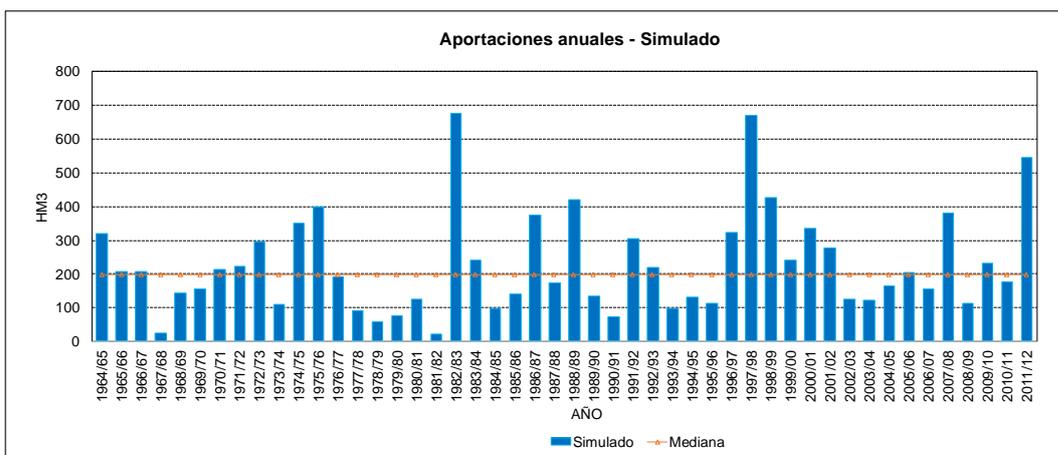


Figura 5-11 Aportaciones anuales del modelo en la cabecera de la cuenca del río Portoviejo.

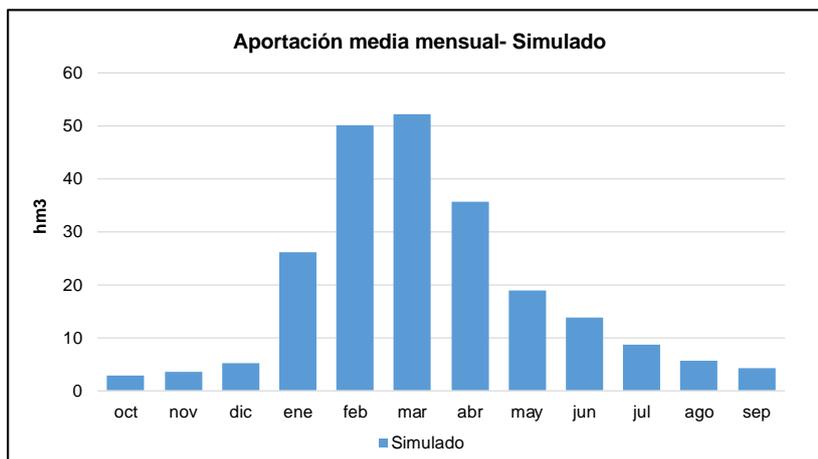


Figura 5-12 Aportaciones medias mensuales del modelo en la cabecera de la cuenca del río Portoviejo.

Los valores de los parámetros de calibración, así como los valores de rendimiento de las simulaciones realizada en el Modelo de Témez, son mostrados en la Tabla 7.

Con la simulación hidrológica del Modelo Agregado de Témez realizada en las cuencas del río Chone y Portoviejo, se obtuvo el balance hídrico en las cuencas, obteniendo valores medios mensuales de precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, evaporación, infiltración, escorrentía superficial y subterránea; este balance hídrico permitirá identificar los impactos causados en cada una de las variables por efectos del cambio climático.

Subcuenca	Cuenca río Chone	Cuenca río Portoviejo	
	río Carrizal	río Chico	cabecera río Portoviejo
Superficie de subcuenca	519	449	462
Aportación media anual aforada (1964-2012)	366,5	69,3	--
Aportación media anual Simulada (1964-2012)	363,3	89,5	227,3
Parámetros de calibración			
Hmax (mm)	96	272	96
C (%)	30	30	30
Imax (mm)	90	160	90
Alfa (mes ⁻¹)	0,4	0,4	0,4
Valores de rendimiento			
Bias	1,1	1,2	--
Bias relativo	4%	16%	--
E (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient)	0,75	0,56	--
Rs (Coeficiente de correlación especial)	0,91	0,85	--
r (Coeficiente de correlación)	0,87	0,80	--
R ²	0,76	0,64	--

Tabla 7 Resultados estadísticos de la calibración y simulación del modelo de Témez en la Demarcación Hidrográfica de Manabí.

5.1.2. Modelo hidrológico distribuido PATRICAL

Para la simulación de las aportaciones en toda la red de drenaje de la Demarcación Hidrográfica de Manabí con el Modelo Distribuido PATRICAL, se utilizaron los datos de todas las estaciones climáticas que registraron precipitación y temperatura para generar mapas mensuales de datos climáticos, además se utilizó un modelo digital del terreno con una dimensión de celda de 1 km², así mismo se realizó una asignación de valores de Hmax a la superficie del área donde se realiza la simulación, la misma que varía de 0 a 1.000 mm, considerando que 0 es un suelo completamente impermeable que no recepta humedad y 1.000 un cuerpo muy húmedo que siempre aceptará humedad; para asignar valores de Imax (infiltración

máxima) a la litología del área de estudio se consideraron los criterios anteriores. La Tabla 8 y la Tabla 9 muestran los valores asignados a cada parámetro.

Hmax (mm)	Tipo de cobertura de suelo
40	Superficies artificiales
100	Espacios con poca vegetación
140	Vegetación arbustiva
180	Praderas y pastizales naturales
190	Sistemas agrícolas heterogéneas
210	Sistemas agroforestales
220	Bosque
1000	Zonas húmedas o superficies de agua

Tabla 8 Valores de Hmax utilizados para la simulación de aportaciones por el Modelo Distribuido PATRICAL en la DHM.

Imax (mm)	Litología
40	doleritas
40	lutitas
40	Lutitas - areniscas
40	Arcillas -lodolitas - argilitas
40	Gabro - basaltos
85	Arenas – arcillosas – limos – calizas - conglomerados
85	Margas – tobáceas – lutitas - areniscas
85	Arcillas – silíceas – turbiditas finas
85	Areniscas – arcillas - limolitas
85	Limolitas – areniscas – toba – volcánica -conglomerados
250	Areniscas - arcillas
250	Areniscas - conglomerados
250	Areniscas – conglomerados – lutitas - tobáceas
700	Rodados – gravas – arenas – limo arcillas
1000	Calizas

Tabla 9 Valores de Imax utilizados para la simulación de aportaciones por el Modelo Distribuido PATRICAL en la DHM.

Con los datos de entrada necesarios para realizar la simulación hidrológica, se establecieron puntos específicos en la red de drenaje en toda la demarcación, con el objetivo de tener un registro de las aportaciones en las diferentes partes de la cuenca. Para ello se establecieron los puntos de drenaje mostrados en la Tabla 10 que involucran, partes altas o cabeceras de todas las cuencas de la demarcación, así como parte media de la cuenca y desembocaduras o partes bajas de la cuenca.

Punto de drenaje	Coordenada X	Coordenada Y	Área de drenaje Km ²
Embalse Poza Honda	588250,7	9876654,9	167
Embalse La Esperanza	602996,1	9900918,9	430
Cuenca Río Grande	601004,0	9923596,6	476
Río Jama en Convento	601487,7	9955541,2	504
Río Lodana en Santa Ana	567520,9	9868950,0	271
Río Portoviejo en Santa Ana	568958,3	9868883,2	473
Cabecera río Chico	579953,7	9883732,6	177
Río Canuto	593551,1	9907006,9	229
Río Mosca en Calceta	591160,0	9911640,2	198
Río Garrapata	597232,5	9923703,9	191
Río Carrizal en Tosagua	589307,5	9921620,0	1303
Río Chone en San Antonio	590837,0	9922515,3	778
Río Chico en Riochico	560358,8	9895834,8	451
Río Portoviejo en Los Positos	559314,3	9895685,6	1259
Río Jama en San Isidro	582956,9	9972772,4	947
Río Mariano	581278,2	9973975,5	249
Río Portoviejo en La Boca	553906,2	9908466,6	2013
Cuenca Río Jipijapa	520070,7	9864678,1	322
Cuenca Cantagallo	523055,0	9859492,7	314
Cuenca Puerto Cayo	529164,7	9850684,0	237
Cuenca Puerto López	521075,4	9828641,3	318
Cuenca Ayampe	521878,0	9814700,6	442
Río Briceño	562313,4	9942853,4	355
Río Jama en Jama	580385,8	9980023,2	1295
Río Coaque	601262,3	1000160,3	519
Río San Marcos	607185,3	1001355,8	309

Tabla 10 Puntos de drenaje establecidos para la simulación de aportaciones mediante PATRICAL en la DHM.

Los resultados de las simulaciones de las aportaciones en los puntos de drenajes establecidos son presentados de forma espacial en la Figura 5-13, además se detallan y agrupan por su ubicación en la cuenca para toda la demarcación en el anexo 2 de este documento.

Una vez que se ha realizado la simulación de las aportaciones a escala mensual y anual en los puntos de drenaje establecidos, se busca la correlación existente entre estas y las aportaciones de las cuencas calibradas con el Modelo de Témez, con el objetivo de obtener el mayor ajuste posible del Modelo Distribuido PATRICAL, asumiendo que los valores del Modelo de Témez serían datos observados.

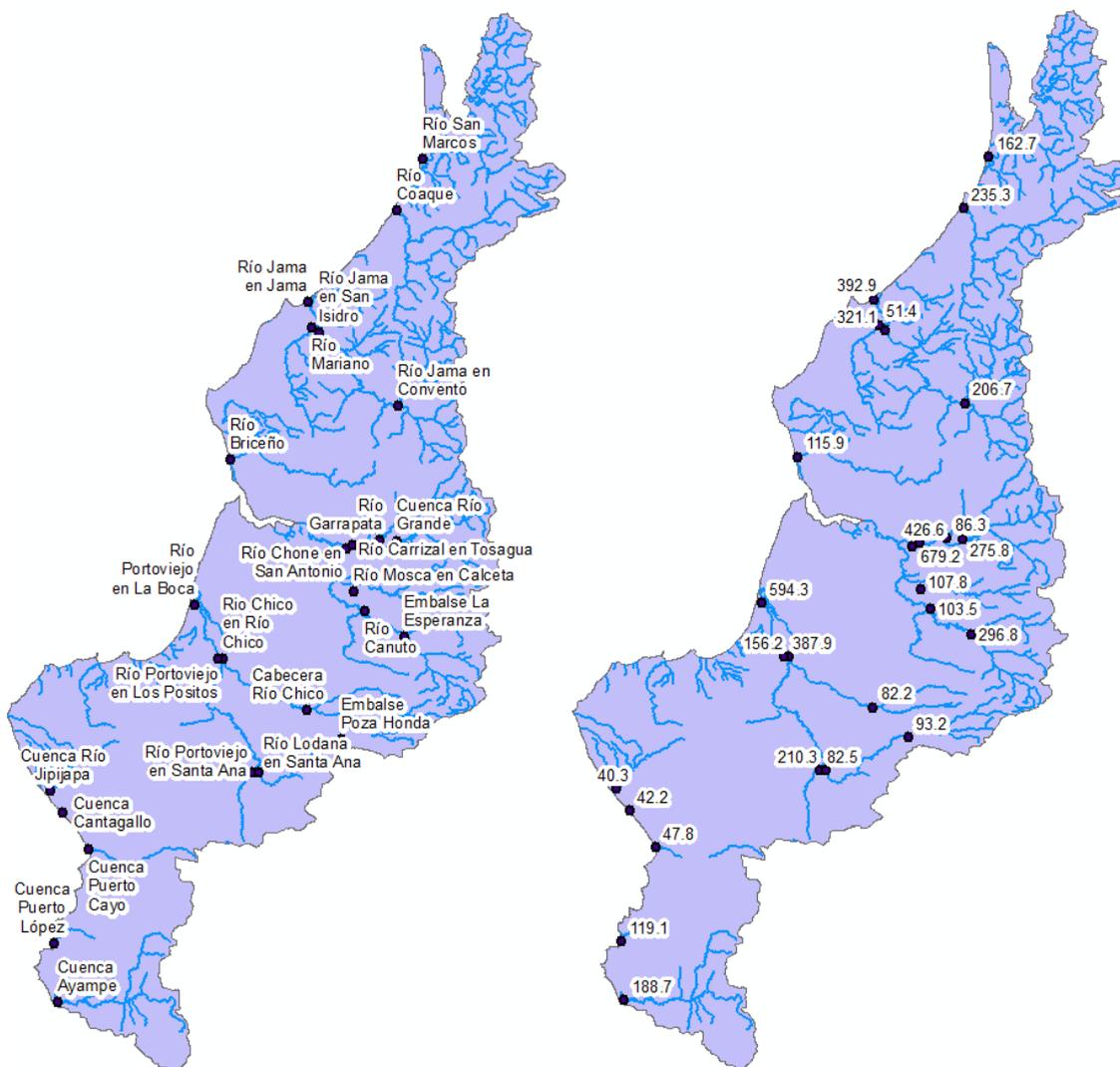


Figura 5-13 Aportaciones anuales en la DHM obtenidas de la simulación hidrológica del modelo PATRICAL.

Para la subcuenca del río Carrizal en la cuenca del río Chone la relación existente entre las aportaciones anuales es de 99%, el valor medio de la aportación anual es de 296 Hm³, tomando el área equivalente a la cuenca de drenaje del embalse La Esperanza. En la Figura 5-14 y Figura 5-15 se muestran un contraste de las aportaciones anuales de los modelos y la correlación existente entre los resultados de los modelos respectivamente.

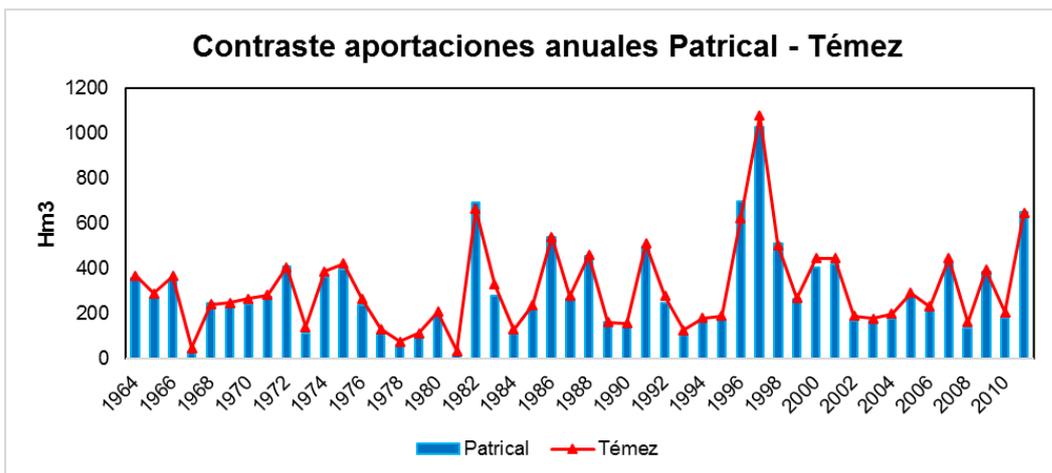


Figura 5-14 Contraste de aportaciones anuales del Modelo Distribuido PATRICAL y el Modelo Agregado de Témez en la cuenca del río Chone

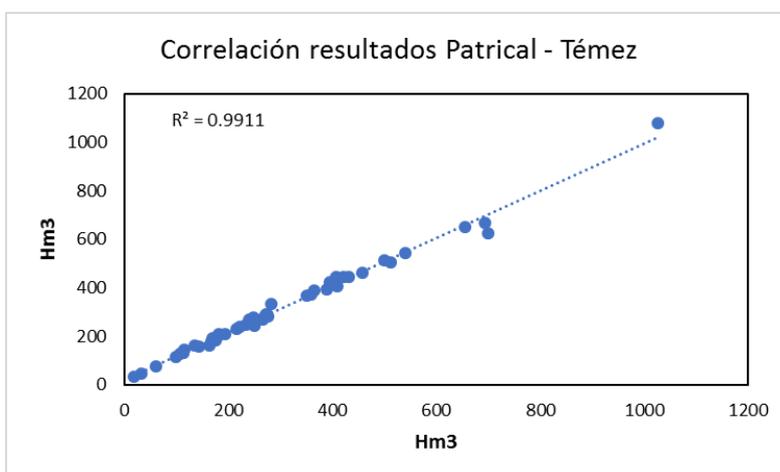


Figura 5-15 Correlación entre aportaciones de los modelos PATRICAL y Témez en la cuenca del río Chone

En la subcuenca del río Chico en la cuenca del río Portoviejo la relación existente entre las aportaciones anuales es de 92%, el valor medio de la aportación anual es de 156 Hm³. En la Figura 5-16 y Figura 5-17 se muestran un contraste de las aportaciones anuales de los modelos y la correlación existente entre los resultados de los modelos respectivamente.

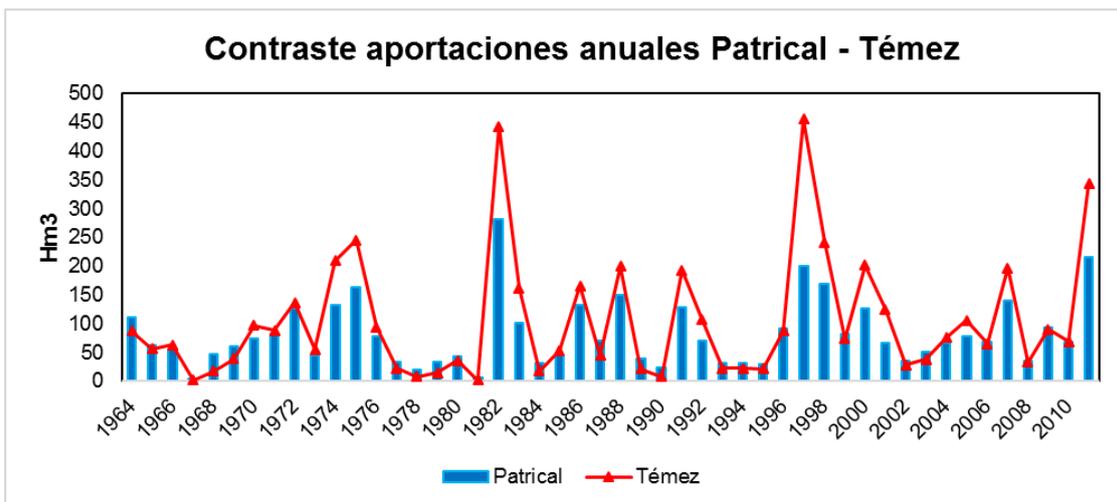


Figura 5-16 Contraste de aportaciones anuales del Modelo Distribuido PATRICAL y el Modelo Agregado de Témez en la cuenca del río Portoviejo

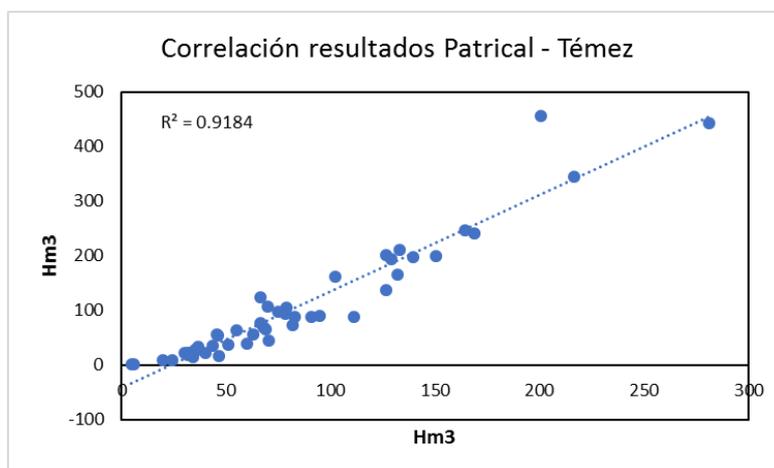


Figura 5-17 Correlación entre aportaciones de los modelos PATRICAL y Témez en la cuenca del río Portoviejo

5.2. Modelos y escenarios de cambio climático

Para comprender la precisión en las proyecciones y corregir los sesgos en el período 1964-2100, los datos extraídos de los modelos climáticos globales se compararon con los datos históricos del período 1961-1990. La comparación se realizó utilizando datos climáticos, comparando ambos valores de modelos climáticos globales con datos históricos y extrayendo un coeficiente de corrección de sesgo basado en las diferencias.

Los datos extraídos de los modelos climáticos globales y descritos en la metodología se muestran en la Figura 5-18, en la que se presentan las anomalías de temperatura mensual (Figura 5-18 a) y precipitación (Figura 5-18 b) para los tres períodos de simulación. Los detalles de tales anomalías de temperatura y precipitación se describen a continuación y se representan mediante mapas mensuales en el anexo 3 y 4 de este documento. Para expresar los resultados se ha tomado la cuenca del río Chone para explicar los cambios futuros de las variables de precipitación y temperatura.

Bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, la temperatura máxima promedio a mediados del siglo XXI tiene una tendencia al alza en todos los meses y varía de 0,9 a 2,5 °C y 1 a 2,7 °C en los modelos CCSM4 y ECHAM6, respectivamente. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2013) informó que la temperatura media global de la superficie muestra una tendencia al calentamiento de 0,85 °C (0,65 a 1,06 °C) durante el período de 1880 a 2012.

En esencia, en el escenario RCP4.5, la temperatura media podría aumentar de 0,8 a 1,2 °C (1,4 a 1,8 °C; 1,5 a 2,1°C) y de 1 a 1,5 °C (1,8 a 2,2 °C; 2 a 2,4 °C) en los modelos CCSM4 y ECHAM6, respectivamente, para los años 2010-39, 2040-69; 2070-99. En el escenario RCP8.5, la temperatura promedio podría aumentar de 0,9 a 1,4°C (1,7 a 2,4 °C; 2,7 a 3,8 °C) y de 1,2 a 1,4 °C (2,4 a 2,8 °C; 3,6 a 4,2 °C) para CCSM4 y ECHAM6, respectivamente, para los años 2010-39 (2040-69; 2070-99). Es probable que para el período 2081-2100, el aumento en la temperatura de la superficie global promedio esté entre 1,1 °C a 2,6 °C bajo RCP4.5 y entre 2,6 °C y 4,8 °C para RCP 8.5 (IPCC, 2013).

La precipitación futura tiene incertidumbre en sus cambios y los modelos analizados no muestran la misma tendencia como en la temperatura. Según CCSM4, la precipitación aumenta (50 mm/mes) y disminuye (-60 mm/mes) tanto en la estación seca como en la lluviosa, sin mostrar cambios significativos en el escenario RCP4.5 para los años 2010-39, 2040-69, 2070-99. Por el contrario, en el escenario RCP8.5 para 2070-2099, la precipitación aumenta en todos los meses llegando a 100 mm/mes, disminuyendo solo en octubre con valores de 70 mm/mes. En los períodos restantes del último escenario, los resultados son similares a los de los escenarios anteriores. En ECHAM6, la precipitación aumentará hasta 60 mm/mes en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, mostrando una disminución en ciertos meses alcanzando niveles de hasta -30 mm/mes en el período 2010-39, 2040-69. En el período 2070-99, el modelo muestra un aumento de entre 10 y 100 mm/mes y una disminución de hasta -25 mm/mes de mayo a septiembre en todos los escenarios, excepto RCP4.5, donde no se muestra ninguna disminución.

Las lluvias futuras indican un cambio en los patrones de precipitación. En CCSM4, las lluvias aumentan de noviembre a febrero alcanzando 380 mm en febrero, y disminuyen de marzo a mayo, aumentando nuevamente de junio a septiembre pasando de 10 mm/mes a 50 mm/mes. ECHAM6 muestra una tendencia creciente en las lluvias en todos los meses del año, excepto en marzo, lo que indica una disminución en el escenario RCP8.5. Los cambios en la temperatura se intensifican progresivamente según los períodos y el escenario, con la significación más pequeña y fuerte en RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. La temperatura promedio en el área de estudio fue de 25,7 °C durante la estación húmeda y de 24,7 °C en la estación seca. Con los cambios estimados, las temperaturas promedio pueden alcanzar valores de hasta 28,2 °C y 27,2 °C en la estación húmeda y seca, respectivamente, para fines del siglo XXI, según el escenario RCP4.5.

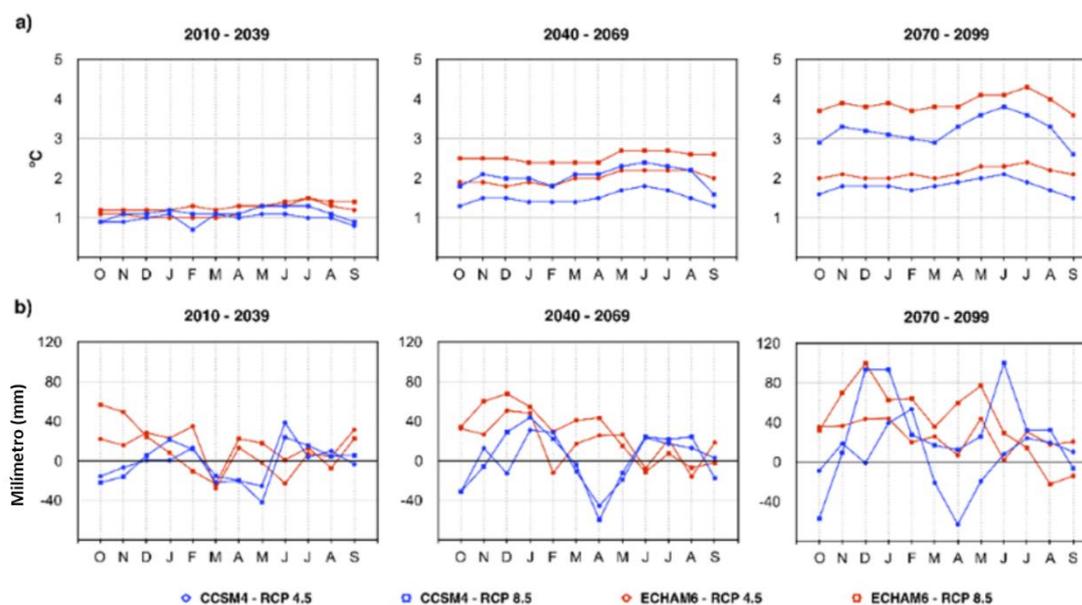


Figura 5-18 Anomalías de precipitación y temperatura, en escenarios RCP4.5 y RCP8.5, para el período de simulación 2010-2099

Magrin et al. (2014) argumentan que se proyecta una disminución en las precipitaciones para la parte norte de América del Sur y un aumento para el noroeste de Ecuador. Además, se espera un calentamiento climático futuro en estas áreas. Niang et al., (2014) estiman un aumento de las temperaturas en África por encima de los niveles globales promedio, aunque se espera que la precipitación sea menos regular e impredecible. Es más probable que Asia tenga mayores temperaturas en las tierras altas a mediados del siglo XXI, y en las zonas orientales y meridionales a fines del siglo XXI. También se espera que ocurra un escenario de calentamiento (Hijioka et al., 2014).

5.3. Clima futuro

La variabilidad espacial de la lluvia y la temperatura mensual en el área de estudio es inferior al 10% (media máxima - min T, media máxima - min P). Por lo tanto, este estudio incluye solo corrección de sesgos mediante el enfoque Delta Change. Esta técnica consiste en agregar a los datos mensuales históricos reales (T (obs) (m), P (obs) (m)) la anomalía del modelo (aumento o disminución), definida como la diferencia entre los datos mensuales del escenario simulado (T (scen) (m), P (scen) (m)) y los datos mensuales del período de control del modelo (T (contr) (m), P (contr) (m)). Los datos observados son datos históricos del área de estudio (1964-2012); los datos del período de control son observaciones meteorológicas de estaciones a nivel mundial (1961-1990). Estos datos se utilizan para desarrollar el período de simulaciones futuras según el escenario e incluye los años entre 2010 y 2100. Esta técnica se ha aplicado en otros estudios (Pardo-Igúzquiza et al., 2019). El sesgo se aplica a la línea base observada del área de estudio para obtener una serie futura corregida, lo que permite reducir la incertidumbre.

Escenario de simulación	Cambios de temperatura °C	Cambios de Precipitación mm/año
CCSM4 RCP4.5 2010-39	1,0	-32,0
ECHAM6 RCP4.5 2010-39	1,2	122,2
CCSM4 RCP8.5 2010-39	1,1	-32,0
ECHAM6 RCP8.5 2010-39	1,3	169,8
CCSM4 RCP4.5 2040-69	1,5	4,3
ECHAM6 RCP4.5 2040-69	2,0	226,7
CCSM4 RCP8.5 2040-69	2,1	29,3
ECHAM6 RCP8.5 2040-69	2,5	327,3
CCSM4 RCP4.5 2070-99	1,8	54,3
ECHAM6 RCP4.5 2070-99	2,1	321,0
CCSM4 RCP8.5 2070-99	3,2	373,5
ECHAM6 RCP8.5 2070-99	3,9	500,6

Tabla 11 Cambios futuros medios por modelo, escenario y período para la DHM

En la Tabla 11 se muestran las combinaciones de modelos, escenarios y períodos con los que se evaluará el impacto del cambio climático. En la Figura 5-19 se muestran los cambios de temperatura del área de estudio en el modelo CCSM4 RCP4.5 en el período 2010-39, considerado uno de los escenarios con menos incrementos en la temperatura y el modelo ECHAM6 RCP8.5 en período 2070-99

considerado el escenario más drástico. En la Figura 5-20 se muestran los cambios en la precipitación.

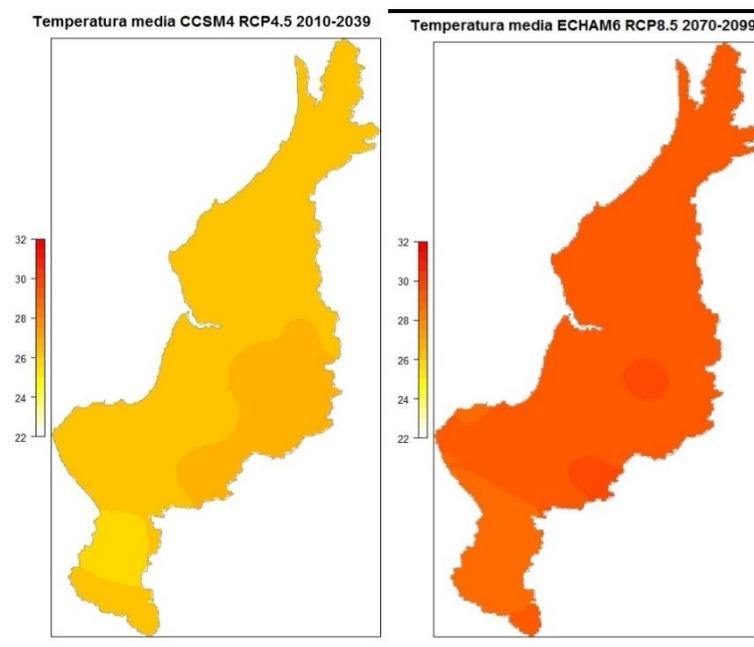


Figura 5-19 Cambios en la temperatura media por efecto del cambio climático.

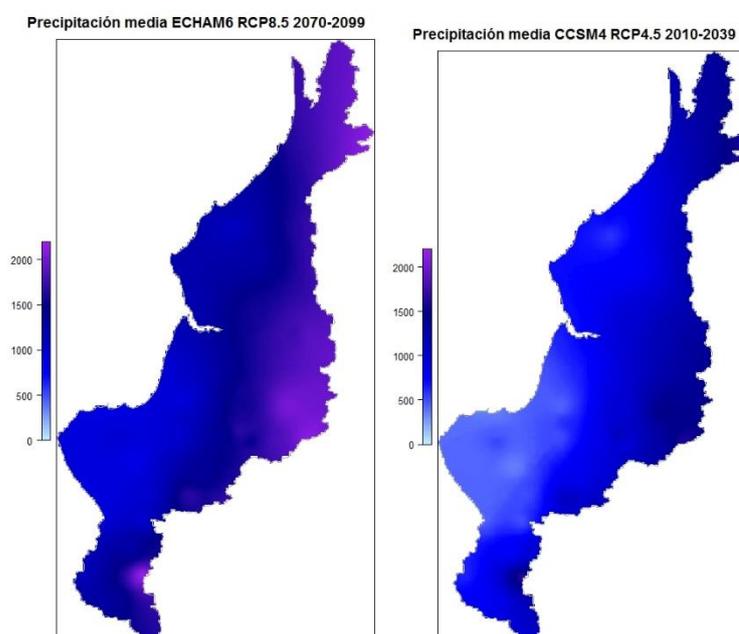


Figura 5-20 Cambios en la precipitación media por efecto del cambio climático.

Para evaluar los efectos del cambio climático, ya sea sobre los recursos hídricos o sobre las variables del ciclo hidrológico en la Demarcación Hidrográfica de Manabí, se ha tomado como referencia de estudio la subcuenca del río Carrizal,

con el objetivo de identificar los cambios y extrapolarlos a otras zonas y obtener resultados referenciales que permitan conocer el comportamiento futuro de los recursos hídricos. La Figura 5-21 muestra el área en el que se han identificado el efecto del cambio climático con mayor detalle.

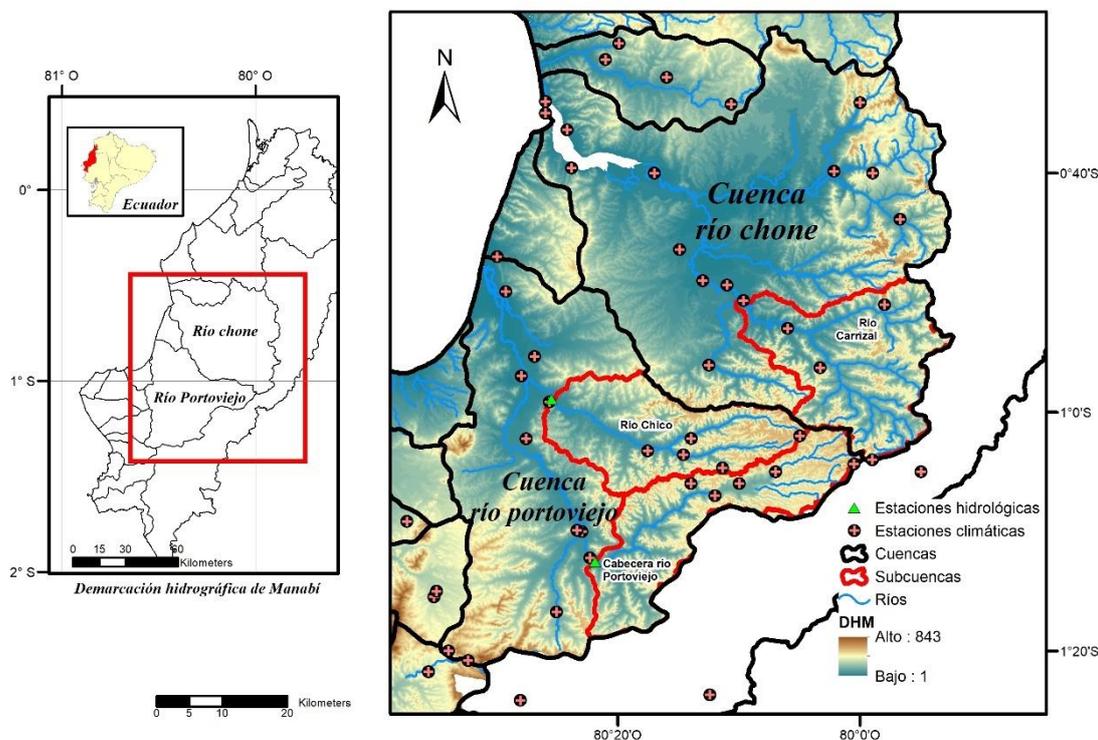


Figura 5-21 Cuencas pilotos para identificación de cambios en los recursos hídricos por efecto del cambio climático

Para identificar los cambios en las aportaciones y el impacto sobre los recursos hídricos, se debe volver a realizar una simulación hidrológica para el área de estudio por cada modelo, escenario y período. Por ejemplo, para esta tesis se han realizado por cada punto de drenaje con el Modelo Agregado de Témez un total de 18 simulaciones, cada una con los cambios mensuales de temperatura y precipitación según corresponda al escenario, modelo o período simulado. Cabe indicar que las simulaciones han sido realizadas 2 veces por cada zona de estudio, con el objetivo de usar dos métodos de cálculos de ETP en el balance de agua; por esta razón los resultados que se mostrarán en los apartados anteriores presentarán resultados según el método de ETP utilizado.

5.4. Efectos en la evapotranspiración y la demanda de agua del cultivo

Para comprender como afectarían el cambio climático a las demandas de agua para riego de cultivos, se utiliza el sistema de explotación “La Esperanza” de la cuenca del río Chone; un sistema de explotación con zonas de riego considerado en los diseños de las infraestructuras. La Figura 5-22 muestra el esquema del sistema de explotación evaluado en la Demarcación Hidrográfica de Manabí.

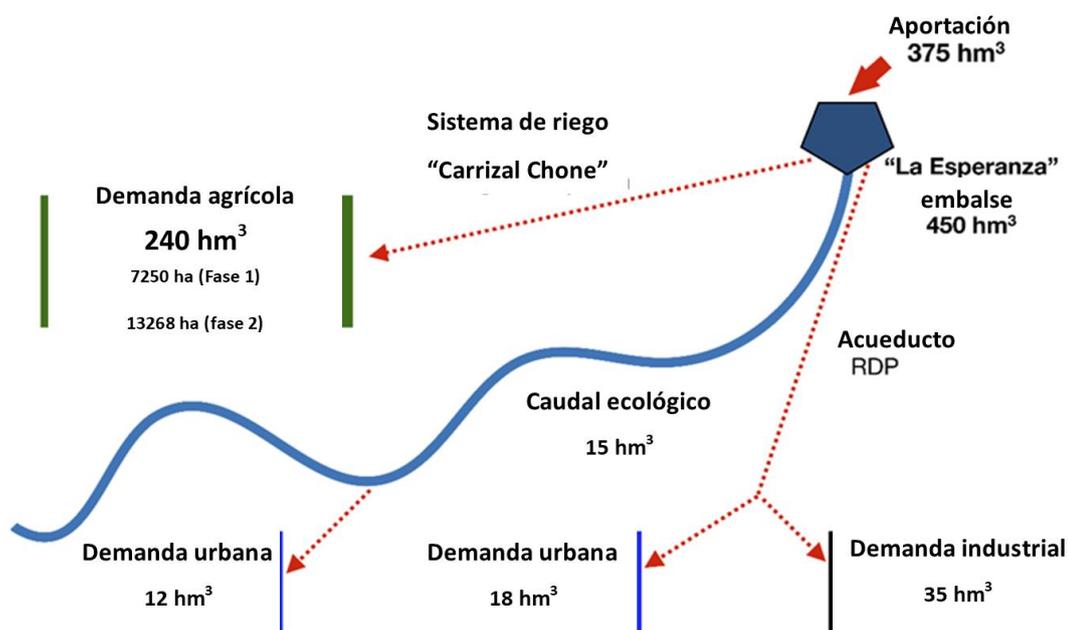


Figura 5-22 Esquema del sistema de explotación La Esperanza de la cuenca del río Chone

El aumento de la temperatura tiene un impacto significativo en la evaporación (EV) (Acharjee et al., 2017; Tao et al., 2015) y la evapotranspiración potencial (ETP) (Bates et al., 2008; Fu et al., 2009; Gharbia et al., 2018). Los resultados del CCSM4 predicen un aumento del 5% (ETP Th) 2% (ETP P-M) en la evapotranspiración en el período 2010-39, 11% (ETP Th) 6% (ETP P-M) para 2040-69, y hasta un 15% (ETP Th) 9% (ETP P-M) para (2070-99) en el escenario RCP4.5. En el RCP8.5, se espera un aumento de 17% y 50% (ETP Th) 10% y 36% (ETP P-M) para 2040-69 y 2070-99, respectivamente.

En cuanto a ECHAM6, se espera que el aumento de la precipitación sea mayor que las proyecciones de CCSM4. Por lo tanto, en los escenarios RCP4.5 y

RCP8.5, se espera un aumento de 18% y 28% (ETP Th) 15% y 25% (ETP P-M) en el período 2010-39. Para el 2040-69, se espera un aumento del 32% y 37% (ETP Th) 25% y 27% (ETP P-M). Se espera un aumento del 41% y 61% (ETP Th) 33% y 42% (ETP P-M) a largo plazo.

Los resultados de CCSM4 prevén un aumento del 12% (ETP Th) 3% (ETP P-M) en la evapotranspiración potencial anual promedio para 2010-39; 20% (ETP Th) 5% (ETP P-M) para 2040-69 y 25% (ETP Th) 6% (ETP P-M) para finales de siglo según el escenario RCP4.5. Por el contrario, en el escenario RCP8.5, se espera un aumento del 15% (ETP Th) 9% (ETP P-M) para (2010-2039); y hasta 54% (ETP Th) 10% (ETP P-M) para (2070-99). Según ECHAM6, se espera que la evapotranspiración potencial mensual promedio aumente de 141,8 mm/mes (ETP Th) 130 mm/mes (ETP P-M) (RCP4.5) a 144 mm/mes (ETP Th) 135 mm/mes (ETP P-M) (RCP8.5) para el período 2010-39, que representa un nivel de 17% (ETP Th) 4% (ETP P-M) por encima del período de control. Se esperan valores mensuales de 158,5 mm/mes (ETP Th) 133 mm/mes (ETP P-M) (RCP4.5) y 170,8 mm/mes (ETP Th) 135 mm/mes (ETP P-M) (RCP8.5) período 2040-69. Los valores para el fin de siglo serán 161,8 mm/mes (ETP Th) 134 mm/mes (ETP P-M) (RCP4.5) y 210,7 mm/mes (ETP Th) 141 mm/mes (ETP P-M) (RCP8.5).

Los resultados obtenidos con las simulaciones indican un mayor requerimiento de agua para satisfacer los valores potenciales de evapotranspiración. Se esperan demandas máximas de agua de 75 mm/mes y 69 mm/mes para el período 2010-39. Se pronostican niveles de hasta 90 mm/mes y 88,5 mm/mes para el período 2040-69, y 100 mm/mes y 114 mm/mes para 2070-99, en CSM4 y ECHAM6 respectivamente. Estos valores oscilan entre el 4% y el 77% de los requerimientos de agua en el análisis histórico, de acuerdo con los cálculos de ETP por el método Thornthwaite (Tabla 12), mientras que los cálculos de ETP por el método de Penman-Monteith muestran un aumento hasta el 4% (Tabla 13). Bates et al. (2008) señalan que la variabilidad en la precipitación y el aumento de las temperaturas podrían generar una mayor demanda de agua de riego, incluso en el escenario donde la precipitación permanece constante durante la temporada de cultivo.

Capítulo 5: Resultados y Discusión

Demanda Agrícola	Demanda neta		Demanda bruta		Incremento
	Demanda Actual (7.250 ha)	Demanda de diseño (13.268 ha)	Demanda Actual (7.250 ha)	Demanda de diseño (13.268 ha)	
Histórica	60,0	149,3	109,8	273,2	--
2010-2039					
CCSM4 RCP4.5 2010-39	70,2	174,7	128,5	319,7	17%
ECHAM6 RCP4.5 2010-39	66,0	164,2	120,8	300,6	10%
CCSM4 RCP8.5 2010-39	71,4	177,7	130,7	325,2	19%
ECHAM6 RCP8.5 2010-39	62,4	155,3	114,2	284,2	4%
2040-2069					
CCSM4 RCP4.5 2040-69	75,0	186,6	137,3	341,5	25%
ECHAM6 RCP4.5 2040-69	73,8	183,6	135,1	336,1	23%
CCSM4 RCP8.5 2040-69	83,4	207,5	152,6	379,8	39%
ECHAM6 RCP8.5 2040-69	81,6	203,1	149,3	371,6	36%
2070-2099					
CCSM4 RCP4.5 2070-99	79,2	197,1	144,9	360,7	32%
ECHAM6 RCP4.5 2070-99	71,4	177,7	130,7	325,2	19%
CCSM4 RCP8.5 2070-99	92,4	229,9	169,1	420,8	54%
ECHAM6 RCP8.5 2070-99	106,2	264,3	194,4	483,6	77%

Tabla 12 Incrementos en la demanda agrícola neta y bruta en el sistema de explotación La Esperanza con el método de ETP thornthwaite

Demanda Agrícola	Demanda neta		Demanda bruta		Incremento
	Demanda Actual (7.250 ha)	Demanda de diseño (13.268 ha)	Demanda Actual (7.250 ha)	Demanda de diseño (13.268 ha)	
Histórica	60,0	149,3	109,8	273,2	--
2010-2039					
CCSM4 RCP4.5 2010-39	62,4	114,2	155,3	284,2	4%
ECHAM6 RCP4.5 2010-39	57,0	104,3	141,8	259,6	-5%
CCSM4 RCP8.5 2010-39	62,4	114,2	155,3	284,2	4%
ECHAM6 RCP8.5 2010-39	52,8	96,6	131,4	240,5	-12%
2040-2069					
CCSM4 RCP4.5 2040-69	62,4	114,2	155,3	284,2	4%
ECHAM6 RCP4.5 2040-69	55,2	101,0	137,4	251,4	-8%
CCSM4 RCP8.5 2040-69	62,4	114,2	155,3	284,2	4%
ECHAM6 RCP8.5 2040-69	55,8	102,1	138,9	254,1	-7%
2070-2099					
CCSM4 RCP4.5 2070-99	61,8	113,1	153,8	281,4	3%
ECHAM6 RCP4.5 2070-99	54,0	98,8	134,4	245,9	-10%
CCSM4 RCP8.5 2070-99	51,6	94,4	128,4	235,0	-14%
ECHAM6 RCP8.5 2070-99	53,4	97,7	132,9	243,2	-11%

Tabla 13 Incrementos en la demanda agrícola neta y bruta en el sistema de explotación La Esperanza con el método de ETP Penman - Monteith

La mayor demanda de agua se espera durante la estación seca cuando los valores de ETP son significativos y la humedad del suelo es poco profunda. La demanda también es alta durante los primeros meses húmedos debido al aumento mínimo en la precipitación y los niveles de alta temperatura. Debido al cambio climático, Alcamo et al., (2007) indican que, en la mayoría de las regiones en desarrollo, el estrés hídrico aumentará; sin embargo, en la mayoría de las regiones industrializadas, descenderá. Fischer et al. (2007) afirman que, en las regiones en desarrollo, los requisitos netos de riego aumentan en más del 50% y en las regiones desarrolladas en un 16%. Gondim et al., (2012) proyectaron que la demanda de agua de riego aumentaría entre un 8% y un 9% a mediados del siglo XXI en una cuenca brasileña. Savé et al., (2012) determinaron que la demanda de riego aumentaría en un 40-250%, dependiendo de los cultivos (maíz, manzana y alfalfa) a fines del siglo XXI en una cuenca española. Nkomozepe & Chung, (2012) mencionan que, aunque existe una incertidumbre significativa en las proyecciones, se espera que la demanda de agua de riego para los cultivos de maíz aumente un 66% en la década de 2050 y un 99% en la década de 2090 en Zimbabwe. Del mismo modo, la demanda de riego para los cultivos de arroz en Corea aumentará en un 2,4% y un 7,9% en la década de 2050 y 99% en la década de 2090, respectivamente.

Los resultados de los cálculos de ETP por los métodos de Penman Monteith y Thornthwaite muestran resultados similares en el clima actual. Sin embargo, bajo el cambio climático, el método Thornthwaite da resultados significativamente más altos con respecto al método Penman Monteith (Figura 5-23). Algunas investigaciones afirman que el enfoque de Thornthwaite subestima el ETP en condiciones áridas (Hashemi & Habibian, 1979; Malek, 1987; Pelton et al., 1960), y sobreestimar en el clima súper húmedo y lugares cercanos a grandes cuerpos de agua encontrados en las tierras bajas de la región amazónica (Camargo et al., 1999). Sin embargo, Camargo et al., (1999) también afirman que la ecuación de Thornthwaite para estimar el ETP funcionó muy bien en regiones húmedas, incluso con una estación seca moderada, dando estimaciones muy cercanas a las obtenidas por el método Penman-Monteith. Además, según (Yang et al., 2017), la contribución de los cambios de ETP a las variaciones en las tierras secas mundiales y

continentales aumentó gradualmente con el calentamiento global, y se descubrió que el método Thornthwaite era cada vez menos aplicable bajo el cambio climático.

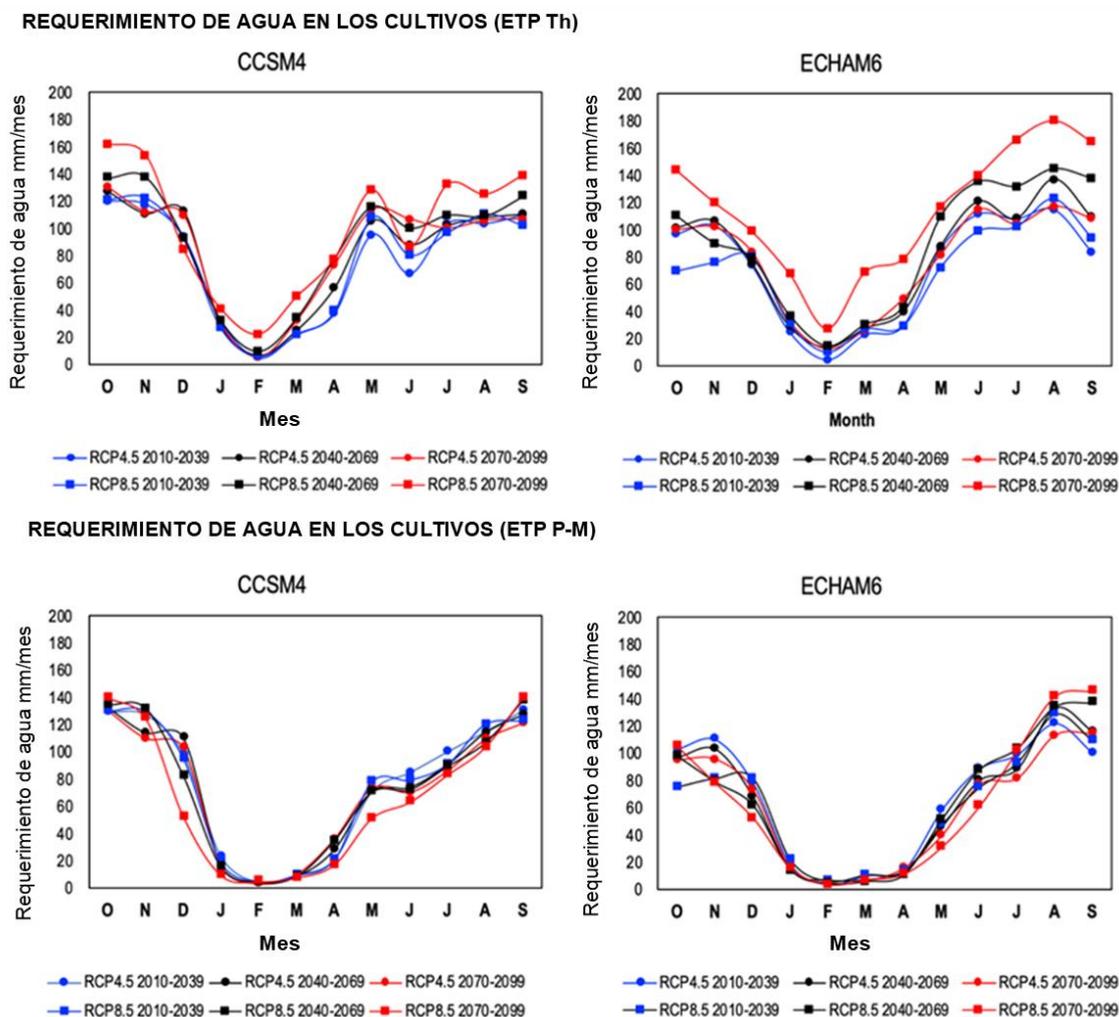


Figura 5-23 Demanda de agua futura mensual para riego de cultivos en escenarios de cambio climático.

Los resultados de este estudio muestran que los requerimientos de agua para los cultivos aumentarán alrededor del 4% (Penman-Monteith) y el 45% (Thornthwaite) debido al cambio climático.

Por lo antecedentes expuestos, para obtener los requerimientos de agua para los principales cultivos de la DHM, se ha utilizado el método de Penman-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración potencial; además se ha seguido la guía para el cálculo de requerimiento de agua de los cultivos, metodología descrita en el documento número 56 de la serie de riego y drenaje de la FAO, donde se detallan los métodos de cálculo para la evapotranspiración del Cultivo (ETc). Este procedimiento se ha recogido en el software CROWAT desarrollado por la FAO, el

mismo que permite el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos y los requisitos de riego en función de los datos del suelo, el clima y los cultivos.

Los requerimientos de agua para los cultivos han sido calculados para las tres cuencas más representativas de la Demarcación Hidrográfica de Manabí (cuenca del río Chone, río Portoviejo y río Jama), usando datos de las principales estaciones climatológicas de cada cuenca. Los cultivos considerados para el cálculo del requerimiento hídrico han sido seleccionados por su alta producción en el área de estudio, así como por su importancia para el desarrollo económico de otros sectores de producción, estos son: maíz, banano, café cacao, pastos, maní, tomate, pimiento, frejoles verdes y secos y melón. Además de estos cultivos se han analizado los vegetales pequeños y las legumbres.

En base a los resultados de los requerimientos hídricos futuros de los cultivos, se pueden estimar demandas futuras para uso agrícola en cada una de las cuencas de estudio. En la Figura 5-24 se presenta el mapa base sobre el que se han calculado los requerimientos hídricos futuros para cada cultivo. Los gráficos que son señalados en el mapa corresponden a los datos climáticos que se han usado en cada una de las cuencas para el cálculo de la ETP.

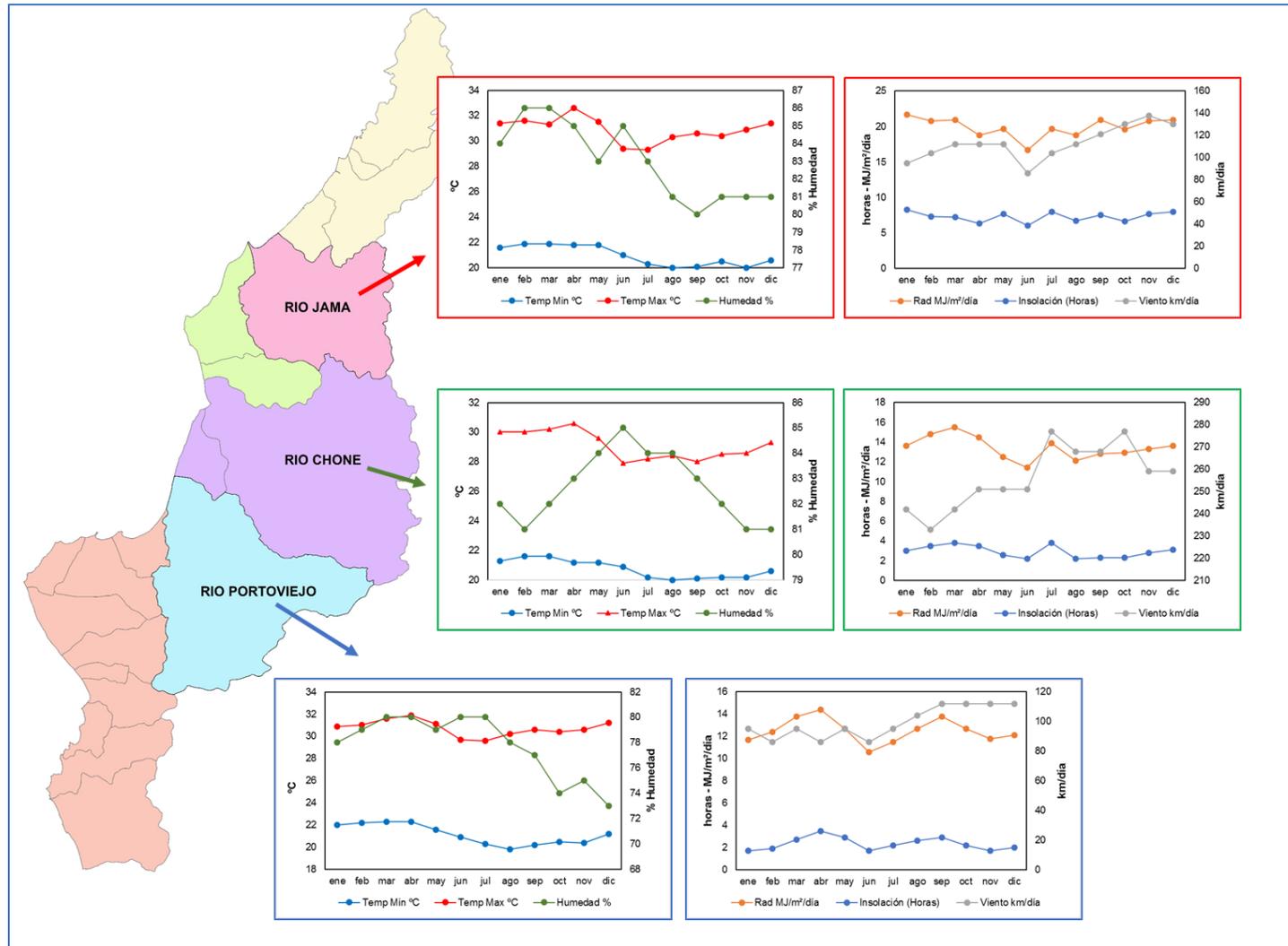


Figura 5-24 Mapa base para el cálculo de requerimientos hídricos futuros en la Demarcación Hidrográfica de Manabí

5.4.1. Requerimiento de agua de los principales cultivos de la DHM

La ETP ha sido calculada el método de Penman-Monteith para cada escenario de simulación futura, considerando los cambios de la temperatura para cada período, modelo y escenario. Para el período base, considerado como el período comprendido entre 1964 y 2012, se ha obtenido una ETP de 4,12 mm/día, equivalente a 1503,8 mm anuales para la cuenca del río Chone, en la cuenca del río Jama estos valores son 3,03 mm/día y 1205,1 mm al año, mientras que para la cuenca del río Portoviejo la ETP presenta los valores más bajos (3,03 mm/día 1.107 mm anuales), un resumen del cálculo de los valores medios mensuales son presentados en el anexo 5.

Para la cuenca del río Chone, en el período 2010–2039 la evapotranspiración potencial, ha mostrado un incremento hasta un 4%, para el 2070 y 2099 se calculó un incremento hasta un 8% y 12% respectivamente. La cuenca del río Portoviejo presenta incrementos similares, pero menos intensos, ya que la ETP máxima que se puede alcanzar en el escenario que presenta mayor incremento de temperatura es de 1202,3 mm. En la cuenca del río Jama se espera que existan incrementos de hasta un 11% respecto a la ETP del período base. La Tabla 14 Cambios futuros de la ETP calculada por el método de Penman-Monteith muestra los cambios en los valores de la ETP para cada período, escenario y modelo, los valores que se indican en el período base son los valores actuales de la ETP.

Los requerimientos de agua actuales para los principales cultivos de la Demarcación hidrográfica de Manabí se han calculado usando el método de Penman-Monteith para el cálculo de la ETP, estas necesidades actuales son mostradas en el anexo 6 para cada una de las cuencas.

Escenario	Río Chone		Río Portoviejo		Río Jama	
	mm/año	cambio %	mm/año	cambio %	mm/año	cambio %
Base	1503,77	-	1.107	-	1205,39	-
CCSM4 RCP4.5 2010-39	1548,88	3%	1130,84	2%	1236,31	3%
CCSM4 RCP4.5 2040-69	1578,96	5%	1134,62	2%	1241,55	3%
CCSM4 RCP4.5 2070-99	1594,00	6%	1135,58	3%	1242,12	3%
CCSM4 RCP8.5 2010-39	1548,88	3%	1138,97	3%	1246,77	3%
CCSM4 RCP8.5 2040-69	1594,00	6%	1143,72	3%	1253,28	4%
CCSM4 RCP8.5 2070-99	1654,15	10%	1156,21	4%	1271,62	5%
ECHAM6 RCP4.5 2010-39	1563,92	4%	1168,95	6%	1269,92	5%
ECHAM6 RCP4.5 2040-69	1594,00	6%	1157,24	5%	1287,15	7%
ECHAM6 RCP4.5 2070-99	1609,03	7%	1151,25	4%	1258,48	4%
ECHAM6 RCP8.5 2010-39	1563,92	4%	1185,46	7%	1309,77	9%
ECHAM6 RCP8.5 2040-69	1624,07	8%	1159,36	5%	1274,11	6%
ECHAM6 RCP8.5 2070-99	1684,22	12%	1202,33	9%	1332,12	11%

Tabla 14 Cambios futuros de la ETP calculada por el método de Penman-Monteith

5.4.2. Requerimiento de agua futura para cultivos de ciclo corto

Para evaluar que sucede con los requerimientos de agua futuros en cultivos de ciclo corto, se analiza el cultivo de maíz con más detalle, ya que es uno de los cultivos de mayor producción en la Demarcación Hidrográfica de Manabí.

En las condiciones actuales, para un ciclo de cultivo de maíz en la estación seca (julio - noviembre) son necesarios 340 mm en la cuenca del río Chone, 295 mm en la cuenca del río Portoviejo y 290 mm en la cuenca del río Jama.

En el mapa base del cálculo de requerimiento de agua del maíz (Figura 5-25), se observa como los requerimientos de agua para el cultivo de maíz, en la demarcación disminuyen de forma general bajo las condiciones del modelo CCSM4, el mismo que indica incremento en la temperatura y en la precipitación sobre todo en la estación seca. En el modelo ECHAM6 en la cuenca del río Portoviejo y Jama se esperan disminuciones de hasta un 30% en el escenario RCP4.5 en todos los períodos por el contrario en el escenario RCP8.5 se producen incrementos a medio y largo plazo hasta un 8% con respecto al período base o requerimientos actuales. Tomando como ejemplo los resultados del escenario ECHAM6 RCP 4.5 en la cuenca del río Chone a final

de siglo solo se necesitarían 284 mm para un ciclo de cultivo en la época seca, 230 mm en la cuenca del río Portoviejo y en la cuenca del río Jama.

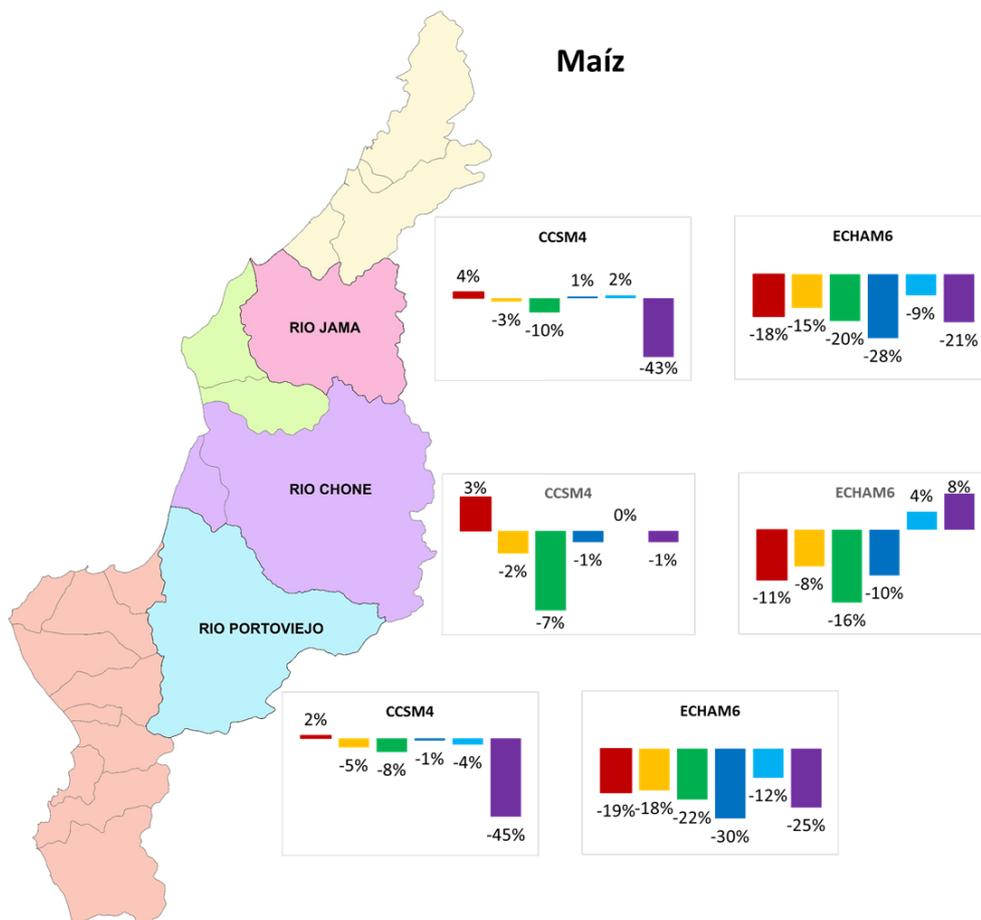


Figura 5-25 Cambios porcentuales futuros en los requerimientos hídricos para el cultivo de maíz, sobre las necesidades hídricas actuales.

Otros cultivos transitorios y de ciclo corto como el tomate, pimiento, fréjol, habas, maní, vegetales pequeños y legumbres, presentan condiciones similares a las del cultivo de maíz. Los requerimientos hídricos para cada tipo de cultivo de ciclo corto considerados en este estudio han sido recopilados en el anexo 6 de este documento, en donde se indica por cada cuenca analizada los requerimientos hídricos futuros esperados en milímetros (mm) para cada período, modelo y escenario.

5.4.3. Requerimiento de agua futura para cultivos permanentes o de ciclo continuo

Cultivos como banano, café, cacao y pastos, son de suma importancia para la Demarcación Hidrográfica de Manabí, por lo que es necesario conocer cuál sería su situación futura respecto al requerimientos de agua. Por ejemplo, tomando como referencia los datos climatológicos de la cuenca del río Portoviejo los requerimientos actuales de estos cultivos permanentes o de ciclo continuo son, para el banano 546,8 mm, para el café 725 mm, para el cacao 677 mm y para los pastos 583 mm.

El tiempo de desarrollo vegetativo de estos cultivos es muy similar entre ellos, ya que dura 365 días al ser de ciclo continuo. A diferencia de los cultivos de ciclo corto, estos cultivos serán más vulnerables al cambio climático si las precipitaciones se redujeran. Sin embargo, un incremento de precipitaciones no asegura que los requerimientos de agua disminuyan, tal como se observa en los resultados obtenidos, en un escenario como el del modelo CCSM4, aunque hay un incremento de precipitación, los requerimientos de agua crecerían hasta un 9% como en el caso del banano o hasta un 8% en el caso de los pastos.

Para que estos cultivos no sean vulnerables al cambio climático, las precipitaciones deberían ser similares a las proyectadas por el modelo ECHAM6, ya que de esta forma se podría disminuir los requerimientos hasta un 39 % en el caso del banano como se observa en la Figura 5-26 y un 34% en el caso de los pastos (Figura 5-27).

Un condesado total de los requerimientos hídricos calculados para los cultivos de mayor importancia en la DHM, se pueden encontrar en el anexo 6 de este documento, donde se analizan por cada cuenca los requerimientos hídricos futuros esperados en milímetros (mm) para cada período, modelo y escenario.

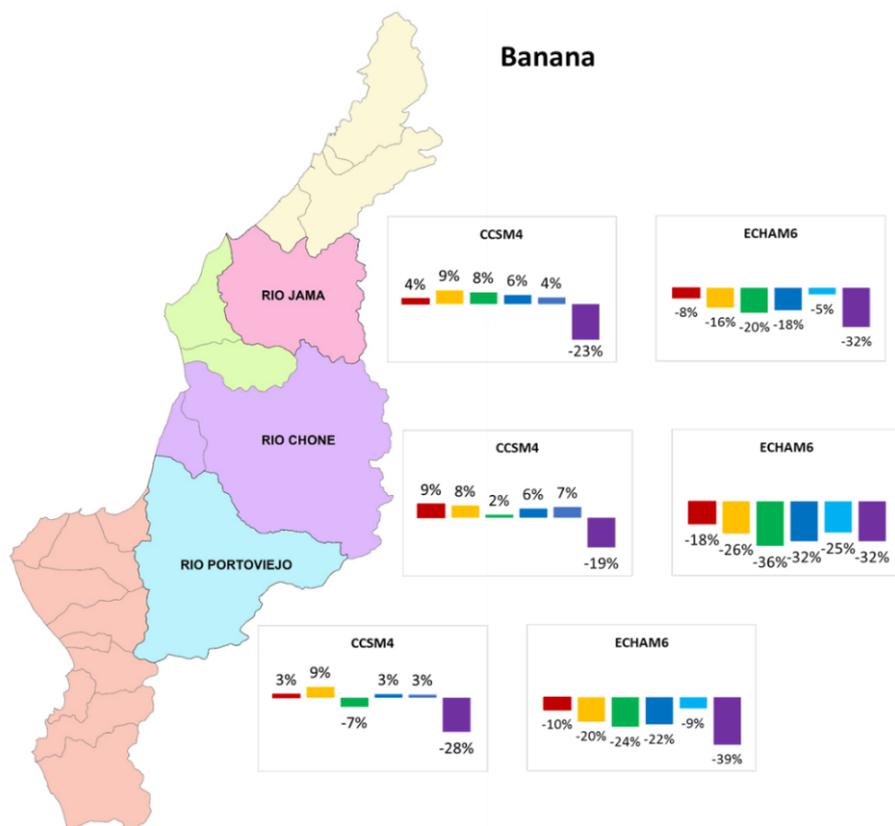


Figura 5-26 Cambios porcentuales futuros en los requerimientos hídricos para el cultivo de bananas, sobre las necesidades hídricas actuales.

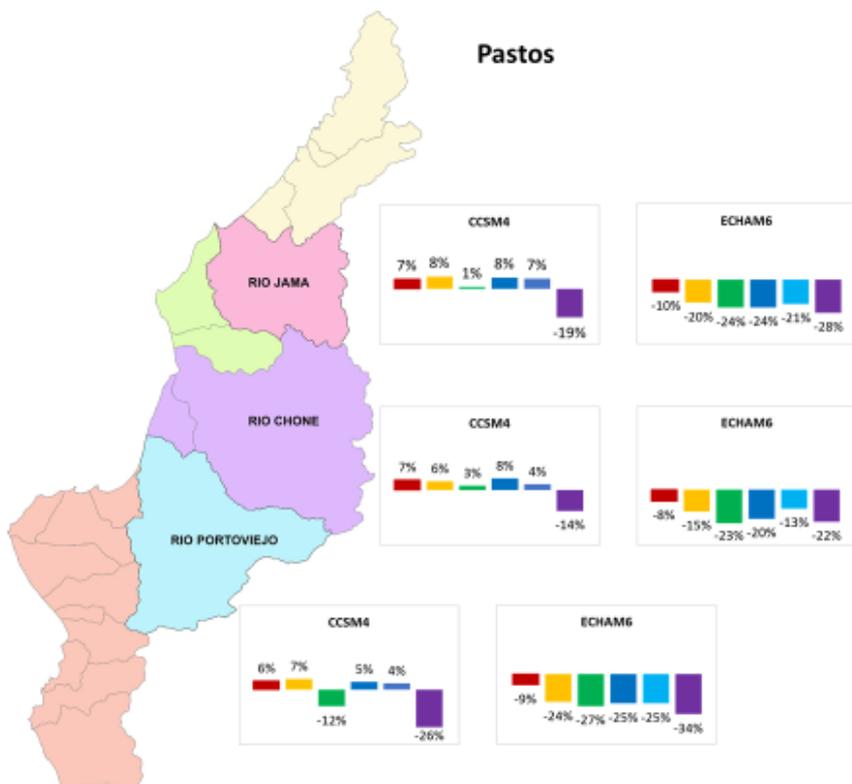


Figura 5-27 Cambios porcentuales futuros en los requerimientos hídricos para el cultivo de pastos, sobre las necesidades hídricas actuales.

5.5. Cambios en los recursos hídricos

Los cambios en las variables hidrológicas se reflejan en los cambios en la aportación de la cuenca durante el año hidrológico. La simulación CCSM4 muestra que la precipitación en la estación húmeda disminuirá aproximadamente un 4%. La disminución más significativa se registra en el escenario RCP4.5 en el período 2010-39, con una precipitación promedio mensual de 206,64 mm, que representa 9 mm por debajo del período de control. Lo contrario ocurre durante la estación seca, con valores positivos por encima del 20% y por debajo del 50%. La precipitación mensual promedio aumentará de 6 mm a 12 mm cada mes.

La simulación ECHAM6 indica que la precipitación aumentará en ambas estaciones: hasta un 30% en la estación húmeda y en un 40% - 94% en la estación seca, con valores de 35 mm/mes a 48 mm/mes. Los futuros cambios anuales en las variables hidrológicas se pueden observar en la Figura 5-28.

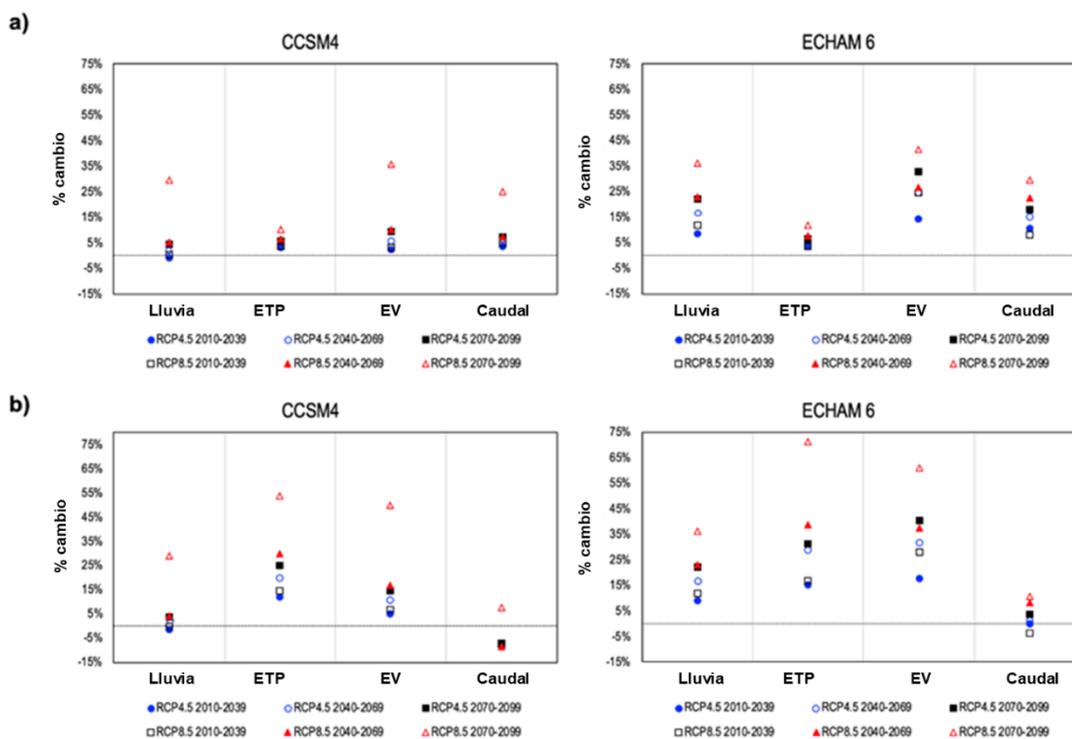


Figura 5-28 Cambios anuales en las variables hidrológicas de la cuenca de estudio bajo situación de cambio climático.

Ambos modelos muestran aumentos similares en la precipitación en la estación seca, lo que confirma un cambio en los patrones históricos de precipitación. IPCC (2007) señalan que en el escenario RCP8.5, habrá un aumento en la precipitación anual promedio en latitudes altas y el Océano Pacífico ecuatorial, pero se proyecta una disminución en un gran número de zonas secas en zonas subtropicales y medias regiones latitudinales.

Las simulaciones CCSM4 muestran niveles decrecientes de 4% y 6% en la escorrentía superficial en todos los escenarios y períodos debido al aumento de la temperatura y al aumento mínimo de la precipitación. El volumen de escorrentía alcanzó 36,8 mm/mes y 37,7 mm/mes en el escenario RCP4.5 para 2010-39 y 2070-99, respectivamente. La simulación ECHAM6 muestra una disminución del 7% en la escorrentía superficial en el período 2010-39 usando el escenario RCP8.5. En el período 2040-69, aumentará en un 3%, y se espera que aumente en un 6% para finales de siglo, lo que representa un nivel de escorrentía de 42,9 mm/mes. El aumento en la escorrentía es más significativo en febrero y marzo cuando el área registra los niveles más altos de precipitación. En contraste, hay una disminución en la escorrentía durante los meses de la estación seca.

Se obtuvieron resultados similares para la infiltración debido al aumento de la temperatura y al aumento mínimo de la precipitación. La variable registra una reducción no significativa en todos los escenarios y períodos del modelo CCSM4, excepto en el escenario RCP8.5 a finales de siglo, con un aumento de hasta el 18%. ECHAM6 muestra un aumento en la infiltración de 2% y 9% para el escenario RCP4.5, y entre 4% y 21% para el escenario RCP8.5.

La contribución a la red fluvial depende no solo de la precipitación sino también del comportamiento de todas las variables hidrológicas. Kundzewicz et al., (2007) argumentan que la precipitación, la temperatura y la demanda de evaporación son los principales factores climáticos que determinan la disponibilidad de agua.

En este estudio, podemos observar que, usando los valores de PET obtenidos por el método de Penman-Monteith se registra un aumento en la contribución a la red fluvial en todas las simulaciones realizadas, mientras que, usando los valores obtenidos por el método modificado de Thornthwaite, a pesar del aumento en la precipitación durante la estación seca, se registra una reducción en la contribución a la red fluvial en la simulación CCSM4 para todos los períodos y escenarios durante las estaciones seca y húmeda. El escenario RCP8.5 fue la única excepción, y se puede observar un aumento en el flujo para las dos estaciones del período 2070-99. Las reducciones observadas no superan el 12% con respecto al período de control, lo que representa una reducción máxima de 7 hm³ para la estación húmeda y 1 hm³ para la estación seca. Los resultados de la simulación ECHAM6 indican que se espera un aumento para la estación húmeda, excepto para el escenario RCP8.5 en el período 2010-39. El aumento más alto (6,3 hm³/mes) durante la estación húmeda se puede observar para el período 2070-2099 bajo el escenario RCP8.5. En la estación seca, se espera que la contribución aumente en un nivel máximo del 14% (1 hm³/mes) con respecto a la contribución histórica en el período de control. Como resultado, se pronostican contribuciones mensuales promedio de 53 hm³/mes y 60 hm³/mes para la estación húmeda, y 9 hm³/mes y 11 hm³/mes para la estación seca en ambas cuencas. Esta variación estacional se muestra en la Figura 5-29.

Gebrechorkos et al., (2019) estudiaron los impactos del cambio proyectado en el clima sobre el balance hídrico en las cuencas de Etiopía (EthShed), Kenia (KenShed) y Tanzania (TanShed). Los resultados muestran un aumento en la precipitación, en relación con el período de referencia (1961-1990), en EthShed (14% - 50%) y KenShed (15% - 86%) y una disminución en TanShed (1,3% - 6,3%) en los años 20 (2011-2040), los años 50 (2041-2070) y los años 80 (2071-2100) bajo las tres vías de concentración representativas (RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5). La temperatura máxima (anomalías de hasta 3,7 °C) y la temperatura mínima (anomalías de hasta 2,76 °C) serán más cálidas que el período de referencia a lo largo del siglo XXI en las

tres cuencas. Se proyecta un aumento (disminución) en el flujo de la corriente estacional y anual, el agua del suelo y la evaporación en EthShed y KenShed (TanShed) en los años 20, 50 y 80. Bhatta et al., (2019) estudiaron el impacto del cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Himalaya, los resultados muestran un aumento en la temperatura máxima promedio anual (+ 4 °C) y la temperatura mínima (+ 5,5 °C), y Se proyecta una disminución de la precipitación (-4,5%) para fines del siglo XXI en escenarios RCP8.5. El estudio encontró que el clima futuro podría disminuir el flujo de la corriente en más del 8,5% durante el siglo XXI en escenarios RCP8.5.

Los resultados demuestran que la variación en la temperatura es un factor esencial para cuantificar la contribución en una cuenca fluvial, dado que, cuando el aumento de la precipitación no es representativo y se distribuye a lo largo del año hidrológico, el balance será negativo para ese año en particular. Esto se puede evidenciar en los resultados de la simulación CCSM4, que indican que los cambios en la precipitación son negativos durante la estación húmeda (disminución) y positivos durante la estación seca (aumento). Sin embargo, el aumento de la temperatura dio como resultado valores negativos (disminución) en las contribuciones para todos los períodos y escenarios, excepto para la simulación RCP8.5 en el período 2070-99, que muestra un aumento en la contribución debido al aumento significativo de la precipitación (Figura 5-29). La simulación ECHAM6 muestra un aumento progresivo con los tres escenarios. Los resultados indican que es posible que la contribución de la cuenca vea un aumento como resultado de un aumento significativo en la temperatura y la precipitación. El IPCC (2014) espera que, por cada grado Celsius que aumente la temperatura global, al menos el 20% del suministro de agua se reduzca en regiones áridas y semiáridas en latitudes subtropicales y latitudes medias, y González-Zeas et al., (2019), afirman que en las zonas montañosas tropicales la demanda de agua está aumentando rápidamente.

Un resumen de como varían los variables hidrológicas usando un método de cálculo de ETP distinto bajo efecto del cambio climático se puede

observar en la Tabla 15 para Thornthwaite y en la Tabla 16 para Penman - Monteith.

Usando método de ETP de Thornthwaite							
	P	ETP	E	I	Asub	ETP -E	Aportación
HISTORIC	120	123	60	26	34	63	375.2
CCSM4 RCP4.5 2010-2039	-1%	12%	5%	-28%	8%	19%	-8%
CCSM4 RCP4.5 2040-2069	2%	20%	11%	-29%	10%	29%	-7%
CCSM4 RCP4.5 2070-2099	4%	25%	15%	-29%	11%	35%	-7%
CCSM4 RCP8.5 2010-2039	0%	15%	7%	-28%	10%	22%	-7%
CCSM4 RCP8.5 2040-2069	5%	30%	17%	-28%	8%	42%	-8%
CCSM4 RCP8.5 2070-2099	29%	54%	50%	-11%	24%	58%	8%
ECHAM6 RCP4.5 2010-2039	9%	15%	18%	-23%	18%	13%	0%
ECHAM6 RCP4.5 2040-2069	17%	29%	32%	-19%	17%	26%	1%
ECHAM6 RCP4.5 2070-2099	22%	31%	41%	-18%	21%	23%	4%
ECHAM6 RCP8.5 2010-2039	12%	17%	28%	-22%	10%	7%	-4%
ECHAM6 RCP8.5 2040-2069	23%	39%	37%	-15%	27%	40%	8%
ECHAM6 RCP8.5 2070-2099	36%	71%	61%	-9%	28%	81%	11%

Tabla 15 Cambios en las variables hidrológicas usando ETP (Th) en el balance de agua.

Usando método de ETP de Penman-Monteith							
	P	ETP	E	I	Asub	ETP -E	Aportación
HISTORIC	120	126	55	20	44	71	375,2
CCSM4 RCP4.5 2010-2039	-1%	3%	2%	-3%	-5%	4%	3%
CCSM4 RCP4.5 2040-2069	2%	5%	6%	-2%	0%	4%	6%
CCSM4 RCP4.5 2070-2099	4%	6%	9%	-3%	1%	3%	7%
CCSM4 RCP8.5 2010-2039	0%	3%	3%	-2%	-3%	4%	5%
CCSM4 RCP8.5 2040-2069	5%	6%	10%	0%	0%	4%	7%
CCSM4 RCP8.5 2070-2099	29%	10%	36%	26%	23%	-10%	25%
ECHAM6 RCP4.5 2010-2039	9%	4%	15%	4%	4%	-5%	11%
ECHAM6 RCP4.5 2040-2069	17%	6%	25%	11%	9%	-8%	15%
ECHAM6 RCP4.5 2070-2099	22%	7%	33%	13%	13%	-14%	18%
ECHAM6 RCP8.5 2010-2039	12%	4%	25%	6%	-1%	-12%	8%
ECHAM6 RCP8.5 2040-2069	23%	8%	27%	18%	21%	-7%	23%
ECHAM6 RCP8.5 2070-2099	36%	12%	42%	31%	33%	-11%	30%

Tabla 16 Cambios en las variables hidrológicas usando ETP (P-M) en el balance de agua.

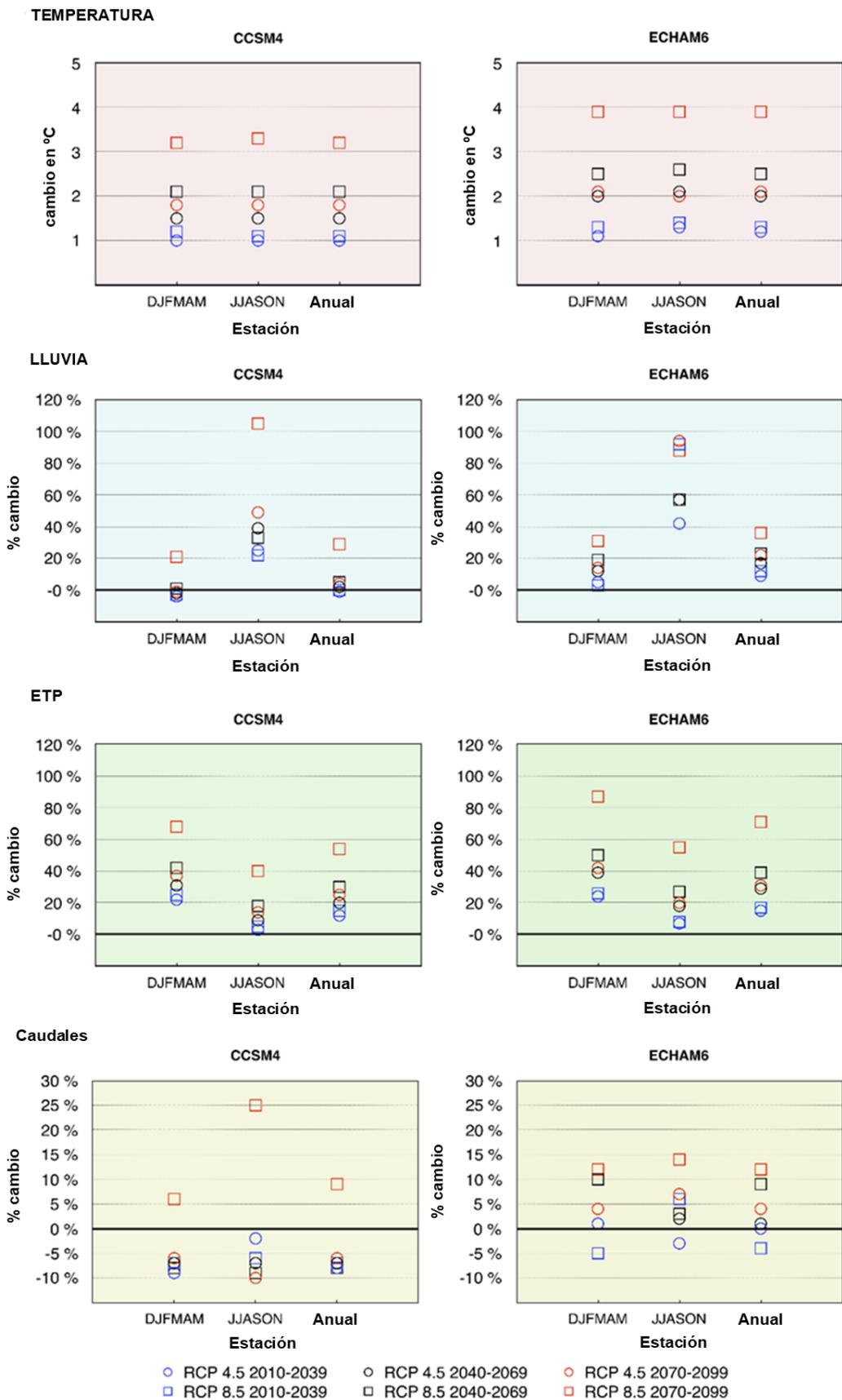


Figura 5-29 Cambios estacionales futuros en la temperatura, precipitación, ETP (Th) y caudales.

5.6. Gestión actual y futura de los recursos hídricos bajo el cambio climático

El cambio climático afecta la funcionalidad y operación de la estructura hidrológica existente y las prácticas de gestión del agua (Kundzewicz et al., 2007), por lo tanto, deben considerarse en el diseño y planificación de los sistemas de recursos hídricos. La gestión del agua es una opción para garantizar la preparación adecuada para la escasez de agua (Magrin et al., 2014) a través de las reglas de operación del embalse (Ahmadi et al., 2015). Las curvas de diseño o la eficiencia del riego pueden utilizarse como una herramienta fácil y confiable para mitigar los impactos del cambio climático (Guo & Shen, 2016; Zhang et al., 2019).

Realizamos una simulación del funcionamiento del sistema de recursos hídricos con las demandas actuales y futuras bajo el efecto del cambio climático considerando el ETP Th para verificar el cumplimiento de los criterios de garantías y establecer las medidas operativas adaptativas.

Con las demandas a corto plazo: demanda urbana (DU) 30 hm³, caudal ecológico (Qec) 15 hm³ y demanda agrícola (DA) (según el modelo y el escenario establecidos en la Tabla 12), el sistema cumplió con la garantía mensual para la DU en todos los períodos y puede expandirse hasta 24.000 ha. Bajo el efecto del cambio climático, la simulación muestra que, el DU cumple con los criterios de garantía mensuales, pero no cumple con los criterios de UTAH 10 en ningún modelo, escenario y período, excepto en el modelo ECHAM6 a corto plazo, mientras que DA no cumple con los criterios de garantía en ninguna simulación (Tabla 17a). Para resolverlo, se establece una curva de reserva a la DU, que varía de 90 a 120 hm³ hasta el final del siglo (Tabla 17b); una eficiencia de riego de 0,43 y dos reglas de operación para el DA basadas en el modelo CCSM4 1) Restricción de suministro del 25% 2) Restricción de suministro del 50%.

Se establece en una restricción de suministro del 25% cuando el nivel del depósito alcanza 200 hm³, y una restricción de suministro del 50% cuando alcanza 170 hm³ (Tabla 17c). Con las medidas establecidas, el sistema se

cumple con los criterios de GM y UTAH 1 y 2, pero no son suficientes para cumplir a largo plazo. Para que el sistema funcione, se establece una mejora de la eficiencia del riego de 0,43 a 0,58 (Tabla 17d); Sin embargo, esta medida no garantiza que el suministro al DA (UTAH 10) cumpla con todos los criterios de garantía, es necesario lograr una eficiencia de riego de 0,43 a 0,65 y restringir el suministro hasta un 10%. (Tabla 17e). Indicamos que el cumplimiento de los criterios de garantía no garantiza el suministro continuo de la demanda agrícola. Las simulaciones se han realizado con la priorización de la demanda urbana y ambiental en todos los escenarios y períodos; así, la demanda agrícola se verá afectada por la escasez de agua. Por lo tanto, es necesario utilizar curvas de reserva para satisfacer las demandas urbanas y curvas para racionar las demandas agrícolas. Las medidas operativas aplicadas en las simulaciones se muestran en la Tabla 18.

Capítulo 5: Resultados y Discusión

	Corto plazo (2010-39)					Mediano plazo (2040-69)					Largo plazo (2070-99)				
	Demanda Urbana (30 hm ³)		Demanda Agrícola (7.250 ha)			Demanda Urbana (55 hm ³)		Demanda Agrícola (7.250 ha)			Demanda Urbana (55 hm ³)		Demanda Agrícola (7.250 ha)		
	GM	UTAH 10	UTAH 1	UTAH 2	UTAH 10	GM	UTAH 10	UTAH 1	UTAH 2	UTAH 10	GM	UTAH 10	UTAH 1	UTAH 2	UTAH 10
a) Simulación futura con efecto del cambio climático (CC)															
CCSM4 RCP4.5	98 %	59 %	51 %	90 %	116 %	98 %	91 %	70 %	109 %	181 %	97 %	105 %	69 %	107 %	190 %
ECHAM6 RCP4.5	100 %	0 %	18 %	21 %	21 %	99 %	41 %	55 %	91 %	123 %	99 %	32 %	45 %	72 %	91 %
CCSM4 RCP8.5	99 %	58 %	49 %	87 %	112 %	97 %	116 %	80 %	117 %	218 %	99 %	48 %	58 %	93 %	153 %
ECHAM6 RCP8.5	100 %	8 %	12 %	21 %	21 %	99 %	30 %	40 %	76 %	97 %	98 %	43 %	61 %	95 %	173 %
b) CC + gestión para la demanda urbana (GDU)															
CCSM4 RCP4.5	100 %	0 %	55 %	95 %	132 %	100 %	0 %	87 %	126 %	217 %	100 %	0 %	76 %	115 %	227 %
ECHAM6 RCP4.5	100 %	0 %	18 %	21 %	21 %	100 %	0 %	58 %	97 %	145 %	100 %	0 %	51 %	91 %	116 %
CCSM4 RCP8.5	100 %	0 %	51 %	91 %	128 %	100 %	0 %	87 %	126 %	258 %	100 %	0 %	62 %	101 %	174 %
ECHAM6 RCP8.5	100 %	0 %	23 %	23 %	23 %	100 %	0 %	41 %	80 %	106 %	100 %	0 %	55 %	94 %	193 %
c) CC +MUD + gestión de la demanda agrícola (GDA)															
CCSM4 RCP4.5	100 %	0 %	47 %	71 %	136 %	100 %	0 %	50 %	100 %	261 %	100 %	0 %	50 %	100 %	285 %
ECHAM6 RCP4.5	100 %	0 %	18 %	21 %	21 %	100 %	0 %	47 %	71 %	148 %	100 %	0 %	44 %	68 %	122 %
CCSM4 RCP8.5	100 %	0 %	47 %	71 %	133 %	100 %	0 %	71 %	128 %	282 %	100 %	0 %	50 %	83 %	186 %
ECHAM6 RCP8.5	100 %	0 %	23 %	23 %	23 %	100 %	0 %	47 %	67 %	142 %	100 %	0 %	50 %	91 %	212 %
d) CC +MUD + MAD + Mejorando la eficiencia del riego a 0.58															
CCSM4 RCP4.5	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	0 %	45 %	72 %	99 %	100 %	0 %	46 %	75 %	117 %
ECHAM6 RCP4.5	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
CCSM4 RCP8.5	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	0 %	40 %	74 %	167 %	100 %	0 %	26 %	37 %	37 %
ECHAM6 RCP8.5	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	0 %	26 %	49 %	71 %
e) CC +MUD + MAD + Mejorando la eficiencia del riego a 0.65															
CCSM4 RCP4.5	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	0 %	26 %	49 %	49 %	100 %	0 %	34 %	60 %	63 %
ECHAM6 RCP4.5	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
CCSM4 RCP8.5	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	0 %	47 %	74 %	96 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
ECHAM6 RCP8.5	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	0 %	13 %	13 %	13 %

Tabla 17 Evaluación del cumplimiento de los criterios de garantía para el abastecimiento de demandas en el contexto del cambio climático. Los valores indican que se cumplen los criterios de garantía (verde) o que no se cumplen (naranja).

Capítulo 5: Resultados y Discusión

Escenario Cambio Climático	Volumen muerto (hm ³)	Demanda Urbana (hm ³)	Demanda Agrícola bruta 7250 ha (hm ³)	Curva de reserva para Demanda Urbana (hm ³)	Restricción preventiva Demanda Agrícola		Restricción Definitiva Demanda Agrícola		Eficiencia de riego
					Nivel del embalse (hm ³)	Restricción	Nivel del embalse (hm ³)	Restricción	
2010-39									
CCSM4 RCP4.5	70	30	174,7	85	200	0,25	170	0,5	0,43
ECHAM6 RCP4.5	70	30	164,2	70	-	-	-	-	
CCSM4 RCP8.5	70	30	177,7	90	200	0,75	170	0,5	
ECHAM6 RCP8.5	70	30	155,3	90	-	-	-	-	
2040-69									
CCSM4 RCP4.5	75	55	186,6	100	300	0,75	270	0,5	0,43
ECHAM6 RCP4.5	75	55	183,6	95	215	0,75	185	0,5	
CCSM4 RCP8.5	75	55	207,5	100	240	0,75	210	0,5	
ECHAM6 RCP8.5	75	55	203,1	95	250	0,75	220	0,5	
2070-99									
CCSM4 RCP4.5	80	55	197,1	122	330	0,75	300	0,5	0,43
ECHAM6 RCP4.5	80	55	177,7	110	215	0,75	185	0,5	
CCSM4 RCP8.5	80	55	229,9	122	260	0,75	230	0,5	
ECHAM6 RCP8.5	80	55	264,3	120	250	0,75	220	0,5	
2010-39									
CCSM4 RCP4.5	70	30	131,0	85	180	0,9	150	0,8	0,58
ECHAM6 RCP4.5	70	30	123,2	70	-	-	-	-	
CCSM4 RCP8.5	70	30	133,3	90	180	0,9	150	0,8	
ECHAM6 RCP8.5	70	30	116,5	90	-	-	-	-	
2040-69									
CCSM4 RCP4.5	75	55	140,0	100	190	0,9	160	0,8	0,58
ECHAM6 RCP4.5	75	55	137,7	95	-	-	-	-	
CCSM4 RCP8.5	75	55	155,7	100	300	0,9	270	0,6	
ECHAM6 RCP8.5	75	55	152,3	95	-	-	-	-	
2070-99									
CCSM4 RCP4.5	80	55	147,8	110	200	0,9	180	0,8	0,58
ECHAM6 RCP4.5	80	55	133,3	110	-	-	-	-	
CCSM4 RCP8.5	80	55	172,4	110	-	-	-	-	
ECHAM6 RCP8.5	80	55	198,2	120	-	-	-	-	

2010-39									
CCSM4 RCP4.5	70	30	116,5	85	-	-	-	-	
ECHAM6 RCP4.5	70	30	109,5	70	-	-	-	-	0,65
CCSM4 RCP8.5	70	30	118,4	90	-	-	-	-	
ECHAM6 RCP8.5	70	30	103,5	90	-	-	-	-	
2040-69									
CCSM4 RCP4.5	75	55	124,4	100	-	-	-	-	
ECHAM6 RCP4.5	75	55	122,4	95	-	-	-	-	0,65
CCSM4 RCP8.5	75	55	138,4	100	-	-	190	0,9	
ECHAM6 RCP8.5	75	55	135,4	95	-	-	-	-	
2070-99									
CCSM4 RCP4.5	80	55	131,4	110	-	-	-	-	
ECHAM6 RCP4.5	80	55	118,4	110	-	-	-	-	0,65
CCSM4 RCP8.5	80	55	153,3	110	-	-	-	-	
ECHAM6 RCP8.5	80	55	176,2	120	-	-	-	-	

Tabla 18 Medida de adaptación considerando el efecto del cambio climático en la demanda agrícola histórica (7250 ha), los colores indican la simulación c (azul), d (naranja) y e (verde) de la Tabla 17.

5.6.1. Evaluación de proyectos de expansión de riego

El sistema de riego Carrizal Chone, ubicado en el sistema de explotación la esperanza, construido en 2007 está diseñado para regar 13.268 hectáreas en su fase operativa. Sin embargo, en un contexto de cambio climático, el sistema no funciona con dichas hectáreas, ya que, con las hectáreas de riego operativas actualmente (7250 ha), bajo un contexto de cambio climático es necesario la aplicación de medidas de gestión en la operación de los sistemas de explotación. Por lo tanto, para expandir las áreas de riego, el sistema debe usar una eficiencia de riego de 0,73. El aumento de hectáreas se da en función de los modelos, escenarios y períodos, (Tabla 19). Las eficiencias de riego son el resultado del producto entre la eficiencia de manejo, la eficiencia de distribución y la eficiencia de la aplicación (Jensen, 2007; Whittlesey, 2003), Fujihara et al, (2008) afirman que, si el área regada se expande en el futuro bajo la expectativa del flujo actual, se producirá escasez de agua.

Máxima superficie de riego futura			
Modelo y Escenario	2010-39	2040-69	2070-99
CCSM4 RCP4.5	11.250	9.100	8.500
ECHAM6 RCP4.5	13.300	10.900	11.500
CCSM4 RCP8.5	11.350	8.200	10.300
ECHAM6 RCP8.5	13.300	11.500	9.700

Tabla 19 Expansión máxima del área agrícola con eficiencia de riego de 0,73 para el área de estudio, Valores en hectáreas (ha).

Estos resultados muestran que, bajo el efecto del cambio climático, pueden producirse déficits y, por lo tanto, incumplimiento de los criterios de garantía para abastecer la demanda agrícola. Dado que el aumento de la temperatura es la causa principal de estos incumplimientos porque incluso al aumentar la contribución, el agua disponible no es suficiente para satisfacer las futuras demandas de agua. Aplicar medidas operativas en la gestión de los recursos hídricos de los sistemas de explotación y mejorar la eficiencia del riego. De lo contrario, el recurso de agua subterránea debería incorporarse a la gestión del sistema de explotación, o deberían agregarse nuevas estructuras de almacenamiento en el sistema (Gutiérrez et al., 2014; Paola et al., 2013).

Otra opción es la sustitución de cultivos estacionales en la estación seca, por cultivos que requieren una cantidad de agua menor que los cultivos actuales, sin afectar la seguridad alimentaria de la región. Para el desarrollo de futuros proyectos de expansión para áreas irrigadas en la Demarcación Hidrográfica de Manabí, se debe considerar el efecto del cambio climático en los recursos hídricos y utilizar una eficiencia de riego de 0,73. Para la toma de decisiones, se debe considerar que la agricultura es una de las actividades más cruciales para el desarrollo económico de la demarcación. Park et al, (2009) evaluaron el impacto del cambio climático en la variación temporal de los niveles de agua en los reservorios de riego de arroz con cáscara, y ajustaron las liberaciones de los reservorios en agosto y septiembre como una estrategia de adaptación futura.

Los resultados del impacto futuro mostraron que los futuros almacenamientos de reservorios de la temporada de otoño e invierno después

de la finalización del período de riego disminuyeron para 2080. Por lo tanto, como estrategia de adaptación futura, el control de la liberación del reservorio, al disminuir en agosto y septiembre, podría garantizar el nivel del agua del embalse en la temporada de otoño e invierno al alcanzar el nivel del agua a casi el 100% del manejo actual del nivel del agua del embalse. Ncube et al, (2011) evaluaron la operación del reservorio bajo escenarios climáticos variables. Los resultados muestran que el depósito puede satisfacer las demandas actuales, pero no podrá hacer frente al aumento previsto de la demanda. El nivel previsto de cambio climático dará como resultado una escasez de hasta el 30% para los usuarios intermedios que necesiten revisar cómo se opera el embalse.



6. CONCLUSIONES

La sostenibilidad de los recursos hídricos depende, en gran medida, de la gestión adecuada y el uso eficiente del agua por lo que las decisiones de planificación de los recursos hídricos futuros deben basarse en las proyecciones de cambio climático y en un adecuado manejo de los operadores de los sistemas hidráulicos. La proyección de cambios en los recursos hídricos es fundamental para controlar y mitigar eventos extremos, garantizar la seguridad alimentaria y facilitar el desarrollo regional.

Los recursos hídricos están sujetos a sufrir cambios significativos debido a la variabilidad en los períodos de lluvias y a los cambios estacionales, lo que afecta la disponibilidad local de agua, la descarga de los ríos y las fuentes de agua estacional, lo que plantea un reto para los gestores del agua.

En los últimos años, la mayoría de los estudios sobre adaptación al cambio climático han evaluado los impactos de los posibles cambios y solo unos pocos han abordado las medidas de adaptación para hacer frente a los impactos del cambio climático. La zona centro de la Demarcación Hidrográfica de Manabí cuenta con la infraestructura esencial para la gestión del agua, aunque históricamente ha sido afectada por frecuentes inundaciones y sequías, afectando principalmente al sector agrícola, por lo cual es necesario realizar estudios para conocer los posibles efectos del cambio climático en la seguridad alimentaria y proponer medidas de adaptación. Dado los incrementos de la temperatura y los cambios en la precipitación se debe incorporar en los estudios de los recursos hídricos la incertidumbre del cambio climático y desarrollar herramientas que contribuyan a la planificación de la gestión de los recursos en el futuro para satisfacer las demandas de agua que pudieran presentarse con los cambios climáticos.

En esta investigación se identifican los cambios futuros en los requerimientos de agua de los cultivos de mayor de producción en la Demarcación Hidrográfica de Manabí mediante la evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos, y se establecen medidas de adaptación mediante un modelo gestión de recursos hídricos para garantizar

la disponibilidad de agua y por ende la seguridad alimentaria mediante la disponibilidad de alimentos en la producción agrícola.

La evaluación de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos se basa en los escenarios climáticos RCP, propuestos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). Para la evaluación se realiza un análisis integral en el balance de agua, y en la disponibilidad de ésta y se identifica los cambios en las demandas. Mediante un modelo de gestión de recursos hídricos se evalúa las garantías y los fallos que se producen en las demandas urbanas, agrícolas y ecológicas establecidas en dicho sistema de gestión. En función de los criterios de garantía se establece un modelo de gestión del sistema de explotación como medida de adaptación para garantizar el cumplimiento de las demandas y en consecuencia la producción agrícola.

La evaluación de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos requiere de la utilización secuencial de modelos climáticos, modelos hidrológicos y modelos de gestión de recursos hídricos. El empleo de estas herramientas permite abordar la problemática y alcanzar conclusiones reales. Los modelos que se han utilizado para evaluar los efectos del cambio climático en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica de Manabí son los modelos climáticos ECHAM6 y CCSM4.

Se ha utilizado el modelo hidrológico de Témez, para simular las aportaciones hidrológicas del área de estudio. El modelo de simulación hidrológica Témez es un modelo agregado de lluvia-escorrentía que utiliza una simulación continua y conceptual que modela valores mensuales promedio en un régimen natural en cualquier punto dado de la red hidrológica. El modelo fue calibrado y validado con datos observados en el período 1964-2012, obteniendo valores PBIAS = 4%, Nse = 0,75 y R2 = 0,76 (muy bien) y PBIAS = 16%, Nse = 0,56 y R2 = 0,87 (satisfactorio) para las cuencas de los ríos Chone y Portoviejo, respectivamente. Los resultados de la simulación muestran un flujo promedio anual de 376 hm³ en la subcuenca del río Carrizal, 89,5 hm³ en la subcuenca del río Chico y 227 hm³ en la cabecera de la cuenca del río Portoviejo.

El modelo distribuido PATRICAL se utilizó para obtener aportaciones hidrológicas en toda la demarcación mediante un proceso de simulación con datos espaciales y climáticos del área en el período 1964-2012. El modelo de simulación hidrológica y calidad del agua PATRICAL es un simulador mensual del ciclo hidrológico con calidad del agua que se apoya en un sistema de información geográfica, para reproducir fundamentalmente las componentes superficiales del ciclo hidrológico, mientras que el comportamiento hidrogeológico se reproduce mediante modelos de acuíferos unicelulares conectados entre sí.

Con los resultados obtenidos en la simulación hidrológica de la demarcación hidrográfica se puede concluir que el tanto el Modelo Distribuido PATRICAL como el Modelo Agregado de Témez, pueden ser usado como herramientas para obtener aportaciones a nivel de cuenca con fines de planificación hidrológica. Además, las aportaciones resultantes de un modelo agregado calibrado en cuencas pequeñas pueden ser usados para validar resultados de un modelo distribuido para áreas de mayor extensión, como se lo ha realizado en este estudio.

Los cambios futuros en las variables climáticas de precipitación y temperatura en la DHM son aumentos de precipitación de menos del 5%, de acuerdo con el modelo climático CCSM4 bajo el escenario RCP4.5, mientras que en el escenario RCP8.5 hay un aumento de hasta 29% a largo plazo. Según el modelo ECHAM6, se proyectan aumentos en la precipitación de hasta 36% a largo plazo. Ambos modelos coinciden con el aumento de las variables en la estación seca, mientras que en la estación húmeda se proyecta una ligera disminución con el modelo CCSM4 y un aumento con el modelo ECHAM6. Los modelos CCSM4 y ECHAM6 indican una intensificación progresiva de la temperatura a corto, mediano y largo plazo en todos los escenarios, siendo el RCP4.5 más ligero y el RCP8.5 más grave. Estos aumentos muestran un impacto en la evapotranspiración real y la evapotranspiración potencial. Según el modelo CCSM4, se proyectan incrementos de evapotranspiración real hasta un 6% a corto plazo y hasta un 33% a fines de siglo, mientras que con el

modelo ECHAM6 se esperan incrementos de hasta un 23% a corto plazo y hasta un 41% a largo plazo.

Los cálculos de evapotranspiración potencial por los métodos Thornthwaite y Penman Monteith muestran resultados similares bajo el clima actual 123 mm/mes y 126 mm/mes respectivamente, sin embargo, bajo el cambio climático, el método Thornthwaite da resultados significativamente más altos (211 mm/mes) con respecto al método Penman Monteith (144 mm/mes). Este estudio muestra que, en cuencas tropicales, el uso de Thornthwaite puede dar resultados excesivos.

El impacto del cambio climático en los requerimientos hídricos de los cultivos en el área de estudio se observa en la necesidad de más agua para satisfacer la Evapotranspiración potencial en la estación seca. Los requisitos fluctúan entre 7% y 81% (método Thornthwaite), y hasta 4% (método Penman Monteith), de acuerdo con los requisitos de agua de las series históricas analizadas. Además, se espera que en los primeros meses de la estación húmeda haya requisitos de agua debido a un aumento mínimo en las precipitaciones y aumentos de temperatura. El cambio climático no solo afecta los recursos hídricos sino también la demanda de agua. La seguridad futura del agua y los alimentos dependerá, entre otros factores, del impacto del cambio climático en la demanda de agua para riego. Por lo tanto, dado que el cálculo de las demandas se basa en el potencial de evapotranspiración, se recomienda el uso del método Penman-Monteith para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos bajo escenarios de cambio climático, además del uso de otros métodos de cálculo de evapotranspiración potencial que consideren no solo la temperatura y ubicación, sino también la radiación como factor principal en su formulación, con el fin de considerar un escenario moderado y severo respectivamente, en el análisis de proyectos hídricos futuros y estar preparados para las situaciones más adversas.

El impacto del cambio climático en los recursos hídricos en la DHM, varían en función del método de cálculo de la evapotranspiración potencial. Basado en el método Thornthwaite, el modelo CCSM4 muestra una

reducción en la aportación en estaciones húmedas y secas (max. -8 %), a excepción de los escenarios RCP8.5 en el período 2070-2099, donde se observan aumentos en ambas estaciones (8%). Los resultados de la simulación con ECHAM6 indican que se esperan aumentos de hasta un 15% en la estación húmeda (aportaciones medias mensuales de 53 hm³/mes hasta 60 hm³/mes), excepto para el escenario RCP8.5 en el período 2010-39. En la estación seca (donde las aportaciones oscilan entre 9 hm³/mes y 11 hm³/mes), se espera que las aportaciones aumenten en un máximo del 14% (1 hm³/mes) de acuerdo con la aportación histórica. Las aportaciones anuales (375 hm³/año) pueden incrementarse hasta un 11% con el método Thornthwaite. Mientras que, los resultados basados en el método Penman Monteith indican un aumento en la aportación hasta el 30%.

El análisis del sistema de explotación del río Carrizal en período histórico indica que el sistema cumplió 100% GM, GA y GV y con 0% criterios de UTAH (1, 2, 10) para DU, DA y Qec, lo que, en el clima actual condiciona que el sistema de riego pueda expandirse hasta 24.000 hectáreas. Bajo el efecto del cambio climático (RCP4.5, 8.5) según los modelos ECHAM6 y CCSM4, los resultados muestran que, a mediano y largo plazo, los recursos almacenados en la infraestructura de la cuenca no son suficientes para abastecer el aumento de la demanda agrícola. Por lo tanto, bajo el escenario crítico (método de Thornthwaite), el sistema de riego no puede expandir las áreas de riego a 13.268 ha.

Las medidas de adaptación al cambio climático que se deben implementar en el área de estudio para minimizar el impacto en los recursos hídricos son medidas de tipo operativas en la gestión de los sistemas de explotación y mejorar la distribución y la eficiencia de los sistemas de riego, ya que sistemas de explotación actualmente viables podrían ser insostenibles bajo escenarios de cambio climático, por ejemplo, en el sistema de explotación del río carrizal de la cuenca del río Chone, para que el sistema funcione se debe mantener una curva de reserva que varía de 90 a 120 hm³ hasta el final del siglo en el embalse (450 hm³) y lograr una eficiencia de riego

de 43% a 65% y para el desarrollo de futuros proyectos de expansión para áreas irrigadas, debe considerarse el efecto del cambio climático en los recursos hídricos y utilizar una eficiencia de riego de 73%.

Se espera que el cambio climático aumente las precipitaciones, la temperatura y la evapotranspiración en las zonas tropicales de la costa ecuatoriana, por lo tanto, el balance hídrico futuro variará. Los cambios en los patrones de precipitación y la evapotranspiración producirán un aumento significativo en los requerimientos de agua para los cultivos actuales, por lo que se espera un desequilibrio en los sistemas de recursos hídricos entre los recursos naturales y las demandas de agua. Por ello es importante basar la planificación de los recursos hídricos y los proyectos de expansión para las áreas irrigadas, en las proyecciones de cambio climático para garantizar la disponibilidad del recurso y el funcionamiento de los sistemas.

Para reducir la vulnerabilidad al cambio climático esta investigación muestra, que en las regiones tropicales, los sistemas de recursos hídricos actualmente viables podrían volverse insostenibles en escenarios de cambio climático. Por ello se plantea aplicar medidas operativas en la gestión de los recursos hídricos de los sistemas de explotación y mejorar la distribución y la eficiencia de los sistemas de riego para reducir la vulnerabilidad al cambio climático.

En relación al objetivo general de la tesis, se ha identificado que en base al incremento progresivo de la temperatura y al leve incremento de las precipitaciones (5% – 36%) en la zona de estudio por efecto del cambio climático, se producirá un desequilibrio entre los recursos hídricos y las necesidades de agua para riego, ya que si bien se esperan incrementos en las aportaciones hidrológicas de hasta un 15%, el incremento de la evapotranspiración potencial (12% método de Penman Monteith y 60% método de Thornthwaite) producirá que los requerimientos de agua mensuales se incrementen de forma significativa (4% [73mm/mes] método de Penman Monteith y 45% [91 mm/mes] método de Thornthwaite), y que los recursos disponibles no sean suficientes para suplir estas necesidades y se

produzcan déficit hídricos en las diferentes demandas de los sistemas de explotación. Esto es observable en el caso analizado, el sistema de explotación del río Carrizal, el mismo que dota de 30 hm³ a la demanda urbana y 175 hm³ a la demanda para riego, con una eficiencia de riego actual del 43% incumple los criterios de garantía en la demanda agrícola UTAH a 1 año (51%), 2 años (90%) y 10 años (116%), para poder cumplir estos criterios se debería mantener una curva de reserva de 85 hm³ para la demanda urbana en el embalse y restricciones en la demanda agrícola del 25% y 50% cuando el embalse alcance los 200 hm³ y 170 hm³ respectivamente. En estas mismas condiciones si la eficiencia de riego se eleva a un 58% para cumplir con los criterios indicados, se mantiene la curva de reserva en 85 hm³ para la demanda urbana y las restricciones bajarían a un 10% y 20% cuando el embalse alcance los 180 hm³ y 150 hm³ respectivamente. Si la eficiencia de riego llegara alcanzar el 65 %, no existirían restricciones para la demanda de riego ni cambios en la curva de reserva para la demanda urbana. Por lo tanto, para reducir al mínimo el desequilibrio que se produce entre los recursos hídricos disponibles y las necesidades de agua para riego, se establece la gestión de los recursos hídricos como una medida de adaptación al cambio climático, ya que, aplicando medidas de tipo operativas (curvas de reservas en embalses, restricciones preventivas) en la gestión de los sistemas de explotación y sumado a una mejora en la eficiencia de los sistema de riego, se hace posible que el recurso disponible sea distribuido de forma eficiente de tal manera que satisfaga las necesidades de las demandas, en especial la agrícola, evitando pérdidas en la producción de alimentos y garantizando la seguridad alimentaria.

CONCLUSIONS

The sustainability of water resources depends, to a large extent, on the proper management and efficient use of water, so future water resources planning decisions must be based on climate change projections and proper management of operators of hydraulic systems. The projection of changes in water resources is essential to control and mitigate extreme events, ensure food security and facilitate regional development.

Water resources are subject to significant changes due to variability in rainy periods and seasonal changes, which affects local water availability, river discharge and seasonal water sources, which poses a challenge for water managers.

In recent years, most studies on climate change adaptation have assessed the impacts of possible changes and only a few have addressed adaptation measures to address the impacts of climate change. The central area of the Manabí River Basin District has the essential infrastructure for water management, although historically it has been affected by frequent floods and droughts, mainly affecting the agricultural sector, so it is necessary to conduct studies to know the possible effects of climate change in food security and propose adaptation measures. Given the increases in temperature and changes in precipitation, the uncertainty of climate change must be incorporated into water resources studies and tools that contribute to future resource management planning to meet water demands must be developed. that could occur with the climatic changes.

This research identifies future changes in the water requirements of the crops with the highest production in the River Basin District by assessing the impact of climate change on water resources, and adaptation measures are established through a water management model. water resources to guarantee water availability and therefore agricultural production.

The assessment of the impacts of climate change on water resources is based on the RCP climate scenarios, proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). For the assessment an integral analysis is carried out in the water balance, and in the availability of this one and the changes in the demands are identified. Through a water resources management model, the guarantees and failures that occur in the urban, agricultural and ecological demands established in said management system are evaluated. Depending on the guarantee criteria, a management model of the operating system is established as an adaptation measure to ensure compliance with the demands and consequently of agricultural production.

The assessment of the impacts of climate change on water resources requires the sequential use of climate models, hydrological models and water resources management models. The use of these tools allows addressing the problem and reaching real conclusions. The models that have been used to assess the effects of climate change in the area of the Manabí River Basin District are the ECHAM6 climate models and CCSM4.

The Témez hydrological model has been used to simulate the hydrological contributions of the study area. The Témez hydrological simulation model is a Lumped rain-runoff model that uses a continuous and conceptual simulation that models average monthly values in a natural regime at any given point in the hydrological network. The model was calibrated and validated with data observed in the period 1964-2012, obtaining PBIAS values = 4%, Nse = 0,75 and R2 = 0,76 (very good) and PBIAS = 16%, Nse = 0,56 and R2 = 0,87 (satisfactory) for the Chone and Portoviejo river basins, respectively. The simulation results show an average annual flow of 376 hm³ in the subbasin of the Carrizal River, 9,5 hm³ in the subbasin of the Chico river and 227 hm³ in the headwaters of the Portoviejo river basin.

The PATRICAL distributed model was used to obtain hydrological contributions throughout the demarcation through a simulation process with spatial and climatic data of the area in the period 1964-2012. The model of hydrological simulation and water quality PATRICAL is a monthly simulator of

the hydrological cycle with water quality that relies on a geographic information system, to fundamentally reproduce the surface components of the hydrological cycle, while the hydrogeological behavior is reproduced by models of unicellular aquifers connected to each other.

With the results obtained in the hydrological simulation of the River Basin District it can be concluded that both the PATRICAL distributed model and the Lumped model of Témex, can be used as tools to obtain contributions at the basin level for hydrological planning purposes. In addition, the contributions resulting from a lumped model calibrated in small watersheds can be used to validate results of a distributed model for larger areas, as has been done in this study.

Future changes in the climatic variables of precipitation and temperature in the MRBD are rainfall increases of less than 5% are observed, according to the CCSM4 climate model under RCP4.5 scenario, while in RCP8.5 scenario there is an increase of up to 29% long term. According to ECHAM6 model, increases in precipitation of up to 36% long term are projected. Both models coincide with the increase of the variables in dry season, while in wet season a slight decrease is projected with CCSM4 model and an increase with ECHAM6 model. The CCSM4 and ECHAM6 models indicate a progressive intensification of temperature in the short, medium and long term in all scenarios, being the lightest RCP4.5 and the most serious RCP8.5. These increases show an impact on real evapotranspiration and potential evapotranspiration. According to CCSM4 model, real evapotranspiration increments are projected up to 6% short term and up to 33% end of the century, while with ECHAM6 model increases of up to 23% are expected short term, and up to 41% long term.

The potential evapotranspiration calculations by Thornthwaite and Penman Monteith methods show similar results under the current climate 123 mm/month and 126 mm/month respectively, however under climate change, Thornthwaite method gives results significantly higher (211 mm/month)

regarding to Penman Monteith method (144 mm/month). This study shows that, in tropical basins the use of Thornthwaite can give results excessive.

The impact of climate change on the water requirements of crops in the study area is seen in the need for more water to satisfy the potential evapotranspiration in the dry season. The requirements fluctuate between 7% and 81% (Thornthwaite method), and until 4% (Penman Monteith method), according to the water requirements of the analysed historical series. Besides, it is expected that in the first months of the wet season there will be water requirements due to a minimum increase in precipitation and temperature increases. The climate change does not only affect water resources but also water demand. Future water and food security will depend, among other factors, on the impact of climate change on water demand for irrigation. Therefore, since the calculation of demands is based on evapotranspiration potential, the use of the Penman-Monteith is recommended for the calculation of crop water requirements under climate change scenarios, in addition to the use of other methods of calculating potential evapotranspiration that consider not only temperature and location, but also radiation as the main factor in its formulation, in order to consider a moderate and severe scenario respectively, in the analysis of future water projects and be prepared for the most adverse situations.

The impact of climate change on water resources in MRBD change depending on the potential evapotranspiration calculation method. Based on Thornthwaite method, the CCSM4 model shows a reduction in streamflow in wet and dry seasons (max -8%), except for RCP8.5 scenarios in the 2070-2099 period, where increases are observed in both seasons (8%). The simulation results with ECHAM6 indicate that increases (15%) in the wet season are expected (average monthly contributions of 53 hm³/month up to 60 hm³/month), except for the RCP8.5 scenario in the 2010-39 period. In the dry season (where contributions range between 9 hm³/month and 11 hm³/month), it is expected that streamflow will increase by a maximum of 14% (1 hm³/month) according to the historical streamflow of baseline. Annual

contributions (375 hm³/year) can be increased up to 11% with the Thornthwaite method. Meanwhile, the results based on the Penman Monteith method indicate an increase in the contribution to 30%.

The analysis of the Carrizal River exploitation system in the baseline indicate which the system met 100% GM, GA and GV and with 0% UTAH criteria (1, 2, 10) for the DU, DA and Qec, and which, in current climate conditions the irrigation system can to expands by until 24.000 hectares. Under the effect of climate change (RCP4.5, 8.5) according to the ECHAM6 and CCSM4 models, the results show which, to the medium and long term the resources stored in the infrastructure of basin are not enough to supply the agricultural demand increase. Therefore, under the critical scenario (Thornthwaite method) the irrigation system can not to expand the irrigation areas to 13.268 ha.

Climate change adaptation measures that must be implemented in the study area to minimize the impact on water resources are operational measures in the management of operating systems and improve the distribution and efficiency of irrigation systems, since currently viable operating systems could be unsustainable under climate change scenarios, e.g., in the Carrizal river exploitation system of the Chone river basin for the system to work, must be to keep a reserve curve that varies from 90 to 120 hm³ until the end of the century in the reservoir (450 hm³) and achieve an irrigation efficiency from 43% a 65%. For the developed of future expansion projects for irrigated areas it should be considered the effect of climate change on water resources and to use a 73% irrigation efficiency.

Climate change is expected to increase rainfall, temperature and evapotranspiration in the tropical areas of the Ecuadorian coast, therefore, future water balance will vary. Changes in precipitation patterns and evapotranspiration will produce an increase in the water requirements for current crops, so an imbalance in the water resources systems between natural resources and water demands is expected. Therefore, it is important to base water resources planning and expansion projects for irrigated areas,

on climate change projections to ensure resource availability and system operation.

To reduce vulnerability to climate change this research shows that in tropical regions, currently viable water resources systems could become unsustainable under climate change scenarios. Therefore, it is proposed to apply operational measures in the water resources management of the exploitation systems and to improve distribution and application efficiency of irrigation systems, to reduce the vulnerability to climate change.

In relation to the general objective of the thesis, it has been identified that based on the progressive increase in temperature and the slight increase in rainfall (5% - 36%) in the study area due to climate change, an imbalance between water resources and water needs for irrigation will produce, since although increases in hydrological contributions of up to 15% are expected, the increase in potential evapotranspiration (12% Penman Monteith method and 60% Thornthwaite method) will produce the monthly water requirements are increased significantly (4% [73mm/month] Penman Monteith method and 45% [91mm/month] Thornthwaite method), and that the available resources are not sufficient to meet these needs and water deficits occur in the different demands of the systems of exploitation. This is observable in the case analyzed, the exploitation system of the Carrizal river, which gives 30 hm³ to urban demand and 175 hm³ to demand for irrigation, with a current irrigation efficiency of 43% does not meet the guarantee criteria in the 1-year UTAH agricultural demand (51%), 2 years (90%) and 10 years (116%), in order to meet these criteria, a reserve curve of 85 hm³ should be keep for urban demand in the reservoir and restrictions on agricultural demand of 25% and 50% when the reservoir reaches 200 hm³ and 170 hm³ respectively. Under these same conditions, if the irrigation efficiency rises to 58% to meet the indicated criteria, the reserve curve is keep at 85 hm³ for urban demand and the restrictions would drop to 10% and 20% when the reservoir reaches 180 hm³ and 150 hm³ respectively. If the irrigation efficiency reached 65%, there would be no restrictions on the demand for irrigation or

changes in the reserve curve for urban demand. Therefore, to minimize the imbalance that is expected between available water resources and water needs for irrigation, water resources management is established as a measure of adaptation to climate change, since, by applying operational measures (reservoir reserve curves, preventive restrictions) in the management of operating systems and added to an improvement in the efficiency of irrigation systems, it is possible that the available resource is distributed efficiently in a way that satisfies the needs of the demands, especially the agricultural one, avoiding losses in food production and guaranteeing food security.



7. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Este capítulo presenta un conjunto de líneas de investigación importantes para la planificación y gestión de los recursos hídricos, así como para garantizar la seguridad alimentaria en la demarcación hidrográfica de Manabí o zonas de clima tropical, considerando el efecto del cambio climático, para poder desarrollar medidas de adaptación ante una situación de cambio climático.

Cambios climáticos regionales. – Identificar cambios futuros en las variables climáticas a nivel regional usando herramientas ya existentes o técnicas que mejoren el escalamiento a nivel de microcuencas, permitirá reducir la incertidumbre que presenta las salidas de los modelos climáticos globales y por ende obtener resultados más finos y precisos que ayuden a elaborar políticas para la toma de decisiones.

Modelos Hidrológicos de mayor resolución. - Evaluar los recursos hídricos a nivel de microcuencas, con modelos hidrológicos distribuidos que sean desarrollados considerando el factor climático de cada zona a la menor resolución posible, permitirá que las series hidrológicas obtenidas sean de mayor confiabilidad y puedan ser usadas por los gestores de los recursos hídricos para la planificación y gestión de los recursos hídricos.

Uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en la planificación hidrológica.- La interconexión entre las masas de agua superficiales y subterráneas es uno de los principales problemas en hidrología, por lo tanto, contar con ambos elementos en la planificación hidrológica permite reducir los déficit existentes en periodos de mayor consumo, así mismo bajo escenarios de cambio climático donde existan incrementos de aportaciones en épocas lluviosa y reducciones en época seca, permitirá contar con una mayor cantidad de agua para la gestión que en lugar de utilizar solo las aguas superficiales. Consecuentemente, también es necesario identificar el comportamiento de los acuíferos bajo en el efecto del cambio climático.

Cambios en el agua subterránea bajo cambio climático. – Identificar los cambios futuros en niveles piezométricos y en la calidad del agua de

acuíferos, producidos por las variaciones futuras en las variables climatológicas como efecto del cambio climático.

Evaluación de los cambios en las demandas urbana de agua con cambio climático. - El incremento de las temperaturas y los cambios en las precipitaciones sean positivos o negativos, conllevará a cambiar los estilos de vida de las ciudades urbanas y cambiar las dotaciones de agua actuales, por ello es necesario evaluar como afectarán estos cambios en el clima a las actividades que demanden agua para uso urbano, cambios que deberán considerados para realizar la gestión integral de los recursos hídricos.

Resistencia de cultivo a temperatura altas. - Evaluar si el incremento de temperatura por efecto del cambio climático produce algún efecto negativo sobre la resistencia al desarrollo del ciclo vegetativo de los cultivos, considerado además que el incremento de las necesidades de riego es inevitable cuando incrementan las temperaturas.

Influencia de eventos extremos en la seguridad alimentaria.- Los cambios en los patrones de precipitación y su intensidad, pueden producir un incremento de aportaciones a la red fluvial de magnitudes considerables, que provocarían desbordamientos en zonas de producción agrícola. La identificación de valores picos de aportaciones en presencia de un evento extremo de precipitaciones, permitirá tomar medidas de planificación mitigantes y reducir la vulnerabilidad de estas zonas para garantizar la producción de alimentos dentro de un marco de seguridad alimentaria.

Métodos para optimizar los sistemas de riego bajo un contexto de cambio climático.- A medida que el cambio climático disminuye las garantías de producción en la agricultura, las inversiones en almacenaje y distribución de agua son importantes. La escasez de agua y la alza de costes de implementar grandes sistemas de riego, hace necesario identificar métodos de riego adaptativos al cambio climático para mejorar la productividad agrícola a través de la actualización de los sistemas existentes.



8. REFERENCIAS

- Acharjee, T. K., Ludwig, F., van Halsema, G., Hellegers, P., & Supit, I. (2017). Future changes in water requirements of Boro rice in the face of climate change in North-West Bangladesh. *Agricultural Water Management*, 194, 172-183. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.09.008>
- Ahmadi, M., Haddad, O. B., & Loáiciga, H. A. (2015). Adaptive Reservoir Operation Rules Under Climatic Change. *Water Resources Management*, 29(4), 1247-1266. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0871-0>
- Alcamo, J., Flörke, M., & Märker, M. (2007). Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 52(2), 247-275. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.2.247>
- Allen, M. R., & Ingram, W. J. (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, 419(6903), 224-232.
- ALLEN, R. G. (1994). An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bull.*, 43(2), 35-92. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10025613989/>
- Arnell, Nigel W., van Vuuren, D. P., & Isaac, M. (2011). The implications of climate policy for the impacts of climate change on global water resources. *Global Environmental Change*, 21(2), 592-603.
- Arnell, Nigel William. (2010). Adapting to climate change: An evolving research programme. *Climatic Change*, 100, 107-111. <http://centaur.reading.ac.uk/16342/>
- Barron, O., Silberstein, R., Ali, R., Donohue, R., McFarlane, D. J., Davies, P., Hodgson, G., Smart, N., & Donn, M. (2012). Climate change effects on water-dependent ecosystems in south-western Australia. *Journal of Hydrology*, 434, 95-109.
- Bates, B., Kundzewicz, Z., & Wu, S. (2008). *Climate change and water*. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat.
- Bhatta, B., Shrestha, S., Shrestha, P. K., & Talchabhadel, R. (2019). Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of the Himalayan River Basin. *CATENA*, 181, 104082. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104082>
- Bhave, A. G., Mishra, A., & Raghuvanshi, N. S. (2014). A combined bottom-up and top-down approach for assessment of climate change adaptation options. *Journal of Hydrology*, 518, 150-161. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.039>
- Block, P. J., Souza Filho, F. A., Sun, L., & Kwon, H.-H. (2009). A streamflow forecasting framework using multiple climate and hydrological models 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 45(4), 828-843.

- Boyer, C., Chaumont, D., Chartier, I., & Roy, A. G. (2010). Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries. *Journal of hydrology*, 384(1-2), 65-83.
- Camargo, A. P., Marin, F. R., Sentelhas, P. C., & Picini, A. G. (1999). Adjust of the Thornthwaite's method to estimate the potential evapotranspiration for arid and superhumid climates, based on daily temperature amplitude. *Rev. Bras. Agrometeorol*, 7(2), 251-257.
- Candela, L., Tamoh, K., Olivares, G., & Gomez, M. (2012). Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Science of The Total Environment*, 440, 253-260. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.062>
- Chirivella Osmá, V., Capilla Romá, J. E., & Pérez Martín, M. A. (2015). Modelling regional impacts of climate change on water resources: The Júcar basin, Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 60(1), 30-49.
- Clarke, L., Edmonds, J., Jacoby, H., Pitcher, H., Reilly, J., & Richels, R. (2007). Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations. *US Department of Energy Publications*, 6.
- Cudennec, C., Leduc, C., & Koutsoyiannis, D. (2007). Dryland hydrology in Mediterranean regions—A review. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*, 52(6), 1077-1087.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- De Silva, C. S., Weatherhead, E. K., Knox, J. W., & Rodriguez-Diaz, J. A. (2007). Predicting the impacts of climate change—A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. *Agricultural Water Management*, 93(1), 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.06.003>
- DeMott, C. A., Randall, D. A., & Khairoutdinov, M. (2007). Convective precipitation variability as a tool for general circulation model analysis. *Journal of Climate*, 20(1), 91-112.
- Dibike, Y. B., & Coulibaly, P. (2005). Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: Comparison of downscaling methods and hydrologic models. *Journal of hydrology*, 307(1), 145-163.
- Döll, P. (2002). Impact of Climate Change and Variability on Irrigation Requirements: A Global Perspective. *Climatic Change*, 54(3), 269-293. <https://doi.org/10.1023/A:1016124032231>
- Elsner, M. M., Cuo, L., Voisin, N., Deems, J. S., Hamlet, A. F., Vano, J. A., Mickelson, K. E., Lee, S.-Y., & Lettenmaier, D. P. (2010). Implications of 21st century climate change for the hydrology of Washington State. *Climatic Change*, 102(1-2), 225-260.

- Estrada, F. (1994). Garantía en los sistemas de explotación de los recursos hidráulicos. *Madrid, Centro de Estudios y Experimentación en Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.*
- Estrela, T., Pérez-Martin, M. A., & Vargas, E. (2012). Impacts of climate change on water resources in Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 57(6), 1154-1167.
- Estrela, Teodoro. (1992). *Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos.* CEDEX.
- Estrela, Teodoro, & Quintas, L. (1996). El sistema integrado de modelización precipitación-aportación SIMPA. *Revista Digital del CEDEX*, 104, 43-43.
- Fasakhodi, A. A., Nouri, S. H., & Amini, M. (2010). Water resources sustainability and optimal cropping pattern in farming systems; a multi-objective fractional goal programming approach. *Water resources management*, 24(15), 4639-4657.
- Fischer, E. M., Seneviratne, S. I., Vidale, P. L., Lüthi, D., & Schär, C. (2007). Soil moisture-atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave. *Journal of Climate*, 20(20), 5081-5099.
- Forbes, K. A., Kienzle, S. W., Coburn, C. A., Byrne, J. M., & Rasmussen, J. (2011). Modelling the impacts of selected GCM derived climate scenarios on the future hydrology of a hybrid watershed in the Oldman River watershed, Alberta, Canada. *Clim. Change*.
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(12), 1547-1578.
- Fu, G. B., Charles, S. P., & Yu, J. J. (2009). A critical overview of pan evaporation trends over the last 50 years. *Climatic Change*, 97(1-2), 193-214. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9579-1>
- Fujihara, Y., Tanaka, K., Watanabe, T., Nagano, T., & Kojiri, T. (2008). Assessing the impacts of climate change on the water resources of the Seyhan River Basin in Turkey: Use of dynamically downscaled data for hydrologic simulations. *Journal of Hydrology*, 353(1-2), 33-48.
- García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta-Martínez, T., & Beguería, S. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105(3), 121-139.
- Gebrechorkos, S. H., Bernhofer, C., & Hülsmann, S. (2019). Impacts of projected change in climate on water balance in basins of East Africa. *Science of The Total Environment*, 682, 160-170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.053>
- Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., Lawrence, D. M., Neale, R. B., Rasch, P. J., Vertenstein, M., Worley, P.

- H., Yang, Z.-L., & Zhang, M. (2011). The Community Climate System Model Version 4. *Journal of Climate*, 24(19), 4973-4991. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4083.1>
- Georgakakos, A. P., Yao, H., Kistenmacher, M., Georgakakos, K. P., Graham, N. E., Cheng, F.-Y., Spencer, C., & Shamir, E. (2012). Value of adaptive water resources management in Northern California under climatic variability and change: Reservoir management. *Journal of Hydrology*, 412-413, 34-46. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.04.038>
- Gharbia, S. S., Smullen, T., Gill, L., Johnston, P., & Pilla, F. (2018). Spatially distributed potential evapotranspiration modeling and climate projections. *Science of The Total Environment*, 633, 571-592. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.208>
- Gómez-Martínez, G., Pérez-Martín, M. A., Estrela-Monreal, T., & del-Amo, P. (2018). North Atlantic Oscillation as a Cause of the Hydrological Changes in the Mediterranean (Júcar River, Spain). *Water Resources Management*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1954-0>
- Gondim, R., A.H. de Castro, M., Maia, A., Evangelista, S., & Fuck Jr, S. (2012). Climate Change Impacts on Irrigation Water Needs in the jaguaribe River Basin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 48. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00620.x>
- González-Zeas, D., Erazo, B., Lloret, P., De Bièvre, B., Steinschneider, S., & Dangles, O. (2019). Linking global climate change to local water availability: Limitations and prospects for a tropical mountain watershed. *Science of The Total Environment*, 650, 2577-2586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.309>
- Gregory, K., Grbler, A., Tae Yong, J., Kram, T., La Rovere, E., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., & Pitcher, H. (2000). Special report on emissions scenarios. Working group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Cambridge University Press, Cambridge* Perry M, Hollis D (2005) *The generation of monthly gridded datasets for a range of climatic variables over the UK. Int J Climatol*, 25, 1041.
- Guo, Y., & Shen, Y. (2016). Agricultural water supply/demand changes under projected future climate change in the arid region of northwestern China. *Journal of Hydrology*, 540, 257-273. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.033>
- Gupta Hoshin Vijai, Sorooshian Soroosh, & Yapo Patrice Ogou. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))
- Gutiérrez, A. P. A., Engle, N. L., De Nys, E., Molejón, C., & Martins, E. S. (2014). Drought preparedness in Brazil. *Weather and Climate Extremes*, 3, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2013.12.001>

- Harding, R., Best, M., Blyth, E., Hagemann, S., Kabat, P., Tallaksen, L. M., Warnaars, T., Wiberg, D., Weedon, G. P., & Lanen, H. van. (2011). Preface to the Water and Global Change (WATCH) special collection: Current knowledge of the terrestrial global water cycle. *Journal of Hydrometeorology*, 12(6), 1149-1156.
- Hashemi, F., & Habibian, M. T. (1979). Limitations of temperature-based methods in estimating crop evapotranspiration in arid-zone agricultural development projects. *Agricultural Meteorology*, 20(3), 237-247. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(79\)90025-6](https://doi.org/10.1016/0002-1571(79)90025-6)
- Held, I. M., & Soden, B. J. (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of Climate*, 19(21), 5686-5699.
- Hijioka, Y., Lin, E., Pereira, J., Corlett, R. T., Cui, X., Insarov, G. E., Lindgren, E., & Surjan, A. (2014). *Asia. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1327-1370.*
- Huntington, T. G. (2010). Chapter One - Climate Warming-Induced Intensification of the Hydrologic Cycle: An Assessment of the Published Record and Potential Impacts on Agriculture. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 109, pp. 1-53). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385040-9.00001-3>
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press.*
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.* http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf>.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)].*

Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5° C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5° C Above Preindustrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jiménez Cisneros, B. E., Oki, T., Arnell, N. W., Benito, G., Cogley, J. G., Doll, P., Jiang, T., & Mwakalila, S. S. (2014). *Freshwater resources In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229-269.
- Jódar, J., Cabrera, J. A., Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Lambán, L. J., Herrera, C., & Custodio, E. (2017). Groundwater discharge in high-mountain watersheds: A valuable resource for downstream semi-arid zones. The case of the Bérchules River in Sierra Nevada (Southern Spain). *Science of The Total Environment*, 593-594, 760-772. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.190>
- Kilsby, C. G., Tellier, S. S., Fowler, H. J., & Howels, T. R. (2007). Hydrological impacts of climate change on the Tejo and Guadiana Rivers. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(3), 1175-1189. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1175-2007>
- Kirby, J. M., Connor, J., Ahmad, M. D., Gao, L., & Mainuddin, M. (2014). Climate change and environmental water reallocation in the Murray–Darling Basin: Impacts on flows, diversions and economic returns to irrigation. *Journal of Hydrology*, 518, 120-129. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.024>
- Kling, H., Stanzel, P., & Preishuber, M. (2014). Impact modelling of water resources development and climate scenarios on Zambezi River discharge. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 1, 17-43. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.05.002>
- Knox, J. W., Rodríguez Díaz, J. A., Nixon, D. J., & Mkhwanazi, M. (2010). A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. *Agricultural Systems*, 103(2), 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.09.002>
- Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K. A., Oki, T., Sen, Z., & Shiklomanov, I. A. (2007). Freshwater resources and their management. En *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation*

- and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press.
- Kyselý, J., & Dubrovský, M. (2005). Simulation of extreme temperature events by a stochastic weather generator: Effects of interdiurnal and interannual variability reproduction. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25(2), 251-269.
- Lall, U., & Miller, C. W. (1988). An optimization model for screening multipurpose reservoir systems. *Water Resources Research*, 24(7), 953-968. <https://doi.org/10.1029/WR024i007p00953>
- Liu, P., Li, L., Guo, S., Xiong, L., Zhang, W., Zhang, J., & Xu, C.-Y. (2015). Optimal design of seasonal flood limited water levels and its application for the Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydrology*, 527, 1045-1053. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.055>
- Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulanger, J. P., Buckeridge, M. S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F. R., & Vicuña, S. (2014). *Central and South America. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566. (pp. 1499-1566).*
- Majone, B., Bovolo, C. I., Bellin, A., Blenkinsop, S., & Fowler, H. J. (2012). Modeling the impacts of future climate change on water resources for the Gállego river basin (Spain). *Water Resources Research*, 48(1). <https://doi.org/10.1029/2011WR010985>
- Malek, E. (1987). Comparison of alternative methods for estimating ETp and evaluation of advection in the Bajgah area, Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*, 39(2), 185-192. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(87\)90036-0](https://doi.org/10.1016/0168-1923(87)90036-0)
- Mall, R. K., Gupta, A., & Sonkar, G. (2017). 2—Effect of Climate Change on Agricultural Crops. En *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 23-46). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63661-4.00002-5>
- Manabe, S., Wetherald, R. T., Milly, P. C. D., Delworth, T. L., & Stouffer, R. J. (2004). Century-Scale Change in Water Availability: CO₂ - Quadrupling Experiment. *Climatic Change*, 64(1-2), 59-76. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000024674.37725.ca>
- Marcos-Garcia, P., Lopez-Nicolas, A., & Pulido-Velazquez, M. (2017). Combined use of relative drought indices to analyze climate change impact on

- meteorological and hydrological droughts in a Mediterranean basin. *Journal of Hydrology*, 554, 292-305. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.028>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., & Pidcock, R. (2018). IPCC, 2018: Summary for Policymakers. *Global warming of, 1*.
- Moradkhani, H., Baird, R. G., & Wherry, S. A. (2010). Assessment of climate change impact on floodplain and hydrologic ecotones. *Journal of hydrology*, 395(3-4), 264-278.
- Moriasi, D., Gitau, M., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, 58, 1763-1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Mosquera-Machado, S., & Ahmad, S. (2007). Flood hazard assessment of Atrato River in Colombia. *Water Resources Management*, 21(3), 591-609. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9032-4>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Ncube, S. P., Makurira, H., Kaseke, E., & Mhizha, A. (2011). Reservoir operation under variable climate: Case of Rozva Dam, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(14), 1112-1119. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.07.059>
- Nkomozepe, T., & Chung, S.-O. (2012). Assessing the trends and uncertainty of maize net irrigation water requirement estimated from climate change projections for Zimbabwe. *Agricultural Water Management*, 111, 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.05.004>
- Nkomozepe, T., & Chung, S.-O. (2014). The effects of climate change on the water resources of the Geumho River Basin, Republic of Korea. *Journal of Hydro-environment Research*, 8(4), 358-366. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2013.08.006>
- Paola, F. de, Ranucci, A., & Feo, A. (2013). Antecedent Moisture Condition (scs) Frequency Assessment: A Case Study in Southern Italy. *Irrigation and Drainage*, 62(S2), 61-71. <https://doi.org/10.1002/ird.1801>
- Pardo-Igúzquiza, E., Collados-Lara, A. J., & Pulido-Velazquez, D. (2019). Potential future impact of climate change on recharge in the Sierra de las Nieves (southern Spain) high-relief karst aquifer using regional climate models and statistical corrections. *Environmental Earth Sciences*, 78(20), 598. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8594-4>
- Paredes, J., Solera, A., & Andreu, J. (2008). Reglas de operación para sistemas multiembalse, combinando métodos heurísticos y redes de flujo.

- Tecnología y Ciencias del Agua*, 23(3), 151-164.
<http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/140>
- Park, G.-A., Shin, H.-J., Lee, M.-S., Hong, W.-Y., & Kim, S.-J. (2009). Future potential impacts of climate change on agricultural watershed hydrology and the adaptation strategy of paddy rice irrigation reservoir by release control. *Paddy and Water Environment*, 7(4), 271. <https://doi.org/10.1007/s10333-009-0174-x>
- Pelton, W. L., King, K. M., & Tanner, C. B. (1960). An Evaluation of the Thornthwaite and Mean Temperature Methods for Determining Potential Evapotranspiration 1. *Agronomy Journal*, 52(7), 387-395. <https://doi.org/10.2134/agronj1960.00021962005200070006x>
- Pérez-Martin, M. A. (2005). *Hydrologic and quality distributed model integrated in geographic information system of large watershed hydrology. Contribution to the pressure and impact analyses of Water Framework Directive WFD*, ProQuest.
- Pérez-Martín, M. A., Estrela, T., Andreu, J., & Ferrer, J. (2014). Modeling water resources and river-aquifer interaction in the Júcar River Basin, Spain. *Water resources management*, 28(12), 4337-4358.
- Porter, J. R., Xie, L., Challinor, A. J., Cochrane, K., Howden, S. M., Iqbal, M. M., Lobell, D. B., Travasso, M. I., Netra Chhetri, N. C., & Garrett, K. (2014). *Food security and food production systems. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 485-533.*
- Puri, S., Stephen, H., & Ahmad, S. (2011). Relating TRMM precipitation radar land surface backscatter response to soil moisture in the Southern United States. *Journal of Hydrology*, 402(1), 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.012>
- Räisänen, J., & Räty, O. (2013). Projections of daily mean temperature variability in the future: Cross-validation tests with ENSEMBLES regional climate simulations. *Climate Dynamics*, 41(5), 1553-1568. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1515-9>
- Riahi, K., Grübler, A., & Nakicenovic, N. (2007). Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7), 887-935. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.026>
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation of the Swat Model on a Large Rwer Basin with

- Point and Nonpoint Sources1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1169-1188. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x>
- Savé, R., de Herralde, F., Aranda, X., Pla, E., Pascual, D., Funes, I., & Biel, C. (2012). Potential changes in irrigation requirements and phenology of maize, apple trees and alfalfa under global change conditions in Fluvià watershed during XXIst century: Results from a modeling approximation to watershed-level water balance. *Agricultural Water Management*, 114, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.07.006>
- Shrestha, R. R., Dibike, Y. B., & Prowse, T. D. (2012). Modelling of climate-induced hydrologic changes in the Lake Winnipeg watershed. *Journal of Great Lakes Research*, 38, 83-94.
- Stevens, B., Giorgetta, M., Esch, M., Mauritsen, T., Crueger, T., Rast Sebastian, Salzmänn Marc, Schmidt Hauke, Bader Jürgen, Block Karoline, Brokopf Renate, Fast Irina, Kinne Stefan, Kornblueh Luis, Lohmann Ulrike, Pincus Robert, Reichler Thomas, & Roeckner Erich. (2013). Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(2), 146-172. <https://doi.org/10.1002/jame.20015>
- Suárez-Almiñana, S., Pedro-Monzonís, M., Paredes-Arquiola, J., Andreu, J., & Solera, A. (2017). Linking Pan-European data to the local scale for decision making for global change and water scarcity within water resources planning and management. *Science of The Total Environment*, 603-604, 126-139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.259>
- Tao, X., Chen, H., Xu, C., Hou, Y., & Jie, M. (2015). Analysis and prediction of reference evapotranspiration with climate change in Xiangjiang River Basin, China. *Water Science and Engineering*, 8(4), 273-281. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2015.11.002>
- Témez, J. (1977). *Modelo matemático de transformación «precipitación—Escorrentía»*. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica ASINEL. Madrid: 39.
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.
- Toth, B., Pietroniro, A., Conly, F. M., & Kouwen, N. (2006). Modelling climate change impacts in the Peace and Athabasca catchment and delta: I—hydrological model application. *Hydrological Processes*, 20(19), 4197-4214.
- Trigo, R. M., & Palutikof, J. P. (2001). Precipitation scenarios over Iberia: A comparison between direct GCM output and different downscaling techniques. *Journal of Climate*, 14(23), 4422-4446.
- van den Hurk, B. J. J. M., Bouwer, L. M., Buontempo, C., Döscher, R., Ercin, E., Hananel, C., Hunink, J. E., Kjellström, E., Klein, B., Manez, M.,

- Pappenberger, F., Pouget, L., Ramos, M.-H., Ward, P. J., Weerts, A. H., & Wijngaard, J. B. (2016). Improving predictions and management of hydrological extremes through climate services: [Www.imprex.eu](http://www.imprex.eu). *Climate Services*, 1, 6-11. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.01.001>
- Van Vuuren, D. P., Elzen, M. G. J. den, Lucas, P. L., Eickhout, B., Strengers, B. J., Ruijven, B. van, Wonink, S., & Houdt, R. van. (2007). Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: An assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, 81(2), 119-159. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9172-9>
- Yang, Q., Ma, Z., Zheng, Z., & Duan, Y. (2017). Sensitivity of potential evapotranspiration estimation to the Thornthwaite and Penman-Monteith methods in the study of global drylands. *Advances in Atmospheric Sciences*, 34(12), 1381-1394. <https://doi.org/10.1007/s00376-017-6313-1>
- Yeste, P., Dorador, J., Martin-Rosales, W., Molero, E., Esteban-Parra, M. J., & Rueda, F. J. (2018). Climate-driven trends in the streamflow records of a reference hydrologic network in Southern Spain. *Journal of Hydrology*, 566, 55-72. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.063>
- Zambrano Mera, Y. E., Rivadeneira Vera, J. F., & Pérez-Martín, M. Á. (2018). Linking El Niño Southern Oscillation for early drought detection in tropical climates: The Ecuadorian coast. *Science of The Total Environment*, 643, 193-207. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.160>
- Zhang, S., Zhang, J., Yue, T., & Jing, X. (2019). Impacts of climate change on urban rainwater harvesting systems. *Science of The Total Environment*, 665, 262-274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.135>



ANEXOS



ANEXO 1
RESUMEN ESTADÍSTICO DE LAS
ESTACIONES CLIMÁTICAS

**RESUMEN ESTADÍSTICO DE LAS ESTACIONES CLIMÁTICAS QUE
REGISTRARON TEMPERATURAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA
DE MANABÍ**

Estación	Años datos	Años Completos	Media	CV
M0005	55	51	25.26	0.02
M0165	52	49	25.35	0.02
M0162	49	38	25.48	0.02
M0167	49	26	25.47	0.02
M0047	42	33	24.83	0.03
M0166	36	28	26.12	0.01
M0171	35	29	25.60	0.01
M0160	32	12	24.16	0.02
M0169	32	29	24.71	0.02
M0042	31	2	--	--
M1080	29	4	25.53	0.01
M1208	25	10	25.76	0.01
M0034	24	21	25.92	0.02
M0074	23	13	24.77	0.02
M0164	22	20	25.78	0.02
M0611	22	13	25.07	0.02
M1092	22	1	--	--
M0168	19	7	25.36	0.03
M0170	18	3	24.67	0.01
M0295	13	2	--	--
M0163	12	5	24.44	0.03
M0296	12	4	25.72	0.02
M0298	12	4	25.83	0.01
M0161	10	2	--	--
M1217	8	7	25.20	0.01
M0035	7	4	25.30	0.01
M0044	7	2	--	--
M0049	7	1	--	--
M0270	6	1	--	--
M0297	6	2	--	--
M1082	5	3	24.60	0.01
M1230	4	2	--	--
M1234	3	1	--	--
M1121	2	1	--	--
M1233	2	1	--	--

**RESUMEN ESTADÍSTICO DE LAS ESTACIONES CLIMÁTICAS QUE REGISTRARON
PRECIPITACIÓN EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE MANABÍ**

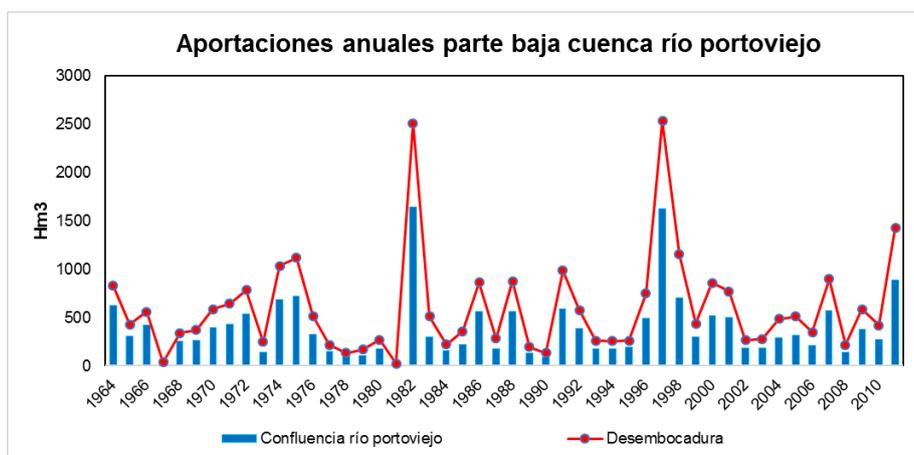
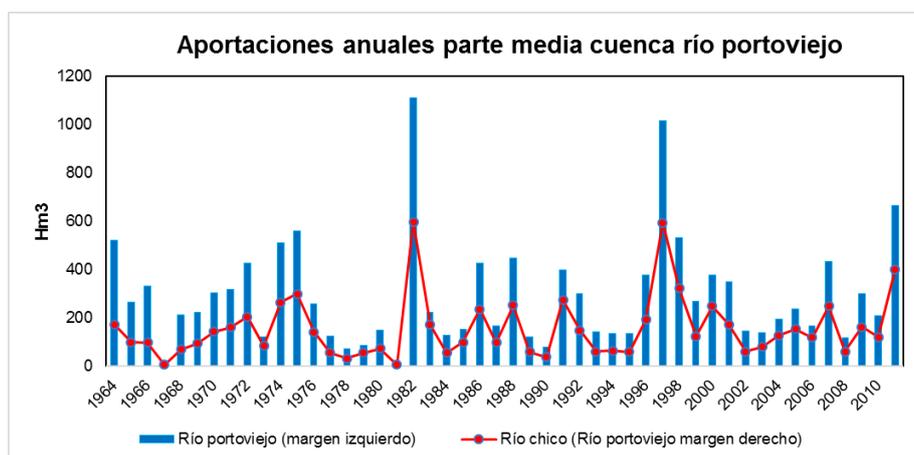
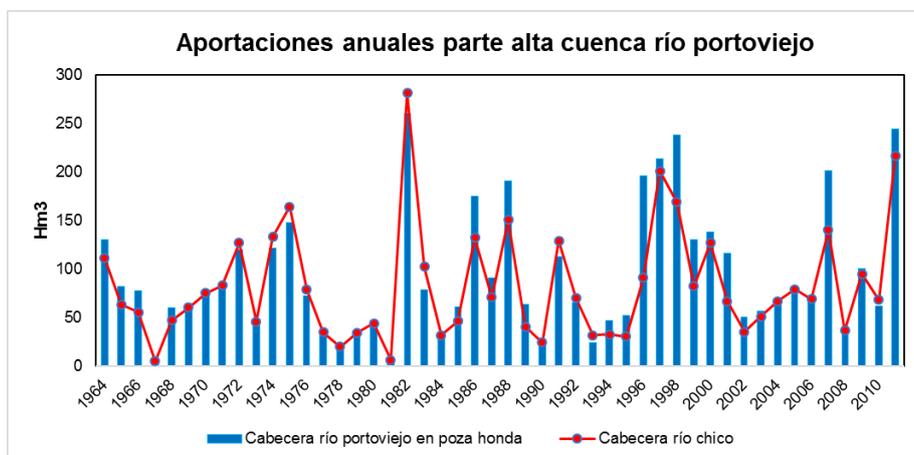
Estación	Años datos	Año Completo	Media	CV
M0005	83	69	537.4	0.6
M0047	69	44	307.7	1.3
M0166	65	45	1604.0	0.5
M0555	60	23	917.2	0.4
M0162	52	42	1239.5	0.5
M0165	51	48	456.6	0.8
M0167	51	37	722.1	0.8
M0447	51	46	1171.2	0.5
M0450	51	45	450.4	1.5
M0451	51	46	977.7	0.6
M0163	50	27	1207.8	1.3
M0446	50	33	759.1	0.6
M0448	50	44	373.8	0.9
M0449	50	46	516.3	1.0
M0452	50	30	1470.8	0.5
M0453	49	46	556.4	0.9
M0589	49	19	913.7	0.6
M0623	49	25	2446.0	0.3
M0454	47	40	853.7	0.6
M0464	46	38	1223.1	0.5
M0169	44	40	775.0	2.5
M0455	44	35	495.9	1.0
M0458	44	41	1108.6	0.6
M0457	42	37	452.1	1.0
M0459	42	36	1559.6	0.7
M0049	40	5	1385.3	0.1
M0462	39	34	1061.0	0.6
M0160	37	22	2988.6	0.4
M0171	37	35	1329.7	0.5
M0456	37	20	466.1	1.0
M1074	37	8	879.5	0.9
M0042	36	5	844.5	0.8
M0611	34	22	540.4	0.4
M0159	32	16	1140.9	0.4
M0168	32	17	945.8	0.7
M0895	32	8	1922.0	0.5
M1076	30	8	1141.3	0.3
M1077	30	8	1619.4	0.3
M1078	30	9	589.4	0.6
M1079	30	7	1156.6	0.4
M1081	30	9	374.9	0.7
M0074	29	15	245.1	0.6
M1080	29	5	1783.0	0.6
M0161	28	8	1785.5	0.7

Estación	Años datos	Año Completo	Media	CV
M1089	27	4	2935.0	0.6
M1090	27	4	1173.3	0.6
M1091	27	4	1634.1	0.8
M1092	26	6	1017.2	1.3
M0164	25	23	1027.5	0.6
M0248	25	5	1899.1	0.2
M0295	25	2	--	--
M0034	24	21	796.3	0.7
M0170	23	8	247.7	1.0
M0445	23	22	378.9	1.1
M0463	22	19	1211.0	0.5
M0461	21	15	839.7	0.8
M0044	19	14	768.2	0.4
M0460	17	15	849.6	0.9
M0590	17	15	1363.1	0.3
M0296	15	5	722.9	0.5
M1220	14	4	1930.1	0.3
M0298	13	4	802.3	0.4
M1204	13	5	2114.5	0.6
M0798	12	9	1108.1	0.4
M1208	12	10	765.2	0.3
M0613	10	8	608.1	0.5
M1075	8	6	1345.9	0.3
M1217	8	7	531.9	0.5
M0035	7	4	584.8	1.4
M0567	7	4	1153.4	0.4
M0270	6	4	307.7	0.7
M0297	6	2	--	--
M0610	6	4	614.7	0.7
M0813	6	1	--	--
M1024	6	4	1081.1	0.5
M1104	6	2	--	--
M1105	6	3	1598.1	0.5
M0615	5	3	1226.1	0.3
M0856	5	3	730.6	0.5
M1082	5	3	279.7	0.7
M0975	4	2	--	--
M1121	4	0	--	--
M1230	4	2	--	--
M0812	3	2	--	--
M1234	3	1	--	--
M1233	2	1	--	--
M1241	2	0	--	--
M1251	2	1	--	--

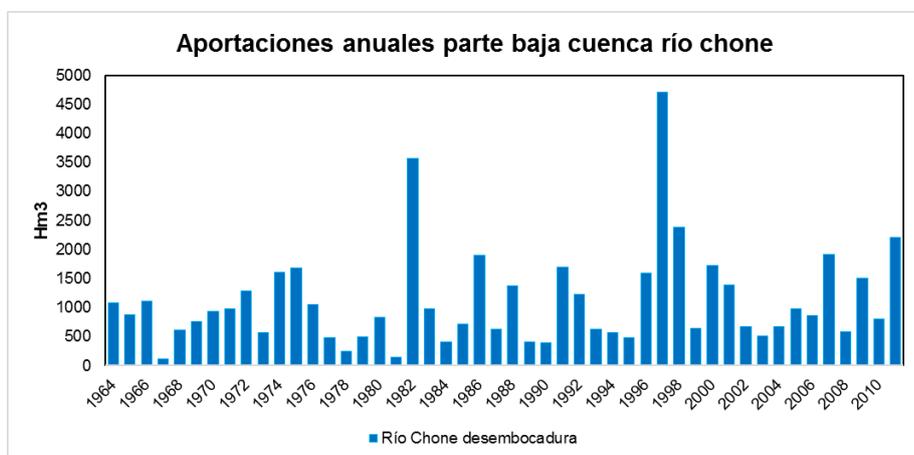
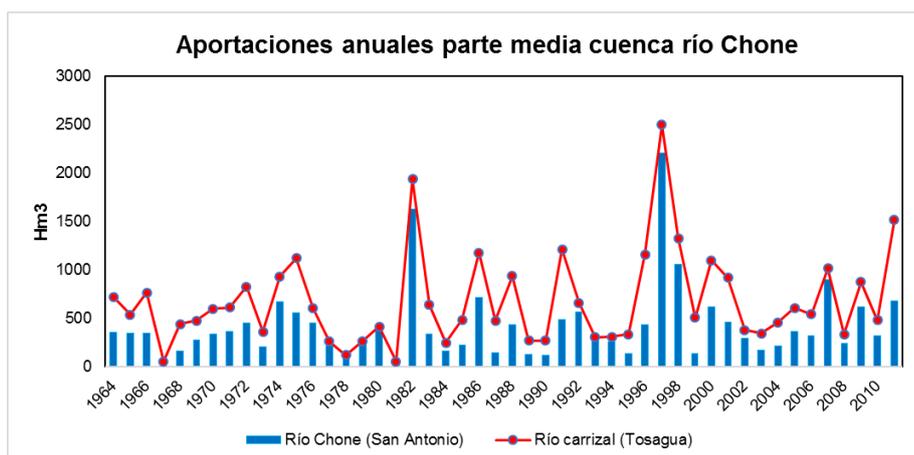
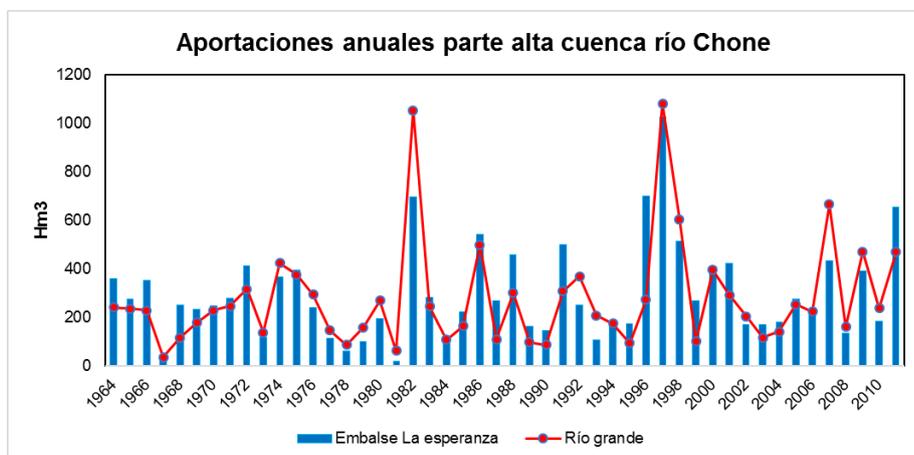


**ANEXO 2 APORTACIONES
ANUALES SIMULADAS CON
MODELO DISTRIBUIDO
PATRICAL EN LA DHM**

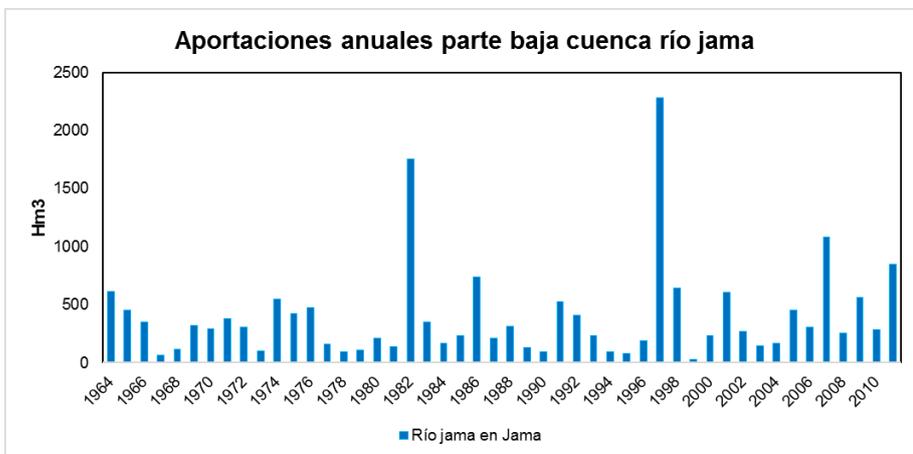
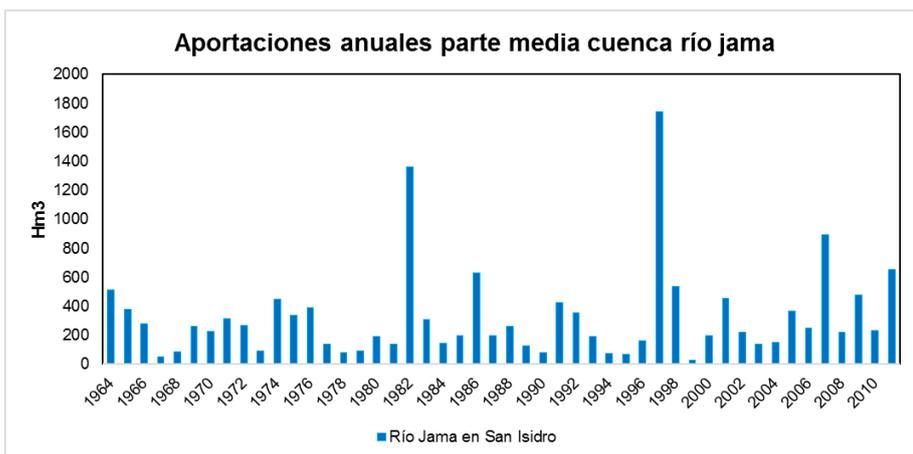
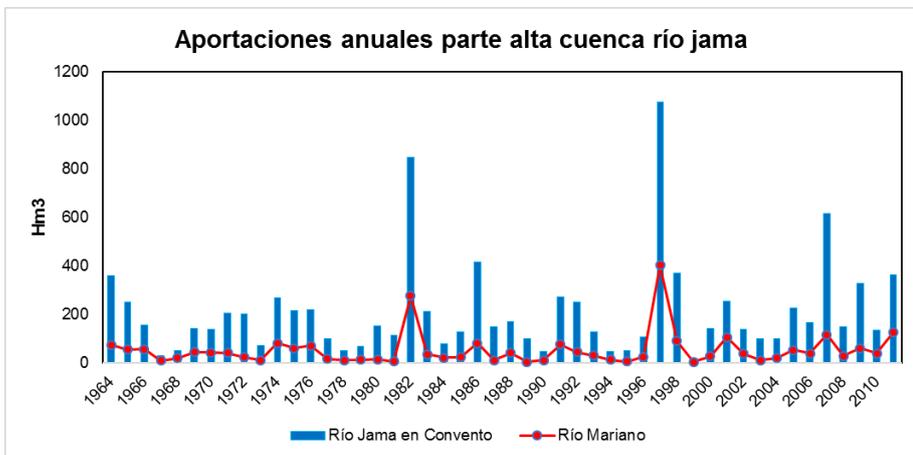
Cuenca del río Portoviejo



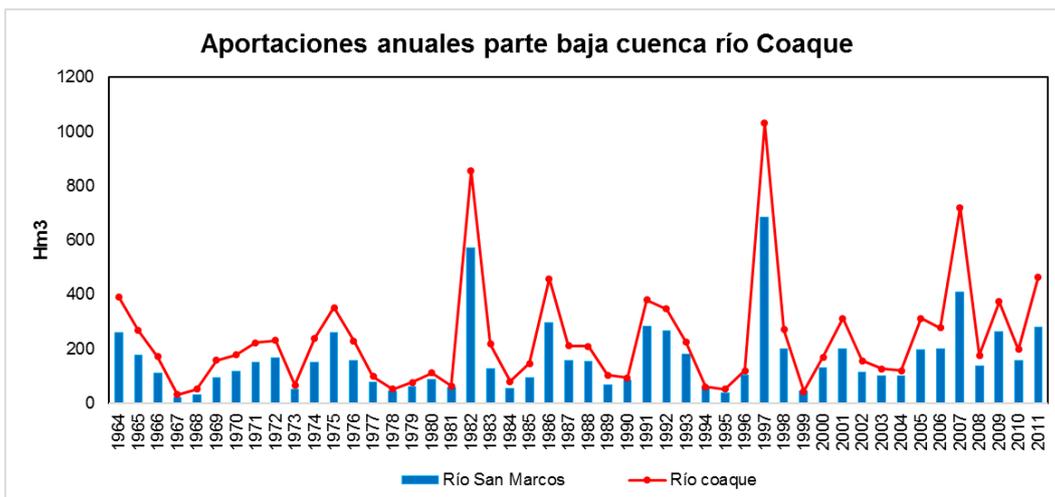
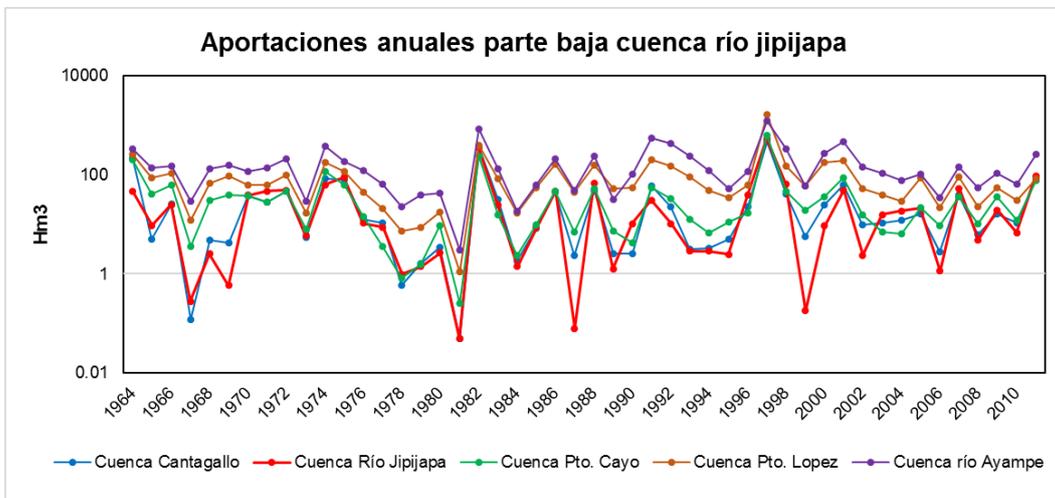
Cuenca del río Chone

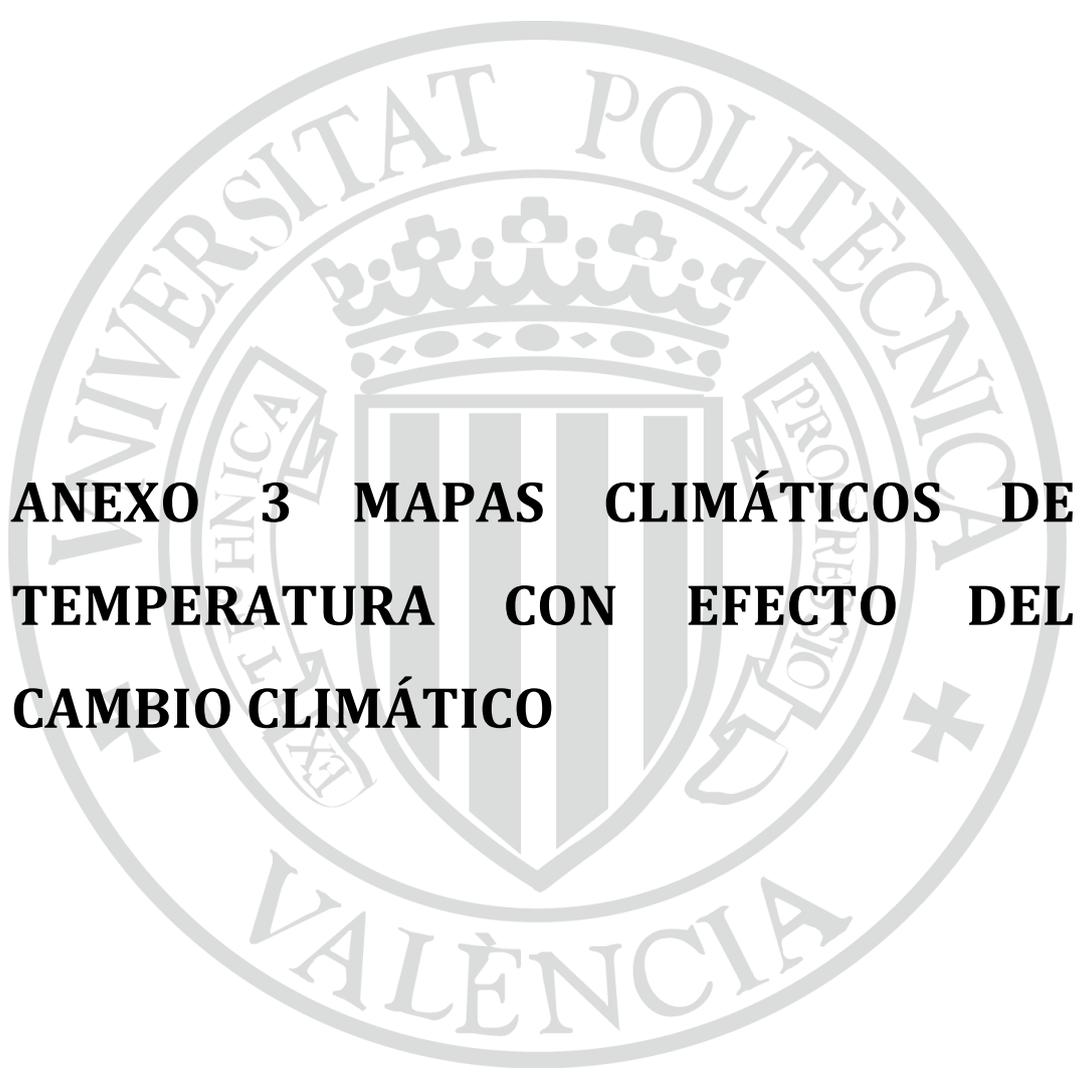


Cuenca del río Jama

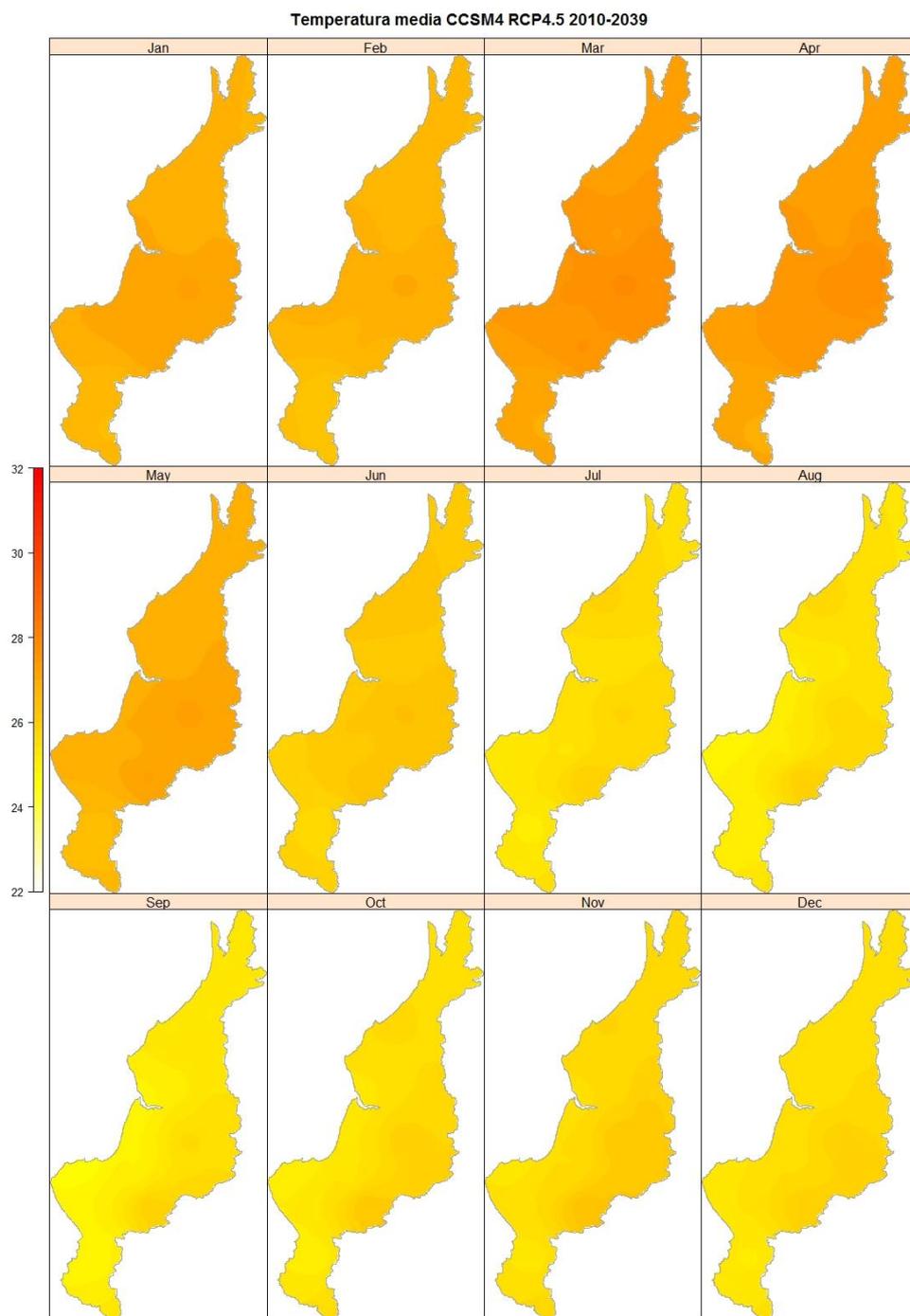


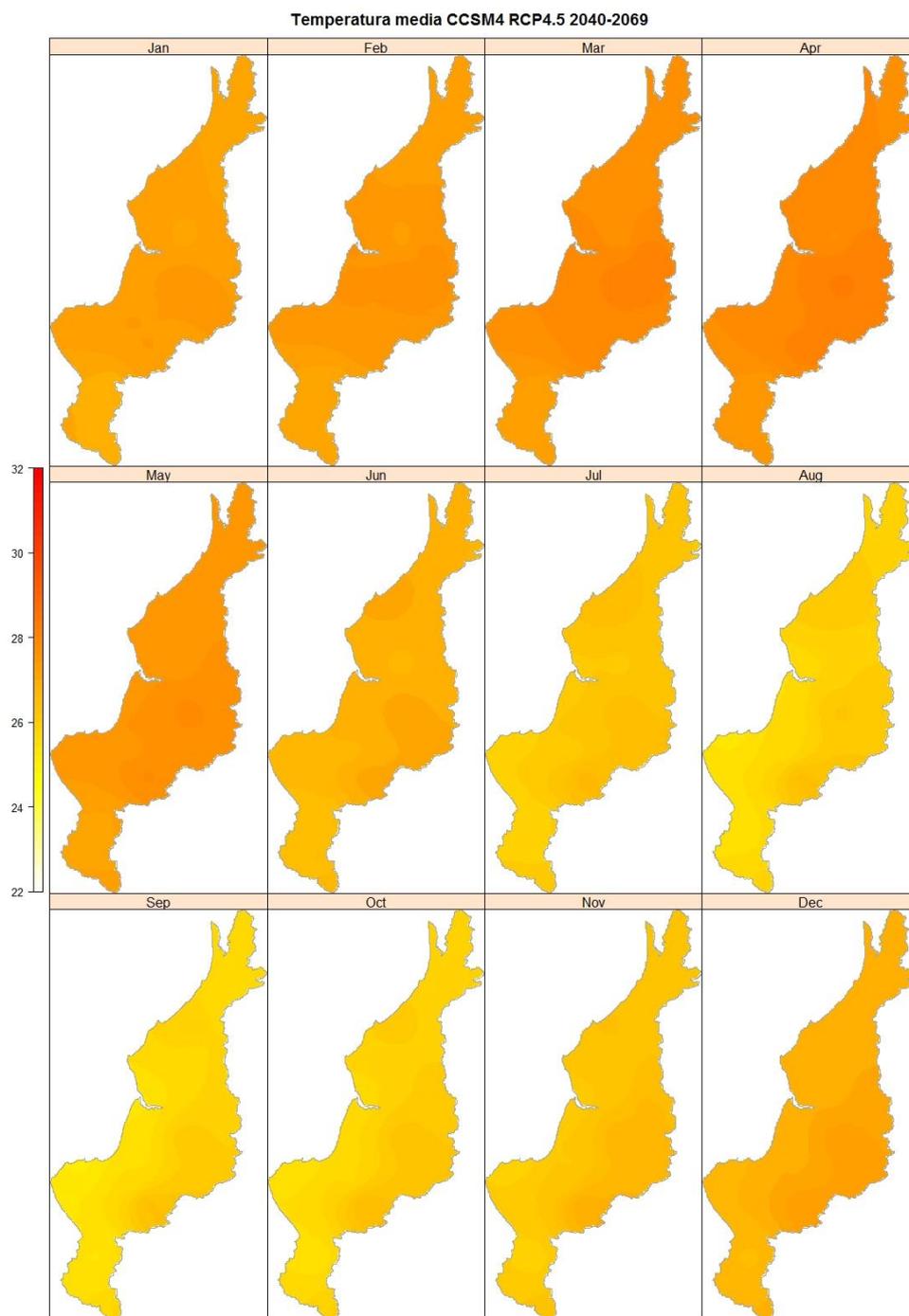
Cuenca del río Jipijapa

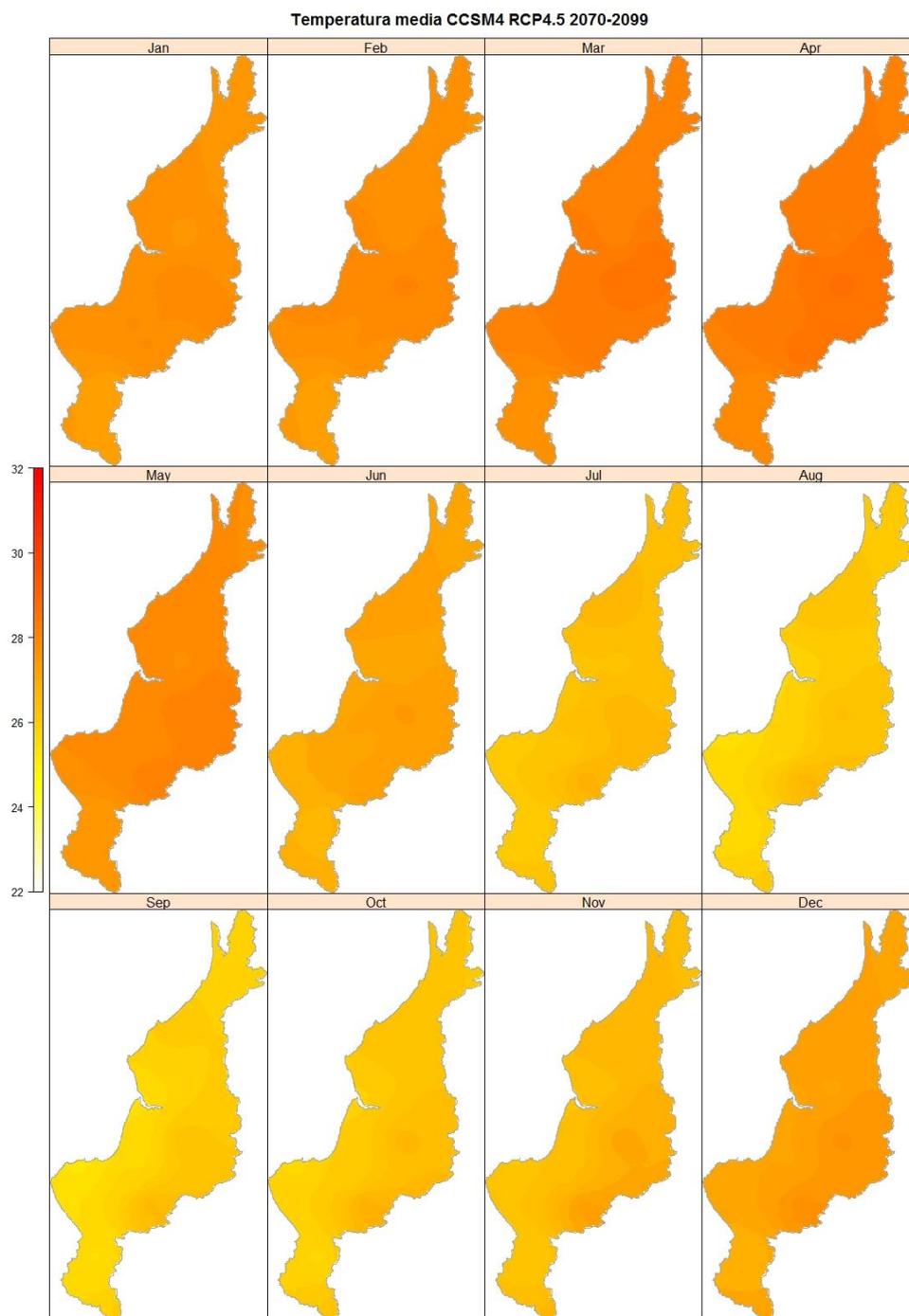


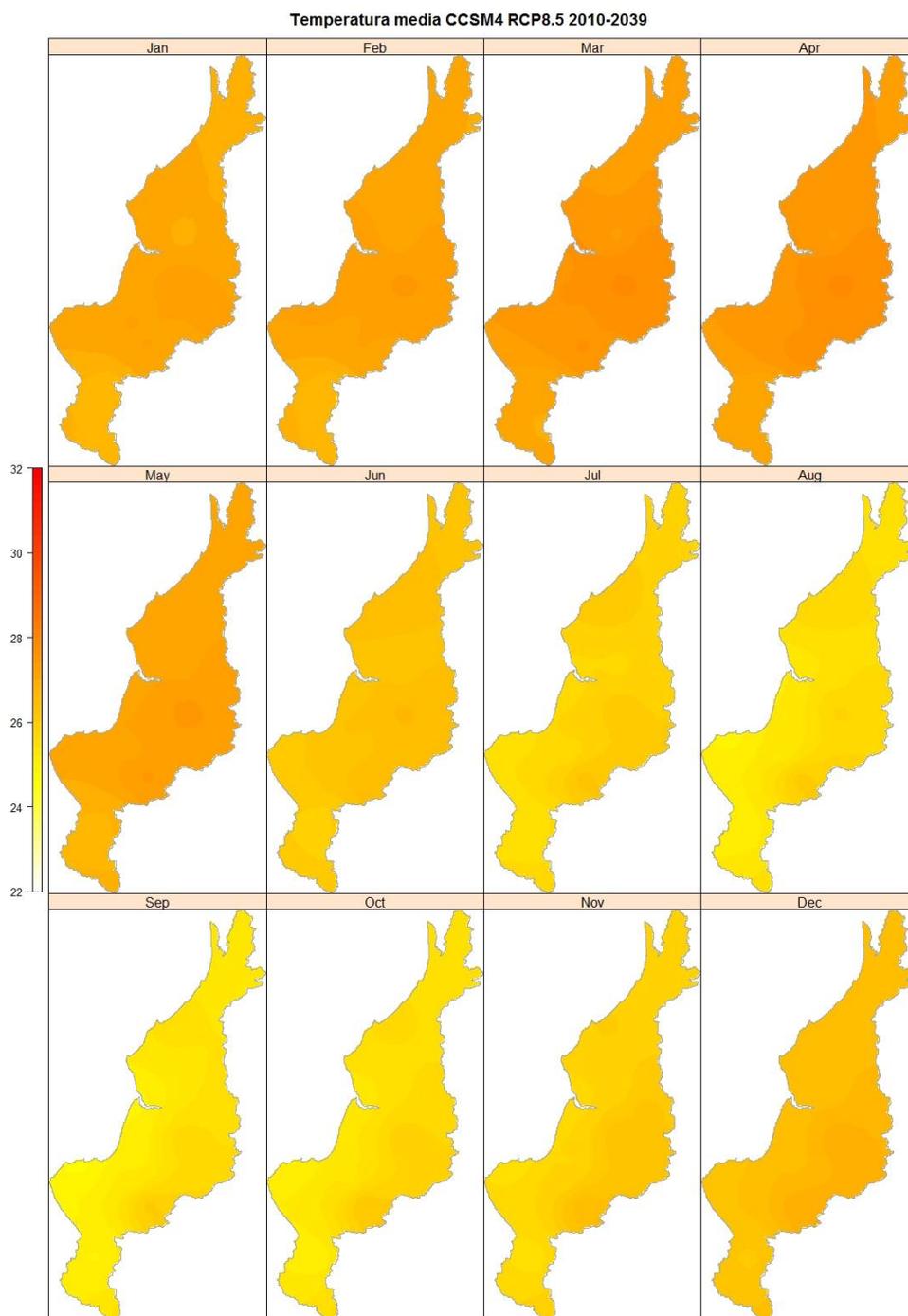
The seal of the Universitat Politècnica de València is a large, light gray watermark in the background. It features a central shield with vertical stripes, topped with a crown. The shield is surrounded by a circular border containing the text 'UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA'.

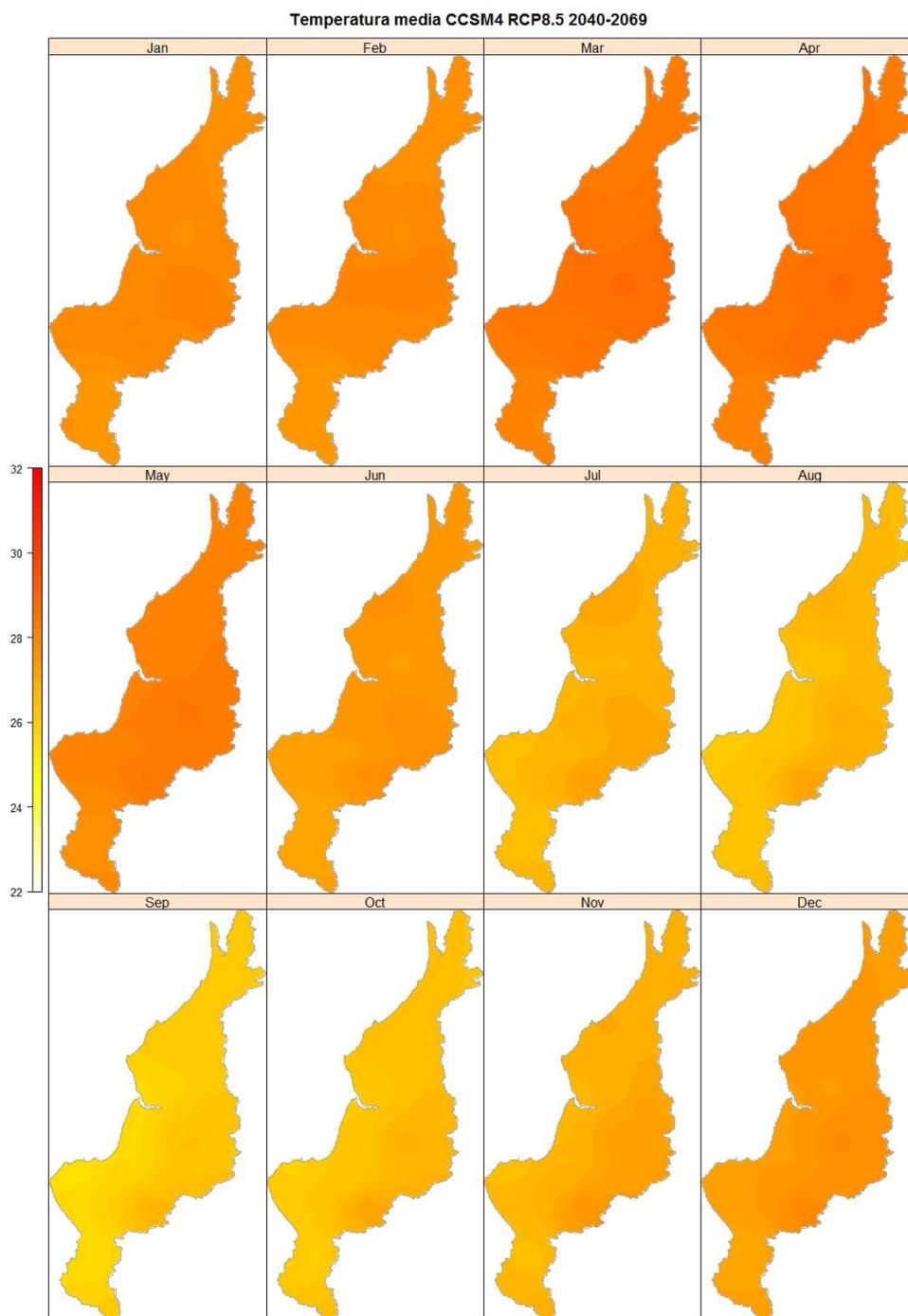
**ANEXO 3 MAPAS CLIMÁTICOS DE
TEMPERATURA CON EFECTO DEL
CAMBIO CLIMÁTICO**

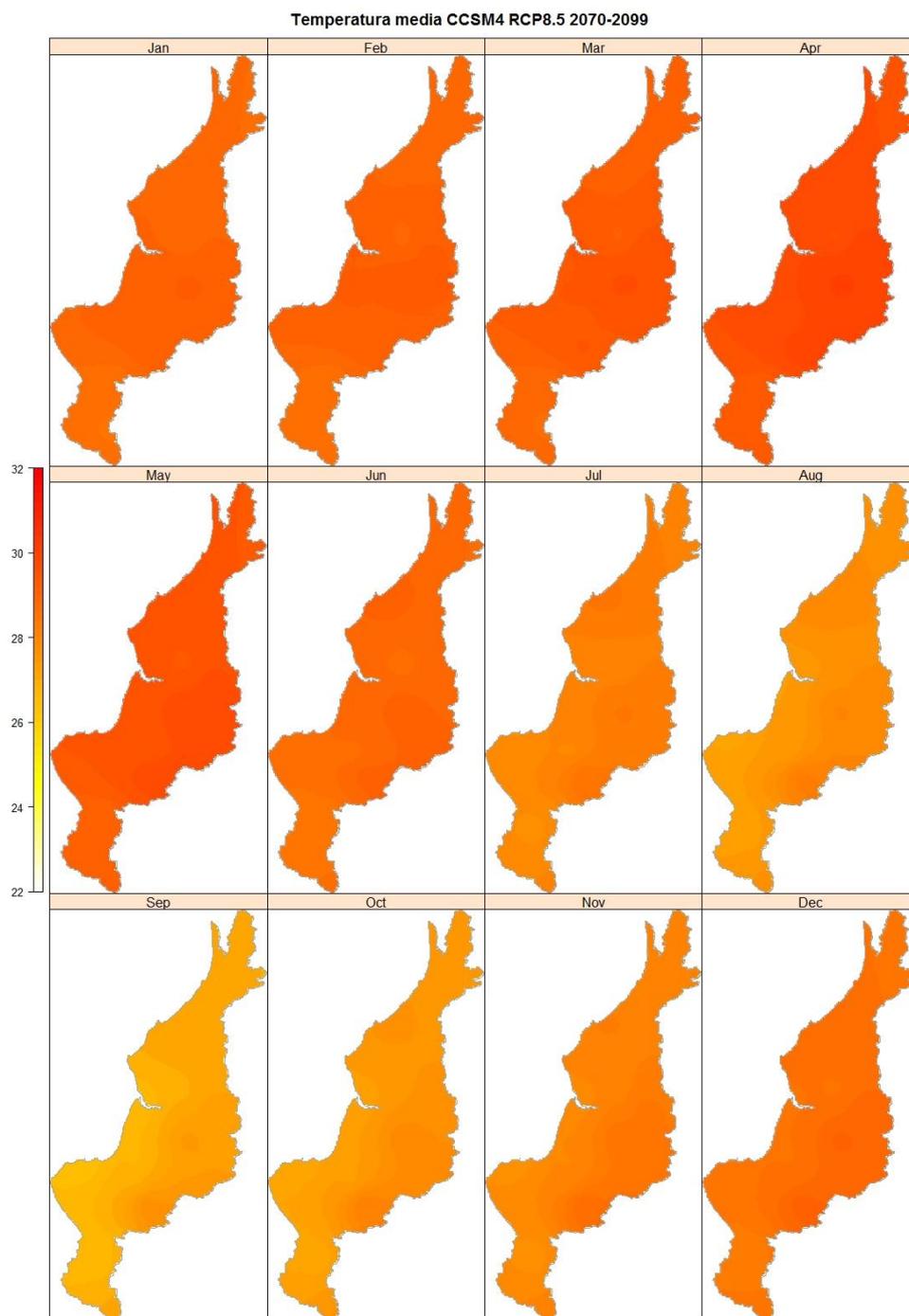


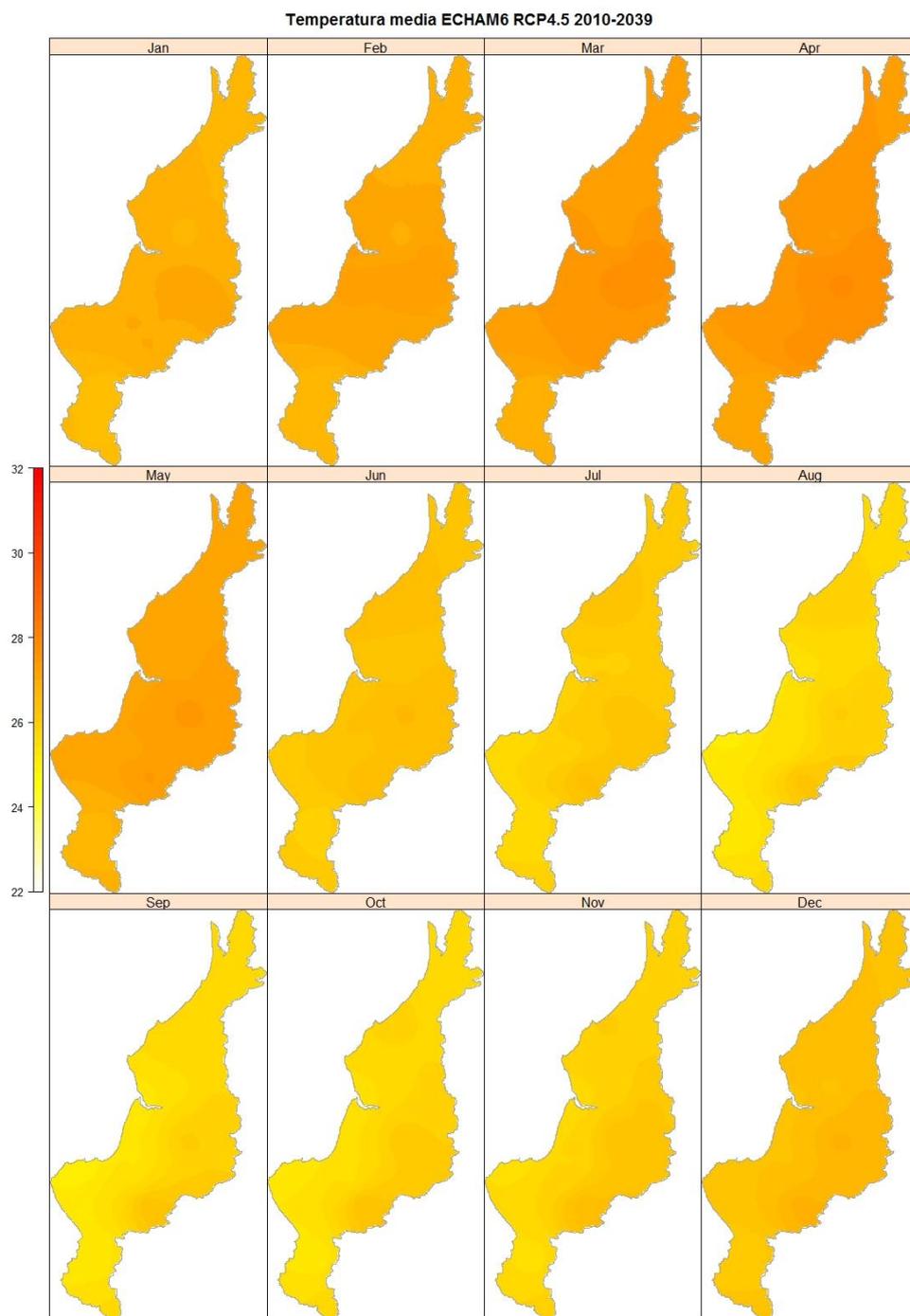


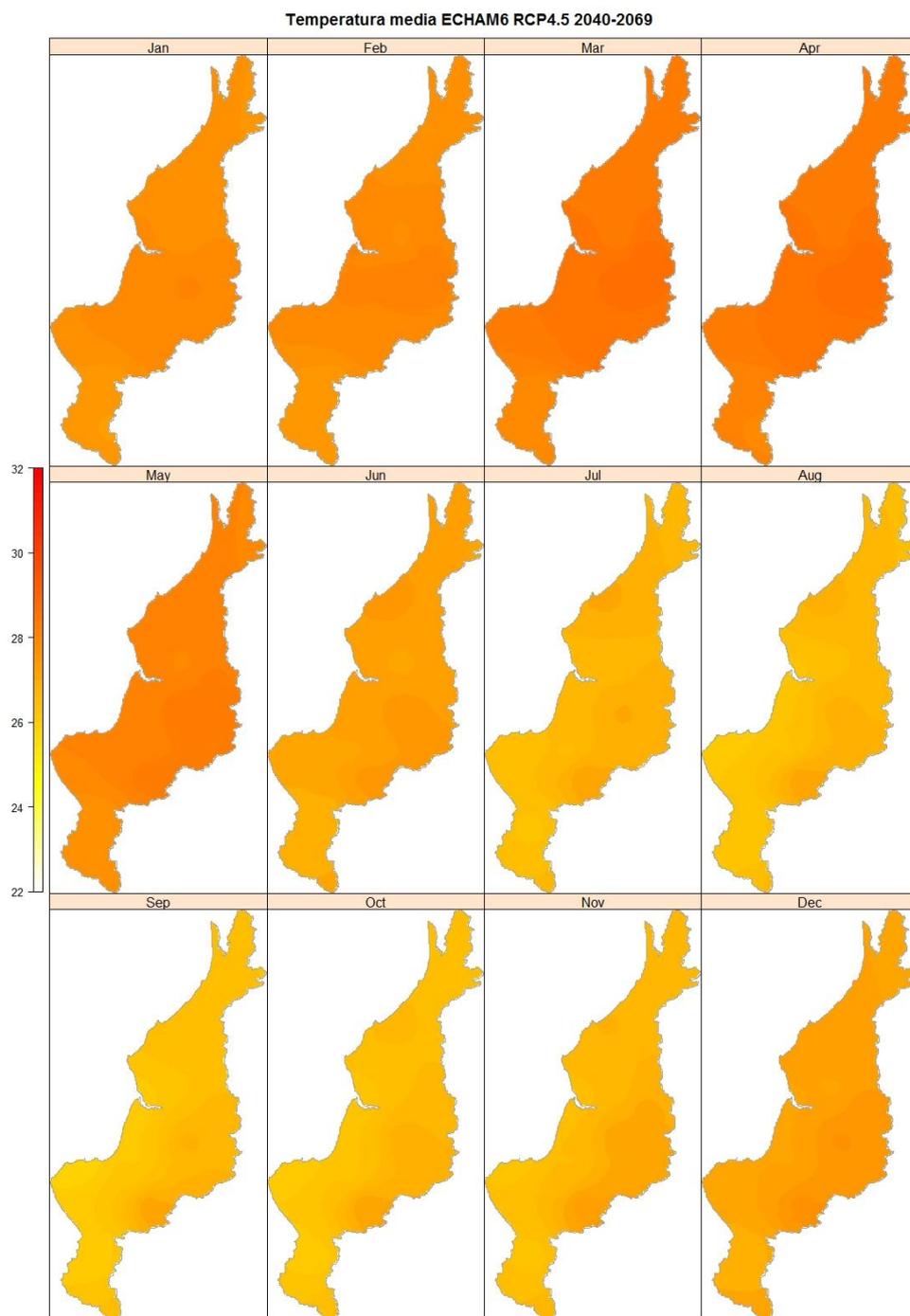


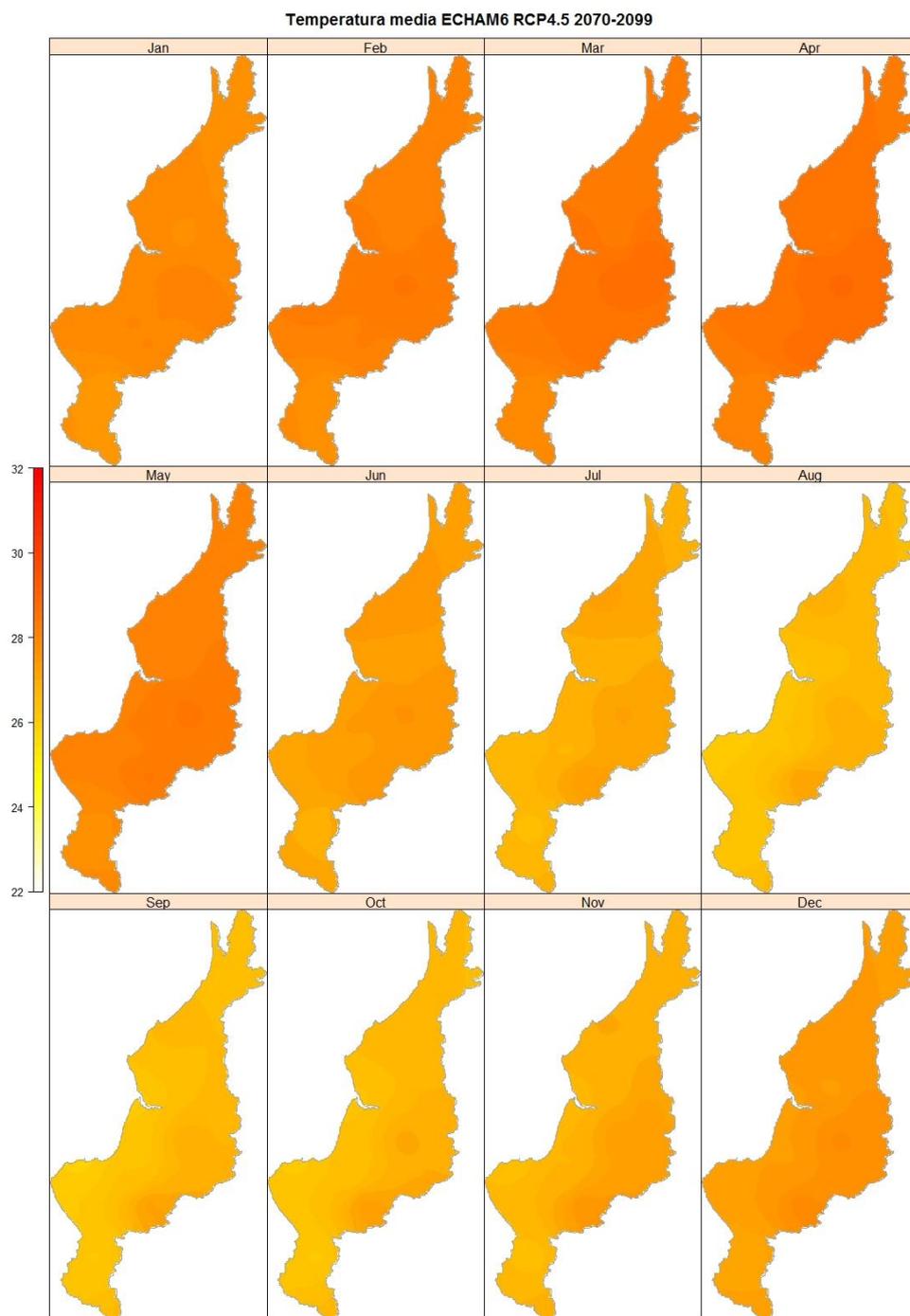


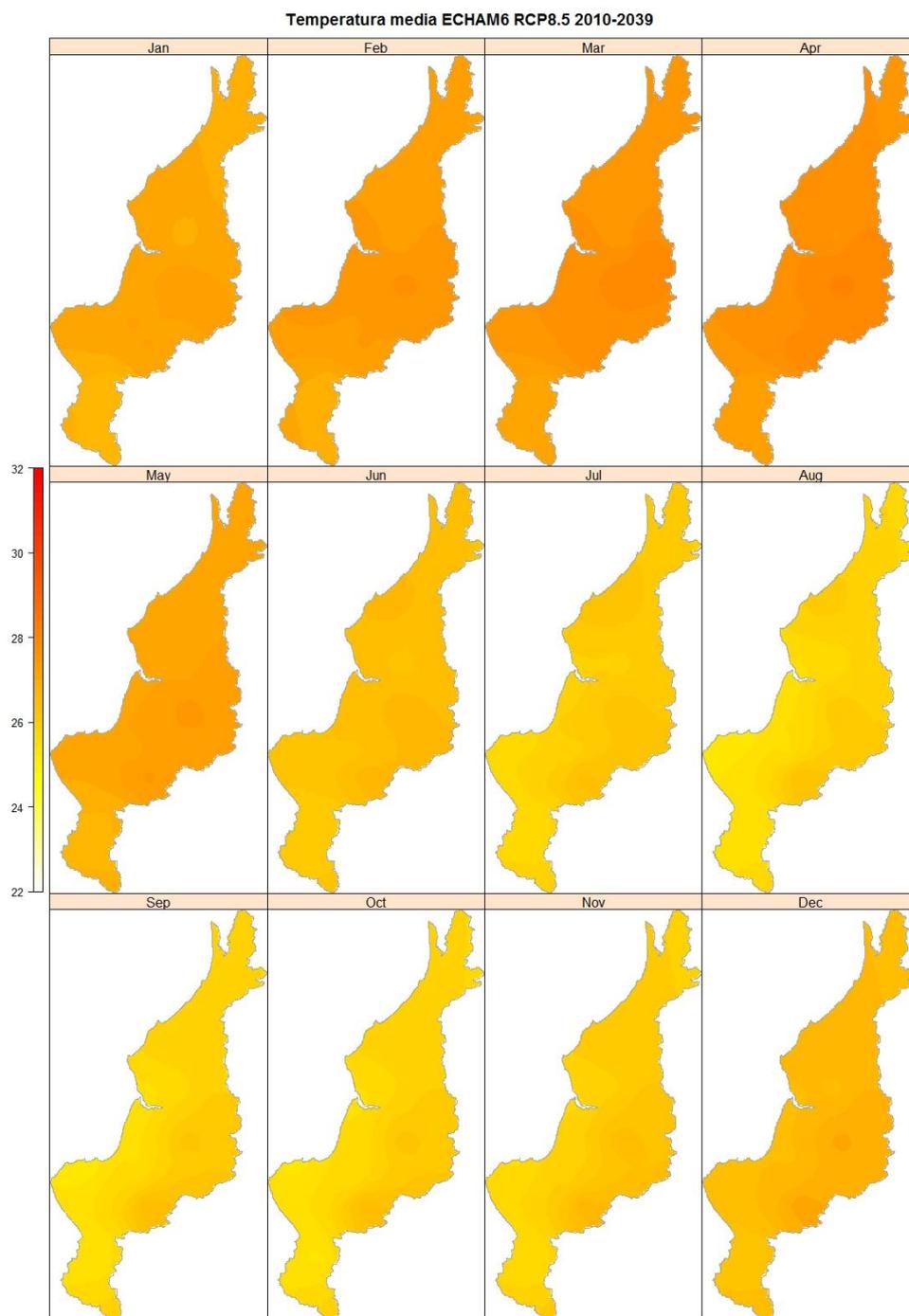


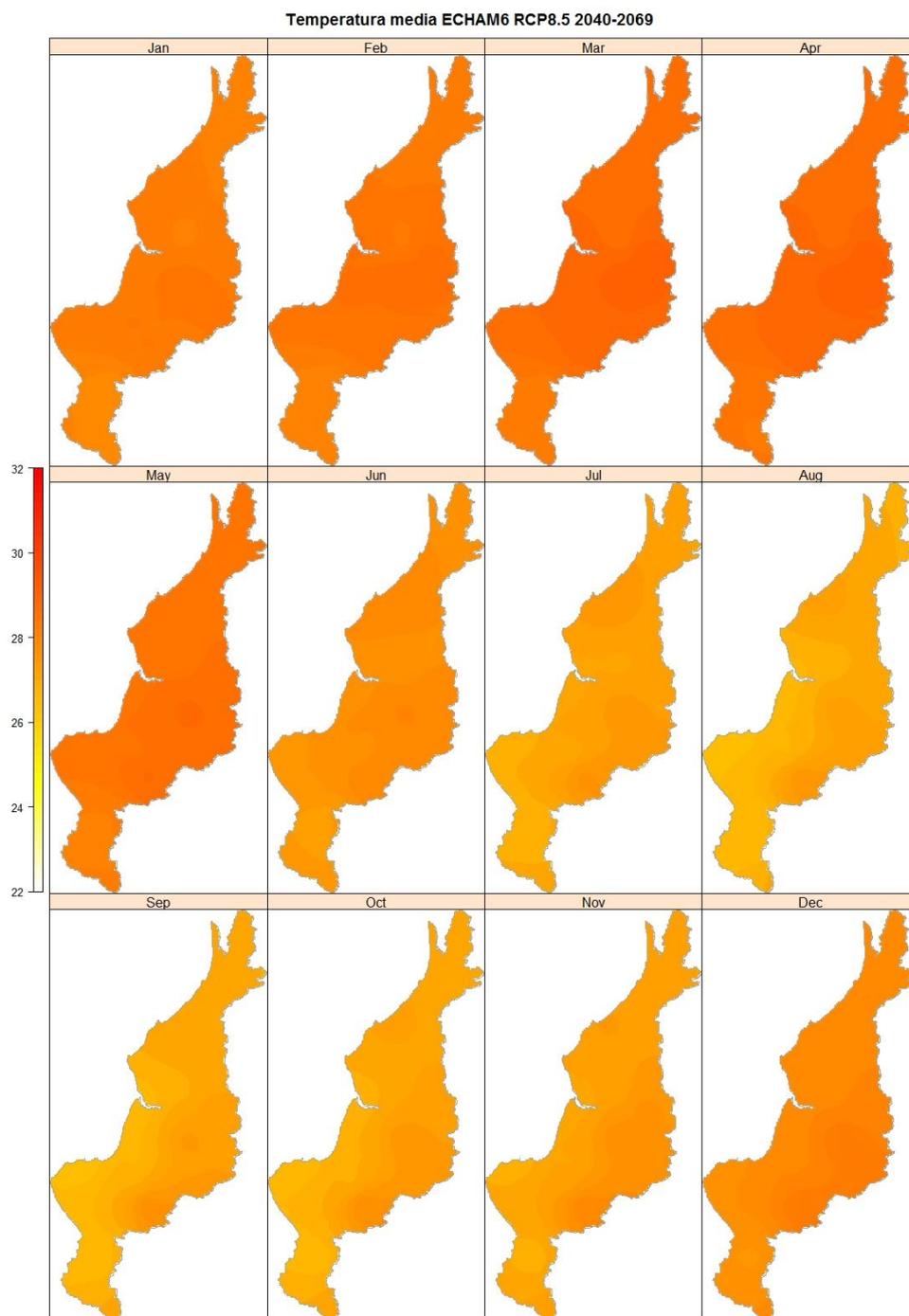


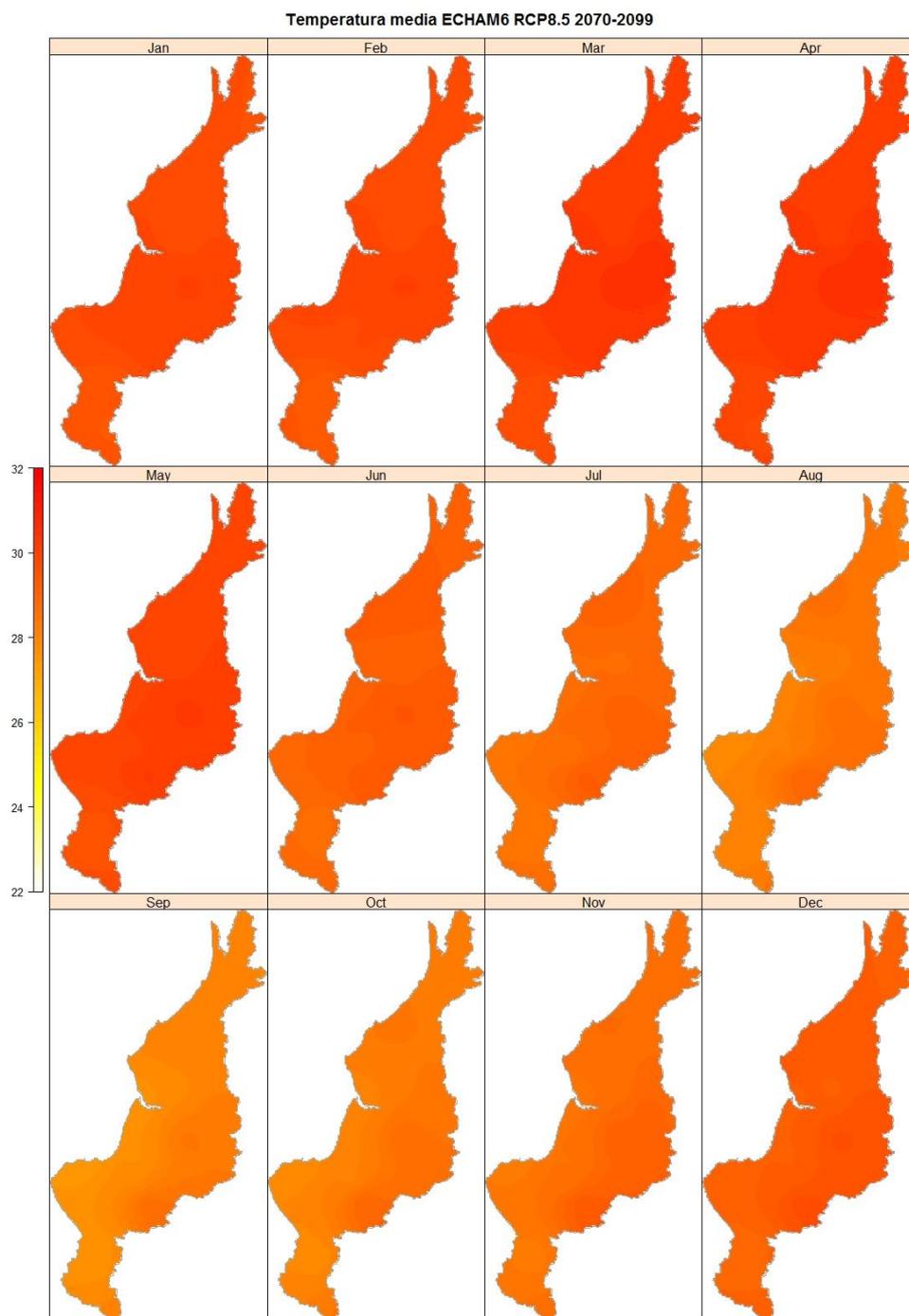


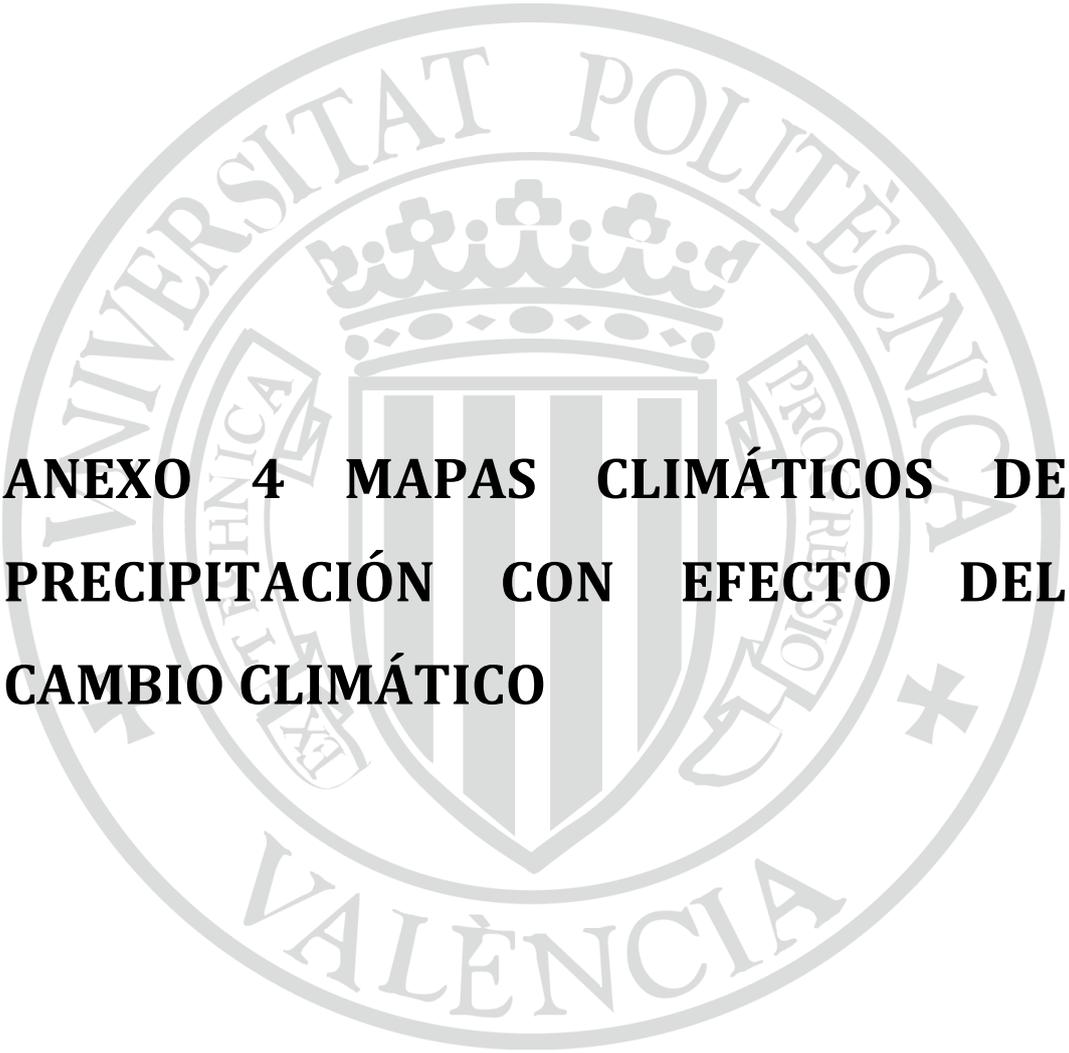




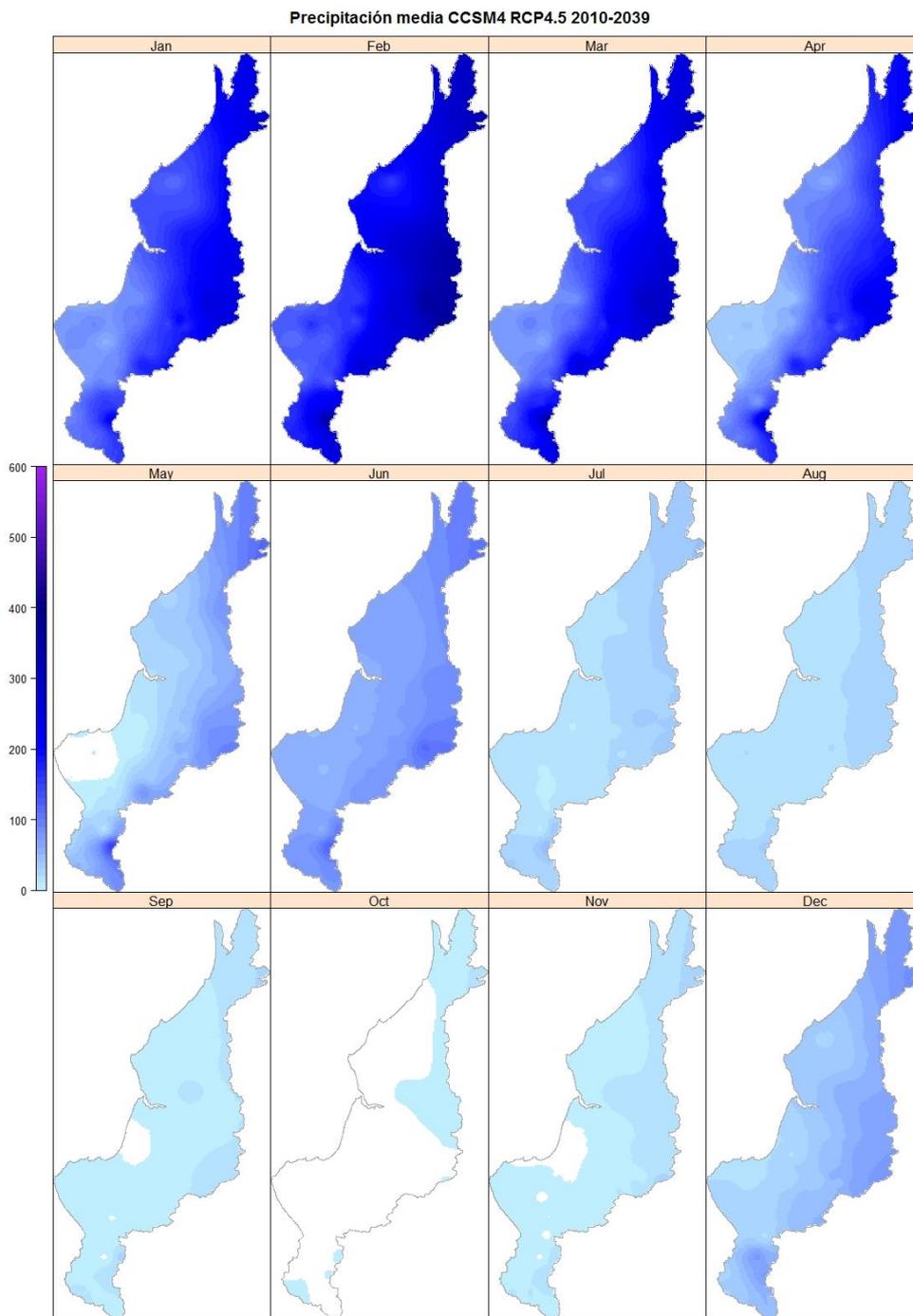


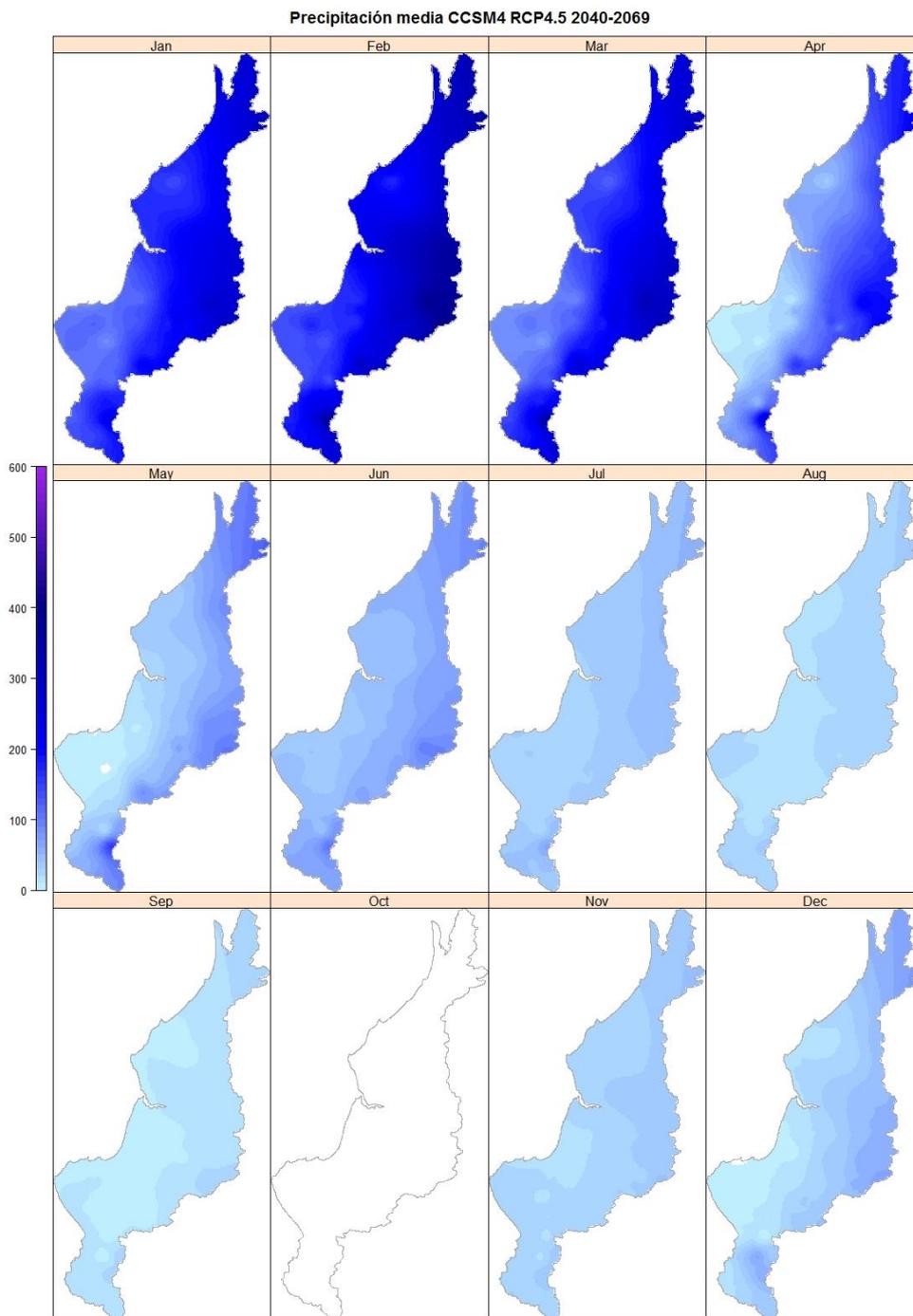


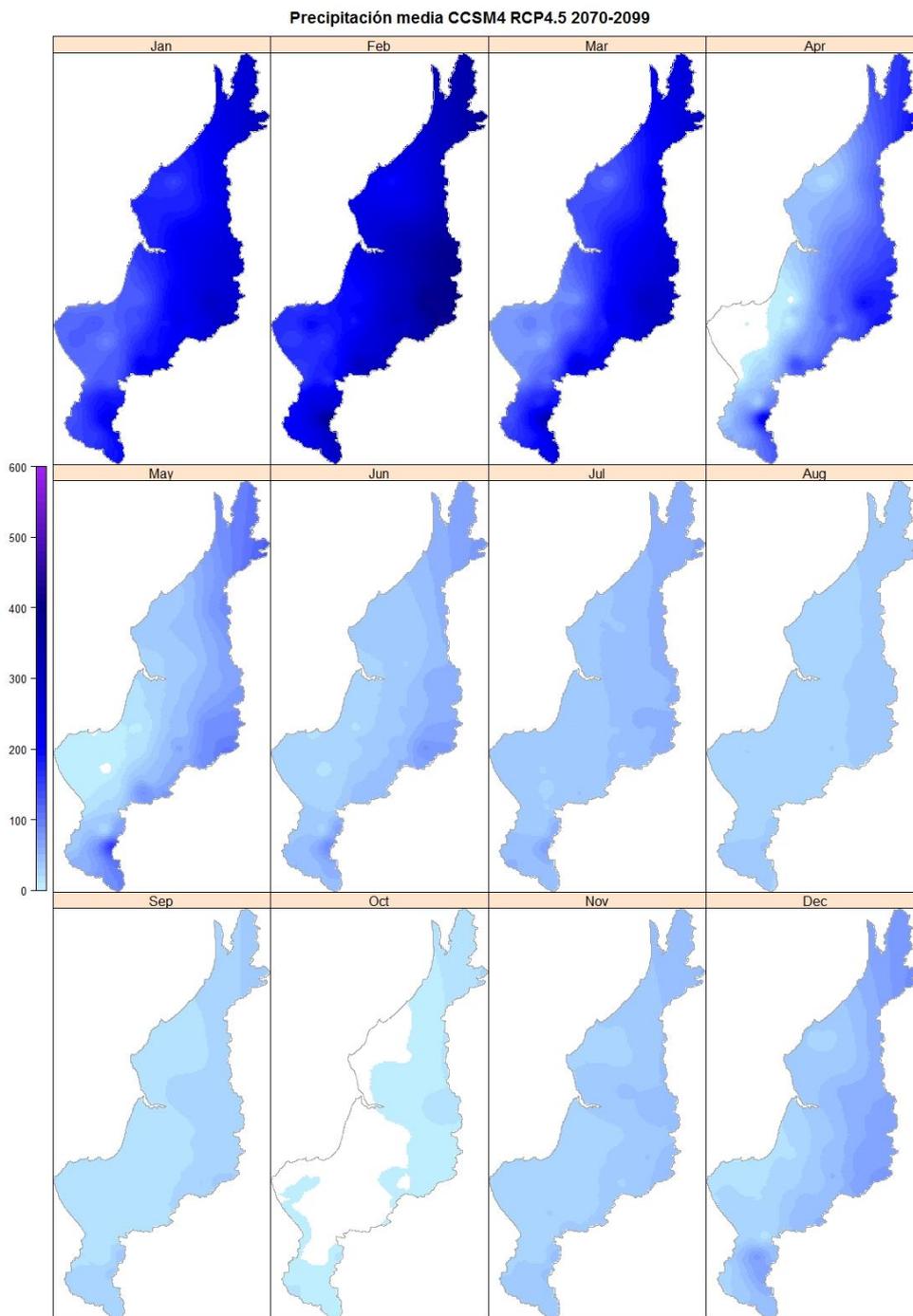


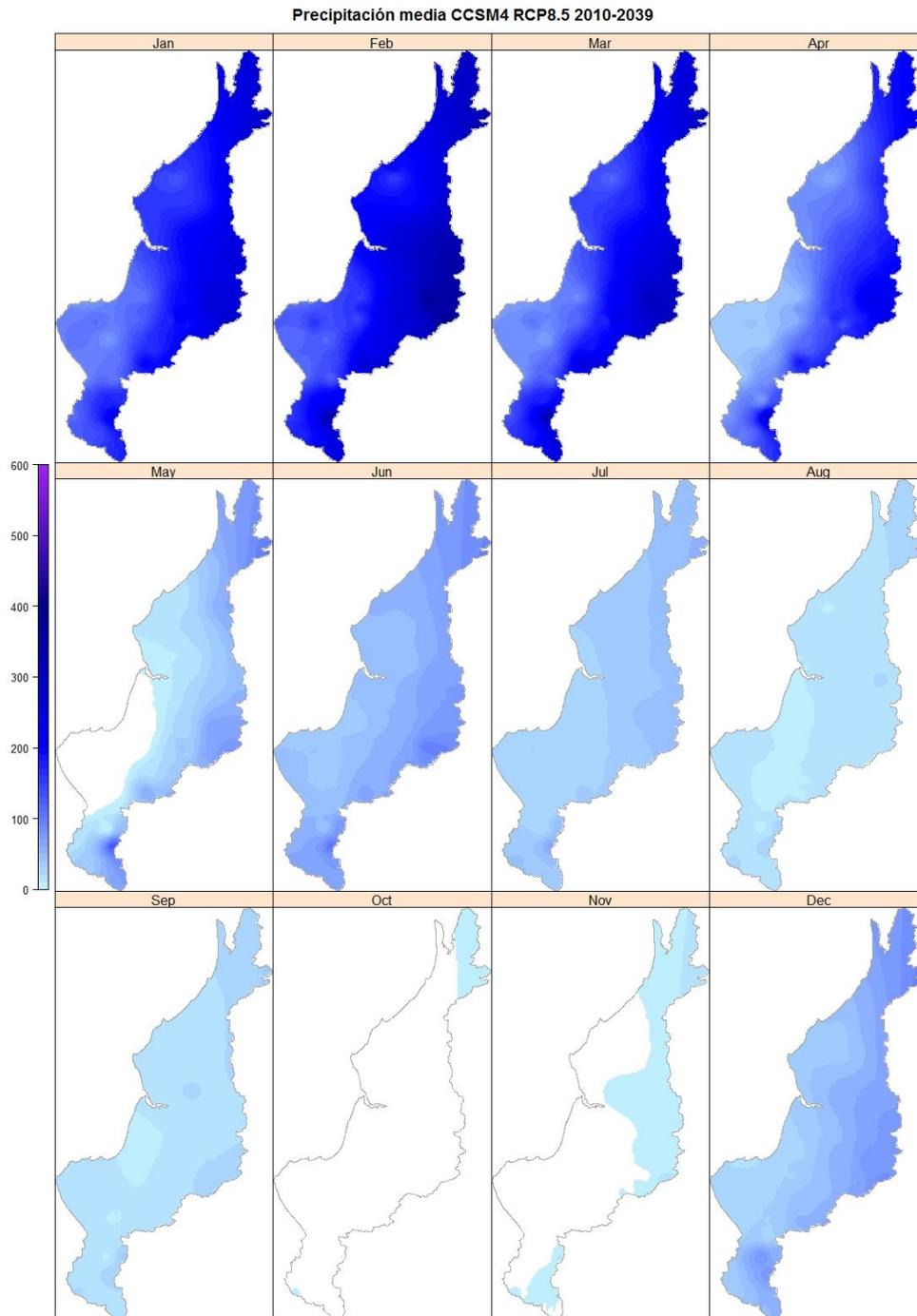


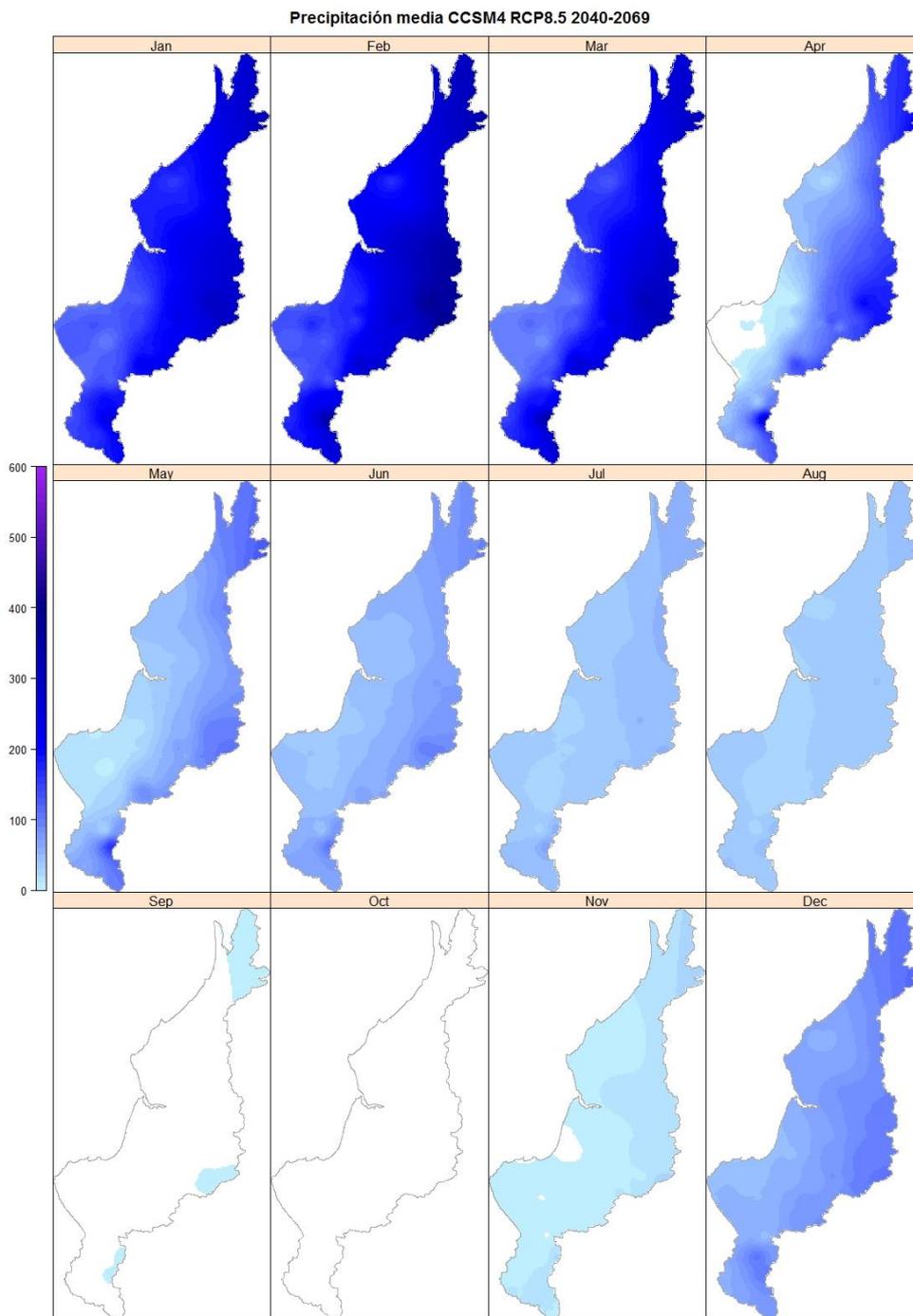
**ANEXO 4 MAPAS CLIMÁTICOS DE
PRECIPITACIÓN CON EFECTO DEL
CAMBIO CLIMÁTICO**

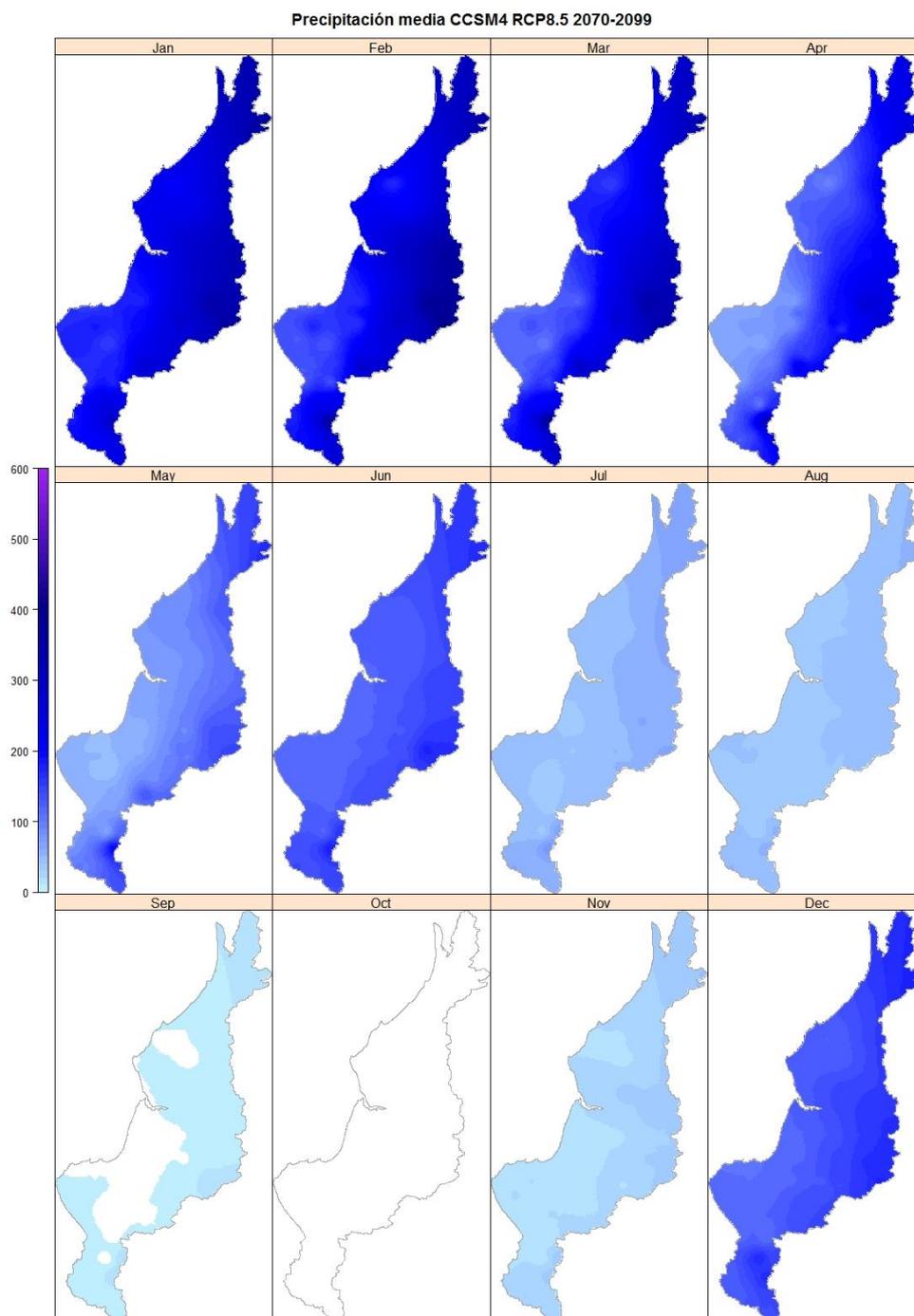


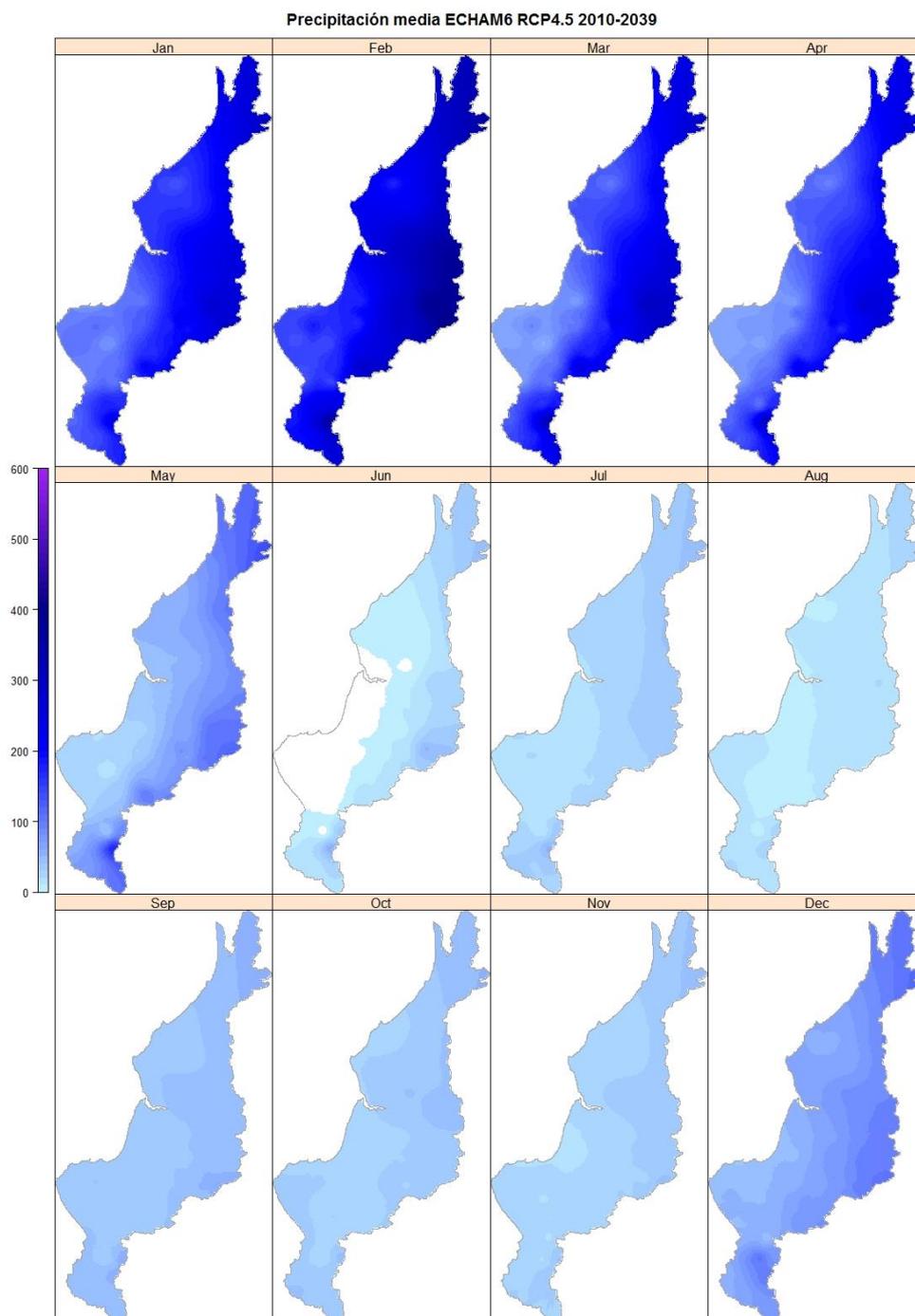


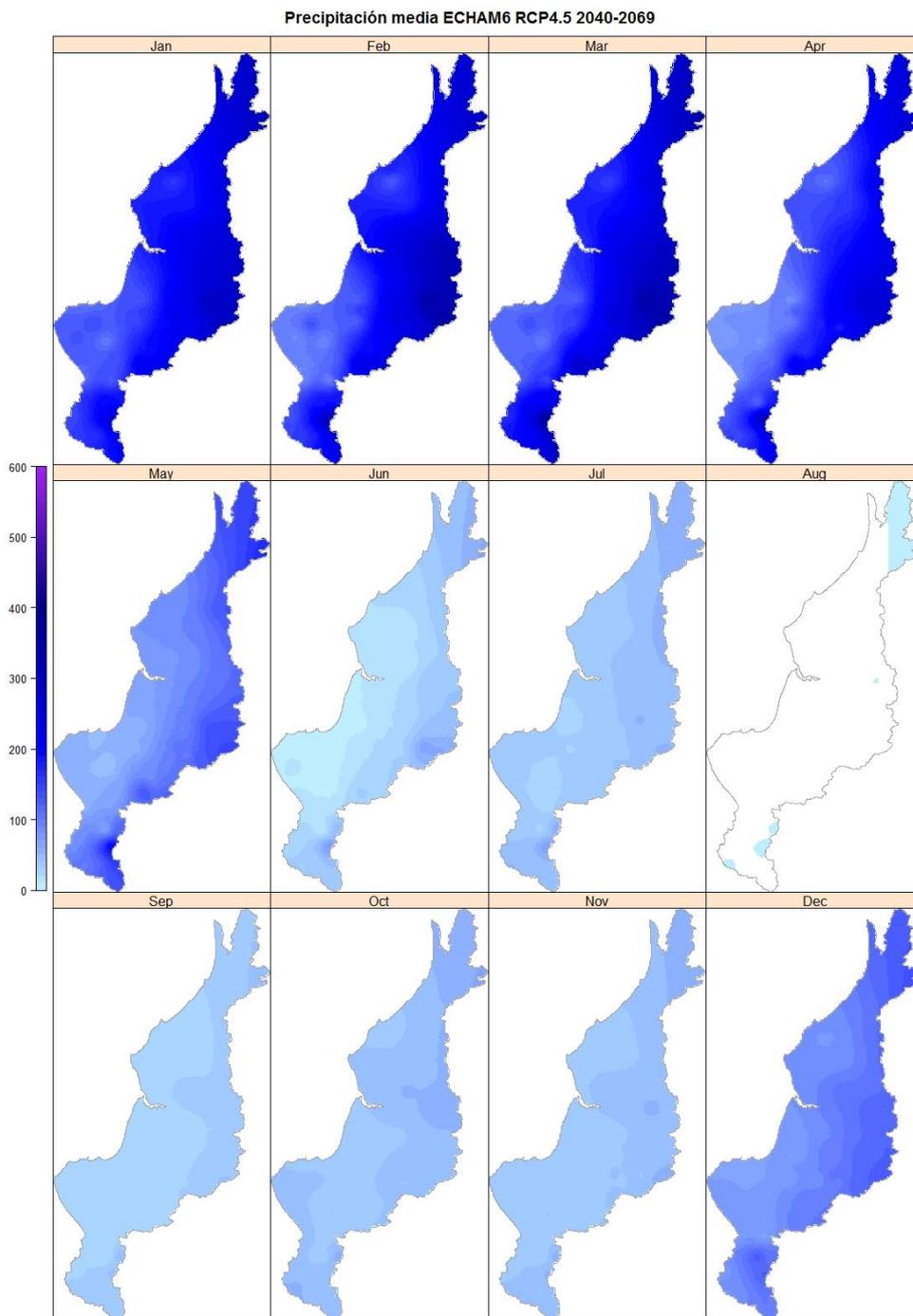


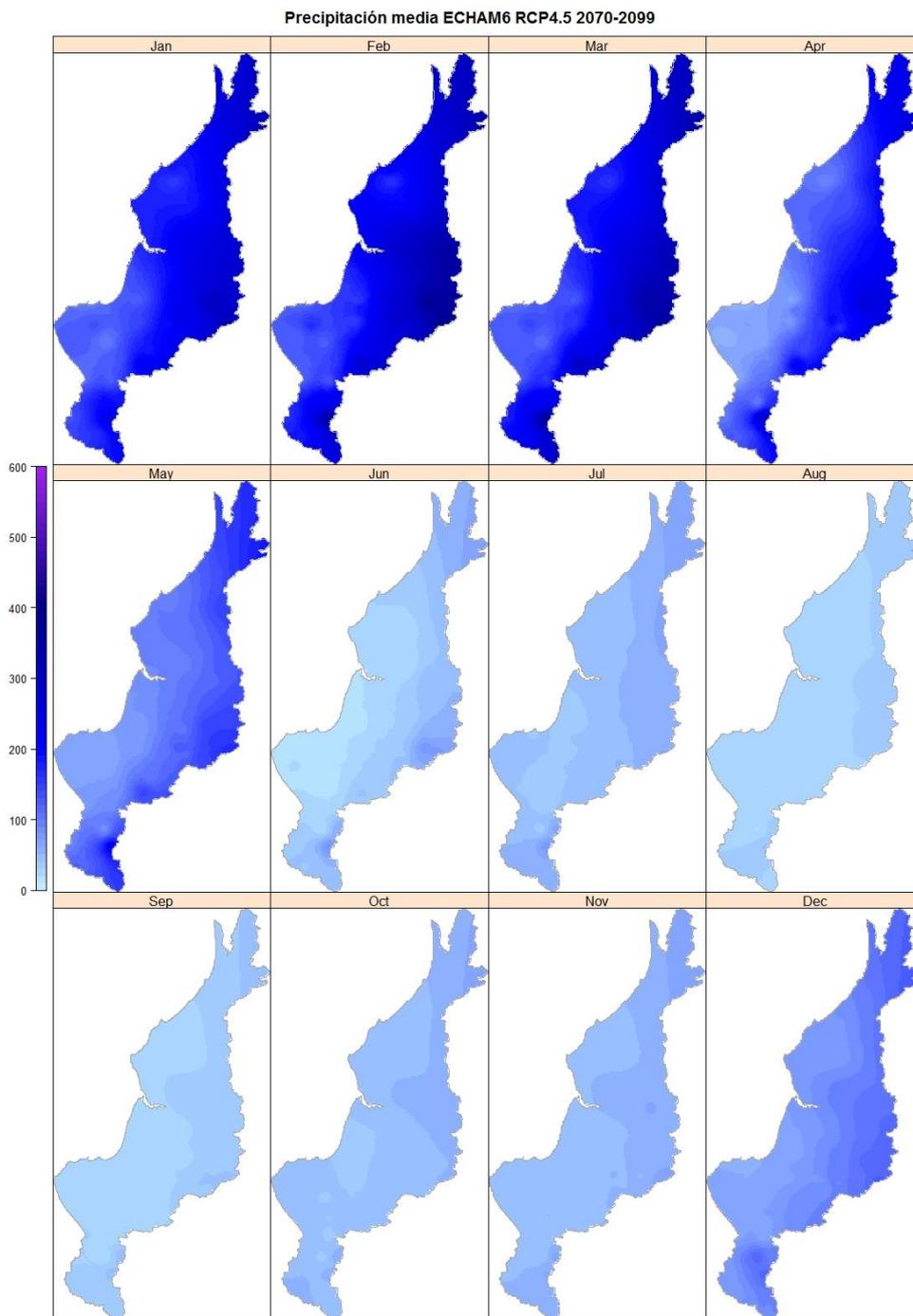


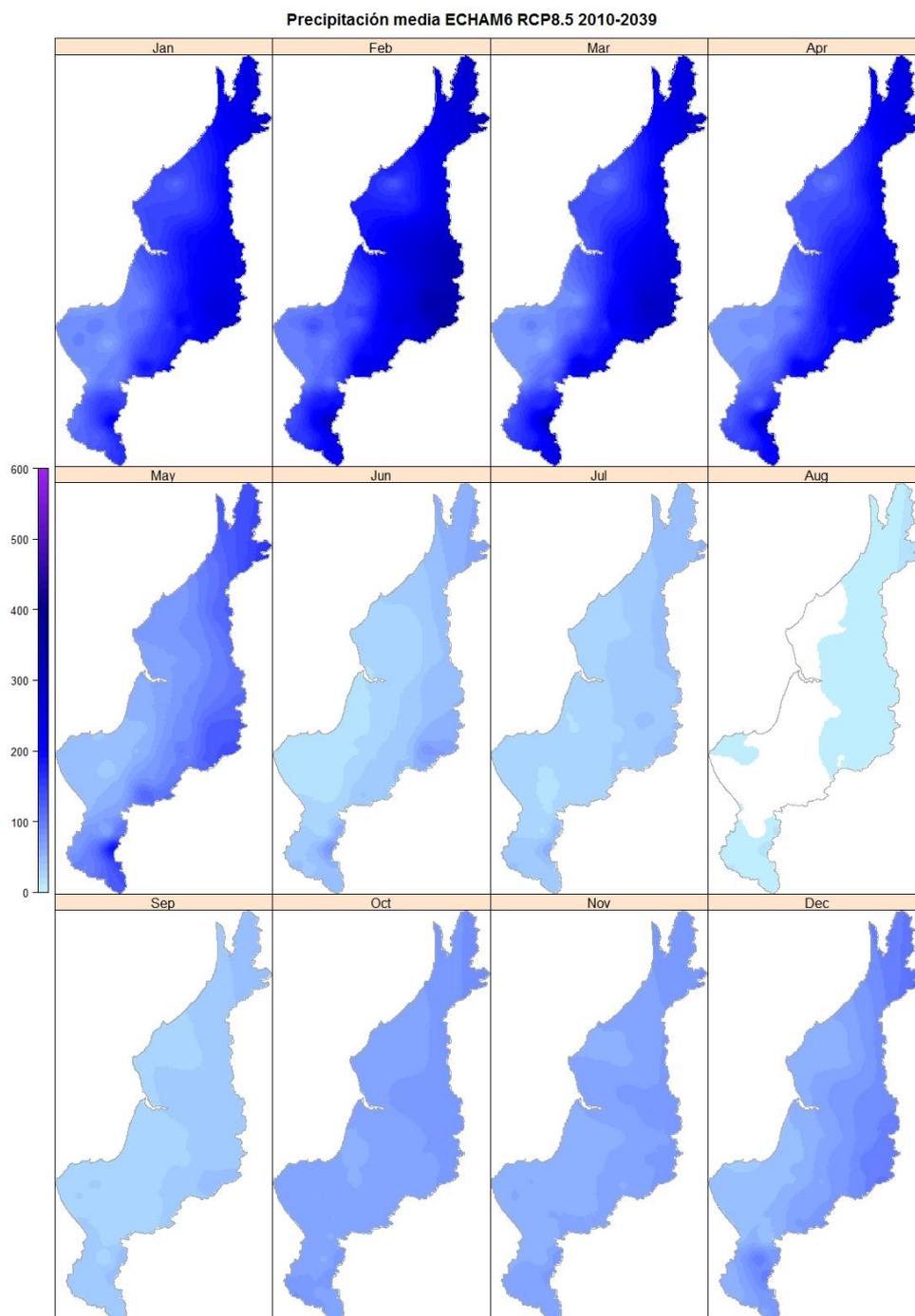


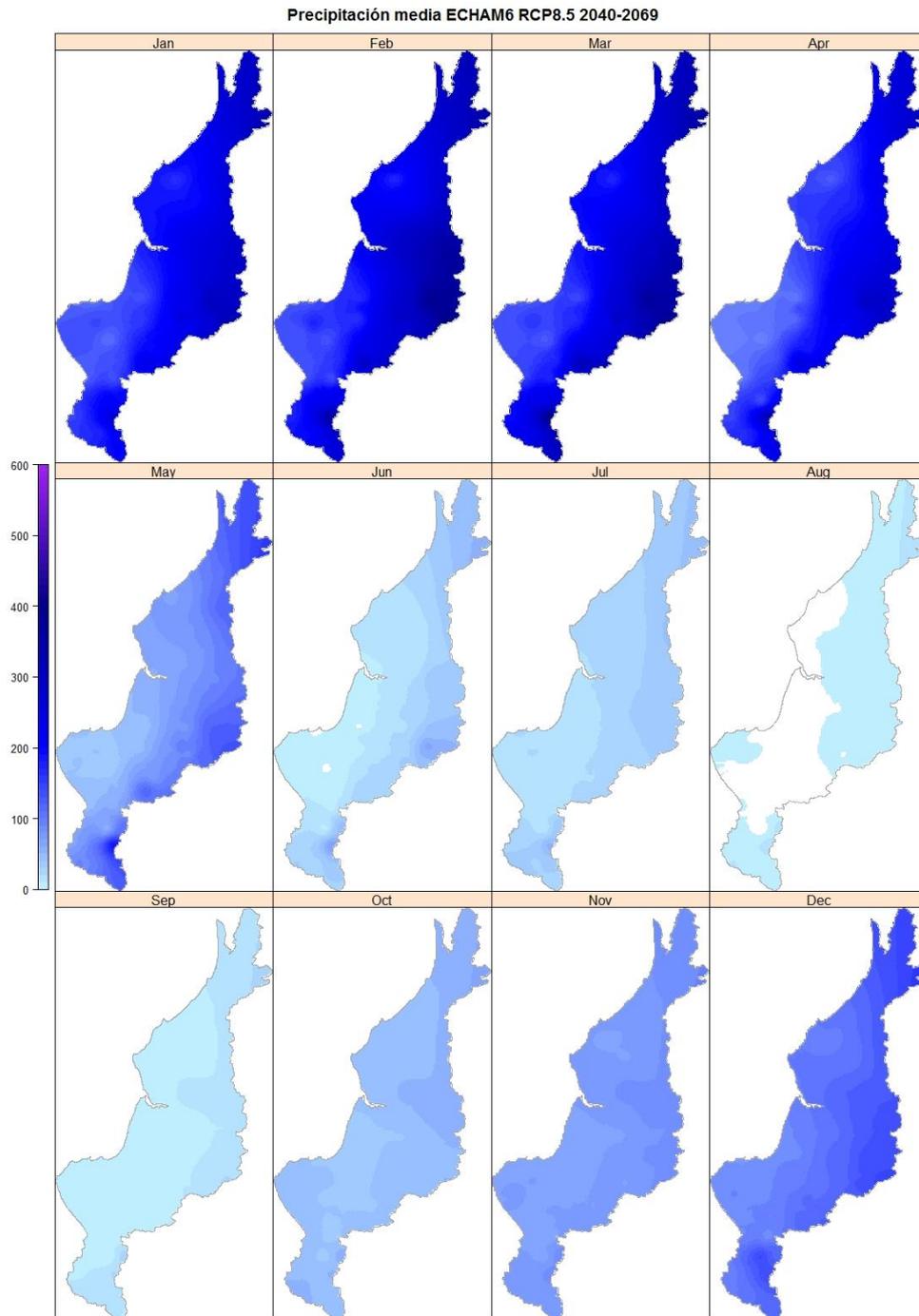


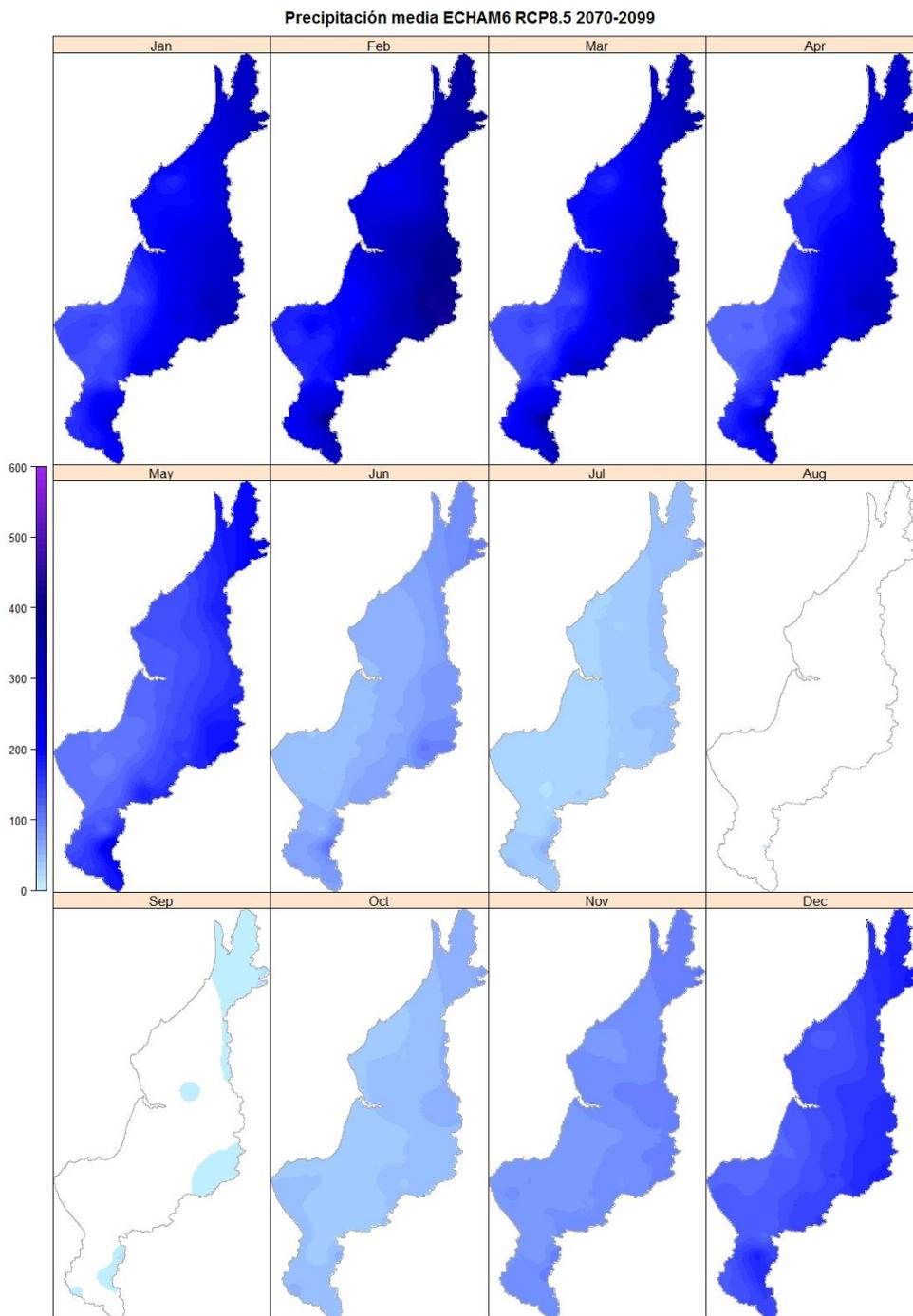














Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP)

Estación Chone, ubicado en las coordenadas 0.7° S de latitud y 80.43° O de longitud, a una altitud de 69 msnm.

Mes	Tem p Min °C	Tem p Max °C	Humeda d %	Viento km/dí a	Insolació n (Horas)	Rad MJ/m ² /día	Eto mm/me s
Enero	21.6	31.4	84	95	8.3	21.7	136.85
Febrero	21.9	31.6	86	104	7.3	20.8	120.8
Marzo	21.9	31.3	86	112	7.2	20.9	133.74
Abril	21.8	32.6	85	112	6.3	18.8	122.06
Mayo	21.8	31.5	83	112	7.7	19.7	127.83
Junio	21.0	29.4	85	86	6	16.7	101.44
Julio	20.3	29.3	83	104	8	19.7	118.77
Agosto	20.0	30.3	81	112	6.7	18.8	120.39
Septiembre	20.1	30.6	80	121	7.5	20.9	129.5
Octubre	20.5	30.4	81	130	6.6	19.6	127.93
Noviembre	20.0	30.9	81	138	7.7	20.8	129.93
Diciembre	20.6	31.4	81	130	8	20.9	134.53
Promedio	21.0	30.9	83	113	7.3	19.9	1503.77

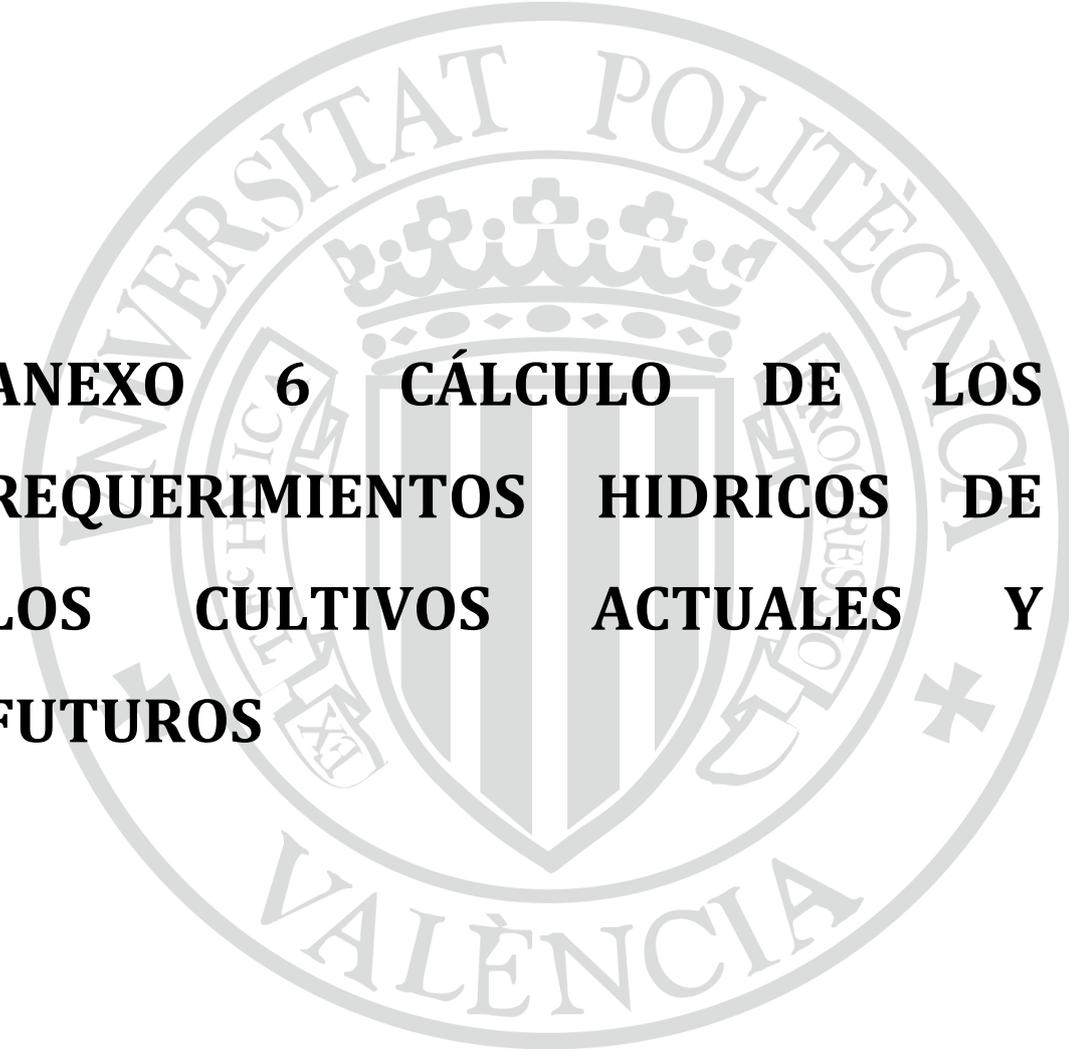
Estación Portoviejo, ubicado en las coordenadas 1.03° S de latitud y 80.11° O de longitud, a una altitud de 44 msnm.

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación (Horas)	Rad MJ/m ² /día	Eto mm/mes
Enero	22.0	30.9	78	95	1.7	11.7	90.03
Febrero	22.2	31.0	79	86	1.9	12.4	83.33
Marzo	22.3	31.6	80	95	2.7	13.8	100.83
Abril	22.3	31.9	80	86	3.5	14.4	100.39
Mayo	21.6	31.1	79	95	2.9	12.7	94.03
Junio	20.9	29.7	80	86	1.7	10.6	76.47
Julio	20.3	29.6	80	95	2.2	11.5	83.49
Agosto	19.8	30.2	78	104	2.6	12.7	93.2
Septiembre	20.2	30.6	77	112	2.9	13.8	98.22
Octubre	20.5	30.4	74	112	2.2	12.7	99.24
Noviembre	20.4	30.6	75	112	1.7	11.8	90.6
Diciembre	21.2	31.2	73	112	2	12.1	97.79
Promedio	21.1	30.7	78	99	2.3	12.5	1107.62

ANEXOS

Estación Jama, ubicado en las coordenadas 0.2 ° S de latitud y 80.25° O de longitud, a una altitud de 5 msnm.

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación (Horas)	Rad MJ/m ² /día	Eto mm/mes
Enero	21.3	30.0	82	242	3	13.6	106.22
Febrero	21.6	30.0	81	233	3.5	14.8	102.24
Marzo	21.6	30.2	82	242	3.8	15.5	115.06
Abril	21.2	30.6	83	251	3.5	14.5	106.91
Mayo	21.2	29.6	84	251	2.6	12.5	96.69
Junio	20.9	27.9	85	251	2.2	11.4	83.18
Julio	20.2	28.2	84	277	3.8	13.9	99.35
Agosto	20.0	28.4	84	268	2.2	12.1	93.81
Septiembre	20.1	28.0	83	268	2.3	12.8	94.85
Octubre	20.2	28.5	82	277	2.3	12.9	101.17
Noviembre	20.2	28.6	81	259	2.8	13.3	99.88
Diciembre	20.6	29.3	81	259	3.1	13.6	105.93
Promedio	20.8	29.1	83	256	2.9	13.4	1205.28



**ANEXO 6 CÁLCULO DE LOS
REQUERIMIENTOS HIDRICOS DE
LOS CULTIVOS ACTUALES Y
FUTUROS**

Necesidades hídricas Futuras de cultivos principales de la cuenca del río Chone (mm)

Cultivo	Actual	CCSM4 RCP4.5			CCSM4 RCP8.5			ECHAM6 RCP4.5			ECHAM6 RCP8.5		
		2010-39	2040-69	2070-99	2010-39	2040-69	2070-99	2010-39	2040-69	2070-99	2010-39	2040-69	2070-99
Maíz*	340	349	334	317	337	339	336	301	314	284	304	352	368
Banana*	777	796	782	754	778	772	698	715	697	660	667	703	700
Café*	833	882	884	873	887	881	739	783	739	688	711	757	703
Cacao*	781	825	823	811	831	819	681	729	683	632	655	701	642
Pastos*	655	698	692	674	705	684	560	600	555	502	526	571	513
Frejoles/habas** secas	300	300	284	266	287	287	281	280	289	258	286	328	338
Frejoles/habas verdes**	229	222	209	196	215	204	192	231	232	197	230	256	251
Pimiento**	351	353	338	323	340	342	334	323	328	292	308	369	374
Tomate**	452	461	445	429	448	452	447	419	421	383	388	457	464
Legumbres**	300	300	284	266	287	287	281	280	289	258	286	328	338
Maní**	369	378	363	345	365	367	365	337	342	310	325	384	398
Vegetales pequeños**	273	258	246	236	249	247	232	265	272	238	269	305	300
Melón***	323	325	309	291	312	313	305	299	308	273	296	349	356
Girasol***	345	354	340	322	342	345	342	310	318	288	301	356	373

* Cultivos de mayor producción

** Cultivos de menor producción

*** Cultivos de producción mínima

Necesidades hídricas Futuras de cultivos principales de la cuenca del río Portoviejo (mm)

Cultivo	Actual	CCSM4 RCP4.5			CCSM4 RCP8.5			ECHAM6 RCP4.5			ECHAM6 RCP8.5		
		2010-39	2040-69	2070-99	2010-39	2040-69	2070-99	2010-39	2040-69	2070-99	2010-39	2040-69	2070-99
Maíz*	294.9	299.7	279.3	271.8	290.7	284.4	160.8	238.6	241.9	229.7	205.6	258.1	220
Banana*	546.8	563.6	531.6	524	535.8	504	478.2	453.3	432.5	447.1	427.5	413	464.6
Café*	725.1	769.3	769	668.6	757.3	748.3	572.6	674	584.7	562.6	588.1	573.7	522.1
Cacao*	677	718	721.1	616.5	708.9	700.6	526.1	625.4	537.7	516.5	535.2	528.7	477.8
Pastos*	583	617.5	624.9	515.8	612.1	607.4	433.5	528.1	443.2	423.5	436	436.4	383.1
Frejoles/habas secas**	268	270.7	257.8	253.4	261.7	255.1	148.5	218.1	225.5	208.5	201.2	253.1	177.9
Frejoles/habas verdes**	214.7	214.4	201.1	213.6	205.5	197.8	106.2	176.3	190.7	172.8	182.1	221	118.2
Tomate**	384.4	393.4	367.2	354.1	384.6	377.3	242.9	318.8	315.3	311.6	271.8	313.3	298.8
Pimiento**	311.3	316.2	296.2	288.7	307.5	301.6	178.2	255.6	259.1	245.3	222.1	273.8	215.5
Legumbres**	268	270.7	257.8	253.4	261.7	255.1	148.5	218.1	225.5	208.5	201.2	253.1	177.9
Maní**	320.9	326.5	303.1	295.7	317.6	311.8	183	263.2	265.4	253.3	224.3	274.8	243.8
Vegetales pequeños**	250.7	252.1	239.4	242.9	243.2	236.4	137.5	206.7	217.7	199.5	200.8	248.2	141.7
Melón***	287.9	292	275	267.4	282.9	276.8	158.9	233.6	238.2	223.1	205.7	258.3	196.8
Girasol***	299.5	304.7	280.9	273.3	295.7	289.5	159.7	241.2	243	233.6	202.7	255.2	225.9

* Cultivos de mayor producción

** Cultivos de menor producción

*** Cultivos de producción mínima

Necesidades hídricas Futuras de cultivos principales de la cuenca del río Jama (mm)

Cultivo	Actual	CCSM4 RCP4.5			CCSM4 RCP8.5			ECHAM6 RCP4.5			ECHAM6 RCP8.5		
		2010-39	2040-69	2070-99	2010-39	2040-69	2070-99	2010-39	2040-69	2070-99	2010-39	2040-69	2070-99
Maíz*	289.6	302.1	281.6	259.5	293.2	295.1	165.6	236.4	247.3	230.6	208.9	262.6	228.9
Banana*	596	617.2	582.5	566.8	592.9	568.9	545.7	496.1	497.6	500.6	489	473.1	528.5
Café*	766.2	806.1	805.1	763.9	808.2	802.4	649.4	702.4	652.2	617.1	641.4	635	596.9
Cacao*	712	750.6	753.8	713.4	754	747.5	597.3	648.2	597.1	566.1	582.4	580.8	545.9
Pastos*	571.2	608.6	618.6	578.3	615.4	610.7	461.2	511.6	458	434.9	435.4	452.2	409.7
Frejoles/habas secas**	256.6	265.8	253.5	230.6	256.8	257.7	146	209.4	223.4	201.7	198.4	251.3	176.9
Frejoles/habas verdes**	205	207.7	195	187.5	198.7	198.5	103.9	168.5	189.2	166.5	179.9	219.7	116.4
Tomate**	388	406.8	379.5	358	398	399.8	259.7	326.4	330.7	322.3	285.7	330.1	319.1
Pimiento**	307.8	321	300.8	278.7	312.1	314.5	186	255.2	265.9	247.4	227.8	281.4	225.1
Legumbres**	256.6	265.8	253.5	230.6	256.8	257.7	146	209.4	223.4	201.7	198.4	251.3	176.9
Maní**	315.3	329.6	305.7	285.1	320.7	323.4	188.3	261.2	270.4	254.9	228.2	280.4	253.3
Vegetales pequeños**	241.2	247.6	235.3	219.6	238.7	239.5	136.7	199.4	217.1	194.1	199.4	247.9	141.1
Melón***	280.3	292.1	275.2	251.4	283	285	161.2	228.9	240.6	220.7	207	261.1	201.3
Girasol***	296.2	309.8	285.6	264.8	300.9	302.9	167.2	241.1	250.2	237.4	208.1	260.9	237.8

* Cultivos de mayor producción

** Cultivos de menor producción

*** Cultivos de producción mínima