



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

**COMPARACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO
CLIMÁTICO EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO LA
ANTIGUA.**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA
L.C.A. YUSIF SALIB NAVA ASSAD

DIRECTORA DE TESIS
DRA. ANA CECILIA CONDE ÁLVAREZ
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

JURADO
DRA. GRACIELA BINIMELIS DE RAGA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA
DR. JORGE ZAVALA HIDALGO
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA
DRA. MARÍA TEREZA CAVAZOS PÉREZ
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE
ENSENADA, BAJA CALIFORNIA
DRA. FANNY LÓPEZ DÍAZ
INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

Ciudad Universitaria, Cd. Mx.

Agosto 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

Resumen Ejecutivo	11
1 Introducción.....	13
2 Objetivo	16
2.1 Objetivo general:	16
2.2 Objetivos particulares:	16
3 Antecedentes.....	17
3.1 Generalidades del clima, cambio climático y escenarios de cambio climático	17
3.2 Antecedentes sobre modelación climática y la regionalización para México de los escenarios de cambio climático globales.	23
4 Descripción del área de estudio	26
5 Metodología	33
5.1 Descarga de datos.....	35
5.2 Análisis cartográfico y generación de mapas	36
5.3 Herramienta de análisis de datos	39
6 Resultados	44
6.1 Clima Base	44
6.1.1 Precipitación	45
6.1.2 Temperatura Máxima	47
6.1.3 Temperatura Mínima	50
6.2 Comparación de Escenarios de Cambio Climático en la cuenca de La Antigua.....	53
6.2.1 Precipitación	54
6.2.2 Temperatura Máxima	58
6.2.3 Temperatura Mínima	62
6.3 Escenario de Cambio Climático RCP 8.5 en el Futuro Lejano (2075-2099).	66
6.3.1 Precipitación	66
6.3.2 Temperatura Máxima	69

6.3.3	Temperatura Mínima	71
7	Conclusiones	73
8	Recomendaciones	75
9	Referencias Bibliográficas.....	76
Anexo I	84	
AI. Nivel de Cuenca	84	
AI.1 Cuenca Alta	84	
AI.1.1	Clima	84
AI.1.2	Precipitación.....	85
AI.1.3	Temperatura Máxima.....	86
AI.1.4	Temperatura Mínima.....	87
AI.2 Cuenca Media.....	88	
AI.2.1	Clima	88
AI.2.2	Precipitación.....	88
AI.2.3	Temperatura Máxima.....	89
AI.2.4	Temperatura Mínima.....	90
AI.3 Cuenca Baja	91	
AI.3.1	Clima	91
AI.3.2	Precipitación.....	92
AI.3.3	Temperatura Máxima.....	93
AI.3.4	Temperatura Mínima.....	94
Anexo II	95	
All.1 Portada.....	96	
All.2 Descripción	96	
All.3 Imágenes.....	97	
All.4 Clima Total.....	97	
All.5 Clima por Nivel de Cuenca	98	
All.6 Anomalía por Nivel de Cuenca.....	99	
All.7 Anomalía por Modelo	100	

AII.8 Clima & Anomalía	101
AII.9 Clima & Total	102
Anexo III	103
AIII.1 Precipitación	104
AIII.2 Temperatura Máxima.....	105
AIII.3 Temperatura Mínima.....	106
Anexo IV.....	107
AIV.1 Descarga de Qgis	107
AIV.2 Interface del sistema de información geográfica Qgis.....	107
AIV.3 Descarga de los datos de los escenarios de cambio climático	108
AIV.4 Como realizar un proyecto de Qgis	108
AIV.5 Descarga de datos del marco geoestadístico de INEGI	109
AIV.6 Cambio de proyección geográfica	109
AIV.7 Recorte de la zona de interés	110
AIV.8 Cálculos de la proyección total	110
AIV.9 Extracción de las estadísticas de zona	111
Anexo V.....	112
AV.1 Precipitación	112
AV.2 Temperatura Máxima	112
AV.3 Temperatura Mínima	113
Anexo VI: Bibliografía	114

Índice de Figuras

Figura 3.1.1: Efecto de los cambios en la distribución de temperaturas en los extremos. Diferentes cambios en las distribuciones de temperaturas entre el clima presente y futuro y sus efectos sobre los valores extremos de las distribuciones: a) efectos de un simple desplazamiento de toda la distribución hacia un clima más cálido; b) efectos de un aumento de la variabilidad de la temperatura sin cambio en la media, y c) efectos de cambio en la forma de la distribución, en este ejemplo un desplazamiento en la asimetría hacia la parte más cálida de la distribución. Fuente: IPCC (2012). 20

Figura 3.1.2: (Parte superior izquierda) Forzamiento radiativo medio global total para los cuatro escenarios de RCP basado en el modelo de balance energético del Modelo de evaluación del cambio climático causado por los GEI (MAGICC). Obsérvese que el forzamiento real simulado por los modelos de la CMIP5 difiere ligeramente de un modelo a otro. (Parte inferior izquierda) Series temporales de los valores medios anuales globales de las anomalías de la temperatura del aire en superficie (en relación con el período 1986-2005) obtenidas de experimentos de la CMIP5 determinados por la concentración. Las proyecciones se muestran para cada RCP para la media multimodelos (líneas continuas) y ± 1.64 desviaciones típicas (5% al 95%) para la distribución de modelos individuales (sombreado) de acuerdo con las medias anuales. El intervalo de 1.64 desviaciones típicas, basado en promedios de 20 años desde 2081 a 2100 en relación con el período 1986-2005, se interpreta como cambios probables para finales del siglo XXI. Las discontinuidades en 2100 se deben a cálculos basados en la ejecución de los modelos para fechas posteriores al siglo XXI cuyas cifras no tienen un sentido físico. Los números del mismo color que las líneas indican el número de modelos diferentes que contribuyen en los distintos períodos de tiempo. Mapas: promedio del ensamble multimodelos del cambio medio anual de la temperatura del aire en superficie (comparado con el período de base 1986-2005) para 2016-2035 y 2081-2100, para las RCP2.6; 4.5; 6.0 y 8.5. Las tramas sombreadas son regiones en las que la media multimodelos es inferior a una desviación típica de variabilidad interna. Las tramas punteadas son regiones en las que la media multimodelos es superior a 2 desviaciones típicas de variabilidad interna y donde, por lo menos, el 90% de los modelos concuerdan con el signo del cambio. El número de modelos de la CMIP5 utilizados se indica en la esquina superior derecha de cada mapa. Fuente: IPCC - WGI (2013). 22

Figura 4.1: Localización del área de estudio, la cuenca hidrográfica del río La Antigua en los estados de Veracruz y Puebla, México. 26

Figura 4.2 Localización de los municipios de los estados de Veracruz y Puebla en los diferentes niveles de la cuenca hidrográfica del río La Antigua, México. Azul – cuenca alta, verde – cuenca media, rojo – cuenca baja. 28

Figura 4.3 Mapa de Vegetación y Uso del Suelo de la cuenca del río Antigua (2014). “Taller del Comité Regional de Veracruz para construir los planes de manejo integral para las cuencas Jamapa y Antigua. 23 y 24 de junio del 2015”. 29

Figura 5.1.1 Ejemplo de la descarga de datos del clima base, como de los escenarios de cambio climático. (Tomado de http://atlasclimatico.unam.mx/AECC_descargas/)	35
Figura 5.2.1 Ejemplo del procesamiento de la información cartográfica y la generación de mapas con la herramienta QGIS.	36
Figura 5.2.2: Caja de análisis de la región de la Cuenca del Río La Antigua y sus alrededores. La imagen de fondo corresponde a Google Satélite, la cual puede ser cargada en QGIS como un complemento.	37
Figura 5.2.3: División de las anomalías o deltas de cambio de los escenarios de cambio climático a resolución espacial de 0.5 x 0.5 grados de arco.....	38
Figura 5.2.4: División de los niveles de cuenca con la referencia de las anomalías de los escenarios de cambio climático. La línea azul delimita a la cuenca alta, la verde a la cuenca media y la roja a la cuenca baja.	38
Figura 5.2.5: División de los niveles de cuenca con referencia al mapa de uso de suelo y vegetación.....	39
Figura 5.3.1: Ejemplo de la tabla maestra que contiene el compendio de la base de datos del clima base y los escenarios de cambio climático de la cuenca del río La Antigua.....	40
Figura 5.3.2: Ejemplo de la aplicación generada en QlikView, en donde se observa la precipitación del clima base en los diferentes niveles de la cuenca, así como una tabla en donde se presentan los datos.....	41
Figura 5.3.3: Ejemplo de las tablas y gráficos generados en Excel. En esta imagen se observa las anomalías y proyecciones totales con el clima base de la precipitación en toda la cuenca del río La Antigua.	42
Figura 6.1.1 Gráfica de las variables climáticas promedio de la cuenca de La Antigua.....	44
Figura 6.1.1.1 Distribución de la precipitación promedio mensual del clima base en un modelos digital de elevación.....	46
Figura 6.1.1.2 Ciclo anual de la precipitación en toda la cuenca y en los diferentes niveles.....	47
Figura 6.1.2.1 Distribución de la temperatura máxima promedio mensual del clima base en mapas con un modelo digital de elevación.	49
Figura 6.1.2.2 Ciclo anual de la temperatura máxima en toda la cuenca y en los diferentes niveles.....	50
Figura 6.1.3.1 Distribución de la temperatura mínima promedio mensual del clima base en un modelo digital de elevación.....	52
Figura 6.1.3.2 Ciclo anual de la temperatura mínima en toda la cuenca y en los diferentes niveles.....	53

Figura 6.2.1.1 Ciclo anual de la precipitación (mm) del clima base (1950-2000) y la proyección total del modelo GFDL-CM3 futuro cercano (2015-2039) bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5	54
Figura 6.2.1.2 Ciclo anual de la precipitación del clima base (1950-2000) y la proyección total del modelo CNRMCM5 futuro cercano (2015-2039) bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5.	56
Figura 6.2.2.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura máxima de los cuatro modelos de circulación general en el futuro lejano (2075-2099) bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5.	60
Figura 6.2.2.2: Ciclo anual de la temperatura máxima (°C) del clima base (1950-2000), y los incrementos acumulados del modelo GFDL-CM3 futuro cercano (2015-2039), futuro intermedio (2045-2069) y futuro lejano (2075-2099) bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5.	62
Figura 6.2.3.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura mínima de los cuatro modelos de circulación general en el futuro intermedio (2045-2069) bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5.	64
Figura 6.2.3.2 Ciclo anual de la temperatura mínima del clima base (1950-2000), la proyección total y la anomalía del modelo HADGEM2-ES futuro lejano (2075-2099) bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5.	66
Figura 6.3.1.1 Ciclo anual de las anomalías de la precipitación proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099)....	67
Figura 6.3.1.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la precipitación de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099).	67
Figura 6.3.1.3 Distribución de la precipitación en clima base y las proyecciones de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099) en julio.....	68
Figura 6.3.2.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura máxima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099).....	69
Figura 6.3.2.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura máxima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099).	69
Figura 6.3.2.3 Distribución de la temperatura máxima en clima base y las proyecciones de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099) en mayo.	70
Figura 6.3.3.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura mínima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099).....	71

Figura 6.3.3.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura mínima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099).	71
Figura 6.3.3.3 Distribución de la temperatura mínima en clima base y las proyecciones de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099) en enero.	72
Figura 6.4.1 Niveles de cuenca del río La Antigua. De color azul tenemos la cuenca alta, de color verde la cuenca media y de color naranja la cuenca baja.	84
Figura AI.1.1 Ciclo anual del clima base de la temperatura y la precipitación de la cuenca alta del río La Antigua.	84
Figura AI.1.2.1 Ciclo anual de las anomalías de la precipitación proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca alta del río La Antigua.	85
Figura AI.1.2.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la precipitación de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca alta del río La Antigua.	85
Figura AI.1.3.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura máxima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca alta del río La Antigua.	86
Figura AI.1.3.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura máxima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca alta del río La Antigua.	86
Figura AI.1.4.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura mínima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca alta del río La Antigua.	87
Figura AI.1.4.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura mínima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca alta del río La Antigua.	87
Figura AI.2.1 Ciclo anual del clima base de la temperatura y la precipitación de la cuenca media del río La Antigua.	88
Figura AI.2.2.1 Ciclo anual de las anomalías de la precipitación proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca media del río La Antigua.	88
Figura AI.2.2.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la precipitación de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca media del río La Antigua.	89
Figura AI.2.3.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura máxima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca media del río La Antigua.	89

Figura AI.2.3.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura máxima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca media del río La Antigua.	90
Figura AI.2.4.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura mínima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca media del río La Antigua.	90
Figura AI.2.4.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura mínima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca media del río La Antigua.	91
Figura AI.3.1 Ciclo anual del clima base de la temperatura y la precipitación de la cuenca baja del río La Antigua.	91
Figura AI.3.2.1 Ciclo anual de las anomalías de la precipitación proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca baja del río La Antigua.	92
Figura AI.3.2.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la precipitación de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca baja del río La Antigua.	92
Figura AI.3.2.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura máxima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca baja del río La Antigua.	93
Figura AI.3.2.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura máxima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca baja del río La Antigua.	93
Figura AI.3.4.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura mínima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca baja del río La Antigua.	94
Figura AI.3.4.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura mínima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca baja del río La Antigua.	94

Índice de Tablas

Tabla 4.1: Principales problemas, sus causas e impactos en la cuenca del río Antigua.....	30
Tabla 6.1.1.1: Precipitación (mm/mes), valor máximo y mínimo del clima base registrados en la región de la cuenca La Antigua.	45
Tabla 6.1.2.1: Temperatura máxima (°C), valor máximo y mínimo del clima base registrados en la región de la cuenca La Antigua.	48
Tabla 6.1.3.1: Temperatura mínima (°C), valor máximo y mínimo del clima base registrados en la región de la cuenca La Antigua.	51
Tabla 6.2.1a. Datos de la precipitación: anomalías, el clima base y la proyección total bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5	55
Tabla 6.2.1b. Datos de la precipitación: anomalías, el clima base y la proyección total bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5	57
Tabla 6.2.2a. Datos de la temperatura máxima: anomalías, clima base y la proyección total bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5	59
Tabla 6.2.2b. Datos de la temperatura máxima: anomalías, clima base y la proyección total bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5	61
Tabla 6.2.3a. Datos de la temperatura mínima: anomalías, clima base y la proyección total bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5	63
Tabla 6.2.3b. Datos de la temperatura mínima: anomalías, clima base y la proyección total bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5	65

Resumen Ejecutivo

Esta tesis busca contribuir a la generación de información relacionada con el tema de cambio climático y escenarios de cambio climático en México. Se dirige especialmente para personas que no son especialistas en el tema y que tienen incidencia en la toma de decisiones. Se plantea una metodología accesible, basada en datos públicos, confiables, robustos, y de fácil acceso, para ser utilizada en estudios específicos de impactos, vulnerabilidad y adaptación, tanto en México como en Centro América.

Se busca que los usuarios de esta información sean capaces de obtener y procesar sus datos a pesar de no ser expertos en el tema de escenarios de cambio climático, a través del uso de herramientas de software libre y que no requieren de un gran conocimiento de programación para poder ser utilizadas.

La limitante de la información proporcionada es que solo se cuenta con las variables de precipitación, temperatura máxima, temperatura media y temperatura mínima en nivel de superficie y solo sobre el continente. Esta información de los escenarios de cambio climático es la que sugiere el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

La metodología propuesta en este trabajo de tesis se aplicó a la Cuenca Hidrográfica del Río La Antigua en el estado de Veracruz.

En la metodología se muestra cómo hacer la descarga de datos, el análisis cartográfico y la generación de mapas, y las herramientas de análisis de datos. Ese capítulo se complementa con videos tutoriales que se realizaron para este trabajo, y los cuales se encuentran en los Anexos II y IV, para que cualquier persona sea capaz de replicar esta metodología, e incluso utilizarla en sus zonas de interés.

Esta metodología ha tenido resultados satisfactorios a la hora de enseñarla en algunos talleres piloto que se han realizado con alumnos e investigadores de diferentes áreas (geografía, biología, economía, por ejemplo) en diversas regiones del país.

En los resultados se realizó una comparación del comportamiento de los escenarios de cambio climático en la cuenca hidrográfica del río La Antigua, Veracruz. Se utilizaron y analizaron las variables de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, del clima base (1950-2000), y las proyecciones de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5, generadas a partir de los modelos globales CNRMCM5, GFDL-CM3, HADGEM2-ES y MPI-ESM-LR, en los horizontes temporales del futuro cercano (2015-2039), futuro intermedio (2045-2069) y futuro lejano (2075-2099). Se hace también una comparación de los resultados obtenidos por los diferentes modelos de circulación general, con la finalidad de mostrar proyecciones futuras probables que pueden variar entre los escenarios de cambio climático, y que no son pronósticos climáticos, por lo que se requiere enfrentar la incertidumbre asociada al cambio climático futuro. Por ello, se recomienda considerar más de un modelo de circulación general, y más de un escenario de

cambio climático, y más de un horizonte temporal (proyección a futuro), para realizar estudios específicos de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático.

En términos generales con las proyecciones de los escenarios de cambio climático se puede observar que en la cuenca del río La Antigua los efectos de la canícula se pronunciarán en toda su extensión, teniendo un efecto importante en la precipitación y por tanto en los sistemas productivos humanos y en los sistemas naturales. La temperatura tiende a incrementar, en algunos casos superando los 6°C, pero mantiene el comportamiento del ciclo anual semejante al clima base.

Asimismo, se muestra la información tanto del clima base, como del RCP 8.5 en el futuro lejano en los diferentes niveles de la cuenca. Esta información detallada por nivel de cuenca puede ser muy útil para estudios que se encarguen de analizar los servicios ecosistémicos que ofrece la cuenca, los impactos de las actividades humanas en cada uno de estos niveles y la vulnerabilidad de estas al cambio climático.

1 Introducción

La comunidad internacional ha reconocido que para lograr el desarrollo y la sostenibilidad del siglo XXI, es necesario atender los retos del cambio climático con un sentido de urgencia (PNUD, 2005 y 2010; OCDE, 2009; Banco Mundial, 2011; ONU-Hábitat, 2011b; Overpeck y Conde, 2019).

Debido a su gran importancia, en México el tema de cambio climático se ha abordado tanto en la comunidad científica, como en la sociedad y el gobierno. Sin embargo, se han detectado ambigüedades y errores de interpretación en el manejo de conceptos e información asociada a este tema (Salinas *et al.*, 2014; Estrada *et al.*, 2012).

Algunos de los obstáculos más frecuentes que se han observado al estudiar el cambio climático son los siguientes:

- El cambio climático suele considerarse un problema a largo plazo, cuyas consecuencias empezarán a manifestarse y a ser relevantes dentro de 30 o 50 años, razón por la cual se cree que no es necesario, ni recomendable, invertir en acciones a corto plazo encaminadas a hacer frente a este desafío.
- Falta de información a nivel local sobre las dimensiones del cambio climático y el modo con el que se vincula con los problemas actuales en esas áreas.
- La información disponible sobre el cambio climático no es fácilmente accesible para los actores locales, en particular en áreas urbanas pequeñas o medianas.
- La presencia de asimetrías entre los tiempos administrativos y político-electorales de los encargados de tomar decisiones a nivel local, los horizontes temporales de otros actores urbanos y las escalas temporales del cambio climático, han representado un obstáculo a la hora de considerar el cambio climático como un problema de desarrollo a corto plazo, y con consecuencias aún mayores a mediano y largo plazo.
- La dificultad de identificar cuándo, dónde y con qué intensidad se registrarán los impactos del cambio climático, así como lo difícil que es definir con exactitud si las consecuencias negativas de un fenómeno climático están asociadas, o no, al cambio climático.
- La confusión entre los conceptos básicos de clima, tiempo meteorológico, variabilidad climática, dinámica atmosférica, cambio climático, calentamiento global, entre otros.
- La complejidad de la información de las proyecciones de los escenarios de cambio climático que se obtienen de los modelos de circulación general, que requiere de un gran conocimiento técnico en el tema para poder regionalizarlos y evaluar su desempeño con respecto a los datos observados.
- La limitada interlocución e interacción entre los expertos de los escenarios de cambio climático y los usuarios de esta información.
- Uso de la información asociada a cambio climático de los tomadores de decisiones en la implementación de acciones.

Con base en lo anterior, es imprescindible la generación de conocimiento, información y herramientas para analizar la variabilidad y el cambio climático regional. No obstante, para poder obtener información certera sobre las proyecciones de cambio climático y su regionalización, se requiere incorporar datos confiables (observados y de modelos numéricos), conocimiento más profundo de la dinámica atmosférica local, así como de poder diferenciar la variabilidad y el cambio climático regional, además de validar su desempeño tanto por región como por variable (Salinas *et al.*, 2014; Díaz-Esteban *et al.* 2020).

La metodología propuesta en este trabajo de tesis se aplicó a la Cuenca Hidrográfica del Río La Antigua en el estado de Veracruz, por lo cual primero se hizo una descripción de la zona, tanto de las componentes biofísicas, como de los fenómenos hidrometeorológicos que ahí se presentan, y de las problemáticas causadas por la actividad humana en los diferentes niveles de la cuenca.

Esta tesis busca contribuir a la generación de información, para aportar al aumento del conocimiento relacionado con el tema de cambio climático y escenarios de cambio climático para personas que no son especialistas en el tema y que tienen incidencia en la toma de decisiones, a través de una metodología accesible, basada en datos públicos, confiables, robustos, y de fácil acceso. Su propósito es ser utilizada en estudios específicos de impactos, vulnerabilidad y adaptación, tanto en México como en Centro América. Se busca que los usuarios de esta información sean capaces de obtener y procesar sus datos a pesar de no ser expertos en el tema de escenarios de cambio climático, a través del uso de herramientas de software libre que no requieren de un gran conocimiento de programación para poder ser utilizadas.

El punto anterior es muy importante, ya que expertos de otras áreas, además de funcionarios públicos y tomadores de decisiones, que requieren poder realizar sus trabajos de análisis del cambio climático, ya sea en su municipio o sus estados, no tienen los elementos o los conocimientos técnicos necesarios para utilizar y aplicar la información de los escenarios de cambio climático, como es el caso de las pruebas de desempeño de los modelos de circulación general en sus regiones de interés. Por este motivo en este trabajo de tesis, se utilizan las bases de datos de los escenarios de cambio climático, que son el resultado de dos estudios (Cavazos *et al.*, 2013; Fernández Eguiarte *et al.*, 2015) que tenían como objetivo el contar con los escenarios de cambio climático para México, durante su desarrollo se realizaron pruebas estadísticas del desempeño de modelos del CMIP5 en diferentes regiones del país, así como contar con una base de datos de cobertura de México y Centro América de acceso libre. La limitante de esta información es que solo se cuenta con las variables de precipitación, temperatura máxima, temperatura media y temperatura mínima en nivel de superficie y solo sobre el continente. Esta información de los escenarios de cambio climático es la que sugiere el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, dicho instituto tiene la atribución a nivel nacional de generar la información oficial respecto al tema de escenarios de cambio climático, la información generada en estos estudios ha sido retomada en la

herramienta del Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (<https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/>).

Como parte del capítulo de antecedentes se abordan las generalidades del cambio climático y los escenarios de cambio climático y se describen algunos de los trabajos que se han desarrollado en México con relación a los escenarios de cambio climático.

En el capítulo donde se describen los diferentes métodos aplicados, se muestra la descarga de datos, el análisis cartográfico y la generación de mapas, y las herramientas de análisis de datos. Ese capítulo se complementa a través de videos tutoriales que se realizaron para este trabajo, y los cuales se encuentran en los Anexos II y IV, para que cualquier persona sea capaz de replicar esta metodología, e incluso utilizarla en sus zonas de interés.

Esta metodología ha tenido resultados satisfactorios a la hora de enseñarla en algunos talleres piloto que se han realizado con alumnos e investigadores de diferentes áreas (geografía, biología y economía, por ejemplo) en diversas regiones del país. Es importante resaltar que, a pesar de los perfiles variados de los participantes, les fue amigable la forma en que pudieron manipular la información de los escenarios, así como la interpretación de los resultados obtenidos al aplicarlos a sus estudios o trabajos de investigación.

El capítulo de resultados es importante para los objetivos de esta tesis, ya que ahí se hace una descripción de los datos obtenidos del área de estudio de las variables climáticas tanto históricas, como de sus valores proyectados a futuro por los escenarios de cambio climático. Se hace una comparación de los resultados obtenidos por los diferentes modelos de circulación general, con la finalidad de que las personas que puedan ver esta información se den cuenta que los resultados entre un modelo y otro pueden ser diferentes, y que es importante considerar este rango de resultados en sus estudios o en su toma de decisiones, ya que son proyecciones futuras probables, que pueden variar entre los diferentes escenarios de cambio climático, y que no son pronósticos climáticos. Por lo cual, a la hora de realizar estudios específicos de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, es recomendable considerar más de un modelo de circulación general, y más de un escenario de cambio climático. Este capítulo se complementa con los Anexos I y II, en donde se muestra la información tanto del clima base, como del RCP 8.5 en el futuro lejano, en los diferentes niveles de la cuenca. Esta información detallada por nivel de cuenca puede ser muy útil para estudios que se encarguen de analizar los servicios ecosistémicos que ofrece la cuenca, los impactos de las actividades humanas en cada uno de estos niveles y la vulnerabilidad de estas al cambio climático.

2 Objetivo

2.1 Objetivo general:

Realizar una comparación de las proyecciones de los escenarios de cambio climático en la cuenca hidrográfica del río La Antigua, Veracruz.

2.2 Objetivos particulares:

- Desarrollar una metodología accesible, basada en datos públicos y de fácil acceso, para generar escenarios regionales de cambio climático, que sean útiles en estudios específicos de impactos, vulnerabilidad y adaptación, tanto en México como en Centro América.
- Proponer un método de análisis y uso de los datos relacionados con los escenarios de cambio climático. Con el método propuesto, es posible contestar diversas preguntas relacionadas con el clima actual y el proyectado a futuro.

3 Antecedentes

3.1 Generalidades del clima, cambio climático y escenarios de cambio climático

Con la finalidad de comprender el tema de los escenarios de cambio climático, es necesario definir varios conceptos relacionados con el cambio climático.

El clima se define como el promedio del tiempo meteorológico (IPCC, 2014b) y en términos generales se puede definir como una descripción estadística del sistema climático (que incluye la atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera, biósfera, y sus complejas interacciones; IPCC, 2014) en un periodo de años, generalmente se utilizan 30 años o más, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Las magnitudes o normales climatológicas son casi siempre variables de superficie (por ejemplo, temperatura, precipitación o viento).

Cabe mencionar que el sistema climático se caracteriza por presentar inestabilidades inherentes, interacciones no-lineales entre sus componentes y presenta oscilaciones en torno a ciertos estados de equilibrio. Por tal razón, se describe como un sistema caótico y complejo, ya que los cambios ocurren prácticamente en todas las escalas espaciales y temporales (Bolin, 1994, citado en Conde, 2003).

La variabilidad climática (IPCC, 2013) se refiere a variaciones en el estado medio y otras estadísticas (como desviaciones estándar, ocurrencia de extremos, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más allá de la de los eventos climáticos individuales. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en el forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad externa).

En contraste, según el IPCC (2013b) cambio climático se refiere a un cambio en el estado del clima que puede identificarse (por ejemplo, mediante el uso de pruebas estadísticas) por cambios en la media y / o la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente décadas o más. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o forzamientos externos como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso del suelo. Es importante señalar que la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como: “un cambio de clima que se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a variabilidad climática natural observada durante períodos de tiempo comparables”. Por tanto, la CMNUCC hace una distinción entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales.

La variabilidad del sistema climático se puede expresar en términos de dos modos básicos (Peixoto, 1993, citado en Conde, 2003): variaciones “libres” y “forzadas”. Las primeras se presentan por inestabilidades y retroalimentaciones que dan lugar a interacciones no – lineales entre los componentes del sistema. Mientras que las variaciones “forzadas” se presentan como respuesta del sistema climático a los cambios por forzamientos externos, tanto terrestres como astronómicos. Algunos ejemplos de forzamientos astronómicos del clima serían los cambios en la intensidad de la radiación solar, la excentricidad de la órbita terrestre, la precesión del perihelio o la oblicuidad del eje terrestre. Por otro lado, los forzamientos terrestres pueden estar relacionados con los cambios en la composición atmosférica debido a factores como las erupciones volcánicas o a las emisiones antropogénicas (gases de efecto de invernadero), por ejemplo. Dentro de este rubro se encuentran ubicadas fundamentalmente las investigaciones relativas al cambio climático.

Las causas internas se relacionan con las complejas retroalimentaciones positivas o negativas en el mismo sistema climático, siendo la interacción entre el océano y la atmósfera una de las causas internas más relevantes. Estas interacciones son fundamentales cuando se analizan fenómenos como El Niño / Oscilación del Sur¹ (ENSO por sus siglas en inglés), o la Oscilación Decadal del Pacífico² (PDO por sus siglas en inglés) o aún oscilaciones de mayor periodo (e.g. Phillips *et al.*, 2014; Lippsett, 2000). Estos casos se asocian a fluctuaciones en el sistema climático que pueden ocurrir en escalas de tiempo de años o décadas y se refieren a variaciones en la circulación general de la atmósfera, a la de los océanos y a las condiciones presentes en la interfase entre ambos (Phillips *et al.*, 2014). Por ejemplo, la temperatura de la superficie del mar puede considerarse un “indicador” de las fluctuaciones de los dos componentes mencionados y de las condiciones de interacción entre ellos. No hay estudios concluyentes que nos indiquen cómo evolucionarán esos fenómenos en el contexto de cambio climático (Deser *et al.*, 2014). En el quinto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), se indica que el ENSO seguirá siendo el modo dominante de la variabilidad interanual en el Pacífico tropical, y es

1 El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) El término El Niño se refería inicialmente a una corriente de aguas cálidas que discurre periódicamente a lo largo de la costa de Ecuador y Perú, alterando la pesquería local. En la actualidad, designa un calentamiento del agua en toda la cuenca del Océano Pacífico tropical al este de la línea internacional de cambio de fecha. Este fenómeno oceánico está asociado a cierta fluctuación de un patrón global de presiones en la superficie tropical y subtropical que se denomina Oscilación del Sur. Este fenómeno atmósfera-océano acoplado, cuya escala de tiempo más habitual abarca entre dos y aproximadamente siete años, es conocido como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Su presencia suele determinarse en función de la anomalía de la diferencia de presión en superficie entre Tahití y Darwin, y de las temperaturas superficiales del mar en la parte central y oriental del Pacífico ecuatorial. Durante un episodio de ENOS, los vientos alisios habituales se debilitan, reduciendo el flujo ascendente de las aguas subsuperficiales en el Pacífico ecuatorial y alterando las corrientes oceánicas, con lo que aumenta la temperatura superficial del mar, lo cual debilita a su vez los vientos alisios. Este fenómeno afecta considerablemente a los patrones de viento, de la temperatura superficial del mar y de la precipitación en el Pacífico tropical. Sus efectos influyen en el clima de toda la región del Pacífico y de muchas otras partes del mundo mediante teleconexiones en toda la extensión del planeta. La fase fría de ENOS se denomina La Niña (IPCC, 2013b).

2 Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) Configuración y serie temporal de la primera función ortogonal empírica de temperatura superficial del mar en el Pacífico Norte al norte de los 20°N. La ODP ampliada de modo que abarque toda la cuenca del Pacífico se conoce como la Oscilación Interdecadal del Pacífico. Ambas oscilaciones, la decenal y la interdecadal, muestran una evolución temporal parecida (IPCC, 2013b).

posible que las intensidades de la variación de las precipitaciones asociadas a este evento podrían intensificarse, pero no se sabe con alta certeza cómo se desarrollará un evento ENSO espacialmente y en frecuencia en el siglo XXI.

Otra definición que es relevante para los trabajos relacionados con el tema de cambio climático es la de “tiempo medio” que se refiere a la descripción estadística del tiempo meteorológico en términos de la media y la variabilidad de ciertas condiciones atmosféricas durante periodos de varios decenios. Por lo tanto, aunado a ese “estado medio de las variables básicas”, la definición de clima incluye algunas medidas de sus fluctuaciones alrededor de la media, o variabilidad, caracterizada por los mayores momentos estadísticos como son su varianza, covarianza, o desviación estándar, que caracterizan a la estructura y comportamiento de la atmósfera para el mismo periodo promedio.

Las medias climáticas pueden variar de dos maneras (IPCC, 2018; Stern *et al.*, 1999): por un pequeño cambio observable en todo el periodo promediado (30, 50, 100 años), o bien, porque hay un cambio en el número de eventos extremos dentro de ese periodo, como por ejemplo en la variable de la temperatura (figura 3.1.1). Asimismo, no es improbable que se den ambos cambios: en las condiciones medias y en los extremos.

Cabe aclarar que un evento meteorológico extremo se define (IPCC, 2013b) como un evento que es *raro* en un lugar y época del año en particular. Las definiciones de raro varían, pero un evento meteorológico extremo normalmente sería tan raro o más raro que el percentil 10 o 90 de una función de densidad de probabilidad estimada a partir de observaciones. Por definición, las características de lo que se llama clima extremo pueden variar de un lugar a otro en un sentido absoluto. Cuando un patrón de clima extremo persiste durante algún tiempo, como una temporada, se puede clasificar como un evento climático extremo, especialmente si produce un promedio o total que es en sí mismo extremo (por ejemplo, sequía o lluvias intensas durante una temporada).

De este modo los eventos extremos contribuyen de manera importante a las variaciones de las condiciones medias climáticas, pero eventos extremos aislados alteran el estado del tiempo, no al clima. Por tanto, el cambio climático estará generalmente referido a la diferencia entre dos estados medios del clima, mientras que las anomalías climáticas (incluyendo a los eventos extremos) se refieren a la diferencia entre las condiciones climáticas específicas y el estado medio del clima (Henderson-Sellers, 1990). El conocimiento de cómo se modifican estas anomalías climáticas cuando se presenta un cambio en el estado medio del clima, es un problema de investigación fundamental en los estudios de cambio climático (IPCC, 2012; IPCC, 2018).

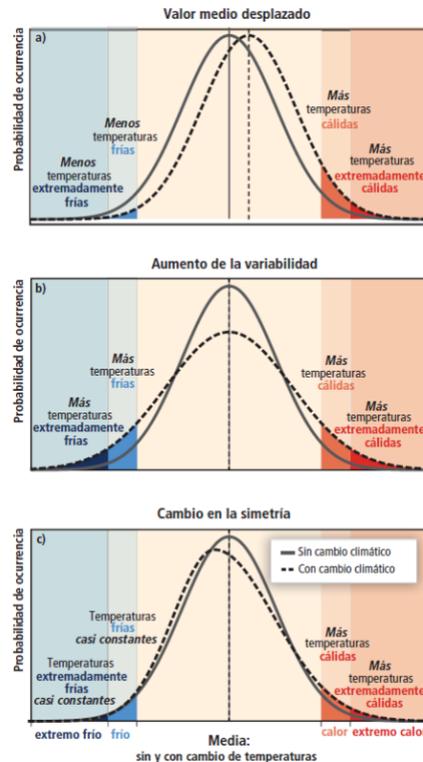


Figura 3.1.1: Efecto de los cambios en la distribución de temperaturas en los extremos. Diferentes cambios en las distribuciones de temperaturas entre el clima presente y futuro y sus efectos sobre los valores extremos de las distribuciones: a) efectos de un simple desplazamiento de toda la distribución hacia un clima más cálido; b) efectos de un aumento de la variabilidad de la temperatura sin cambio en la media, y c) efectos de cambio en la forma de la distribución, en este ejemplo un desplazamiento en la asimetría hacia la parte más cálida de la distribución. **Fuente: IPCC (2012).**

Existen límites fundamentales en relación con la precisión con que se pueden realizar proyecciones de las temperaturas anuales, debido a la naturaleza caótica del sistema climático. Asimismo, las proyecciones decenales son sensibles a las condiciones imperantes, como la temperatura de las profundidades del océano las cuales varían muy lentamente. En consecuencia, la predecibilidad de este comportamiento es limitada; el rango de variaciones de las variables clave está usualmente restringido por características globales del sistema. Los cambios generales proyectados como los cambios más detallados sólo pueden ser descritos de manera probabilística.

Los modelos climáticos se definen como (IPCC; 2013b) “una representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, sus interacciones y procesos de retroalimentación, y que explica algunas de sus propiedades conocidas”. Los modelos acoplados de circulación general atmósfera-océano (AOGCM) proporcionan una representación del sistema climático que se encuentra cerca o en el extremo más completo del espectro actualmente disponible. Existe una evolución hacia modelos más complejos con química y biología interactivas. Los modelos climáticos se aplican como una herramienta de investigación para estudiar y simular el clima y con fines

operativos, incluidas las predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales (IPCC; 2013b).

Así, los modelos de circulación general muestran gran habilidad para simular las condiciones promedio de temperatura para grandes regiones del planeta y a nivel global, en periodos anuales y decadales, aunque su habilidad es menor para el caso de la precipitación (Kirtman et al, 2013).

Con esos modelos se generan los escenarios de cambio climático, que se definen como (IPCC, 2013b) “Una representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas internamente coherentes que se ha construido para su uso explícito en la investigación de las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico, que a menudo sirve como entrada para los modelos de impacto. Las proyecciones climáticas a menudo sirven como materia prima para construir escenarios climáticos, pero los escenarios climáticos generalmente requieren información adicional, como el clima actual observado”. Estrictamente, un escenario de cambio climático es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual.

Cabe señalar que el proceso entre la teoría y la modelación del clima se ha convertido en sí mismo en un tema de investigación y debate, porque hay algunas incertidumbres no resueltas en la modelación del cambio climático, .Por ejemplo, las que se encuentran en la sensibilidad de equilibrio del sistema climático (esto es, el calentamiento global se incrementa cuando se duplica el CO₂), la amplificación de los cambios de temperatura en el Ártico, y las respuestas de la precipitación regional. En particular, existen grandes problemas para simular las condiciones en los trópicos, en donde el signo de los cambios en la nubosidad y la estructura espacial de las respuestas en la precipitación difieren de manera importante de un modelo al otro (e.g. Held, 2005, Stevens, 2013; Shepherd, 2014; Díaz-Esteban *et al.* 2020).

En el debate sobre cambio climático se ha incluido en la discusión de privilegiar los modelos simples, ante los modelos más complejos, los cuales se basan en gran medida en la utilización de mayores y más veloces recursos computacionales (e.g. Polvani *et al.*, 2017), y algunas aplicaciones basadas en lógica difusa se han impulsado para México (Gay *et al.*, 2014).

En el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, se definieron cuatro escenarios denominados trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) (figura 3.1.2), que muestran el forzamiento radiativo³ aproximado al año 2100 en relación con 1750. Lo que se refiere a la cantidad de radiación que se concentra en un metro cuadrado, esto es, 2.6 W/m², en el caso del escenario RCP2.6; 4.5 W/m², en el caso del escenario RCP4.5; 6.0 W/m², en el caso del

³ El forzamiento radiativo es el cambio en el flujo de energía causado por un impulsor y se calcula en la tropopausa o en la parte superior de la atmósfera (IPCC – WG1, 2013).

escenario RCP6.0, y 8.5 W/m², en el caso del escenario RCP8.5 (IPCC - WGI, 2013).

Los cuatro escenarios de RCP comprenden:

- un escenario de mitigación conducente a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6);
- dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0);
- y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5).

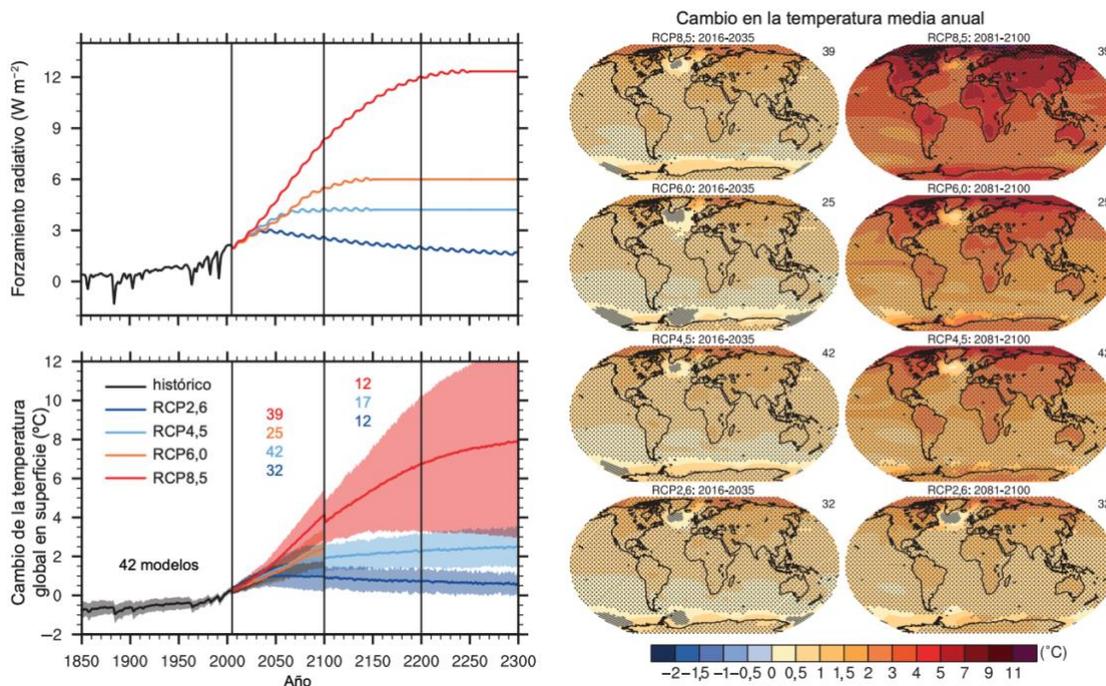


Figura 3.1.2: (Parte superior izquierda) Forzamiento radiativo medio global total para los cuatro escenarios de RCP basado en el modelo de balance energético del Modelo de evaluación del cambio climático causado por los GEI (MAGICC). Obsérvese que el forzamiento real simulado por los modelos de la CMIP5 difiere ligeramente de un modelo a otro. (Parte inferior izquierda) Series temporales de los valores medios anuales globales de las anomalías de la temperatura del aire en superficie (en relación con el período 1986-2005) obtenidas de experimentos de la CMIP5 determinados por la concentración. Las proyecciones se muestran para cada RCP para la media multimodelos (líneas continuas) y ± 1.64 desviaciones típicas (5% al 95%) para la distribución de modelos individuales (sombreado) de acuerdo con las medias anuales. El intervalo de 1.64 desviaciones típicas, basado en promedios de 20 años desde 2081 a 2100 en relación con el período 1986-2005, se interpreta como cambios probables para finales del siglo XXI. Las discontinuidades en 2100 se deben a cálculos basados en la ejecución de los modelos para fechas posteriores al siglo XXI cuyas cifras no tienen un sentido físico. Los números del mismo color que las líneas indican el número de modelos diferentes que contribuyen en los distintos períodos de tiempo. Mapas: promedio del ensamble multimodelos del cambio medio anual de la temperatura del aire en superficie (comparado con el período de base 1986-2005) para 2016-2035 y 2081-2100, para las RCP2.6; 4.5; 6.0 y 8.5. Las tramas sombreadas son regiones en las que la media multimodelos es inferior a una desviación típica de variabilidad interna. Las tramas punteadas son regiones en las que la media multimodelos es superior a 2 desviaciones típicas de variabilidad interna y donde, por lo menos, el

90% de los modelos concuerdan con el signo del cambio. El número de modelos de la CMIP5 utilizados se indica en la esquina superior derecha de cada mapa. **Fuente: IPCC - WGI (2013).**

De acuerdo con el IPCC – WGI (2013), “los escenarios RCP6,0 y RCP8,5, en 2100 el forzamiento radiativo no llegará a su máximo; en el RCP2,6, llega al máximo y disminuye; y en el RCP4,5 está estabilizado”.

De los escenarios RCP se pueden obtener datos de resolución espacial del cambio de uso del suelo y de emisiones sectoriales de contaminantes atmosféricos, y las concentraciones de gases de efecto invernadero y las emisiones antropógenas anuales hasta 2100. Los escenarios de RCP están basados en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos sencillos, modelos de la química atmosférica y modelos del ciclo global del carbono (IPCC - WGI, 2013).

3.2 Antecedentes sobre modelación climática y la regionalización para México de los escenarios de cambio climático globales.

Los primeros estudios sobre modelaciones climáticas para México fueron desarrollados en el Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM a partir del modelo Termodinámico del Clima, cuyo autor principal fue el Dr. Julián Adem Chaín (Adem y Garduño, 1982; Adem y Garduño, 1984).

Posteriormente, y en colaboración con el grupo de investigación del Dr. Adem, y bajo la dirección del Dr. Carlos Gay, se desarrolló el llamado Estudio de País: México (1994 – 1996) (Gay *et al.*, 1995, Gay *et al.*, 1996, Gay, 2000) en donde se diagnosticó sobre la vulnerabilidad de las zonas costeras.

De los trabajos más relevantes para México a nivel internacional son las comunicaciones nacionales reportadas ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Estos reportes nacionales han permitido desarrollar en México estudios multidisciplinarios sobre los posibles impactos del cambio climático en México, realizando descripciones del clima actual y las posibles proyecciones futuras, basadas en los escenarios de cambio climático del cuarto reporte (escenarios de emisiones, SRES por sus siglas en inglés) y del quinto reporte (trayectorias de concentración representativa, RCP por sus siglas en inglés) del IPCC.

Como parte de los proyectos para la elaboración de las comunicaciones nacionales, diversos especialistas en clima interactuaron con expertos en biodiversidad, recursos hídricos, asentamientos humanos, salud, entre otros; generando escenarios de cambio climático “a la medida”, dependiendo de en qué sectores y en qué regiones se deseaba realizar estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático (Conde *et al.*, 2008). México cuenta con seis comunicaciones nacionales siendo el único país en desarrollo en esa condición (<http://encuentronacional.cambioclimatico.gob.mx/Descargas/resumen/sexta.pdf>).

De los esfuerzos que más destacan a nivel estatal son los “Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático”. En estos trabajos se han desarrollado análisis regionalizados de los escenarios de Cambio Climático, para dar cumplimiento a la Ley General de Cambio Climático de México que establece que los estados deben contar con dichos programas (Art. 8), y las atribuciones del Sistema Nacional de Cambio Climático (SINACC), el cual está orientado a propiciar sinergias para enfrentar, de manera conjunta, la vulnerabilidad y los riesgos del país, y establecer las acciones prioritarias de mitigación y adaptación al cambio climático. Estos esfuerzos son relevantes, ya que han permitido incrementar el número de investigadores interesados en generar escenarios a escalas estatales, municipales o locales. De los trabajos más notables son los del estado de Baja California (<http://peac-bc.cicese.mx/>) y de Veracruz (https://thereddesk.org/sites/default/files/e2008a_pvccv2.pdf), cuyos grupos de investigadores realizaron los escenarios estatales con recursos humanos propios, y sirvieron como referente para otros estados.

Otros trabajos relevantes son los realizados por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) en donde se elaboraron estudios de escenarios de cambio climático en la zona del Monzón de Norte América (Cavazos y Arriaga-Ramirez, 2012; Torres-Alavez et al., 2014) y para todo México y Centro América (Colorado-Ruiz et al., 2018; Cavazos et al., 2019).

Actualmente, con la finalidad de obtener mejor información, se desarrollan experimentos en México utilizando la reducción de escala dinámica, con modelos regionales del clima, como *The Weather Research & Forecasting Model (WRF)*, *The Regional Climate Model System (RegCM4)*, *The Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX)*; p. ej., Cavazos et al., 2019), los cuales se complementan con los Modelos de Circulación General (MCG), permitiendo integrar información más detallada de la dinámica atmosférica local, con la ventaja de no requerir gran infraestructura de cómputo, pero con la limitante de la incertidumbre de los MCG más la propia de cada modelo regional.

Es importante resaltar que se debe hacer una evaluación de los modelos de circulación general que se piensan emplear, para ver su desempeño comparado con los datos históricos que se toman como base, esto para determinar que tan bien representan el clima de la zona que estamos interesados en estudiar. Algunos de los métodos están basados en pruebas estadísticas que permiten analizar y cuantificar, a través de parámetros, las diferencias entre los datos obtenidos de los modelos y los datos que se utilizan como base. Pruebas como el error cuadrático medio, desviación estándar, diagramas de Taylor, correlaciones, entre otras, se aplican a cada una de las variables. La variable precipitación, en latitudes tropicales, es en la cual existe mayor diferencia entre lo simulado por los modelos y los datos observados, esto debido a que los modelos tienen dificultad para simular la Zona de Convergencia Intertropical y los rangos máximos de precipitación diaria (Díaz-Esteban et al. 2020).

En particular, en este trabajo de investigación, se seleccionó la cuenca hidrográfica del río La Antigua, en la cual se han realizado una gran cantidad de estudios de diferentes disciplinas, los cuales han contribuido a caracterizar la zona; no obstante, existen pocos trabajos sobre escenarios de cambio climático a nivel de cuenca, ya que por lo general son más utilizados los límites administrativos como son los estados y municipios. Por ello, este estudio permite ampliar el conocimiento de la región sobre el tema de cambio climático y avanzar en estudios de impactos de cambio climático regionales, para incidir en la toma de decisiones.

Cuando se hacen estudios regionales es indispensable emplear más de un modelo de circulación general, más de un escenario de cambio climático, para así obtener diferentes proyecciones a futuro (Conde *et al.*, 2008). Esto permite visualizar rangos de cambio climático futuro, lo que subraya que estos escenarios son futuros posibles, y no pronósticos.

Lo anterior resulta fundamental en los estudios de vulnerabilidad regional ante el cambio climático. Si bien, esto puede complicar la toma de decisiones, permiten analizar trayectorias de acciones, y determinar qué sería posible hacer ante los posibles impactos proyectados. En algunos casos, las opciones pueden conducir a cambios en algunas prácticas. En otras ocasiones, se requerirían cambios más profundos, y tendrían que impulsarse innovaciones ante cambios en el clima extremadamente severos.

Así pues, la comparación entre las proyecciones resultantes de escenarios de cambio climático con diferentes trayectorias de concentración representativa, y modelos de circulación general, es fundamental para detectar rangos de cambios en las variables climáticas básicas, y con ello las posibles trayectorias y toma de decisiones a nivel regional. Los trabajos de comparación de escenarios aportan información relevante sobre los posibles riesgos futuros, y son instrumento para el análisis de las posibles acciones para enfrentarlos. Cabe señalar que puede haber umbrales críticos a partir de los cuales los sistemas bajo estudio (bosques, recursos hídricos, cultivos, por ejemplo) pueden rebasar niveles peligrosos y entrar a condiciones de cambios abruptos o irreversibles (Rockström *et al.*, 2009).

La determinación de los posibles umbrales críticos debe ser desarrollada por los especialistas en los diferentes sistemas bajo estudio (por ejemplo, Gosling, *et al.*, 2016; Prestele *et al.*, 2016). Así, esos especialistas generan sus escenarios futuros de los sistemas bajo estudio, y hacen el análisis de las incertidumbres asociadas a los impactos posibles proyectados.

Los escenarios de cambio climático regionales (o sub-nacionales) son el punto de partida de esos análisis. Cabe señalar que en la actualidad se están integrando los resultados a posibles escenarios socioeconómicos (llamados Shared Socioeconomic Pathways, SSP; O'Neill, *et al.*, 2014, por ejemplo) y escenarios de políticas climáticas compartidas (Shared Climate Policy Assumptions, Kebede, 2018).

4 Descripción del área de estudio

En esta sección se define el área de estudio con sus características geográficas y fisiográficas; también se describen los fenómenos meteorológicos y climáticos más relevantes en la región y algunas problemáticas ambientales derivadas de su impacto y la interacción con los cambios de uso de suelo.

La cuenca del río La Antigua se delimitó geográficamente con base en criterios hidrográficos entre los 19° 05' y 19° 34' latitud norte, y entre 96° 06' y 97° 16' longitud oeste. Tiene un área aproximada de 2,196 km² (Cuevas *et al.*, 2010), distribuida una porción en el Estado de Puebla y la mayor parte dentro del Estado de Veracruz (figura 4.1). El río La Antigua nace en la Sierra Madre Oriental, con el nombre de río Sumidero, al oriente de la localidad González Ortega, en el estado de Puebla, a una altitud de 3,345 msnm (Espinoza, 2009).

La cuenca del río La Antigua se localiza dentro de la Región Hidrológica X, de acuerdo con la regionalización de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 1998) y dentro de la Región Centro de Veracruz con base en la información de la Ley de Aguas del Estado de Veracruz (CSVA, 2005, Pérez *et al.*, 2008). Asimismo, la CONABIO la definió como una región hidrológica prioritaria (Arriaga *et al.*, 2000).



Figura 4.1: Localización del área de estudio, la cuenca hidrográfica del río La Antigua en los estados de Veracruz y Puebla, México.

Por la ubicación geográfica de la cuenca del río La Antigua, es afectada por fenómenos tropicales como son los ciclones tropicales, las ondas del este y los vientos alisios, entre los meses de mayo a noviembre, que es cuando se desplaza

más al norte la Zona de Convergencia Intertropical⁴ (ZCIT); los fenómenos extratropicales o de latitudes medias, como son los sistemas frontales y los nortes, se presentan principalmente de octubre hasta mayo, cuando la ZCIT se desplaza hacia el sur y la corriente de chorro de latitudes medias tiene una gran influencia arrastrando masas de aire frío y seco hacia el norte y centro de México (Acevedo y Luna 2006).

La cuenca posee una orografía compleja y pronunciada, debido a que se localiza entre la Sierra Madre Oriental, el Eje Neovolcánico y el Golfo de México, favoreciendo la lluvia convectiva, que es originada por el viento húmedo proveniente del Golfo de México, al momento de ser forzado a ascender, ocurre la condensación que a su vez provoca la formación de nubes y niebla (Ruiz-Barradas *et al.*, 2010).

Cabe resaltar que durante la temporada de lluvia se presenta el fenómeno de la canícula o sequía intraestival, lo que implica una disminución de la precipitación relacionada con una fuerte influencia del sistema de alta presión semipermanente del Atlántico Norte Subtropical (NASH, por sus siglas en inglés) (Ruiz-Barradas *et al.*, 2010; Díaz-Esteban *et al.* 2018).

Este tipo de fenómenos, así como el importante gradiente de temperatura que existe desde la zona costera en donde se encuentra la cuenca baja y el sistema montañoso en donde se encuentra la cuenca media y alta, favorecen que exista una gran diversidad de flora y fauna.

Los fenómenos relacionados con la variabilidad climática que tienen efectos sobre la cuenca son El Niño, La Niña, la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés), la Oscilación Multidecenal del Atlántico⁵ (AMO por sus siglas en inglés); estos tienen influencia sobre las condiciones de precipitación y temperatura en la cuenca, ya que tienen un alto impacto tanto en los fenómenos tropicales como en los fenómenos de latitudes medias (Ruiz-Barradas *et al.*, 2010; Díaz-Esteban *et al.* 2018).

Es importante mencionar que las actividades humanas y los cambios de uso de suelo han alterado las condiciones climáticas características de la cuenca, lo cual aumenta la vulnerabilidad a desastres relacionados con fenómenos hidrometeorológicos (Ruiz-Barradas *et al.*, 2010).

⁴ Zona de convergencia intertropical (ZCIT). Franja zonal ecuatorial de bajas presiones, fuerte convección e importantes precipitaciones, próxima al ecuador, en que los vientos alisios del noreste se encuentran con los del sureste. Esta franja tiene un desplazamiento meridional estacionalmente (IPCC, 2013).

⁵ Oscilación/variabilidad multidecenal atlántica (OMA/VMA). Fluctuación multidecenal (entre 65 y 75 años) de las temperaturas superficiales del mar del Atlántico Norte, que pasaron por fases más cálidas entre 1860 y 1880 y entre 1930 y 1960, y por fases más frías entre 1905 y 1925 y entre 1970 y 1990, a lo largo de un intervalo del orden de 0.4°C (IPCC, 2013.)

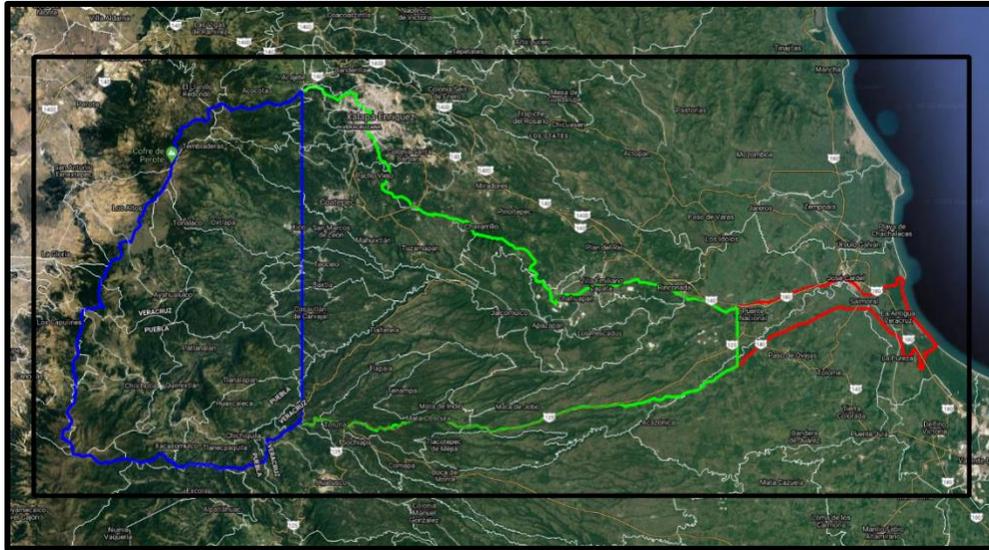


Figura 4.2 Localización de los municipios de los estados de Veracruz y Puebla en los diferentes niveles de la cuenca hidrográfica del río La Antigua, México. Azul – cuenca alta, verde – cuenca media, rojo – cuenca baja.

En la figura 4.2 se presenta la ubicación de la Cuenca del río la Antigua que con la finalidad de caracterizarla se dividió en Cuenca Alta, Cuenca Media y Cuenca Baja, y comprende los siguientes municipios de Veracruz y algunos de Puebla.

Cuenca alta	Cuenca media	Cuenca baja
1. Acajete	1. Apazapan	1. La Antigua
2. Ayahualulco	2. Banderilla	2. Puente Nacional
3. Calchualco	3. Comapa	3. Paso de Ovejas
4. Coatepec	4. Emiliano Zapata	4. Veracruz
5. Cosautlam de Carvajal	5. Huatusco	
6. Chichiquila (Puebla)	6. Jalcomulco	
7. Chilchotla (Puebla)	7. Tenampa	
8. Ixhuacán de los Reyes	8. Totutla	
9. Las Vigas	9. Tlacotepec de Mejía	
10. La Fragua (Puebla)	10. Tlaltetela	
11. Perote	11. Xalapa	
12. Quimixtlán (Puebla)		
13. San Andrés Tlalnehuayocan		
14. Tatatila		
15. Teocelo		
16. Xico		

Fuente: Gestión Integral de la Cuenca de La Antigua –Libro Blanco - Universidad Anáhuac Xalapa.

A lo largo de la cuenca de La Antigua, se encuentran diversos usos de suelo y vegetación (figura 4.3), y se puede identificar una distribución ordenada de los ecosistemas, la cual se encuentra asociada a los diferentes niveles de altitud que tiene la cuenca, desde zonas a nivel del mar, hasta zonas montañosas de más de 1000 metros de altitud con respecto al nivel del mar. Estos niveles altitudinales permiten comprender porque esta región presenta una gran variedad de climas en distancias cortas, .Este tema se abordará con más detalle en los siguientes capítulos.

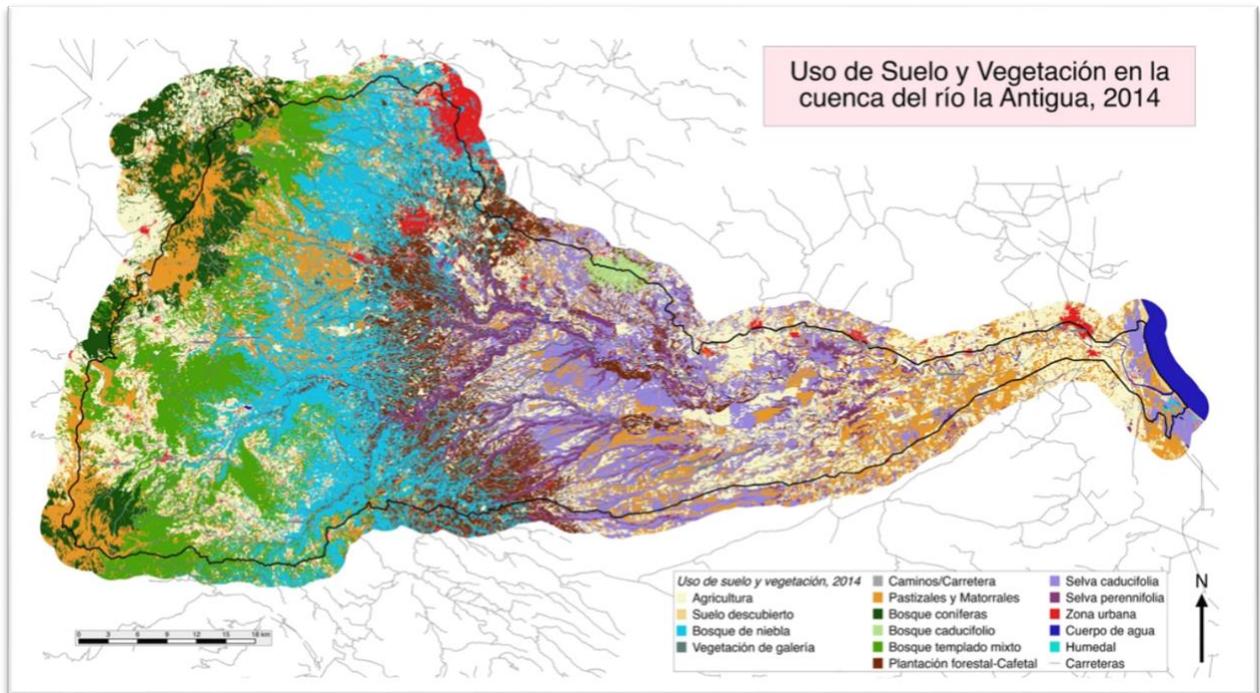


Figura 4.3 Mapa de Vegetación y Uso del Suelo de la cuenca del río Antigua (2014). “Taller del Comité Regional de Veracruz para construir los planes de manejo integral para las cuencas Jamapa y Antigua. 23 y 24 de junio del 2015”.

Por su diversidad, la cuenca del río La Antigua se clasifica como un área de “Alta Biodiversidad”, y una de las Áreas Prioritarias Terrestres del país (CONABIO, 2000). Existen al menos 25 especies de árboles y arbustos en toda la extensión de la cuenca, formando comunidades vegetales que van desde bosque templado-frío hasta selva baja.

Debido a los recursos naturales de la zona, así como el suelo fértil, esta región es reconocida culturalmente debido a que aporta un gran cantidad de servicios ambientales como la identidad regional, ya sea en zonas de paseo en la montaña (por ejemplo, los corredores de los parques nacionales Cofre de Perote-Pico de Orizaba; desarrollos ecoturísticos como Las Cañadas y Los Cocuyos); los productivos cafetales alrededor de Coatepec; o bien los cañaverales en las partes de planicie y las áreas de pesca y recreación acuática, incluyendo desarrollos de

turismo denominado “extremo”, que se presentan a todo lo largo del Río Santa María-Jalcomulco-La Antigua y sus corrientes tributarias (Ayuntamiento de Xalapa, 2005 en Román-Jiménez *et al.*, 2011).

Algunos de los principales problemas que se encuentran en la cuenca se enlistan en la tabla 4.1, la cual fue obtenida del “Taller del Comité Regional de Veracruz para construir los planes de manejo integral para las cuencas Jamapa y Antigua. 23 y 24 de junio del 2015”.

Tabla 4.1: Principales problemas, sus causas e impactos en la cuenca del río Antigua		
Problemas	Causas	Impactos
Zona alta		
1.- Pérdida de cubierta forestal	1.1 Tala ilegal 1.2 Crecimiento de la frontera agrícola 1.3 Crecimiento de asentamientos humanos	1.1 Incremento de escorrentía 1.2 Cambio de uso suelo 1.3 Pérdida de biodiversidad 1.4 Pérdida de suelos 1.5 Disminución de la capacidad de infiltración y de captación de agua.
2.- Contaminación del agua y suelo por uso de agroquímicos (Ayahualulco y cuenca media Pixquiac)	2.1 Mal manejo de cultivo de papa 2.2 Mayor presencia de enfermedades y plagas 2.3 Baja fertilidad del suelo 2.4 Agotamiento de suelos en la zona alta	2.1 Degradación en agua y suelos por agroquímicos 2.2 Daños a la salud humana 2.3 Daños a la flora y fauna
3.- Pérdida de suelo- Falta de cubierta forestal- (zona Puebla) erosión hídrica (zona media alta) por actividades agrícolas y pendientes	3.1 Pérdida de cubierta vegetal 3.2 Falta de prácticas de conservación de suelo y agua	3.1 Pérdida de capacidad productiva 3.2 Pérdida de biodiversidad 3.3 Azolvamiento 3.4 Pérdida de capacidad de recuperación
4.- Tala ilegal (Ixhuacán, Ayahualulco, Acajete y parte poblana)	4.1 Falta de fuentes de empleo 4.2 Escasa vigilancia 4.3 Organizaciones políticas ligadas a la tala. 4.4 Competencia desleal de la tala clandestina contra el aprovechamiento forestal	4.1 Pérdida de biodiversidad y conectividad 4.2 Perdida de suelo 4.3 Pérdida del germoplasma
5.- Problema sobre vertimiento de aguas negras (cuenca alta Huitzilapan)	5.1 No aplicación de normatividad 5.2 Falta de cultura para el manejo de aguas negras 5.3 Falta de mantenimiento de plantas de tratamiento 5.4 Promoción del drenaje como visión de modernidad/ desarrollo	5.1 Agua contaminada por drenajes urbanos 5.2 Enfermedades en la población 5.3 Incremento en costos de potabilización
6.- Mal manejo de actividades productivas/libre	6.1 Usos y costumbres 6.2 Debilitamiento de capacidad social para la toma de acuerdos	6.1 Incendios 6.2 Falta de regeneración del bosque

pastoreo (PNCP- Ayahualulco)	/pérdida del tejido social, irregularidad de la tenencia de la tierra	6.3 Destrucción de suelo
7.- Degradación o falta de recuperación de la cubierta forestal	7.1 Falta de oportunidades para el aprovechamiento y manejo de los recursos naturales	7.1 Percepción negativa de la reforestación debido a la regulación PNCP
8.- Mal manejo de actividades productivas/ agricultura	8.1 Resistencia-miedo al cambio para la adopción de nuevas prácticas 8.2 Población dedicada a la agricultura-adultos mayores 8.3 Escaso interés de jóvenes para realizar actividades agrícolas 8.4 Débil capacidad de asesoría técnica y seguimiento	8.1 Baja producción 8.2 Altos costos de producción 8.3 Pérdida de fertilidad 8.4 Aumento de contaminación-uso de agroquímicos
Zona media		
9.- Pérdida de cafetales de sombra	9.1 Especulación inmobiliaria en la zona conurbada Xalapa-Coatepec- Xico 9.2 Inestabilidad en el precio del café 9.3 Subsidios al cultivo de caña que promueven su expansión	9.1 Pérdida de cubierta forestal 9.2. Pérdida de biodiversidad asociada a cafetales de sombra 9.3 Pérdida de conectividad entre áreas forestales de Bosque Mesófilo de Montaña unidas por cafetales de sombra
10.- Pérdida de áreas forestadas con frutales (mangos, cítricos).	10.1 Sustitución de huertos frutales por cultivos anuales como caña y chayote 10.2 No reconocimiento de frutales como áreas forestales en la normatividad ambiental y agropecuaria	10.1 Pérdida de área arbolada, 10.2 Aumento de demanda de agua para uso agrícola 10.3 Aumento del uso de agroquímicos, contaminación de suelos
11.- Extracción de mármol y piedra caliza (Jalcomulco)	11.1 Se privilegia el valor comercial de predios sobre su valor ambiental. 11.2 Falta de aplicación de la normatividad que regula cambios de uso del suelo	11.1 Azolves 11.2 Pérdida de vegetación 11.3 Deterioro y pérdida de suelos, pérdida de fuentes de agua
12.- Crecimiento urbano descontrolado	12.1 Debilidad de las instituciones responsables de regular la tenencia de la tierra y ordenamiento del territorio 12.2 Alta especulación inmobiliaria	12.1 Cambio de uso del suelo 12.2 Aumento de demanda de agua y saneamiento. 12.3 No existe planeación para el manejo y uso de los recursos naturales 12.4 Asentamientos irregulares vulnerables
Zona baja		
13.- Uso ineficiente del agua en el riego de caña	13.1 Uso de tecnología y prácticas de cultivo obsoletas.	13.1 Arrastre de suelos por efecto del riego rodado

	<p>13.2 Resistencia del sector cañero a modernizarse; uso de prácticas de alta demanda de mano de obra (zafra en cañaveral quemado)</p> <p>13.3 Infraestructura de riego obsoleta (riego rodado)</p>	<p>13.2 Uso ineficiente del agua en el riego de caña</p> <p>13.3 Acidificación de suelo por uso de agroquímicos</p> <p>13.3 Contaminación de caudales por uso de agroquímicos</p> <p>13.4 Traslados de ríos para riego</p> <p>13.5 Disminución del caudal cuenca baja</p>
<p>14.- Descargas industriales de ingenios azucareros</p>	<p>14.1 Falta de aplicación de normatividad</p> <p>14.2 Intereses políticos y económicos impiden la modernización del sector azucarero</p>	<p>14.1 Concentración de contaminantes agroquímicos en cuerpos de agua</p> <p>14.2 Muerte de fauna acuática</p>
<p>15.- Azolves en cauces de ríos</p>	<p>15.1 Pérdida de cubierta forestal en cuenca alta y media</p> <p>15.2 Erosión de suelos y pérdida de capacidad de infiltración en cuenca alta y media.</p> <p>15.3 Malas prácticas ganaderas y agrícolas; sobre pastoreo en pendientes, surcos a favor de la pendiente</p>	<p>15.1 Disminución de caudales en ríos y cuerpos de agua en general</p> <p>15.2 Inundaciones y desbordamiento de ríos en zonas bajas</p> <p>15.3 Pérdida de vidas humanas, pérdida de cultivos, infraestructura y patrimonio familiar</p> <p>15.4 Aumento de costos de potabilización de agua</p> <p>15.5 Altos costos en obras de mantenimiento y dragado de cauces</p>
<p>16.- Desastres por avenidas extraordinarias de agua (Puente Nacional, Paso de Ovejas)</p>	<p>16.1 Eventos climáticos extraordinarios</p> <p>16.2 Pérdida de la cubierta forestal en las zonas altas y medias de la cuenca</p> <p>16.3 Asentamientos en zonas de riesgo por inundación</p>	<p>16.1 Pérdida de vidas humanas</p> <p>16.2 Daños a la infraestructura</p> <p>16.3 Reasentamiento, cambio de cauces de ríos</p>

5 Metodología

En esta sección se describe a detalle la metodología para extraer y procesar la información de los escenarios de cambio climático de una zona de interés en México, utilizando los escenarios de cambio climático regionalizados para México. En esta tesis se aplicó la metodología a la cuenca hidrográfica del río La Antigua, donde se muestra la obtención de los datos, el procesamiento de gráficas, tablas y mapas. La información que se obtiene es el insumo inicial en los estudios de impactos potenciales, que fundamentan el análisis de la vulnerabilidad al cambio climático.

El primer paso es seleccionar una climatología base, que represente el clima regional observado. La climatología base que se consideró en este estudio se obtuvo de los datos del *WorldClim-Global Climate Data (1950-2000)*, documentada por *Hijmans et al.*, (2005), la cual contempla el efecto topográfico conforme a la base *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, 2015)*, de 90 m de resolución espacial e interpola superficies climáticas a muy alta resolución espacial (926 m x 926 m).

Con respecto a las bases de datos de los escenarios de cambio climático, se sugiere utilizar la información generada por los estudios “*Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional*” (Cavazos et al., 2013) (ver Anexo III), y “*Actualización de los Escenarios de Cambio Climático para Estudios de Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación*” (Fernández Eguiarte et al., 2015; <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>). En ambos estudios se contó con el consenso y el trabajo de las instituciones mexicanas (CCA/UNAM, IMTA, CICESE) que por largo tiempo han sido fuente de información de los escenarios de cambio climático regionalizados para México, información fundamental para los estudios de impactos del cambio climático regional.

Cabe aclarar que existen más de veinte modelos de circulación que pueden emplearse. Por ello, se sugiere seleccionar aquéllos que han sido considerados en estudios previos, y que sean o fueron propuestos por los especialistas mexicanos por su capacidad de simular adecuadamente el clima de México o de alguna región en particular.

Los modelos de circulación general considerados en este trabajo tienen un buen desempeño representando el clima regional observado (Conde, 2003; Conde, 2008; Conde 2011), y han sido utilizados en diferentes estudios de análisis de impactos potenciales del cambio climático en diferentes sectores. Por ejemplo, estos modelos han sido utilizados en las Comunicaciones de México ante la CMNUCC, también son los modelos que se utilizan en el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (<https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/>). Lo que nos indica que los resultados de este trabajo pueden ser comparables con los resultados de dichos estudios.

Los escenarios de radiación o forzamientos radiativos (RCP, por sus siglas en inglés) que se consideraron en este trabajo son:

- RCP 4.5 (emisiones bajas)
- RCP 8.5 (emisiones altas)

En la tabla 5.1 se muestra un resumen de la información de los escenarios de cambio climático que se descargaron para este trabajo, se menciona el modelo, institución, país, así como los periodos, los escenarios de cambio climático y las variables.

Tabla 5.1 Información de escenarios de cambio climático utilizada.

Modelo de Circulación General (MCG)	Institución	País	Periodos	Escenario de Trayectorias de Concentraciones Representativas	Anomalías o Delta de Cambio
CNRMCM5	<i>Centre National de Recherchers Meteorologiques</i>	Francia	2015-2039 2045-2069 2075-2099	RCP 4.5	Precipitación (mm)
GFDL-CM3	<i>Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>	Estados Unidos			Temperatura máxima (°C)
HADGEM2-ES	<i>Met Office Hadley Center</i>	Reino Unido		RCP 8.5	Temperatura media (°C)
MPI-ESM-LR	<i>Max Plank Institute for Meteorology</i>	Alemania		Temperatura mínima (°C)	

Decidir la climatología base, y los escenarios de cambio climático que proyectarán el clima futuro, no es un tema menor, así que es fundamental definir estos dos aspectos antes de proceder a los estudios de impactos potenciales y de vulnerabilidad regional.

En el estudio “*Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional*” (Cavazos *et al.*, 2013), se incluye el método de ensamble ponderado REA (Reliability Ensemble Averaging), pero la base de datos para estas realizaciones ya no se encuentra disponibles en algún portal de acceso público, por lo que la información generada en este trabajo de tesis utilizando estos datos se muestra en el Anexo III. Existen estudios y artículos que han utilizado esta información de cambio climático de algunos sectores productivos de México (Arce *et al.*, 2019)

5.1 Descarga de datos

Para este estudio, la información regionalizada para México tanto del clima base como de los escenarios de cambio climático, se descargó del portal <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>, de UNIATMOS del Centro de Ciencias de la Atmósfera (ver el video AIV.3 que se encuentra en el Anexo IV).

Se descargaron los datos comprimidos (figura 5.1.1) de las variables temperatura máxima, temperatura media, temperatura mínima y precipitación del clima base, y se descargaron las anomalías o delta de cambio de esas mismas variables para los cuatro modelos.

Modelo: CNRMCM5 RCP: 4.5 Futuro cercano: 2015-2039		
Temperatura máxima (°C)	bases de datos	metadato Δ de cambio
Temperatura promedio (°C)	bases de datos	metadato Δ de cambio
Temperatura mínima (°C)	bases de datos	metadato Δ de cambio
Precipitación (mm)	bases de datos	metadato Δ de cambio
Porcentaje de cambio de precipitación (% de cambio)	bases de datos	metadato

Figura 5.1.1 Ejemplo de la descarga de datos del clima base, como de los escenarios de cambio climático. (Tomado de http://atlasclimatico.unam.mx/AECC_descargas/)

La carpeta comprimida incluye los datos en formato TXT y en formato TIF, estos datos pueden desplegarse espacialmente en algún sistema de información geográfica (SIG).

Para este estudio, se empleó el Shapefile⁶ de la cuenca hidrográfica del río La Antigua, obtenida del estudio “Cuenas Hidrográficas de México” (Cuevas, 2010). Esta capa se utilizó como capa de mascara o molde para extraer la información de los escenarios de cambio climático y el clima base en esta región en particular.

Fue conveniente tener más información espacial de la región de estudio. Por ejemplo, la información del Modelo Digital de Elevación del Terreno de INEGI (<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463630715>), también en formato Shapefile. Esta capa se utilizó para darle una mejor apariencia a los mapas elaborados, ya que ayuda a resaltar los detalles orográficos de la zona.

⁶ Shapefile: es un formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas. Las entidades geográficas de un shapefile se pueden representar por medio de puntos, líneas o polígonos (áreas).

(<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/shapefiles/what-is-a-shapefile.htm>)

5.2 Análisis cartográfico y generación de mapas

Como ya se mencionó, un sistema de información geográfica (SIG) es una herramienta necesaria para desplegar los cambios espaciales de la información generada.

En este estudio el análisis cartográfico se realizó utilizando la herramienta llamada QGIS (figura 5.2.1), el cual es un sistema de información geográfica libre y de código abierto (Ver el Anexo IV), la cual crea, edita, visualiza, analiza y publica información geoespacial en diferentes plataformas (Windows, Mac, Linux, BSD), y se puede descargar del siguiente portal <http://www.qgis.org/es/site/>

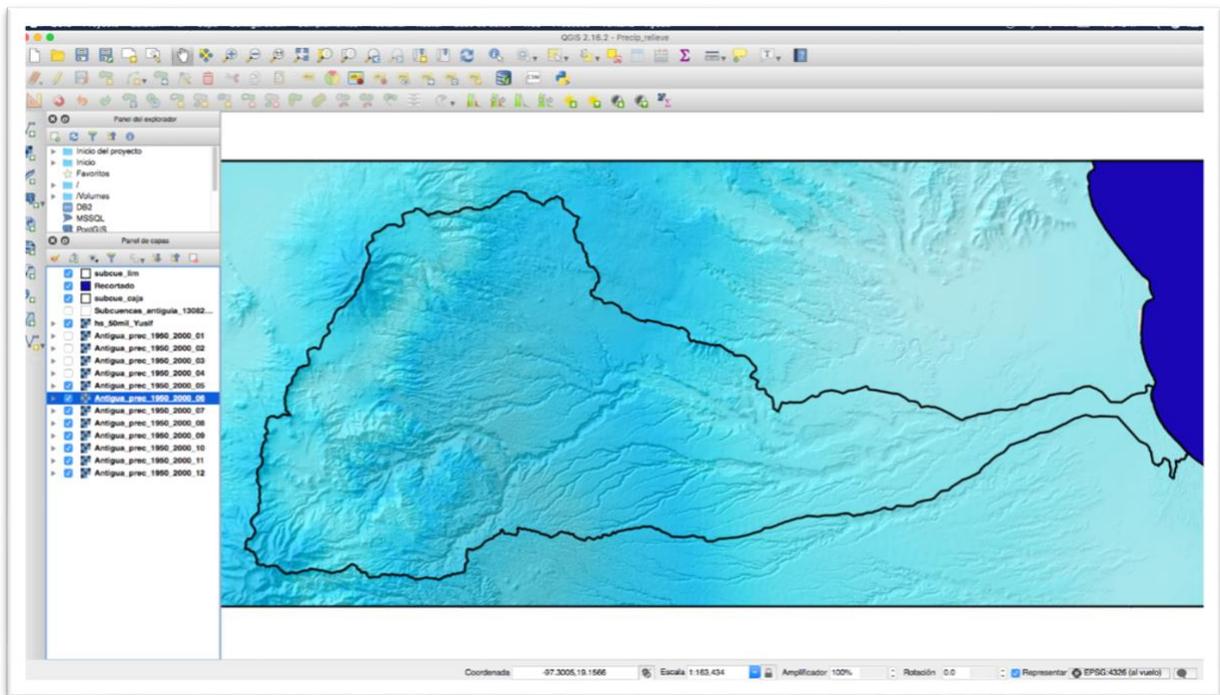


Figura 5.2.1 Ejemplo del procesamiento de la información cartográfica y la generación de mapas con la herramienta QGIS.

En este caso, para poder hacer una regionalización de la información, se pudo generar una caja de análisis la cual cubre la cuenca del río La Antigua y sus alrededores (figura 5.2.2). Esta caja sirvió para extraer la información tanto del clima base como de los escenarios de cambio climático.

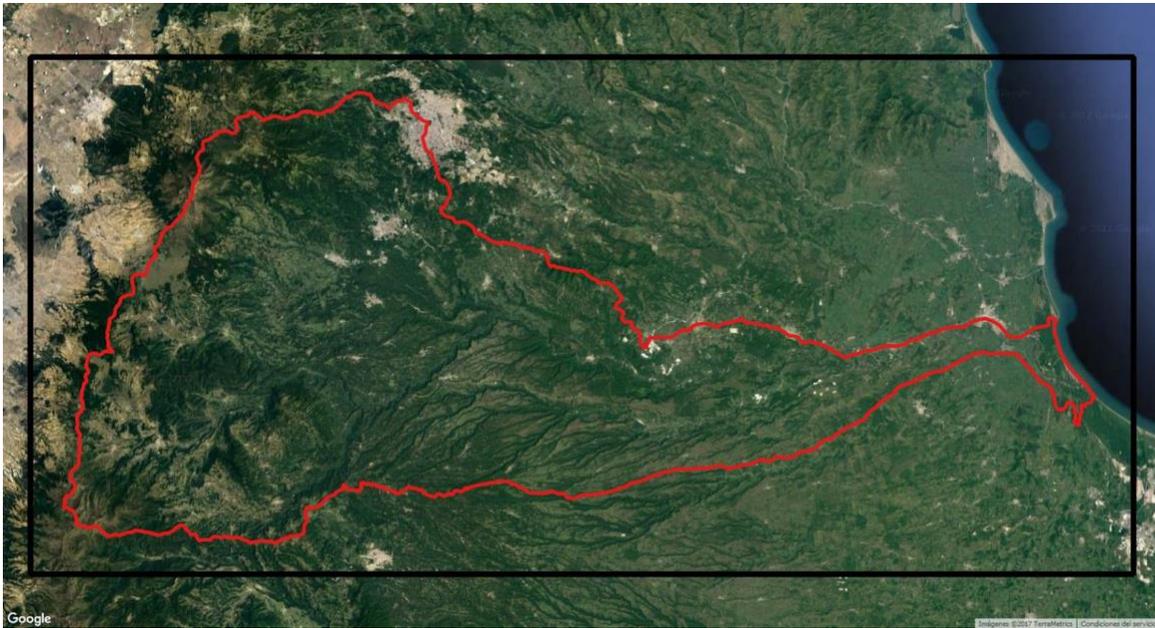


Figura 5.2.2: Caja de análisis de la región de la Cuenca del Río La Antigua y sus alrededores. La imagen de fondo corresponde a Google Satélite, la cual puede ser cargada en QGIS como un complemento.

Las anomalías o deltas de cambio de los escenarios climáticos se encuentran a resolución espacial de 0.5 x 0.5 grados de arco. Cuando se extrajo la información con la caja (figura 5.2.3), los puntos de malla que cubrían la cuenca fueron cinco, de estos puntos de malla se tomaron los datos para el procesamiento estadístico para realizar las tablas que se encuentran en los siguientes capítulos.

En este trabajo se consideró la división de los puntos de malla de los escenarios para poder realizar la división entre los diferentes niveles de cuenca, así que cuando en lo sucesivo se mencione cuenca alta, cuenca media y cuenca baja, se hace referencia a la división observada en la figura 5.2.4.

Con la división de nivel de cuenca se extrajo la información del clima base, el cual se encuentra a una resolución aproximada de 30 X 30 segundos de arco. Estos datos fueron la base que se utilizó con la herramienta de análisis de datos.

Para las proyecciones totales de los escenarios de cambio climático se utilizó la herramienta calculadora ráster de QGIS (ver video AIV.8 del Anexo IV), en la cual se realizó la siguiente operación: **Clima Base + Anomalía = Proyección Total**

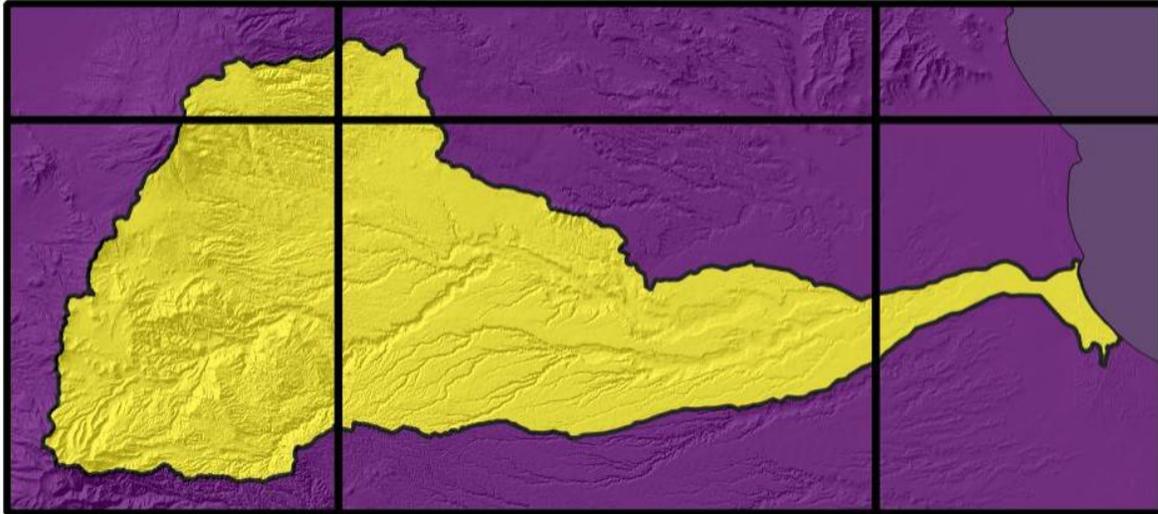


Figura 5.2.3: División de las anomalías o deltas de cambio de los escenarios de cambio climático a resolución espacial de 0.5 x 0.5 grados de arco.

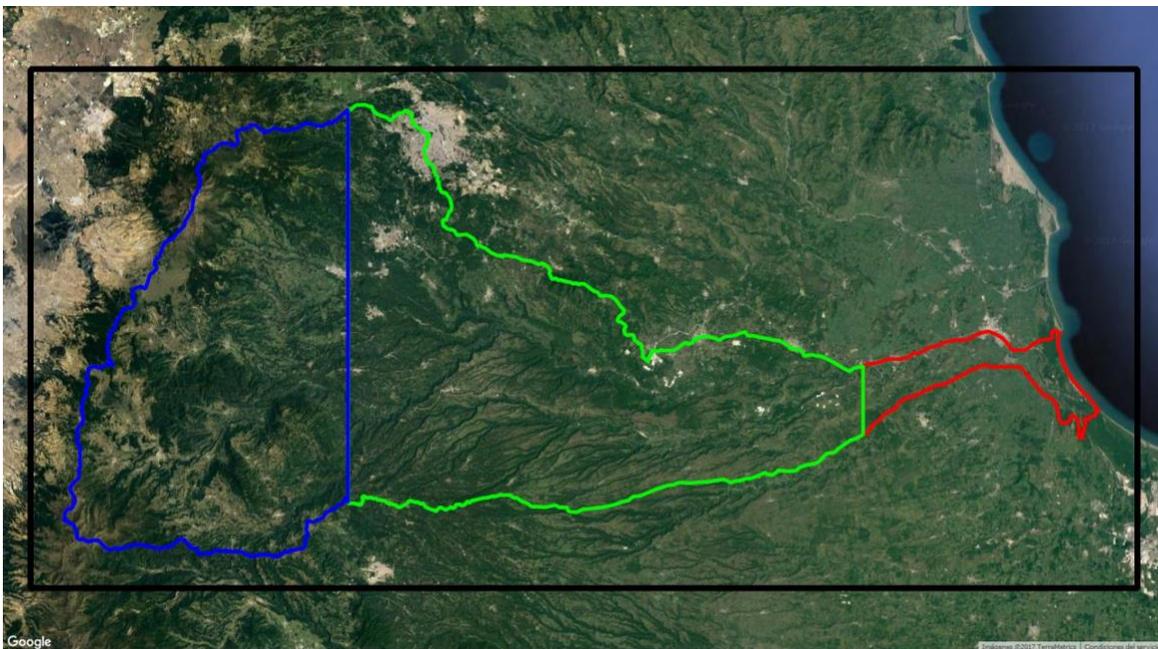


Figura 5.2.4: División de los niveles de cuenca con la referencia de las anomalías de los escenarios de cambio climático. La línea azul delimita a la cuenca alta, la verde a la cuenca media y la roja a la cuenca baja.

Ese proceso se siguió para generar todas las capas de proyección de cada uno de los modelos, con los diferentes escenarios de cambio climático y en los horizontes temporales definidos.

Los mapas de las capas también se obtuvieron con QGIS. Se realizó la composición cartográfica utilizando los *Shapefiles* de la caja, la cuenca, los niveles de cuenca,

así como el ráster del modelo de elevación del terreno y los rásters del clima base y los escenarios de cambio climático.

Si se sobreponen las divisiones de la cuenca sobre el mapa de uso de suelo y vegetación, como se muestra en la figura 5.2.5, se puede observar que existe una gran consistencia entre las divisiones de vegetación y las divisiones de niveles de cuenca, lo que puede resultar muy relevante para aquellos usuarios que hacen los estudios de los impactos potenciales de cambio climático en la biodiversidad de la región.

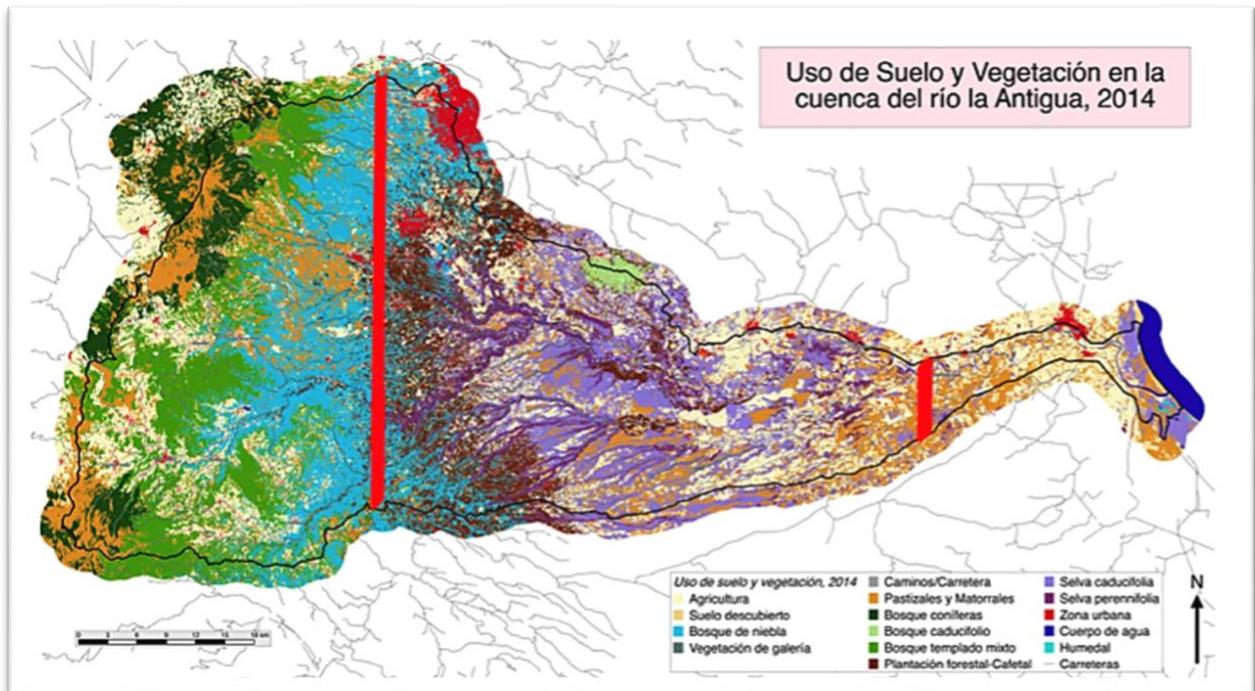


Figura 5.2.5: División de los niveles de cuenca con referencia al mapa de uso de suelo y vegetación.

5.3 Herramienta de análisis de datos

Las herramientas que se utilizaron para el manejo y análisis de datos fueron Excel de Microsoft y QlikView.

El programa *QlikView* es un software de *business intelligence* que permite manejar base de datos a través de gráficos y tablas interactivas. El único inconveniente con la versión gratuita es que las aplicaciones sólo se pueden ver en el equipo de cómputo que se genera. El software se puede descargar de su sitio web <http://www.qlik.com/us/>.

En Excel se generó la base de datos maestra que contiene la información del clima base, así como las anomalías de los escenarios de cambio climático, acomodado de tal modo que pueda ser fácilmente manejable con el programa QlikView, como se muestra en la figura 5.3.1

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Variable	Año	Mes	Llave	Nivel de Cuenca	Climatología	Escenario	Clima & Escenario
2	Precipitación (mm)	2015-2039	Enero	457	Cuenca Alta		RCP 4.5	RCP 4.5
3	Precipitación (mm)	2015-2039	Enero	458	Cuenca Media		RCP 4.5	RCP 4.5
4	Precipitación (mm)	2015-2039	Enero	459	Cuenca Baja		RCP 4.5	RCP 4.5
5	Precipitación (mm)	2015-2039	Enero	485	Cuenca Alta		RCP 4.5	RCP 4.5
6	Precipitación (mm)	2015-2039	Enero	486	Cuenca Media		RCP 4.5	RCP 4.5
7	Precipitación (mm)	2015-2039	Febrero	457	Cuenca Alta		RCP 4.5	RCP 4.5
8	Precipitación (mm)	2015-2039	Febrero	458	Cuenca Media		RCP 4.5	RCP 4.5
9	Precipitación (mm)	2015-2039	Febrero	459	Cuenca Baja		RCP 4.5	RCP 4.5
10	Precipitación (mm)	2015-2039	Febrero	485	Cuenca Alta		RCP 4.5	RCP 4.5
11	Precipitación (mm)	2015-2039	Febrero	486	Cuenca Media		RCP 4.5	RCP 4.5
12	Precipitación (mm)	2015-2039	Marzo	457	Cuenca Alta		RCP 4.5	RCP 4.5
13	Precipitación (mm)	2015-2039	Marzo	458	Cuenca Media		RCP 4.5	RCP 4.5
14	Precipitación (mm)	2015-2039	Marzo	459	Cuenca Baja		RCP 4.5	RCP 4.5
15	Precipitación (mm)	2015-2039	Marzo	485	Cuenca Alta		RCP 4.5	RCP 4.5
16	Precipitación (mm)	2015-2039	Marzo	486	Cuenca Media		RCP 4.5	RCP 4.5
17	Precipitación (mm)	2015-2039	Abril	457	Cuenca Alta		RCP 4.5	RCP 4.5
18	Precipitación (mm)	2015-2039	Abril	458	Cuenca Media		RCP 4.5	RCP 4.5
19	Precipitación (mm)	2015-2039	Abril	459	Cuenca Baja		RCP 4.5	RCP 4.5
20	Precipitación (mm)	2015-2039	Abril	485	Cuenca Alta		RCP 4.5	RCP 4.5
21	Precipitación (mm)	2015-2039	Abril	486	Cuenca Media		RCP 4.5	RCP 4.5
22	Precipitación (mm)	2015-2039	Mayo	457	Cuenca Alta		RCP 4.5	RCP 4.5
23	Precipitación (mm)	2015-2039	Mayo	458	Cuenca Media		RCP 4.5	RCP 4.5
24	Precipitación (mm)	2015-2039	Mayo	459	Cuenca Baja		RCP 4.5	RCP 4.5
25	Precipitación (mm)	2015-2039	Mayo	485	Cuenca Alta		RCP 4.5	RCP 4.5
26	Precipitación (mm)	2015-2039	Mayo	486	Cuenca Media		RCP 4.5	RCP 4.5
27	Precipitación (mm)	2015-2039	Junio	457	Cuenca Alta		RCP 4.5	RCP 4.5
28	Precipitación (mm)	2015-2039	Junio	458	Cuenca Media		RCP 4.5	RCP 4.5
29	Precipitación (mm)	2015-2039	Junio	459	Cuenca Baja		RCP 4.5	RCP 4.5
30	Precipitación (mm)	2015-2039	Junio	485	Cuenca Alta		RCP 4.5	RCP 4.5
31	Precipitación (mm)	2015-2039	Junio	486	Cuenca Media		RCP 4.5	RCP 4.5
32	Precipitación (mm)	2015-2039	Julio	457	Cuenca Alta		RCP 4.5	RCP 4.5
33	Precipitación (mm)	2015-2039	Julio	458	Cuenca Media		RCP 4.5	RCP 4.5
34	Precipitación (mm)	2015-2039	Julio	459	Cuenca Baja		RCP 4.5	RCP 4.5
35	Precipitación (mm)	2015-2039	Julio	485	Cuenca Alta		RCP 4.5	RCP 4.5
36	Precipitación (mm)	2015-2039	Julio	486	Cuenca Media		RCP 4.5	RCP 4.5

Figura 5.3.1: Ejemplo de la tabla maestra que contiene el compendio de la base de datos del clima base y los escenarios de cambio climático de la cuenca del río La Antigua.

Con el programa *QlikView* se realizó una aplicación interactiva (ver el Anexo II), que despliega los datos de la tabla maestra en forma de gráficos y tablas específicas, como se muestra en la figura 5.3.2

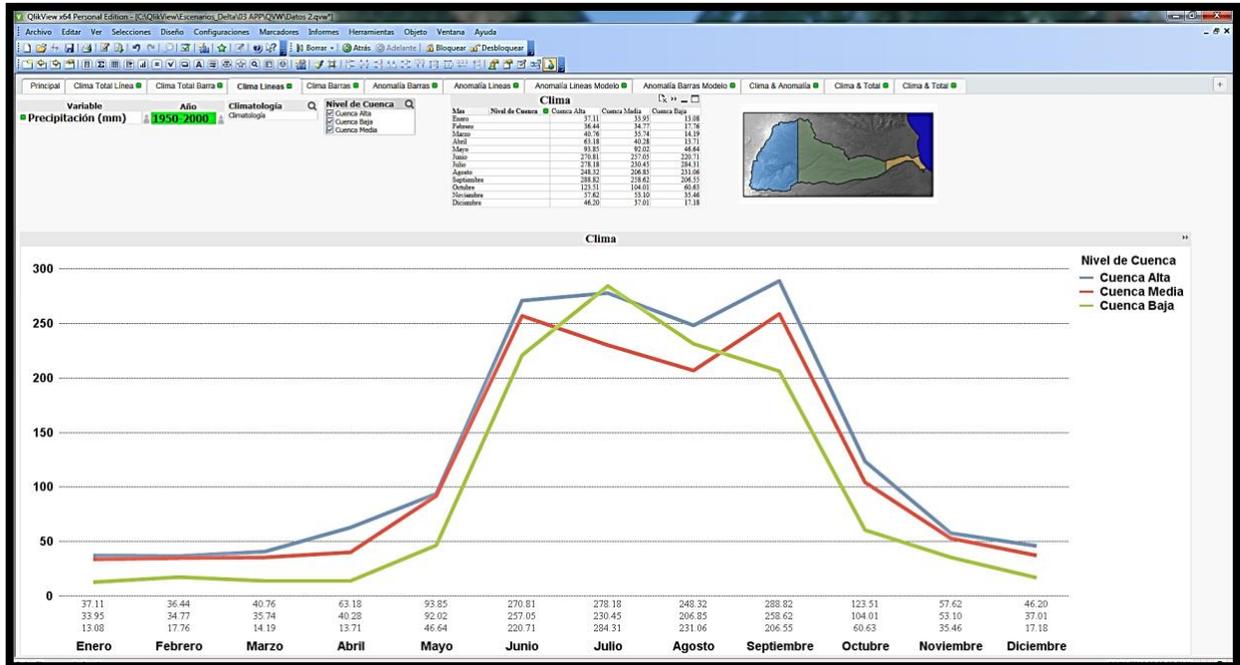


Figura 5.3.2: Ejemplo de la aplicación generada en QlikView, en donde se observa la precipitación del clima base en los diferentes niveles de la cuenca, así como una tabla en donde se presentan los datos.

El uso de esta herramienta facilita el análisis de los datos, así como la generación de tablas y gráficos que se presentan en los siguientes capítulos.

Con datos ya procesados en QlikView, se generaron tablas y gráficos en Excel que muestran los resultados por variable de cada uno de los niveles de la cuenca, así como de las anomalías y proyecciones totales con el clima base, como se observa en la figura 5.3.3.

El diagrama de la metodología propuesta en este trabajo de tesis, tiene por objetivo resumir de manera simplificada los pasos seguidos para el procesamiento de la información del clima base y los escenarios de cambio climático regionalizados para México. En los Anexos II y IV se proporciona información más detallada sobre los métodos utilizados tanto en QlikView, como en Qgis.

Precipitación (mm)										
Mes	Anomalía RCP 8.5 (2075-2099)				Clima	Proyección Total RCP 8.5 (2075-2099)				
	CNRMCM5	MPI-ESM-LR	HADGEM2-ES	GFDL-CM3		CNRMCM5	MPI-ESM-LR	HADGEM2-ES	GFDL-CM3	
Enero	-7.41	-12.56	-9.40	7.83	28.04	20.64	15.49	18.64	35.87	
Febrero	-14.12	-11.96	-7.75	7.09	29.66	15.54	17.70	21.90	36.75	
Marzo	-15.01	-26.45	2.18	-12.21	30.23	15.22	3.78	32.41	18.02	
Abril	-15.01	-26.45	2.18	-12.21	39.06	24.05	12.61	41.24	26.85	
Mayo	16.73	-25.34	-5.49	-21.17	77.50	94.23	52.16	72.02	56.33	
Junio	-1.09	19.82	-5.66	-8.80	249.52	248.44	269.35	243.86	240.73	
Julio	-14.88	-14.67	-14.72	-19.21	264.32	249.44	249.64	249.59	245.11	
Agosto	-31.38	-38.69	-62.49	-39.14	228.74	197.37	190.06	166.26	189.61	
Septiembre	-1.98	-3.43	-20.97	-48.51	251.33	249.35	247.90	230.36	202.82	
Octubre	13.07	28.45	-29.76	26.48	96.05	109.12	124.50	66.29	122.53	
Noviembre	-7.54	15.15	94.22	24.36	48.73	41.19	63.88	142.95	73.09	
Diciembre	-11.18	10.27	20.70	31.52	33.46	22.28	43.73	54.17	64.98	

Gráfico y tabla anomalía de precipitación (mm) en la Cuenca de La Antigua

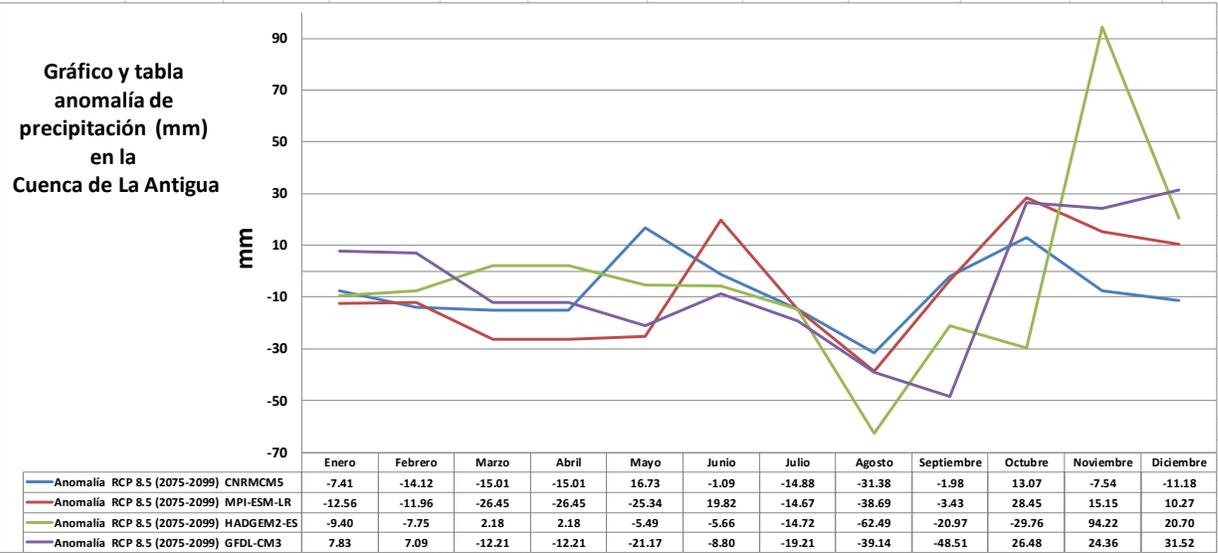


Gráfico y tabla Precipitación total (mm) en la Cuenca de La Antigua

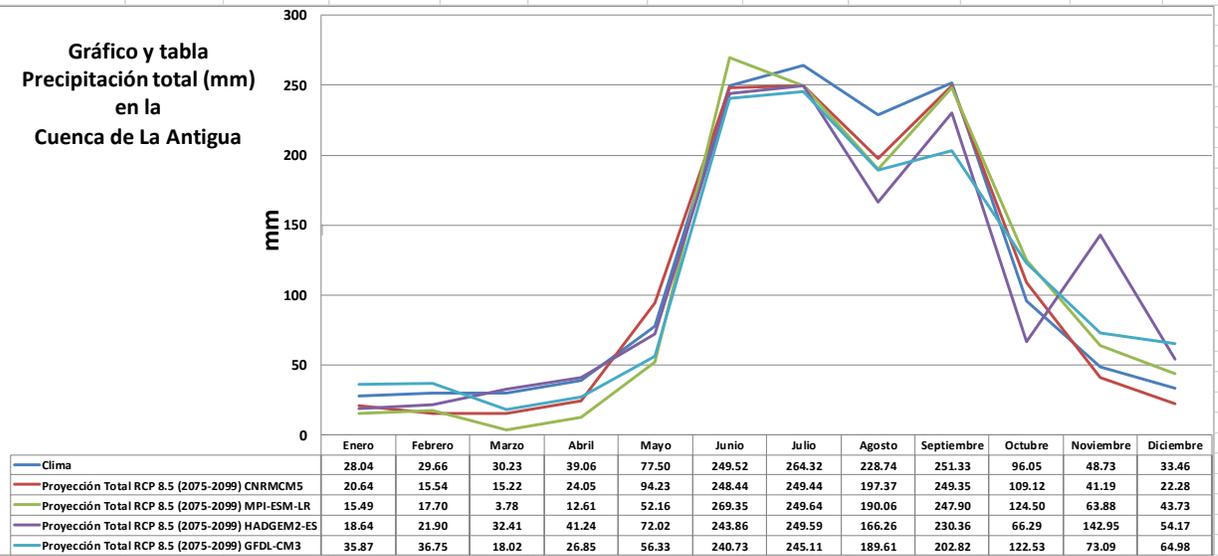
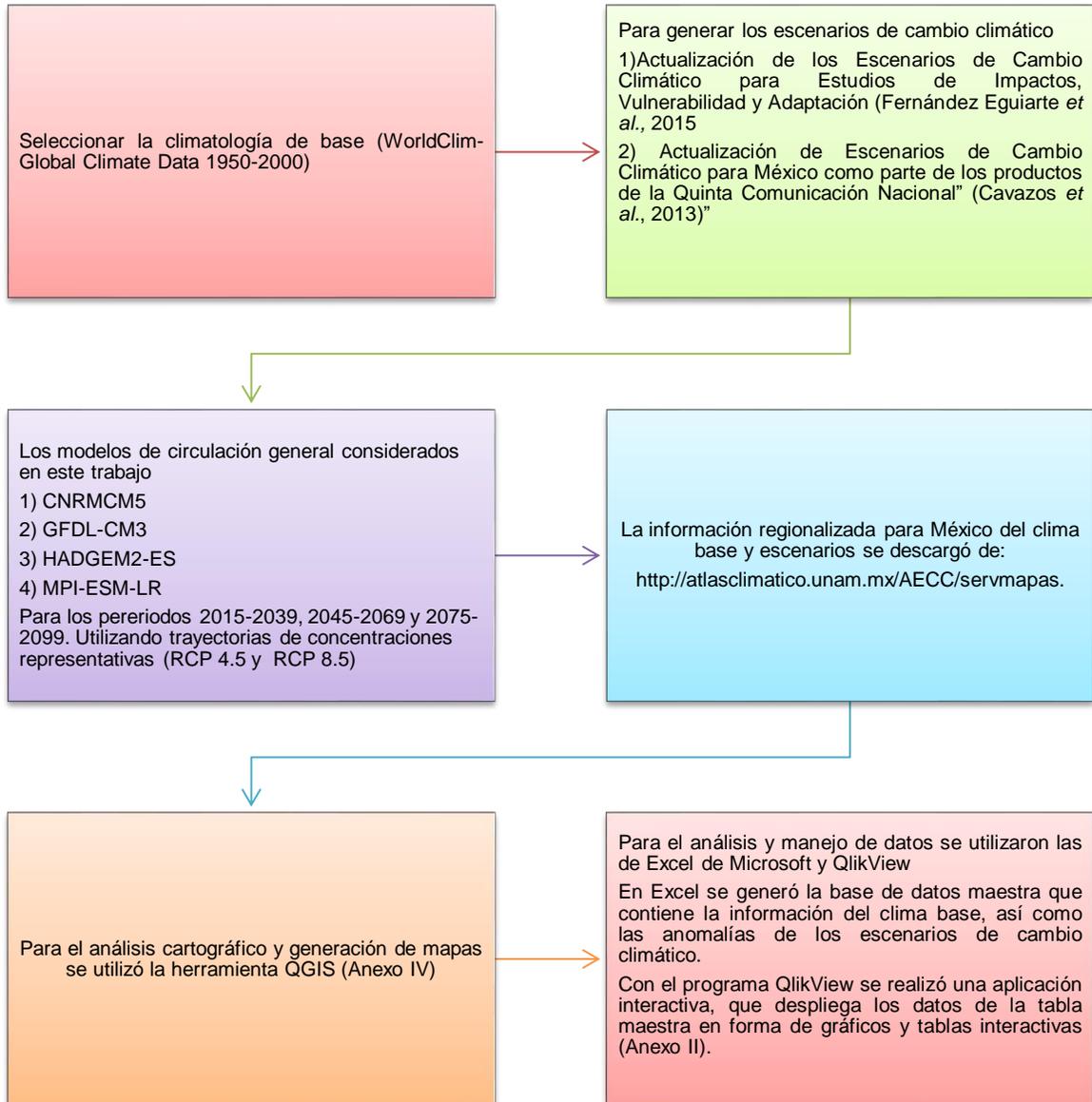


Figura 5.3.3: Ejemplo de las tablas y gráficos generados en Excel. En esta imagen se observa las anomalías y proyecciones totales con el clima base de la precipitación en toda la cuenca del río La Antigua.

Diagrama de la metodología propuesta para el procesamiento de la información.



6 Resultados

En capítulo de resultados, se analiza a detalle el comportamiento de la temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación en la cuenca del río La Antigua, tanto el clima base (1950-2000), como en los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5, que incluye las anomalías y las proyecciones totales en el futuro cercano (2015-2039), intermedio (2045-2069) y lejano (2075-2099).

Se hace un análisis especial sobre el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), ya que en este periodo y bajo este escenario es donde se presentan los mayores cambios con respecto al clima base. En esa sección se analiza el comportamiento en la cuenca completa y en el Anexo I se incluye la información detallada por nivel de cuenca (cuenca alta, cuenca media y cuenca baja).

6.1 Clima Base

En esta sección se analiza a detalle el comportamiento de las variables climáticas de temperatura y precipitación sobre la cuenca del río La Antigua. En la figura 6.1.1 se muestra el ciclo anual de la precipitación y de las temperaturas máxima, media y mínima del periodo 1950 al 2000. Se observa que los meses de invierno son los más fríos y secos, mientras que en la primavera comienzan las lluvias ligeras y la temperatura también se incrementa. En el verano se intensifican las lluvias hasta llegar a un máximo en el mes de julio mientras que se presenta una ligera disminución de la temperatura (un ligero enfriamiento). En el mes de agosto se registra un mínimo de precipitación y un ligero incremento de la temperatura; en septiembre vuelve a incrementar la precipitación y la temperatura vuelve a disminuir. En los meses de octubre y noviembre la precipitación disminuye de forma significativa y la temperatura continúa descendiendo.

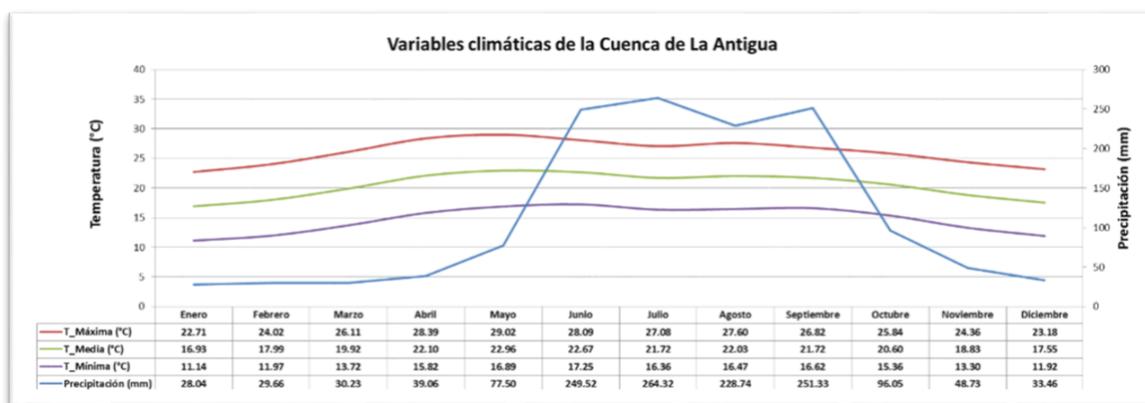


Figura 6.1.1 Gráfica de las variables climáticas promedio de la cuenca de La Antigua.

El análisis anterior corresponde al comportamiento promedio de estas variables en toda la cuenca, lo cual nos muestra que en esa cuenca se presenta el fenómeno de

la canícula o sequía intraestival (Magaña *et al.*, 1999), y que ésta tiene un impacto en el comportamiento de las temperaturas. Posteriormente, se hace un análisis del comportamiento de estas variables en los distintos niveles de cuenca y se observan diferencias importantes entre un nivel y otro.

6.1.1 Precipitación

Esta sección se enfoca en particular al comportamiento de la precipitación del clima base. Como se pudo observar en la sección anterior los meses más secos son diciembre, enero y febrero, en los cuales la precipitación mínima fue 10 mm. Los meses en los que se registra mayor precipitación son junio, julio, agosto y septiembre, la precipitación máxima fue de 486 mm. En la Tabla 6.1.1.1 se muestra la precipitación máxima y mínima mes por mes registrada en la región de la cuenca.

Tabla 6.1.1.1: Precipitación (mm/mes), valor máximo y mínimo del clima base registrados en la región de la cuenca La Antigua.

Datos Antigua - Climatología		
Mes	Precipitación	
	Mínima	Máxima
Enero	10	58
Febrero	13	57
Marzo	12	73
Abril	13	106
Mayo	44	149
Junio	112	476
Julio	104	486
Agosto	98	444
Septiembre	138	482
Octubre	44	217
Noviembre	17	92
Diciembre	12	74
Extremos	10	486

Con la tabla 6.1.1.1 se puede observar una diferencia importante en los valores máximos y mínimos de la precipitación en toda la región de la cuenca. La distribución de la precipitación en la cuenca varía mes con mes, aunque siempre mantienesen las precipitaciones más altas en la zona montañosa de la cuenca alta, estos detalles se pueden apreciar claramente en la figura 6.1.1.1, en donde se muestran los valores de precipitación mensual en las diferentes regiones.

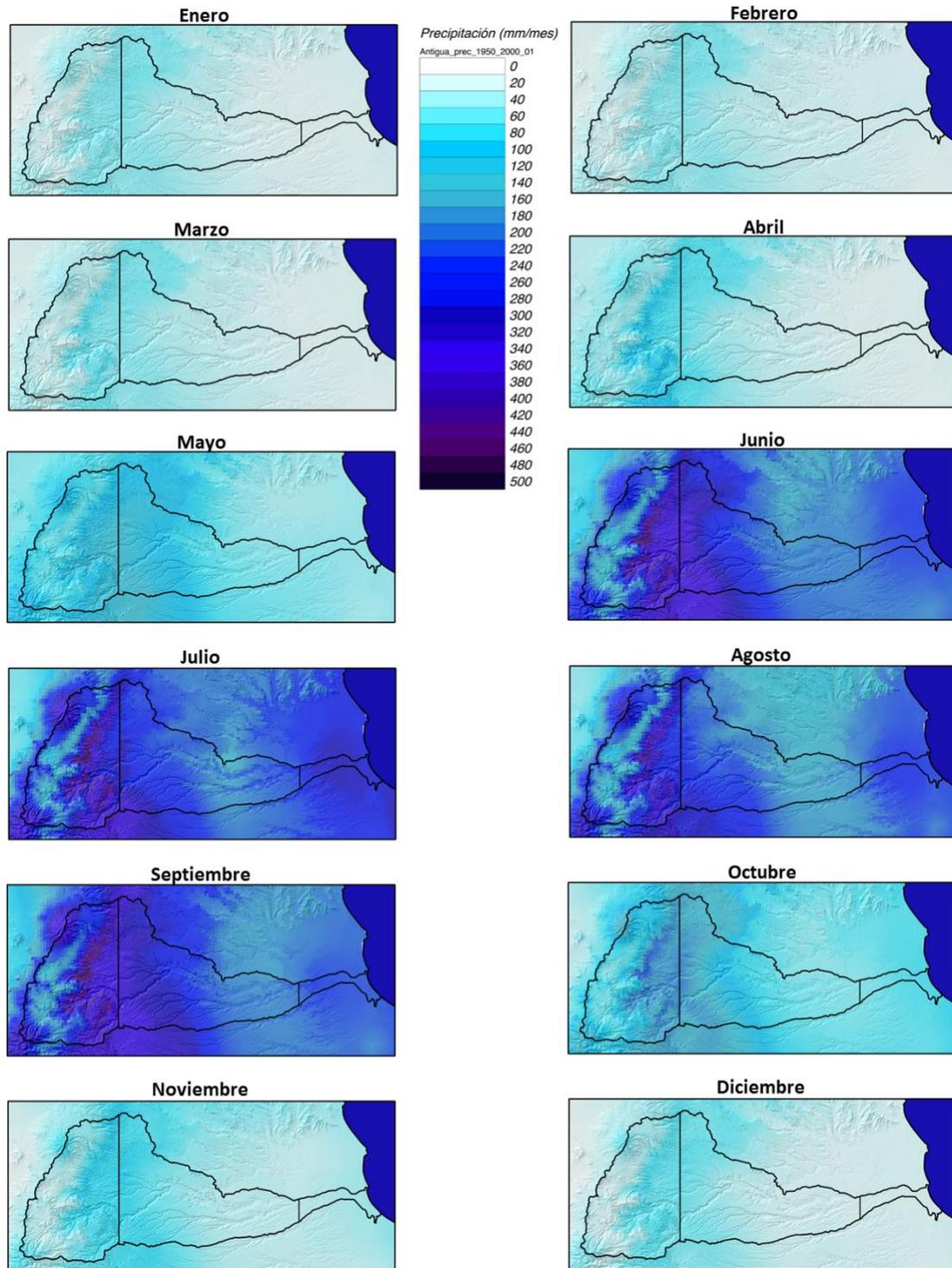


Figura 6.1.1.1 Distribución de la precipitación promedio mensual del clima base en un modelos digital de elevación.

La figura 6.1.1.1 muestra a detalle las zonas en donde se presenta la mayor y la menor precipitación y como el comportamiento de la lluvia es diferente mes con mes. Para poder hacer un análisis sintetizado, se obtuvo el promedio mensual de la precipitación en cada uno de los niveles de la cuenca y se compara con la precipitación promedio de toda la cuenca (figura 6.1.1.2).

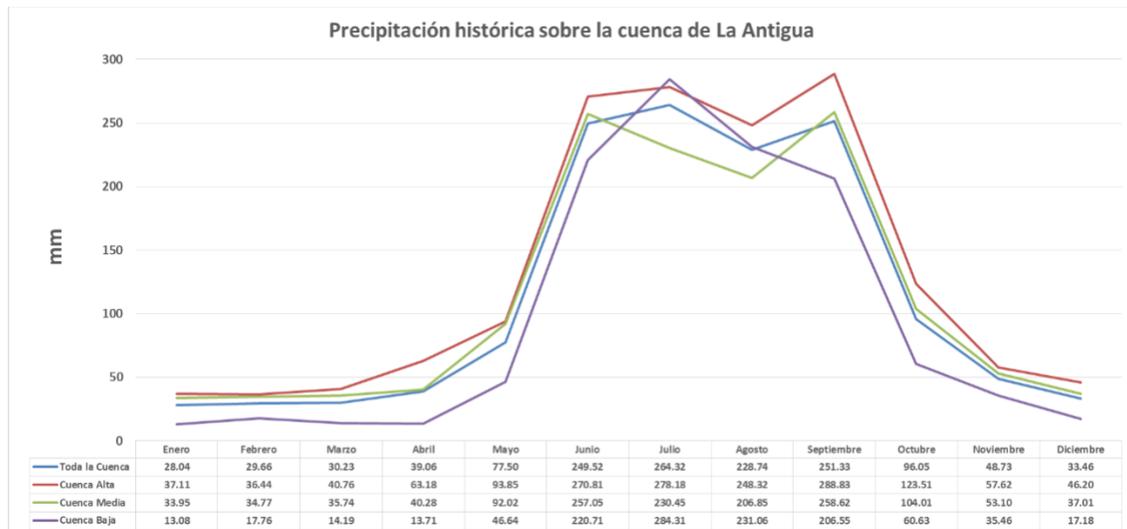


Figura 6.1.1.2 Ciclo anual de la precipitación en toda la cuenca y en los diferentes niveles.

En la cuenca alta y media se presenta el fenómeno de la canícula, aunque la distribución de los máximos de precipitación es diferente entre una y otra. Ya que en la cuenca alta los máximos se encuentran en julio y septiembre, y en la cuenca media los máximos se encuentran en junio y septiembre; la precipitación promedio en toda la cuenca muestra un comportamiento muy parecido a la cuenca alta, ya que los meses en donde se presentan los máximos de precipitación son julio y septiembre. Por otro lado, en la cuenca baja se presenta sólo un máximo de precipitación en el mes de julio. La región más seca, casi todo el año, es la cuenca baja, a excepción de los meses de julio y agosto, en donde la cuenca media es más seca. Las lluvias originadas por los sistemas frontales, y por condensación orográfica favorecen a la cuenca media y alta, mientras que en la temporada de ciclones tropicales se ve favorecida toda la cuenca.

6.1.2 Temperatura Máxima

Esta sección se enfoca en analizar el comportamiento de la temperatura máxima. Como se describió en la sección de clima base, las temperaturas más altas se registran durante la primavera y verano, sobresaliendo el mes de mayo en donde se registró una temperatura máxima promedio mensual de 34.3°C. La temporada más fría es el invierno, en el cual se registró una temperatura máxima promedio mensual de 9.6°C. En la Tabla 6.1.2.1 se muestran los valores máximos y mínimos, mes por mes, de la temperatura máxima registrada en la región de la cuenca.

Tabla 6.1.2.1: Temperatura máxima (°C), valor máximo y mínimo del clima base registrados en la región de la cuenca La Antigua.

Datos Antigua- Climatología		
Mes	Tmax	
	Mínima	Máxima
Enero	9.6	27.4
Febrero	10.9	28.5
Marzo	12.8	30.8
Abril	13.7	33.3
Mayo	13.1	34.3
Junio	11.8	33.6
Julio	10.8	32.1
Agosto	10.8	32.8
Septiembre	10.1	32.3
Octubre	10.1	31.3
Noviembre	10.4	29.4
Diciembre	9.9	28
Extremos	9.6	34.3

En la tabla 6.1.2.1 se puede observar una diferencia importante en los valores máximos y mínimos de la temperatura máxima en toda la región de la cuenca. La distribución de la temperatura máxima en la cuenca varía mes con mes, aunque siempre mantiene las temperaturas máximas más bajas en la zona montañosa de la cuenca alta, y las temperaturas máximas más altas en la cuenca media y baja. Estos detalles se pueden apreciar claramente en la figura 6.1.2.1, en donde se muestra los valores de temperatura máxima mensual en las diferentes regiones de la cuenca.

La cuenca baja es la zona con menor elevación y colindante con el océano, por lo que las temperaturas máximas son más altas; la cuenca media tiene zonas muy bajas en donde la temperatura máxima también registra valores altos, asimismo. A en la cuenca media comienza la zona montañosa en donde las temperaturas máximas son menos cálidas, y cuando se hace un promedio de toda la región, los valores son menores que los de la cuenca baja; la cuenca alta se encuentra en la zona montañosa en donde la altitud ya es considerable y las temperaturas máximas no son tan elevadas como en las otras dos regiones.

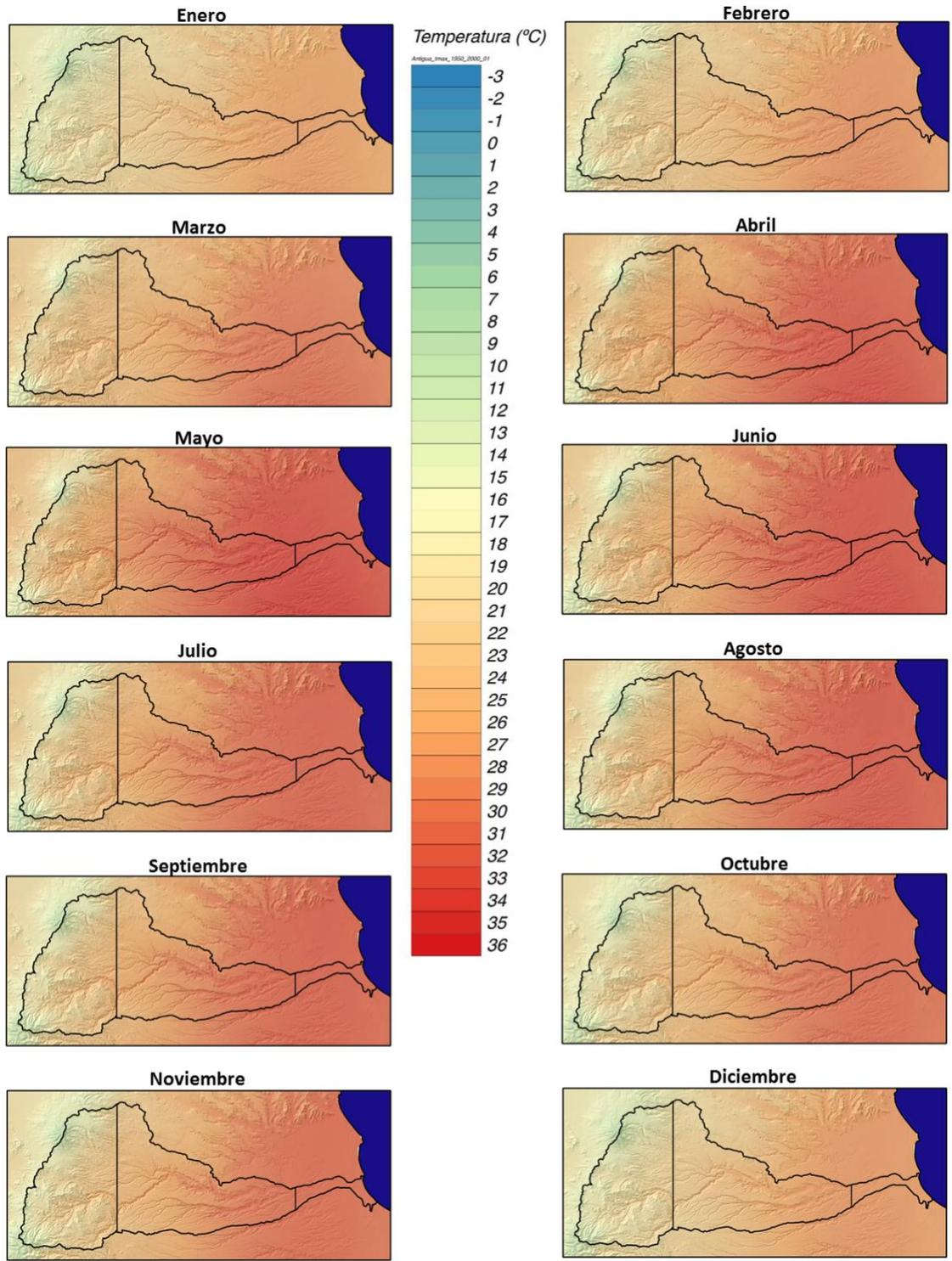


Figura 6.1.2.1 Distribución de la temperatura máxima promedio mensual del clima base en mapas con un modelo digital de elevación.

En la figura 6.1.2.2 se muestran el promedio mensual de la temperatura máxima en cada uno de los niveles de la cuenca y la temperatura máxima promedio de toda la cuenca.

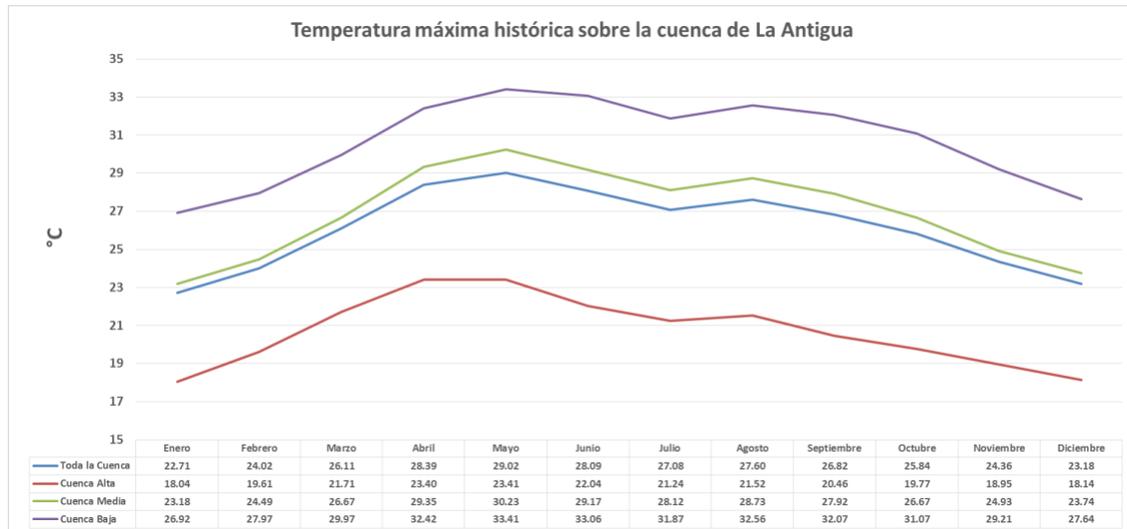


Figura 6.1.2.2 Ciclo anual de la temperatura máxima en toda la cuenca y en los diferentes niveles.

Se puede observar una diferencia importante de temperatura máxima entre un nivel y otro, que se mantiene casi uniforme durante todo el año. Las temperaturas máximas en la cuenca baja van de 26.92°C en enero a 33.41°C en mayo; en la cuenca media, las temperaturas máximas van de 23.18°C en enero a 30.23°C en mayo; el promedio de la temperatura máxima en toda la cuenca es un poco más bajo, e incluso, muy parecido al del comportamiento de la cuenca media, existiendo una diferencia de 1°C; la cuenca alta tiene temperaturas máximas que van de los 18.04°C en enero a 23.41°C en mayo, existiendo una diferencia aproximada de 6°C entre la cuenca alta y la cuenca media, y de 9°C entre la cuenca alta y la cuenca baja.

Es posible observar el efecto de la canícula en la temperatura máxima en todos los niveles de la cuenca, ya que se presenta un ligero descenso desde el mes de mayo a julio, y un ligero incremento en el mes de agosto.

6.1.3 Temperatura Mínima

Esta sección se enfoca en analizar al comportamiento de la temperatura mínima. Como se describió en la sección de clima base, las temperaturas más altas se registran durante la primavera y verano, resaltando el mes de junio, en donde se registró una temperatura mínima promedio mensual de 23.9°C. La temporada más fría es el invierno, en el cual se registró una temperatura mínima promedio mensual de -2.8°C. En la Tabla 6.1.3.1 se muestran los valores máximos y mínimos mes por mes de la temperatura máxima registrada en la región de la cuenca.

Tabla 6.1.3.1: Temperatura mínima (°C), valor máximo y mínimo del clima base registrados en la región de la cuenca La Antigua.

Datos Antigua - Climatología		
Mes	Tmin	
	Mínima	Máxima
Enero	-2.8	16.9
Febrero	-2.3	17.5
Marzo	-0.8	19.6
Abril	0	22
Mayo	0.1	23.4
Junio	0.5	23.9
Julio	0.2	22.9
Agosto	0.1	23.1
Septiembre	0.5	22.9
Octubre	-0.7	21.7
Noviembre	-1.8	19.7
Diciembre	-2.5	17.9
Extremos	-2.8	23.9

Con la tabla 6.1.3.1 se puede observar una diferencia importante en los valores máximos y mínimos de la temperatura mínima en toda la región de la cuenca. La distribución de la temperatura mínima en la cuenca varía mes con mes, aunque siempre manteniéndose en las temperaturas mínimas más bajas en la zona montañosa de la cuenca alta, y las temperaturas mínimas más altas en la cuenca media y baja. Estos detalles se pueden apreciar claramente en la figura 6.1.3.1, en donde se muestra los valores de temperatura mínima mensual en las diferentes regiones de la cuenca.

La cuenca baja es la zona con menor elevación y colindante con el océano, ahí las temperaturas mínimas son más altas; la cuenca media tiene zonas muy bajas en donde la temperatura mínimas también registra valores altos, pero en la cuenca media comienza la zona montañosa en donde las temperaturas mínimas ya no son tan altas, y cuando se hace un promedio de toda la región, los valores son menores que los de la cuenca baja; la cuenca alta se encuentra en la zona montañosa en donde la altitud ya es considerable, y las temperaturas mínimas son más bajas que en las otras dos regiones.

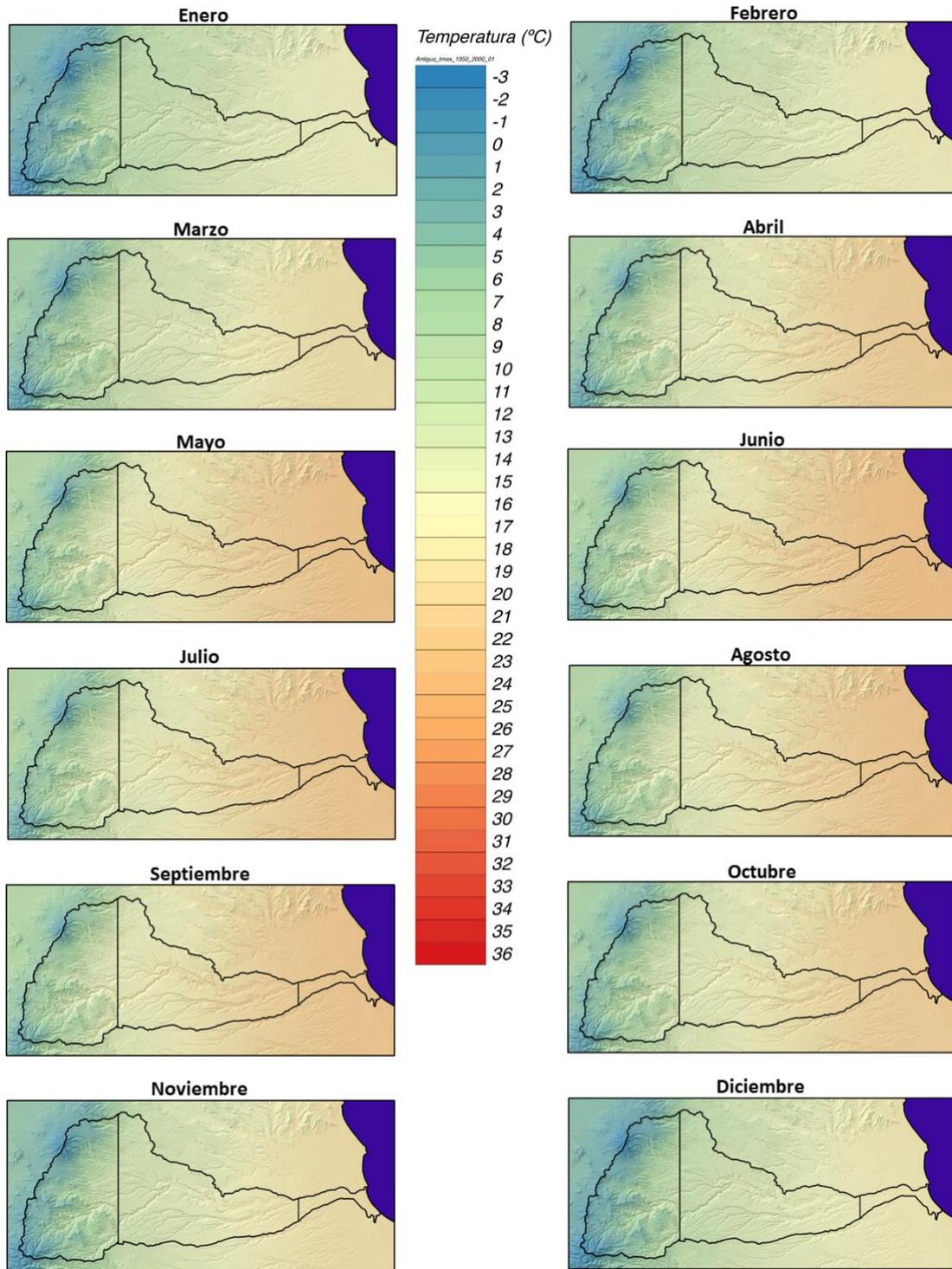


Figura 6.1.3.1 Distribución de la temperatura mínima promedio mensual del clima base en un modelo digital de elevación.

En la figura 6.1.3.2 se muestra el promedio mensual de la temperatura mínima en cada uno de los niveles de la cuenca y la temperatura mínima promedio de toda la cuenca.

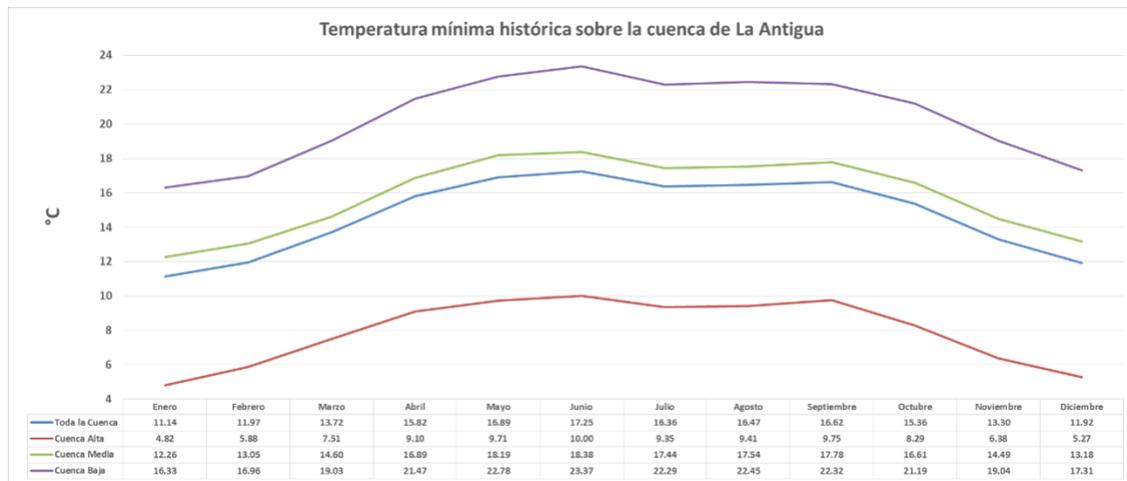


Figura 6.1.3.2 Ciclo anual de la temperatura mínima en toda la cuenca y en los diferentes niveles.

Se observa una diferencia casi uniforme de la temperatura mínima entre un nivel y otro, en todo el año. Las temperaturas mínimas en la cuenca baja van de 16.33°C en enero a 23.37°C en junio; en la cuenca media las temperaturas máximas van de 12.26°C en enero a 18.38°C en junio; el promedio de la temperatura máxima en toda la cuenca es un poco más bajo e incluso parecido al comportamiento de la cuenca media, existiendo una diferencia aproximada de 1°C; la cuenca alta tiene temperaturas mínimas que van de los 4.82°C en enero a 10°C en junio, existiendo una diferencia aproximada de 7°C entre la cuenca alta y la cuenca media, y de 11°C entre la cuenca alta y la cuenca baja.

Es posible observar un efecto en la temperatura mínima, que puede estar relacionado con la canícula, ya que se presenta un valor máximo en junio, un ligero descenso en julio y un ligero incremento en el mes de agosto.

6.2 Comparación de Escenarios de Cambio Climático en la cuenca de La Antigua

En esta sección se encuentran los resultados del cálculo de la información de las proyecciones de los escenarios de cambio climático de las trayectorias de concentración representativa RCP 4.5 y RCP 8.5, y de los cuatro modelos que se utilizaron en este trabajo.

Para poder mostrar algunos de los resultados obtenidos de una forma sintética y fácil de comprender, se consideró utilizar el valor promedio de toda la cuenca hidrográfica de La Antigua, de las variables de precipitación, temperatura máxima y

temperatura mínima. En el Anexo II se puede observar la aplicación que se generó con el programa QlikView, que facilitó el manejo y análisis de la información y a manera de ejemplo en esta sección se incluyen algunas gráficas generadas con dicha aplicación.

Se generaron tablas en las cuales se puede observar un desglose a detalle el comportamiento de los escenarios de cambio climático de las variables de temperatura y precipitación sobre la cuenca de la Antigua.

6.2.1 Precipitación

En las tablas 6.2.1a y 6.2.1b, se presentan los datos de las anomalías, el clima base y la proyección total de la precipitación en toda el área de la cuenca de La Antigua.

Comparando los resultados de la tabla 6.2.1a, se observa que:

En el RCP 4.5 futuro cercano (2015-2039), las anomalías de mayor valor las presenta el modelo HADGEM2-ES y el modelo GFDL-CM3. En la proyección total el modelo HADGEM2-ES se observa que la primavera y el principio del verano hay más precipitación que en el clima base, mientras que agosto y octubre presentan una importante reducción de la precipitación con respecto al clima base. El modelo GFDL-CM3 es más seco casi todo el año a excepción de octubre y noviembre (figura 6.2.1.1). Casi todos los modelos coinciden con la precipitación del clima base, con pequeñas diferencias.

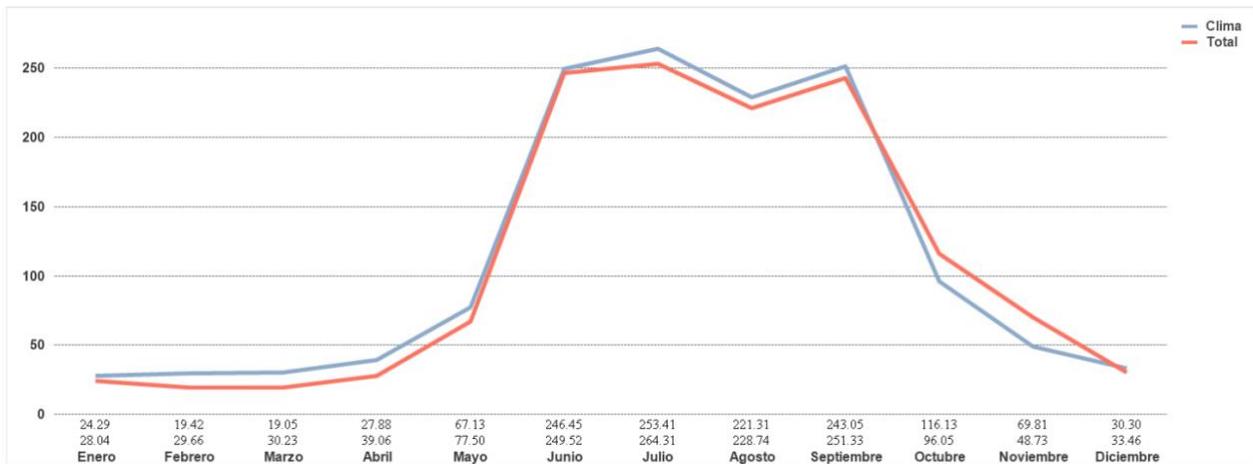


Figura 6.2.1.1 Ciclo anual de la precipitación (mm) del clima base (1950-2000) y la proyección total del modelo GFDL-CM3 futuro cercano (2015-2039) bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5

En el RCP 4.5 futuro intermedio (2045-2069), las anomalías más grandes en precipitación las presenta el modelo HADGEM2-ES y el modelo GFDL-CM3. En la proyección total del modelo HADGEM2-ES se observa en agosto y octubre una reducción y en noviembre un incremento importante. La canícula inicia antes y es

más pronunciada que en el clima base; el modelo GFDL-CM3 es más seco en primavera y verano, y más lluvioso en otoño e invierno.

Tabla 6.2.1a. Datos de la precipitación: anomalías, el clima base y la proyección total bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5

Precipitación (mm) del Escenarios de Cambio Climático RCP 4.5 en la Cuenca de La Antigua								
Mes	Modelo	Anomalía RCP 4.5			Clima	Total RCP 4.5		
		2015-2039	2045-2069	2075-2099		2015-2039	2045-2069	2075-2099
Enero	CNRMCM5	0.12	-4.89	1.02	28.04	28.16	23.15	29.06
	MPI-ESM-LR	-0.04	-3.64	-0.58	28.04	28.00	24.40	27.46
	HADGEM2-ES	-0.87	-6.57	-9.33	28.04	27.17	21.47	18.71
	GFDL-CM3	-3.56	2.06	-10.01	28.04	24.48	30.10	18.03
Febrero	CNRMCM5	-6.91	-7.56	-5.67	29.66	22.75	22.10	23.99
	MPI-ESM-LR	0.37	-8.83	-11.01	29.66	30.03	20.83	18.65
	HADGEM2-ES	-3.22	-6.01	-4.74	29.66	26.44	23.65	24.92
	GFDL-CM3	-10.33	3.26	4.17	29.66	19.33	32.92	33.83
Marzo	CNRMCM5	-5.97	-5.16	-5.75	30.23	24.25	25.07	24.48
	MPI-ESM-LR	-2.37	-3.98	-11.65	30.23	27.86	26.25	18.58
	HADGEM2-ES	5.03	-2.19	0.25	30.23	35.26	28.04	30.48
	GFDL-CM3	-11.35	-12.84	-16.55	30.23	18.88	17.39	13.68
Abril	CNRMCM5	-5.97	-5.16	-5.75	39.06	33.09	33.90	33.31
	MPI-ESM-LR	-2.37	-3.98	-11.65	39.06	36.69	35.08	27.41
	HADGEM2-ES	5.03	-2.19	0.25	39.06	44.09	36.87	39.31
	GFDL-CM3	-11.35	-12.84	-16.55	39.06	27.71	26.22	22.51
Mayo	CNRMCM5	-8.37	-15.33	13.64	77.50	69.13	62.17	91.14
	MPI-ESM-LR	-0.05	1.17	2.80	77.50	77.45	78.67	80.30
	HADGEM2-ES	6.91	-0.71	16.11	77.50	84.41	76.79	93.61
	GFDL-CM3	-10.14	-0.53	-10.54	77.50	67.36	76.97	66.96
Junio	CNRMCM5	-3.45	-10.46	3.66	249.52	246.07	239.06	253.18
	MPI-ESM-LR	15.73	10.83	11.26	249.52	265.25	260.35	260.78
	HADGEM2-ES	7.60	4.72	6.25	249.52	257.12	254.24	255.77
	GFDL-CM3	-3.60	-1.07	0.95	249.52	245.92	248.45	250.47
Julio	CNRMCM5	-16.61	-19.51	-25.14	264.32	247.71	244.81	239.18
	MPI-ESM-LR	-3.36	-22.69	-17.13	264.32	260.96	241.63	247.19
	HADGEM2-ES	21.71	-13.87	22.21	264.32	286.03	250.45	286.53
	GFDL-CM3	-10.75	-10.92	-22.61	264.32	253.57	253.40	241.71
Agosto	CNRMCM5	0.00	-26.14	-17.40	228.74	228.74	202.60	211.34
	MPI-ESM-LR	-6.20	-16.59	-38.19	228.74	222.54	212.15	190.55
	HADGEM2-ES	-29.96	-37.85	-62.53	228.74	198.78	190.89	166.21
	GFDL-CM3	-6.92	-21.58	-23.29	228.74	221.82	207.16	205.45
Septiembre	CNRMCM5	-18.34	8.00	-6.43	251.33	232.99	259.33	244.90
	MPI-ESM-LR	-0.75	-2.69	2.35	251.33	250.58	248.64	253.68
	HADGEM2-ES	0.65	1.10	-21.31	251.33	251.98	252.43	230.02
	GFDL-CM3	-8.27	-19.47	-15.51	251.33	243.06	231.86	235.82
Octubre	CNRMCM5	-23.23	23.84	37.74	96.05	72.82	119.89	133.79
	MPI-ESM-LR	-0.16	-9.41	3.46	96.05	95.89	86.64	99.51
	HADGEM2-ES	-25.96	-21.67	-22.09	96.05	70.09	74.38	73.96
	GFDL-CM3	19.54	29.86	18.87	96.05	115.59	125.91	114.92
Noviembre	CNRMCM5	-6.32	-10.70	-4.63	48.73	42.41	38.03	44.10
	MPI-ESM-LR	5.93	11.09	8.30	48.73	54.66	59.82	57.03
	HADGEM2-ES	5.93	30.98	37.48	48.73	54.66	79.71	86.21
	GFDL-CM3	21.11	11.18	5.88	48.73	69.84	59.91	54.61
Diciembre	CNRMCM5	-9.31	-6.57	-11.93	33.46	24.15	26.89	21.53
	MPI-ESM-LR	-4.06	3.59	3.44	33.46	29.40	37.05	36.90
	HADGEM2-ES	2.75	7.24	8.76	33.46	36.21	40.70	42.22
	GFDL-CM3	-3.21	0.46	16.10	33.46	30.25	33.92	49.56

En el RCP 4.5 futuro lejano (2075-2099), las mayores anomalías en la precipitación presenta el modelo HADGEM2-ES. En la proyección total, en el modelo HADGEM2-ES se observa una reducción en agosto y julio, y en noviembre un incremento importante. La canícula es más pronunciada que en el clima base.

Comparando los resultados de la tabla 6.2.1b, se observa que:

En el RCP 8.5 futuro cercano (2015-2039), las mayores anomalías en precipitación las presentan los modelos CNRMCM5, HADGEM2-ES y GFDL-CM3. En la proyección total del modelo HADGEM2-ES se observa una reducción en agosto y un incremento en noviembre, con respecto al clima base, y la canícula es más pronunciada. El modelo GFDL-CM3 es más seco casi todo el año con excepción de enero, octubre y noviembre, y la canícula comienza un poco antes que en el clima base. En el modelo CNRMCM5, el verano y principio del otoño son más lluviosos comparado con el clima base (figura 6.2.1.2).

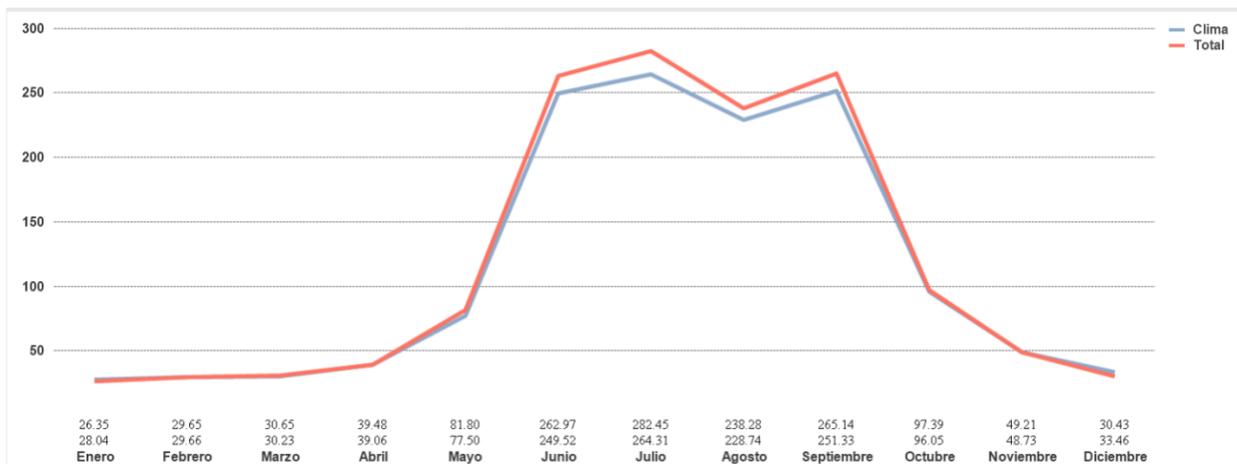


Figura 6.2.1.2 Ciclo anual de la precipitación del clima base (1950-2000) y la proyección total del modelo CNRMCM5 futuro cercano (2015-2039) bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5.

En el RCP 8.5 futuro intermedio (2045-2069), las mayores anomalías en precipitación las presentan los modelos MPI-ESM-LR, HADGEM2-ES y GFDL-CM3. En la proyección total, el modelo HADGEM2-ES se observa en agosto una reducción y en noviembre un incremento con respecto al clima base, y la canícula es más pronunciada. El modelo GFDL-CM3 es más seco casi todo el año con excepción de enero, octubre y noviembre. En el modelo MPI-ESM-LR se observa un aumento de la precipitación en el mes de junio, y se adelanta la canícula.

En el RCP 8.5 futuro lejano (2075-2099), las anomalías más grandes en precipitación las presentan los modelos HADGEM2-ES y GFDL-CM3. En la proyección total, en el modelo HADGEM2-ES se observa una reducción en agosto y un incremento en noviembre, con respecto al clima base, y la canícula es más pronunciada. El modelo GFDL-CM3 es más seco casi todo el año, a excepción de invierno y finales del otoño.

Tabla 6.2.1b. Datos de la precipitación: anomalías, el clima base y la proyección total bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5

Precipitación (mm) del Escenarios de Cambio Climático RCP 8.5 en la Cuenca de La Antigua								
Mes	Modelo	Anomalía RCP 8.5			Clima	Total RCP 8.5		
		2015-2039	2045-2069	2075-2099		2015-2039	2045-2069	2075-2099
Enero	CNRMCM5	-1.54	-6.39	-7.19	28.04	26.50	21.65	20.85
	MPI-ESM-LR	-13.02	-4.81	-13.11	28.04	15.02	23.23	14.93
	HADGEM2-ES	-0.85	-4.91	-9.31	28.04	27.19	23.13	18.73
	GFDL-CM3	7.14	23.62	6.88	28.04	35.18	51.66	34.92
Febrero	CNRMCM5	-0.03	-7.24	-14.38	29.66	29.63	22.42	15.28
	MPI-ESM-LR	-5.00	-9.35	-12.42	29.66	24.66	20.31	17.24
	HADGEM2-ES	4.24	0.87	-8.04	29.66	33.90	30.53	21.62
	GFDL-CM3	-2.32	-12.58	6.50	29.66	27.34	17.08	36.16
Marzo	CNRMCM5	0.89	-6.91	-15.60	30.23	31.12	23.32	14.63
	MPI-ESM-LR	-0.31	-7.81	-26.26	30.23	29.92	22.42	3.97
	HADGEM2-ES	3.51	2.96	1.88	30.23	33.74	33.19	32.11
	GFDL-CM3	-7.65	-17.07	-11.61	30.23	22.58	13.16	18.62
Abril	CNRMCM5	0.89	-6.91	-15.60	39.06	39.95	32.15	23.46
	MPI-ESM-LR	-0.31	-7.81	-26.26	39.06	38.75	31.25	12.80
	HADGEM2-ES	3.51	2.96	1.88	39.06	42.57	42.02	40.94
	GFDL-CM3	-7.65	-17.07	-11.61	39.06	31.41	21.99	27.45
Mayo	CNRMCM5	4.24	0.63	16.74	77.50	81.74	78.13	94.24
	MPI-ESM-LR	5.40	-18.27	-26.63	77.50	82.90	59.23	50.87
	HADGEM2-ES	-4.67	7.21	-4.30	77.50	72.83	84.71	73.20
	GFDL-CM3	-3.39	-10.11	-20.92	77.50	74.11	67.39	56.58
Junio	CNRMCM5	13.15	-2.06	-0.59	249.52	262.67	247.46	248.93
	MPI-ESM-LR	8.19	34.66	18.12	249.52	257.71	284.18	267.64
	HADGEM2-ES	-10.11	3.07	-6.06	249.52	239.41	252.59	243.46
	GFDL-CM3	-1.94	-3.59	-8.82	249.52	247.58	245.93	240.70
Julio	CNRMCM5	18.47	-7.19	-15.47	264.32	282.79	257.13	248.85
	MPI-ESM-LR	-8.33	-18.31	-15.44	264.32	255.99	246.01	248.88
	HADGEM2-ES	-11.46	-8.95	-18.83	264.32	252.86	255.37	245.49
	GFDL-CM3	-21.91	-15.59	-20.87	264.32	242.41	248.73	243.45
Agosto	CNRMCM5	9.62	-19.75	-31.87	228.74	238.36	208.99	196.87
	MPI-ESM-LR	-5.66	-14.80	-40.32	228.74	223.08	213.94	188.42
	HADGEM2-ES	-31.05	-40.10	-63.69	228.74	197.69	188.64	165.05
	GFDL-CM3	-20.99	-31.00	-37.64	228.74	207.75	197.74	191.10
Septiembre	CNRMCM5	12.97	12.34	-1.86	251.33	264.30	263.67	249.47
	MPI-ESM-LR	7.18	-10.86	-5.17	251.33	258.51	240.47	246.16
	HADGEM2-ES	13.31	-9.24	-22.66	251.33	264.64	242.09	228.67
	GFDL-CM3	-7.07	-14.19	-48.50	251.33	244.26	237.14	202.83
Octubre	CNRMCM5	1.53	2.51	13.34	96.05	97.58	98.56	109.39
	MPI-ESM-LR	-0.76	-5.15	29.28	96.05	95.29	90.90	125.33
	HADGEM2-ES	-5.42	-25.62	-31.40	96.05	90.63	70.43	64.65
	GFDL-CM3	43.60	13.21	26.27	96.05	139.65	109.26	122.32
Noviembre	CNRMCM5	0.44	-7.59	-7.61	48.73	49.17	41.14	41.12
	MPI-ESM-LR	6.29	3.31	15.11	48.73	55.02	52.04	63.84
	HADGEM2-ES	27.87	39.42	94.58	48.73	76.60	88.15	143.31
	GFDL-CM3	8.46	8.25	24.37	48.73	57.19	56.98	73.10
Diciembre	CNRMCM5	-3.10	-3.81	-11.67	33.46	30.36	29.65	21.79
	MPI-ESM-LR	1.79	2.78	9.68	33.46	35.25	36.24	43.14
	HADGEM2-ES	11.18	11.86	21.41	33.46	44.64	45.32	54.87
	GFDL-CM3	-6.20	1.25	31.12	33.46	27.26	34.71	64.58

Después de la comparación del comportamiento de los modelos y los RCP 4.5 y RCP 8.5, se observa que las anomalías de precipitación más grandes se presentan en el RCP 8.5 futuro lejano, y los modelos HADGEM2-ES y GFDL-CM3 son los que

en todos los periodos y bajo los diferentes escenarios, muestran proyecciones más extremas, con respecto al clima base y a los otros modelos.

6.2.2 Temperatura Máxima

En las tablas 6.2.2a y 6.2.2b, se presentan los datos de las anomalías, el clima base y la proyección total de la temperatura máxima en toda el área de la cuenca de La Antigua.

Comparando los resultados de la tabla 6.2.2a, se observa que:

En el RCP 4.5 futuro cercano (2015-2039), las anomalías más importantes en la temperatura máxima las presenta el modelo HADGEM2-ES con valores hasta de 1.78°C, y el modelo GFDL-CM3 con valores hasta de 2.56°C. En la proyección total todos los modelos muestran un incremento con respecto al clima base, aunque mantienen el mismo patrón, a excepción del modelo HADGEM2-ES en donde se observa un incremento mayor de la temperatura en el otoño y el modelo GFDL-CM3 con un incremento mayor de temperatura en primavera y verano.

En el RCP 4.5 futuro intermedio (2045-2069), las anomalías más importantes en la temperatura máxima las presenta el modelo HADGEM2-ES con valores hasta de 3.03°C, y el modelo GFDL-CM3 con valores hasta de 3.66°C. En la proyección total todos los modelos muestran un incremento con respecto al clima base, aunque mantienen el mismo patrón, a excepción del modelo GFDL-CM3 con un incremento significativo de temperatura de abril a septiembre.

En el RCP 4.5 futuro lejano (2075-2099), las anomalías más grandes en la temperatura máxima las presenta el modelo HADGEM2-ES con valores hasta de 3.83°C, y el modelo GFDL-CM3 con valores hasta de 4.36°C (figura 6.2.2.1). En la proyección total todos los modelos muestran un incremento con respecto al clima base, aunque mantienen el mismo patrón, a excepción del modelo HADGEM2-ES en donde se observa un incremento significativo de la temperatura en abril, mayo y septiembre, y el modelo GFDL-CM3 con un incremento de temperatura de marzo a septiembre.

Tabla 6.2.2a. Datos de la temperatura máxima: anomalías, clima base y la proyección total bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5

Temperatura Máxima (°C) del Escenario de Cambio Climático RCP 4.5 en la Cuenca de La Antigua								
Mes	Modelo	Anomalía RCP 4.5			Clima	Total RCP 4.5		
		2015-2039	2045-2069	2075-2099		2015-2039	2045-2069	2075-2099
Enero	CNRMCM5	0.54	1.52	1.47	22.71	23.25	24.23	24.18
	MPI-ESM-LR	0.79	1.62	1.94	22.71	23.50	24.33	24.65
	HADGEM2-ES	1.34	2.58	3.28	22.71	24.05	25.29	25.99
	GFDL-CM3	1.34	2.31	2.79	22.71	24.05	25.02	25.50
Febrero	CNRMCM5	1.18	1.52	1.66	24.02	25.20	25.54	25.68
	MPI-ESM-LR	1.27	2.37	2.21	24.02	25.29	26.39	26.23
	HADGEM2-ES	1.15	2.39	3.19	24.02	25.17	26.41	27.21
	GFDL-CM3	1.26	2.36	3.19	24.02	25.28	26.38	27.21
Marzo	CNRMCM5	1.23	1.76	2.44	26.11	27.34	27.87	28.55
	MPI-ESM-LR	1.03	1.90	2.12	26.11	27.14	28.01	28.23
	HADGEM2-ES	1.18	2.45	3.27	26.11	27.29	28.56	29.38
	GFDL-CM3	1.86	3.18	3.77	26.11	27.97	29.29	29.88
Abril	CNRMCM5	0.99	1.59	2.57	28.39	29.38	29.98	30.96
	MPI-ESM-LR	1.31	2.43	2.50	28.39	29.70	30.82	30.89
	HADGEM2-ES	1.58	2.73	3.85	28.39	29.97	31.12	32.24
	GFDL-CM3	1.89	2.95	3.75	28.39	30.28	31.34	32.14
Mayo	CNRMCM5	0.60	1.77	2.27	29.02	29.62	30.79	31.29
	MPI-ESM-LR	1.31	2.28	2.60	29.02	30.33	31.30	31.62
	HADGEM2-ES	1.37	3.03	3.66	29.02	30.39	32.05	32.68
	GFDL-CM3	2.09	3.54	4.29	29.02	31.11	32.56	33.31
Junio	CNRMCM5	0.76	1.87	1.39	28.09	28.85	29.96	29.48
	MPI-ESM-LR	1.00	1.76	2.25	28.09	29.09	29.85	30.34
	HADGEM2-ES	1.30	2.49	3.06	28.09	29.39	30.58	31.15
	GFDL-CM3	2.26	3.33	3.54	28.09	30.35	31.42	31.63
Julio	CNRMCM5	1.04	1.86	2.15	27.08	28.12	28.94	29.23
	MPI-ESM-LR	1.13	1.68	2.03	27.08	28.21	28.76	29.11
	HADGEM2-ES	1.23	2.40	2.73	27.08	28.31	29.48	29.81
	GFDL-CM3	2.53	3.31	4.32	27.08	29.61	30.39	31.40
Agosto	CNRMCM5	0.78	2.10	1.96	27.60	28.38	29.70	29.56
	MPI-ESM-LR	1.23	2.07	2.26	27.60	28.83	29.67	29.86
	HADGEM2-ES	1.51	2.58	3.17	27.60	29.11	30.18	30.77
	GFDL-CM3	1.51	3.58	4.36	27.60	29.11	31.18	31.96
Septiembre	CNRMCM5	0.92	1.92	2.03	26.82	27.74	28.74	28.85
	MPI-ESM-LR	1.30	2.26	2.60	26.82	28.12	29.08	29.42
	HADGEM2-ES	1.72	2.50	3.41	26.82	28.54	29.32	30.23
	GFDL-CM3	2.14	3.67	3.98	26.82	28.96	30.49	30.80
Octubre	CNRMCM5	0.81	1.33	1.55	25.84	26.65	27.17	27.39
	MPI-ESM-LR	1.06	2.07	2.25	25.84	26.90	27.91	28.09
	HADGEM2-ES	1.70	2.65	3.38	25.84	27.54	28.49	29.22
	GFDL-CM3	1.64	2.79	3.23	25.84	27.48	28.63	29.07
Noviembre	CNRMCM5	1.22	1.10	1.27	24.36	25.58	25.46	25.63
	MPI-ESM-LR	1.22	2.07	1.98	24.36	25.58	26.43	26.34
	HADGEM2-ES	1.77	2.33	2.77	24.36	26.13	26.69	27.13
	GFDL-CM3	1.43	2.32	2.62	24.36	25.79	26.68	26.98
Diciembre	CNRMCM5	1.10	1.53	1.47	23.18	24.28	24.71	24.65
	MPI-ESM-LR	0.95	1.77	2.18	23.18	24.13	24.95	25.36
	HADGEM2-ES	1.47	1.97	2.65	23.18	24.65	25.15	25.83
	GFDL-CM3	1.52	2.53	2.90	23.18	24.70	25.71	26.08

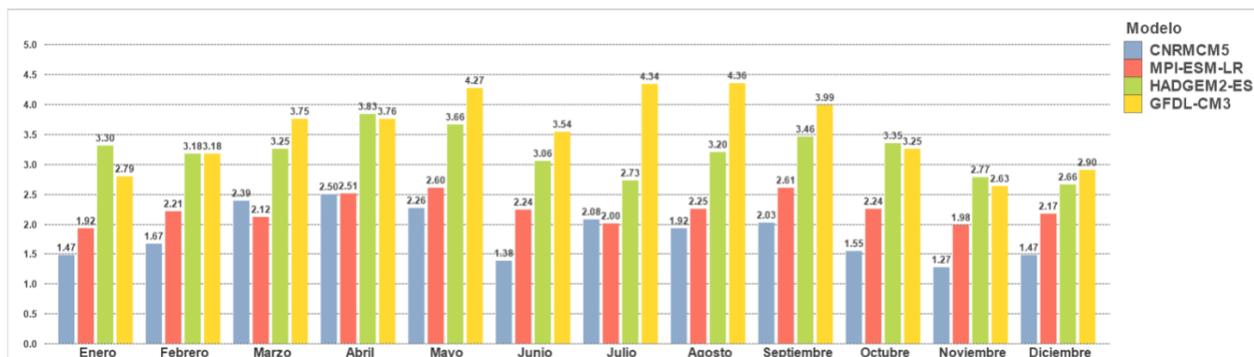


Figura 6.2.2.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura máxima de los cuatro modelos de circulación general en el futuro lejano (2075-2099) bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5.

Comparando los resultados de la tabla 6.2.2b, se observa que:

En el RCP 8.5 futuro cercano (2015-2039), los valores mayores de las anomalías en la temperatura máxima las presenta el modelo HADGEM2-ES con valores hasta de 2.02°C, y el modelo GFDL-CM3 con valores hasta de 2.69°C. En la proyección total todos los modelos muestran un incremento con respecto al clima base, aunque mantienen el mismo patrón, a excepción del modelo HADGEM2-ES en donde se observa un incremento de la temperatura en mayo y el otoño, y el modelo GFDL-CM3 con un incremento de temperatura mayor de mayo a septiembre.

En el RCP 8.5 futuro intermedio (2045-2069), las anomalías más grandes en la temperatura máxima las presenta el modelo HADGEM2-ES con valores hasta de 3.56°C, y el modelo GFDL-CM3 con valores hasta de 4.54°C. En la proyección total todos los modelos muestran un incremento con respecto al clima base, aunque mantienen el mismo patrón, a excepción del modelo HADGEM2-ES en donde se observa un incremento de la temperatura de abril a octubre, y el modelo GFDL-CM3 con un incremento mayor de temperatura de marzo a septiembre.

En el RCP 8.5 futuro lejano (2075-2099), las mayores anomalías en la temperatura máxima las presenta el modelo HADGEM2-ES con valores hasta de 6.14°C, y el modelo GFDL-CM3 con valores hasta de 6.77°C. En la proyección total todos los modelos muestran un incremento con respecto al clima base, aunque mantienen el mismo patrón, a excepción del modelo GFDL-CM3 con un aumento de temperatura en mayo, agosto y septiembre (figura 6.2.2.2).

Después de la comparación del comportamiento de los modelos y los diferentes escenarios, se observa que las mayores anomalías se presentan en el RCP 8.5 futuro lejano, y los modelos HADGEM2-ES y GFDL-CM3 son los que en todos los periodos y bajo los diferentes escenarios, muestran proyecciones más extremas en la temperatura máxima con respecto al clima base y a los otros modelos.

Tabla 6.2.2b. Datos de la temperatura máxima: anomalías, clima base y la proyección total bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5

Temperatura Máxima (°C) del Escenario de Cambio Climático RCP 8.5 en la Cuenca de La Antigua								
Mes	Modelo	Anomalía RCP 8.5			Clima	Total RCP 8.5		
		2015-2039	2045-2069	2075-2099		2015-2039	2045-2069	2075-2099
Enero	CNRMCM5	0.69	1.77	3.03	22.71	23.40	24.48	25.74
	MPI-ESM-LR	1.27	2.32	4.11	22.71	23.98	25.03	26.82
	HADGEM2-ES	1.48	3.34	5.43	22.71	24.19	26.05	28.14
	GFDL-CM3	1.15	2.75	5.43	22.71	23.86	25.46	28.14
Febrero	CNRMCM5	0.78	2.19	3.64	24.02	24.80	26.21	27.66
	MPI-ESM-LR	1.33	2.59	4.04	24.02	25.35	26.61	28.06
	HADGEM2-ES	1.14	3.42	5.57	24.02	25.16	27.44	29.59
	GFDL-CM3	1.26	2.74	4.16	24.02	25.28	26.76	28.18
Marzo	CNRMCM5	0.82	2.45	4.17	26.11	26.93	28.56	30.28
	MPI-ESM-LR	0.90	2.45	4.76	26.11	27.01	28.56	30.87
	HADGEM2-ES	1.10	2.97	5.80	26.11	27.21	29.08	31.91
	GFDL-CM3	1.57	3.80	4.74	26.11	27.68	29.91	30.85
Abril	CNRMCM5	0.96	2.78	4.50	28.39	29.35	31.17	32.89
	MPI-ESM-LR	1.29	2.82	5.00	28.39	29.68	31.21	33.39
	HADGEM2-ES	1.22	3.53	5.82	28.39	29.61	31.92	34.21
	GFDL-CM3	1.53	3.97	5.75	28.39	29.92	32.36	34.14
Mayo	CNRMCM5	0.88	2.03	3.09	29.02	29.90	31.05	32.11
	MPI-ESM-LR	1.33	2.86	5.20	29.02	30.35	31.88	34.22
	HADGEM2-ES	1.98	3.39	6.20	29.02	31.00	32.41	35.22
	GFDL-CM3	1.61	3.88	6.07	29.02	30.63	32.90	35.09
Junio	CNRMCM5	0.62	1.93	3.00	28.09	28.71	30.02	31.09
	MPI-ESM-LR	1.17	2.52	4.59	28.09	29.26	30.61	32.68
	HADGEM2-ES	1.36	3.05	5.17	28.09	29.45	31.14	33.26
	GFDL-CM3	1.78	3.84	5.63	28.09	29.87	31.93	33.72
Julio	CNRMCM5	0.49	2.23	3.68	27.08	27.57	29.31	30.76
	MPI-ESM-LR	0.95	2.41	4.34	27.08	28.03	29.49	31.42
	HADGEM2-ES	1.56	3.27	4.94	27.08	28.64	30.35	32.02
	GFDL-CM3	2.52	3.90	5.83	27.08	29.60	30.98	32.91
Agosto	CNRMCM5	0.63	2.45	4.27	27.60	28.23	30.05	31.87
	MPI-ESM-LR	1.25	2.56	4.55	27.60	28.85	30.16	32.15
	HADGEM2-ES	1.83	3.39	5.68	27.60	29.43	30.99	33.28
	GFDL-CM3	2.71	4.55	6.58	27.60	30.31	32.15	34.18
Septiembre	CNRMCM5	0.79	2.06	3.71	26.82	27.61	28.88	30.53
	MPI-ESM-LR	1.28	3.08	5.11	26.82	28.10	29.90	31.93
	HADGEM2-ES	1.80	3.42	5.64	26.82	28.62	30.24	32.46
	GFDL-CM3	2.53	4.46	6.77	26.82	29.35	31.28	33.59
Octubre	CNRMCM5	0.75	1.75	3.01	25.84	26.59	27.59	28.85
	MPI-ESM-LR	1.46	3.02	4.78	25.84	27.30	28.86	30.62
	HADGEM2-ES	1.79	3.39	5.42	25.84	27.63	29.23	31.26
	GFDL-CM3	1.34	3.29	5.32	25.84	27.18	29.13	31.16
Noviembre	CNRMCM5	0.81	1.93	3.02	24.36	25.17	26.29	27.38
	MPI-ESM-LR	0.88	2.72	4.47	24.36	25.24	27.08	28.83
	HADGEM2-ES	1.62	3.10	4.74	24.36	25.98	27.46	29.10
	GFDL-CM3	1.30	2.92	4.52	24.36	25.66	27.28	28.88
Diciembre	CNRMCM5	0.85	1.90	3.16	23.18	24.03	25.08	26.34
	MPI-ESM-LR	0.89	2.46	4.13	23.18	24.07	25.64	27.31
	HADGEM2-ES	1.03	2.84	4.39	23.18	24.21	26.02	27.57
	GFDL-CM3	1.54	3.27	4.88	23.18	24.72	26.45	28.06

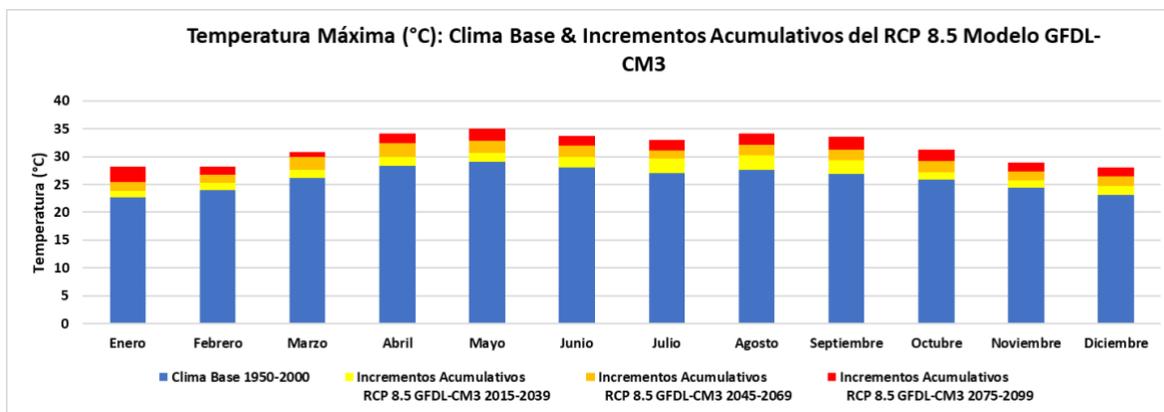


Figura 6.2.2.2: Ciclo anual de la temperatura máxima (°C) del clima base (1950-2000), y los incrementos acumulados del modelo GFDL-CM3 futuro cercano (2015-2039), futuro intermedio (2045-2069) y futuro lejano (2075-2099) bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5.

6.2.3 Temperatura Mínima

En las tablas 6.2.2a y 6.2.2b, se presentan los datos de las anomalías, el clima base y la proyección total de la temperatura mínima en toda el área de la cuenca de La Antigua.

Comparando los resultados de la tabla 6.2.2a, se observa que:

En el RCP 4.5 futuro cercano (2015-2039), las anomalías más grandes en la temperatura mínima las presenta el modelo HADGEM2-ES con valores hasta de 1.50 °C, y el modelo GFDL-CM3 con valores hasta de 1.78 °C. En la proyección total, todos los modelos muestran un incremento con respecto al clima base, aunque mantienen el mismo patrón.

En el RCP 4.5 futuro intermedio (2045-2069), las anomalías con mayor valor en la temperatura mínima las presenta el modelo HADGEM2-ES con valores hasta de 2.52 °C, y el modelo GFDL-CM3 con valores hasta de 2.71 °C (figura 6.2.3.1). En la proyección total todos los modelos muestran un incremento con respecto al clima base, aunque mantienen el mismo patrón, a excepción del modelo HADGEM2-ES en donde se observa un aumento de la temperatura en mayo, y el modelo GFDL-CM3 con un incremento de temperatura en junio y septiembre.

En el RCP 4.5 futuro lejano (2075-2099), las mayores anomalías en la temperatura mínima las presenta el modelo HADGEM2-ES y el modelo GFDL-CM3 con valores hasta de 3.33 °C. En la proyección total todos los modelos muestran un incremento con respecto al clima base, aunque mantienen el mismo patrón.

Tabla 6.2.3a. Datos de la temperatura mínima: anomalías, clima base y la proyección total bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5

Temperatura Mínima (°C) del Escenario de Cambio Climático RCP 4.5 en la Cuenca de La Antigua								
Mes	Modelo	Anomalía RCP 4.5			Clima	Total RCP 4.5		
		2015-2039	2045-2069	2075-2099		2015-2039	2045-2069	2075-2099
Enero	CNRMCM5	0.43	1.17	1.44	11.14	11.57	12.31	12.58
	MPI-ESM-LR	0.84	1.48	1.79	11.14	11.98	12.62	12.93
	HADGEM2-ES	1.20	2.15	2.89	11.14	12.34	13.29	14.03
	GFDL-CM3	1.16	2.07	2.04	11.14	12.30	13.21	13.18
Febrero	CNRMCM5	0.38	1.02	1.30	11.97	12.35	12.99	13.27
	MPI-ESM-LR	1.08	1.93	1.96	11.97	13.05	13.90	13.93
	HADGEM2-ES	1.14	2.01	2.86	11.97	13.11	13.98	14.83
	GFDL-CM3	0.91	1.90	1.89	11.97	12.88	13.87	13.86
Marzo	CNRMCM5	0.55	1.28	1.88	13.72	14.27	15.00	15.60
	MPI-ESM-LR	0.99	1.79	1.88	13.72	14.71	15.51	15.60
	HADGEM2-ES	0.86	1.99	2.76	13.72	14.58	15.71	16.48
	GFDL-CM3	0.87	2.01	2.09	13.72	14.59	15.73	15.81
Abril	CNRMCM5	0.66	1.33	1.87	15.82	16.48	17.15	17.69
	MPI-ESM-LR	1.19	2.01	2.12	15.82	17.01	17.83	17.94
	HADGEM2-ES	1.14	2.17	3.23	15.82	16.96	17.99	19.05
	GFDL-CM3	1.38	2.30	2.47	15.82	17.20	18.12	18.29
Mayo	CNRMCM5	0.48	1.32	2.12	16.89	17.37	18.21	19.01
	MPI-ESM-LR	1.13	1.94	2.22	16.89	18.02	18.83	19.11
	HADGEM2-ES	1.42	2.53	3.33	16.89	18.31	19.42	20.22
	GFDL-CM3	1.36	2.48	2.95	16.89	18.25	19.37	19.84
Junio	CNRMCM5	0.70	1.82	2.10	17.25	17.95	19.07	19.35
	MPI-ESM-LR	1.22	1.86	2.20	17.25	18.47	19.11	19.45
	HADGEM2-ES	1.22	2.16	2.72	17.25	18.47	19.41	19.97
	GFDL-CM3	1.60	2.70	3.09	17.25	18.85	19.95	20.34
Julio	CNRMCM5	0.66	1.50	1.48	16.36	17.02	17.86	17.84
	MPI-ESM-LR	1.13	1.78	2.08	16.36	17.49	18.14	18.44
	HADGEM2-ES	1.26	2.06	2.68	16.36	17.62	18.42	19.04
	GFDL-CM3	1.50	2.47	2.80	16.36	17.86	18.83	19.16
Agosto	CNRMCM5	0.98	1.42	1.69	16.47	17.45	17.89	18.16
	MPI-ESM-LR	1.06	1.80	2.11	16.47	17.53	18.27	18.58
	HADGEM2-ES	1.12	2.01	2.45	16.47	17.59	18.48	18.92
	GFDL-CM3	1.59	2.40	2.84	16.47	18.06	18.87	19.31
Septiembre	CNRMCM5	0.90	1.69	2.04	16.62	17.52	18.31	18.66
	MPI-ESM-LR	1.01	1.78	2.14	16.62	17.63	18.40	18.76
	HADGEM2-ES	1.38	2.10	2.57	16.62	18.00	18.72	19.19
	GFDL-CM3	1.66	2.65	2.95	16.62	18.28	19.27	19.57
Octubre	CNRMCM5	0.71	1.73	1.79	15.36	16.07	17.09	17.15
	MPI-ESM-LR	1.09	1.79	2.10	15.36	16.45	17.15	17.46
	HADGEM2-ES	1.27	2.12	2.76	15.36	16.63	17.48	18.12
	GFDL-CM3	1.72	2.61	2.95	15.36	17.08	17.97	18.31
Noviembre	CNRMCM5	0.89	1.01	1.42	13.30	14.19	14.31	14.72
	MPI-ESM-LR	1.33	2.04	1.97	13.30	14.63	15.34	15.27
	HADGEM2-ES	1.50	2.42	2.98	13.30	14.80	15.72	16.28
	GFDL-CM3	1.79	2.46	2.68	13.30	15.09	15.76	15.98
Diciembre	CNRMCM5	0.72	1.31	1.33	11.92	12.64	13.23	13.25
	MPI-ESM-LR	0.80	1.48	1.86	11.92	12.72	13.40	13.78
	HADGEM2-ES	1.41	2.27	2.85	11.92	13.33	14.19	14.77
	GFDL-CM3	1.43	2.39	2.82	11.92	13.35	14.31	14.74

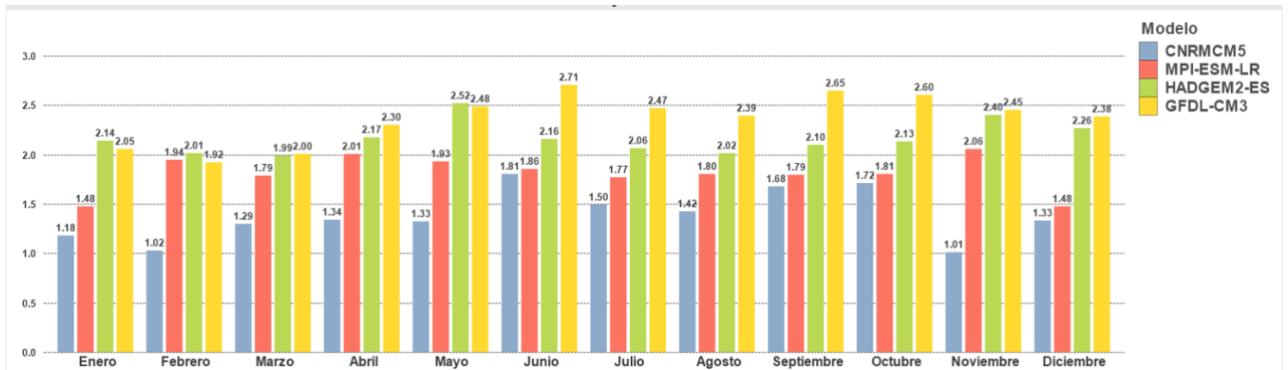


Figura 6.2.3.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura mínima de los cuatro modelos de circulación general en el futuro intermedio (2045-2069) bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5.

Comparando los resultados de la tabla 6.2.3b, se observa que:

En el RCP 8.5 futuro cercano (2015-2039), las anomalías más grandes en la temperatura mínima las presenta el modelo HADGEM2-ES con valores hasta de 1.82°C, y el modelo GFDL-CM3 con valores hasta de 1.84°C. En la proyección total todos los modelos muestran un incremento con respecto al clima base, aunque mantienen el mismo patrón, a excepción del modelo HADGEM2-ES en donde se observa un aumento de la temperatura en mayo y septiembre, y el modelo GFDL-CM3 con un incremento de temperatura en junio y septiembre.

En el RCP 8.5 futuro intermedio (2045-2069), las anomalías de mayor valor en la temperatura mínima las presenta el modelo HADGEM2-ES con valores hasta de 3.20°C, y el modelo GFDL-CM3 con valores hasta de 3.48°C. En la proyección total todos los modelos muestran un incremento con respecto al clima base, aunque mantienen el mismo patrón, a excepción del modelo HADGEM2-ES en donde se observa un incremento de la temperatura en enero, mayo, noviembre y diciembre, y el modelo GFDL-CM3 con un aumento de temperatura en junio y septiembre.

En el RCP 8.5 futuro lejano (2075-2099), las anomalías más grandes en la temperatura mínima las presenta el modelo HADGEM2-ES con valores hasta de 5.25°C, y el modelo GFDL-CM3 con valores hasta de 5.21°C. En la proyección total todos los modelos muestran un incremento con respecto al clima base, aunque mantienen el mismo patrón, a excepción del modelo HADGEM2-ES en donde se observa un aumento de la temperatura en mayo y noviembre, y el modelo GFDL-CM3 con un incremento de temperatura de abril a diciembre (figura 6.2.3.2).

Después de la comparación del comportamiento de los modelos y los diferentes escenarios, se observa que las anomalías más grandes se presentan en el RCP 8.5 futuro lejano, y los modelos HADGEM2-ES y GFDL-CM3 son los que en todos los periodos y bajo los diferentes escenarios, muestran proyecciones más extremas en la temperatura mínima con respecto al clima base y a los otros modelos.

Tabla 6.2.3b. Datos de la temperatura mínima: anomalías, clima base y la proyección total bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5

Temperatura Mínima (°C) del Escenario de Cambio Climático RCP 8.5 en la Cuenca de La Antigua								
Mes	Modelo	Anomalía RCP 8.5			Clima	Total RCP 8.5		
		2015-2039	2045-2069	2075-2099		2015-2039	2045-2069	2075-2099
Enero	CNRMCM5	0.66	1.47	2.64	11.14	11.80	12.61	13.78
	MPI-ESM-LR	1.16	2.16	3.66	11.14	12.30	13.30	14.80
	HADGEM2-ES	1.36	3.06	4.90	11.14	12.50	14.20	16.04
	GFDL-CM3	1.10	2.67	3.74	11.14	12.24	13.81	14.88
Febrero	CNRMCM5	0.66	1.55	2.72	11.97	12.63	13.52	14.69
	MPI-ESM-LR	1.33	2.37	3.72	11.97	13.30	14.34	15.69
	HADGEM2-ES	1.09	2.95	4.86	11.97	13.06	14.92	16.83
	GFDL-CM3	1.13	2.11	3.73	11.97	13.10	14.08	15.70
Marzo	CNRMCM5	0.74	1.86	3.10	13.72	14.46	15.58	16.82
	MPI-ESM-LR	1.04	2.33	4.08	13.72	14.76	16.05	17.80
	HADGEM2-ES	0.92	2.59	4.75	13.72	14.64	16.31	18.47
	GFDL-CM3	1.11	2.81	3.95	13.72	14.83	16.53	17.67
Abril	CNRMCM5	0.93	2.18	3.56	15.82	16.75	18.00	19.38
	MPI-ESM-LR	1.22	2.53	4.37	15.82	17.04	18.35	20.19
	HADGEM2-ES	1.05	2.93	5.01	15.82	16.87	18.75	20.83
	GFDL-CM3	1.53	3.25	4.89	15.82	17.35	19.07	20.71
Mayo	CNRMCM5	1.09	2.04	3.56	16.89	17.98	18.93	20.45
	MPI-ESM-LR	1.26	2.49	4.45	16.89	18.15	19.38	21.34
	HADGEM2-ES	1.57	3.12	5.23	16.89	18.46	20.01	22.12
	GFDL-CM3	1.49	3.07	4.92	16.89	18.38	19.96	21.81
Junio	CNRMCM5	1.09	2.12	3.50	17.25	18.34	19.37	20.75
	MPI-ESM-LR	1.31	2.65	4.44	17.25	18.56	19.90	21.69
	HADGEM2-ES	1.18	2.81	4.55	17.25	18.43	20.06	21.80
	GFDL-CM3	1.71	3.32	5.09	17.25	18.96	20.57	22.34
Julio	CNRMCM5	1.01	2.05	3.39	16.36	17.37	18.41	19.75
	MPI-ESM-LR	1.19	2.58	4.29	16.36	17.55	18.94	20.65
	HADGEM2-ES	1.27	2.84	4.45	16.36	17.63	19.20	20.81
	GFDL-CM3	1.37	3.10	4.82	16.36	17.73	19.46	21.18
Agosto	CNRMCM5	0.99	2.00	3.46	16.47	17.46	18.47	19.93
	MPI-ESM-LR	1.24	2.58	4.27	16.47	17.71	19.05	20.74
	HADGEM2-ES	1.37	2.81	4.60	16.47	17.84	19.28	21.07
	GFDL-CM3	1.58	3.07	4.84	16.47	18.05	19.54	21.31
Septiembre	CNRMCM5	1.16	2.26	3.82	16.62	17.78	18.88	20.44
	MPI-ESM-LR	1.20	2.58	4.22	16.62	17.82	19.20	20.84
	HADGEM2-ES	1.62	2.95	4.61	16.62	18.24	19.57	21.23
	GFDL-CM3	1.84	3.47	5.19	16.62	18.46	20.09	21.81
Octubre	CNRMCM5	0.84	1.76	3.38	15.36	16.20	17.12	18.74
	MPI-ESM-LR	1.38	2.78	4.49	15.36	16.74	18.14	19.85
	HADGEM2-ES	1.59	2.91	4.61	15.36	16.95	18.27	19.97
	GFDL-CM3	1.69	3.20	5.05	15.36	17.05	18.56	20.41
Noviembre	CNRMCM5	0.78	1.69	2.89	13.30	14.08	14.99	16.19
	MPI-ESM-LR	1.25	2.84	4.55	13.30	14.55	16.14	17.85
	HADGEM2-ES	1.83	3.22	5.29	13.30	15.13	16.52	18.59
	GFDL-CM3	1.60	3.18	4.91	13.30	14.90	16.48	18.21
Diciembre	CNRMCM5	0.65	1.65	2.86	11.92	12.57	13.57	14.78
	MPI-ESM-LR	1.07	2.31	4.03	11.92	12.99	14.23	15.95
	HADGEM2-ES	1.27	3.09	4.82	11.92	13.19	15.01	16.74
	GFDL-CM3	1.34	3.16	5.08	11.92	13.26	15.08	17.00

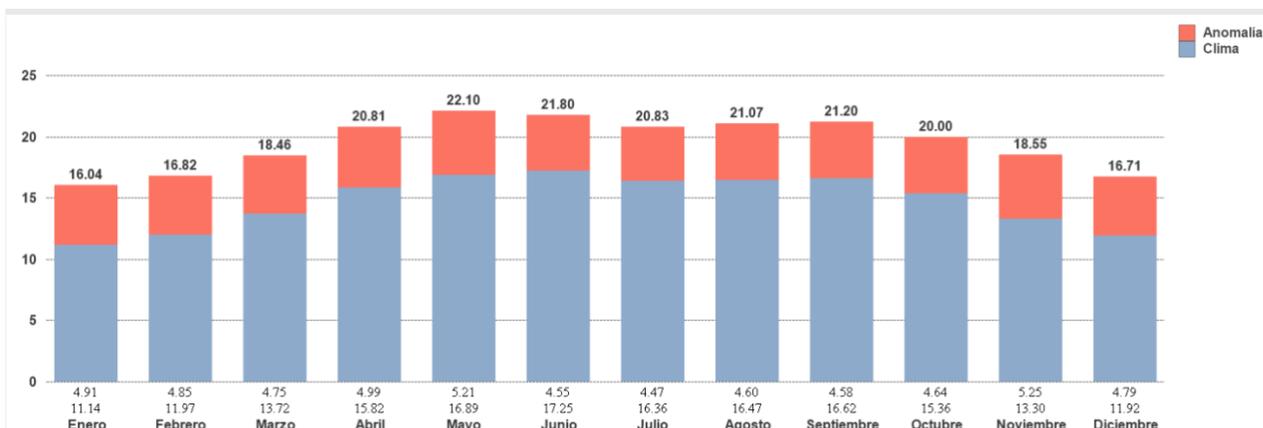


Figura 6.2.3.2 Ciclo anual de la temperatura mínima del clima base (1950-2000), la proyección total y la anomalía del modelo HADGEM2-ES futuro lejano (2075-2099) bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5.

Como se observa en las diferentes variables el modelo GFDL-CM3 muestra los valores más grandes en las anomalías, seguido por el modelo HADGEM2-ES. Gracias a esta comparación entre los resultados tanto de las anomalías, como de las proyecciones totales, podemos ver que todos los modelos proyectan diferencias con respecto al clima base, pero las proyecciones más extremas las presenta el modelo GFDL-CM3.

En este ejercicio fue considerando un valor promedio en toda la cuenca, por tal motivo en la siguiente sección se realizó un análisis detallado del escenario RCP 8.5 futuro lejano, considerando valores promedio en toda la cuenca con el objetivo de observar cómo varían las proyecciones de los diferentes modelos, y en el Anexo I se muestran los resultados de los tres niveles de la cuenca. En la sección del clima base se mostraron los diferentes valores y comportamientos de las variables climáticas por nivel de cuenca, y a continuación se analizarán las proyecciones de los escenarios de cambio climático.

6.3 Escenario de Cambio Climático RCP 8.5 en el Futuro Lejano (2075-2099).

En esta sección se analiza a detalle el escenario RCP 8.5 futuro lejano en toda la cuenca de La Antigua, las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. En el Anexo I se hace un análisis de esta información en la cuenca alta, cuenca media y cuenca baja.

6.3.1 Precipitación

En la figura 6.3.1.1, se observa en forma gráfica y de tabla el comportamiento mes por mes de las anomalías de la precipitación con el escenario RCP 8.5 proyectado

a futuro lejano; los modelos coinciden con un incremento en la precipitación en el otoño sobre todo la mayoría coincide con un incremento en octubre, sólo el HADGEM2-ES muestra un incremento significativo en noviembre. El modelo GFDL-CM3 tiene un incremento de la precipitación en otoño e invierno, el resto del año tiene una reducción de la precipitación. El modelo CNRMCM5 se mantiene una ligera disminución de la precipitación casi todo el año a excepción de mayo y octubre en donde se tiene un ligero incremento de la precipitación. El modelo MPI-ESM-LR tienen un ligero incremento de la precipitación en junio y en el otoño, el resto del año tiene disminución de precipitación acentuándose en agosto.

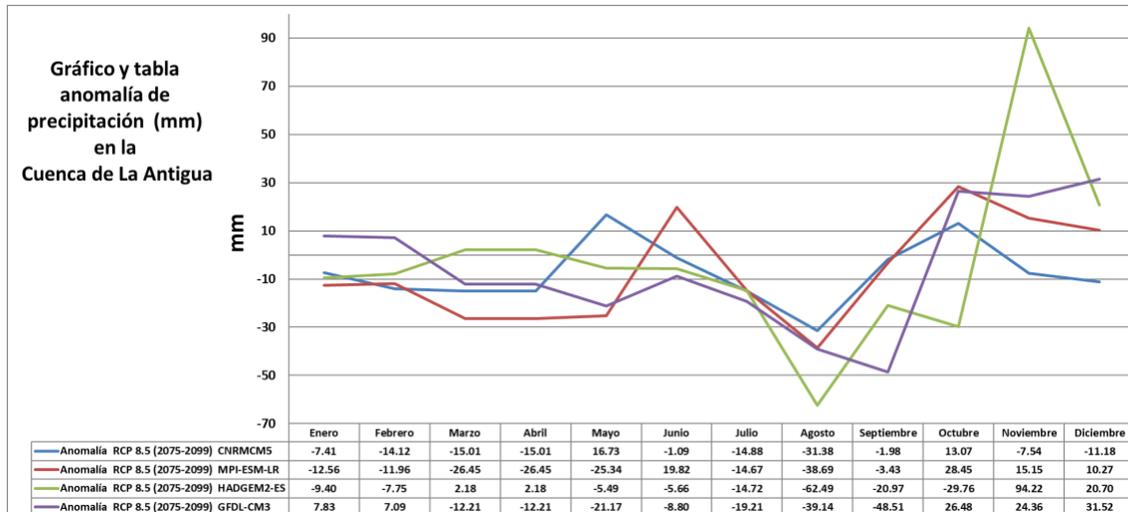


Figura 6.3.1.1 Ciclo anual de las anomalías de la precipitación proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099).

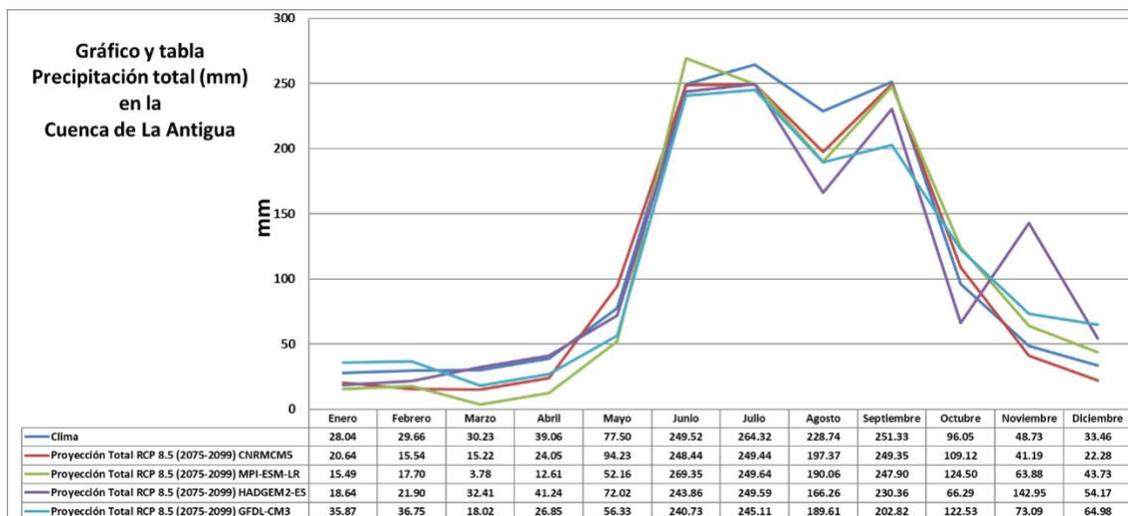


Figura 6.3.1.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la precipitación de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099).

En el ciclo anual de la precipitación tanto del clima base como de las proyecciones totales de los modelos se observa claramente la señal de la canícula, con algunos

modelos se acentúa la señal y con otros se adelanta (figura 6.3.1.2). El modelo HADGEM2-ES es el que presenta los cambios más drásticos sobre todo en los meses de octubre en donde disminuye drásticamente, y noviembre en donde incrementa de forma importante la precipitación con respecto al clima base. El modelo MPI-ESM-LR proyecta el valor máximo de precipitación con 269.35 mm en junio, y el valor mínimo de precipitación con 3.78 mm en marzo.

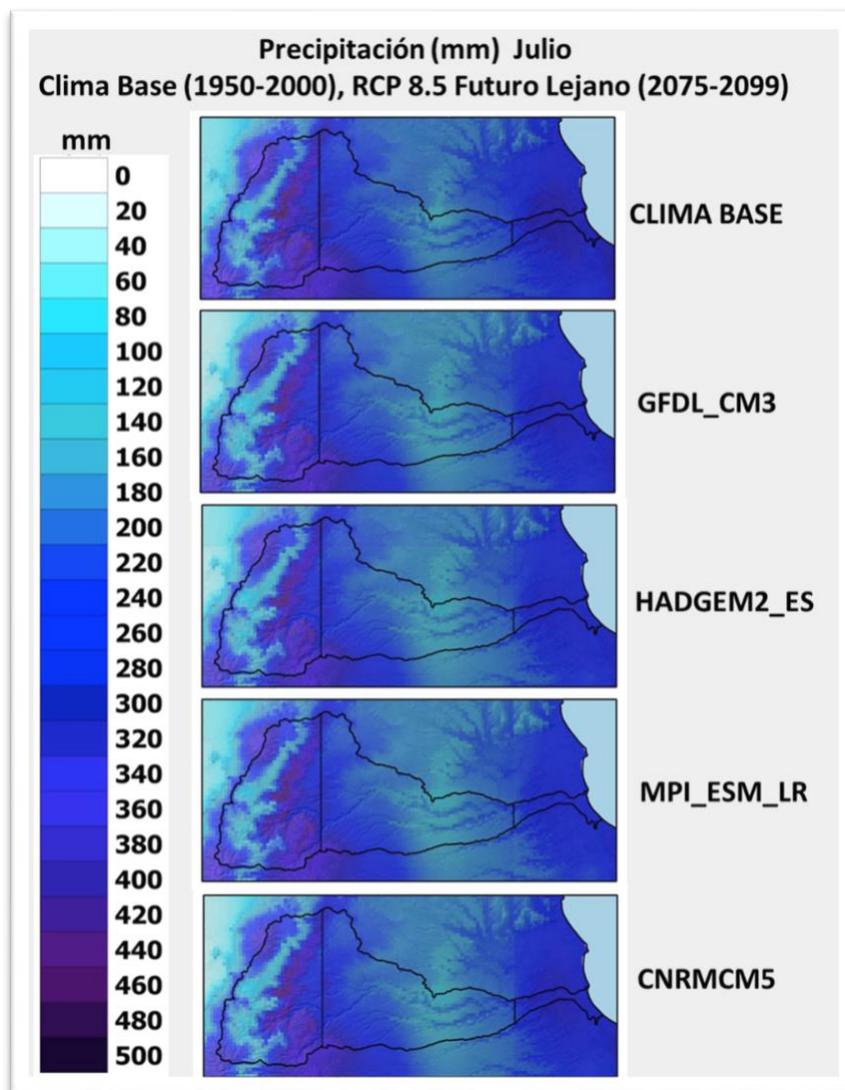


Figura 6.3.1.3 Distribución de la precipitación en clima base y las proyecciones de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099) en julio.

La distribución de la precipitación en la región de la cuenca de La Antigua varía mes con mes como se mostró a detalle en la figura 6.1.1.1, en la que se observa que el mes de mayor precipitación es julio. En la figura 6.3.1.3 se aprecia la distribución de la precipitación en julio tanto en el clima base, como proyectado por los diferentes modelos. La mayor precipitación se presenta en la zona montañosa de la cuenca

alta y en la zona de la cuenca baja, mientras que en la cuenca media la precipitación más representativa se presenta en la parte alta.

6.3.2 Temperatura Máxima

En la figura 6.3.2.1, se observa en forma gráfica y de tabla el comportamiento mes por mes de las anomalías de la temperatura máxima con el escenario RCP 8.5 proyectado a futuro lejano. Las anomalías más grandes las presentan los modelos GFDL-CM3 y HADGEM2-ES con valores en rango de 4 a 7°C. Mientras que el modelo MPI-ESM-LR tiene valores aproximados de 4 a 5°C. El modelo CNRMCM5 va de 3 a 4.5°C.

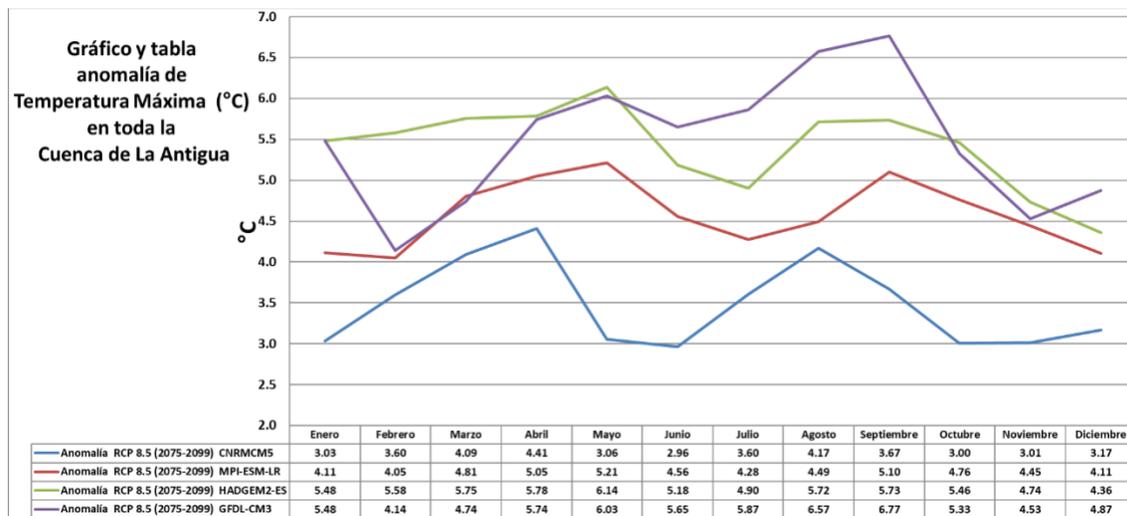


Figura 6.3.2.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura máxima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099).

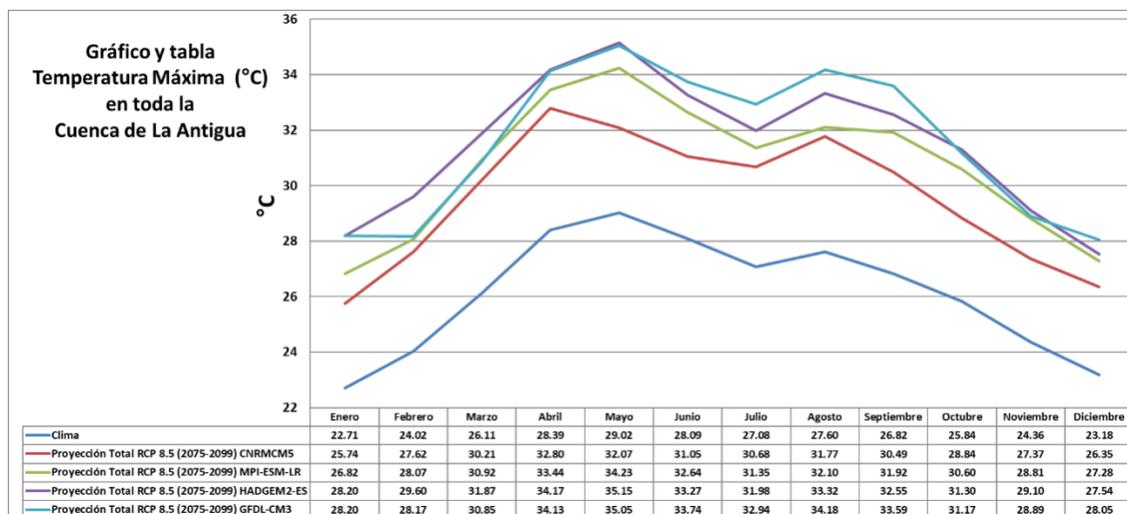


Figura 6.3.2.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura máxima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099).

La mayoría de las proyecciones conservan un patrón semejante al del clima base, con la excepción de modelo CNRMCM5 que muestra la temperatura más alta en abril y no en mayo como el resto de los modelos (figura 6.3.2.2). Los modelos y el clima base muestran claramente una disminución de la temperatura durante la temporada de lluvias y un incremento durante el periodo de la canícula.

Las temperaturas más altas se presentan en la cuenca baja y en gran parte de la cuenca media (figura 6.3.2.3). El modelo GFDL_CM3 muestra las temperaturas máximas más altas en el mes de mayo, seguido por los modelos HADGEM2-ES y MPI-ESM-LR. La cuenca alta es en donde se mantienen las temperaturas máximas más bajas, y aunque también refleja un incremento en las proyecciones con respecto al clima base, es la cuenca baja en donde existe un mayor incremento.

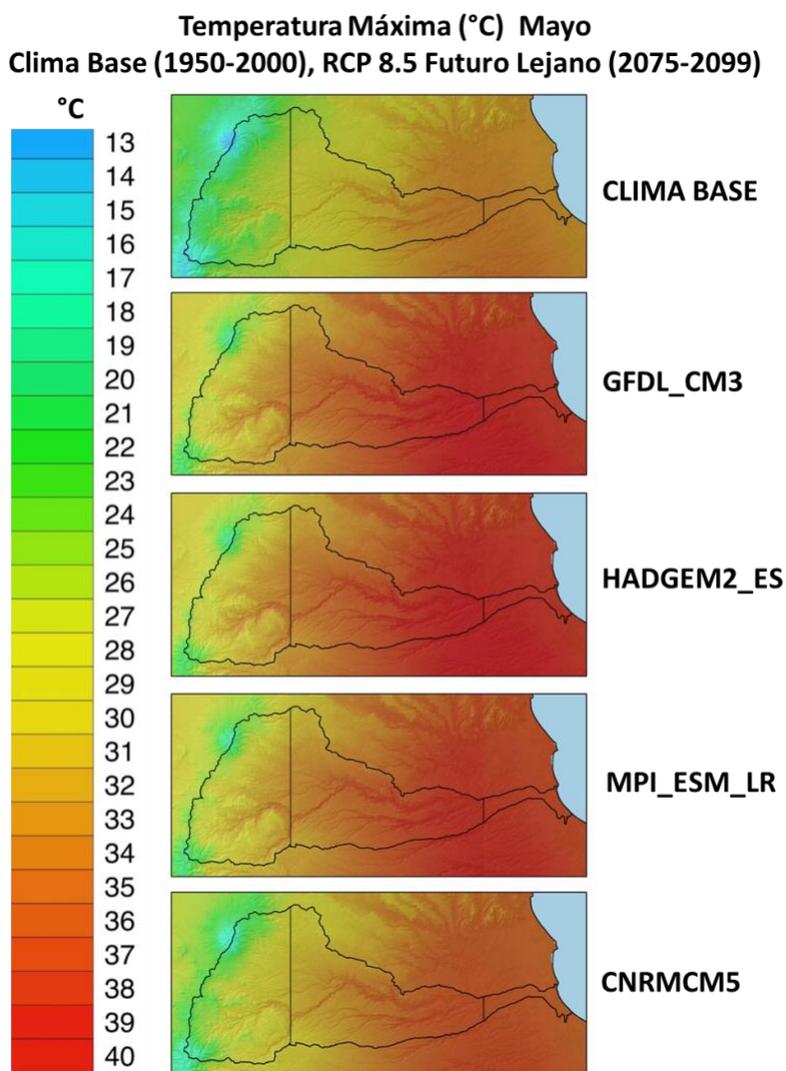


Figura 6.3.2.3 Distribución de la temperatura máxima en clima base y las proyecciones de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099) en mayo.

6.3.3 Temperatura Mínima

En la figura 6.3.3.1, se observa en forma gráfica y de tabla el comportamiento mes por mes de las anomalías de la temperatura mínima con el escenario RCP 8.5 proyectado a futuro lejano. Las anomalías más grandes las presenta el modelo HADGEM2-ES con valores en rango de 4.47 a 5.25°C. Mientras el modelo GFDL-CM3 tienen valores de 3.72 a 5.21°C. Los modelo MPI-ESM-LR CNRMCM5 van de 2.67 a 4.56°C.

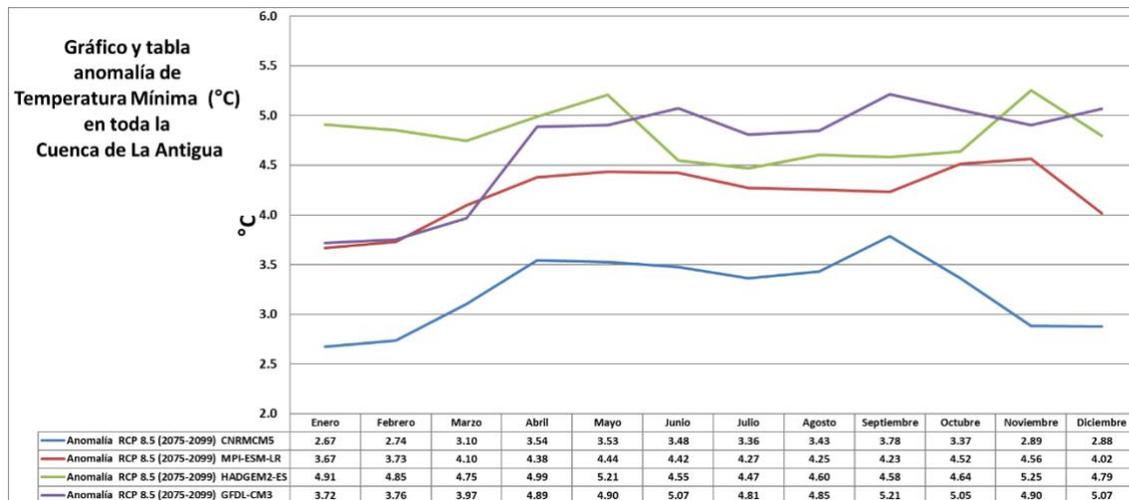


Figura 6.3.3.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura mínima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099).

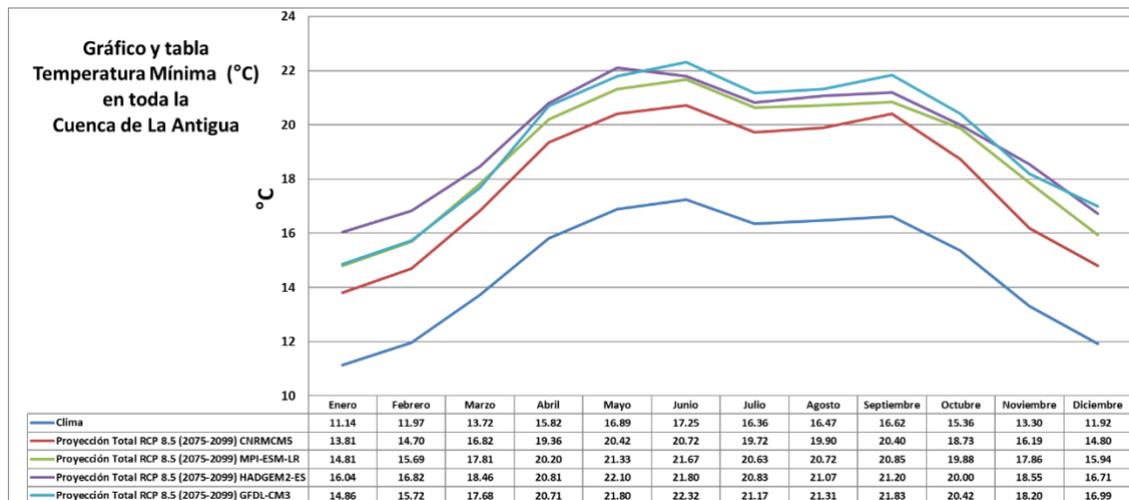


Figura 6.3.3.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura mínima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099).

La mayoría de las proyecciones conservan un patrón semejante al del clima base, con la excepción de modelo HADGEM2-ES que muestra la temperatura mínima más alta en mayo y no en junio como el resto de los modelos (figura 6.3.3.2). Los

modelos y el clima base muestran claramente una disminución de la temperatura durante la temporada de lluvias y un incremento durante el periodo de la canícula.

Las temperaturas mínimas más altas se presentan en la cuenca baja y en gran parte de la cuenca media (figura 6.3.3.3). El modelo GFDL_CM3 es el que presenta mayor incremento de la temperatura mínima con respecto al clima base. La cuenca alta es en donde se mantienen las temperaturas mínimas más bajas, y aunque también refleja un incremento en las proyecciones con respecto al clima base, es la cuenca baja en donde existe un mayor incremento.

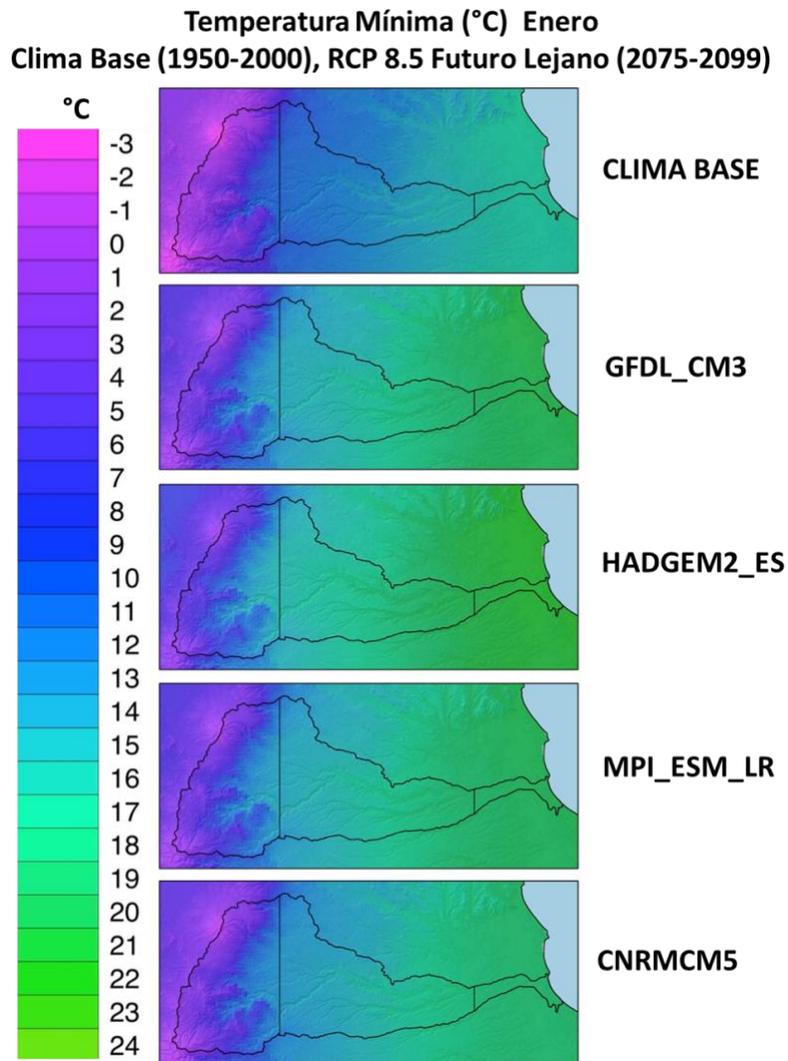


Figura 6.3.3.3 Distribución de la temperatura mínima en clima base y las proyecciones de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099) en enero.

7 Conclusiones

La aportación más relevante de este trabajo fue el desarrollo de una metodología basada en información libre y disponible para cualquier usuario, con herramientas para la generación de escenarios regionales base y de cambio climático, a las que la gran mayoría de los usuarios puede tener acceso, debido a que son software de acceso libre.

Se aplicó este método en el análisis de una región de México, la cuenca hidrográfica del río La Antigua, Veracruz. Esto también constituye un aporte en tanto que se realiza un análisis territorial.

En los estudios de impactos del cambio climático, la regionalización queda determinada por la pregunta bajo estudio, y también por la resolución (espacial y temporal) de las bases de datos para generar los escenarios de cambio climático. Una posible regionalización es el análisis con enfoque de cuenca, lo que permitiría hacer estudios territoriales, en lugar de únicamente locales o de gran escala. Un análisis territorial resulta más enriquecedor para los estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación, en tanto se trataría de una región con recursos naturales compartidos, y para los que hay políticas públicas definidas.

Cabe mencionar que se procesó y se utilizó la información de diversas formas, con la finalidad de poder identificar cómo puede variar un análisis con los datos observados desde tablas, gráficas y mapas. Todos estos pasos fueron importantes, ya que aportaban información valiosa y diferente, con la cual se puede hacer una descripción profunda de la región y se obtuvieron los escenarios actuales y de cambio climático en la región de estudio. Ejemplos de aplicación del método para el desarrollo de estos productos se describe en los anexos de este trabajo.

Es importante resaltar que se en este trabajo se consideraron dos condiciones extremas: un escenarios de estabilización de emisiones (RCP4.5), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5).

En términos generales en la cuenca del río La Antigua, con las proyecciones de los escenarios de cambio climático tanto en el RCP 4.5 como en el RCP 8.5, los efectos de la canícula se pronunciarán en toda su extensión, teniendo un efecto importante en la precipitación y por tanto en los sistemas productivos humanos y en los sistemas naturales. La temperatura aún bajo el escenario de cambio climático más favorable tiende a incrementarse. En el escenario más extremo superaría los 6°C, pero mantiene el comportamiento del ciclo anual semejante al del clima base. Esta información es fundamental para los posibles estudios de impactos por cambio climático en la cuenca, como los mencionados en la tabla 4.1 (“Principales problemas, sus causas e impactos en la cuenca del río Antigua”), porque a pesar de que son proyecciones y no pronósticos, brindan información para la mejor toma de decisiones, para el análisis de un abanico de posibles acciones, y finalmente, del desarrollo de políticas en materia de cambio climático.

En este trabajo se cumplió el objetivo de analizar y comparar el comportamiento de los escenarios disponibles y más actuales en la región de estudio. En el cumplimiento de este objetivo se desarrolló una herramienta simple, flexible y accesible para ser aplicada por estudiosos de diferentes disciplinas.

En particular, podemos concluir lo siguiente:

- Los modelos que presentan mayor variación con respecto al clima base son el GFDL-CM3 y el HADGEM2-ES.
- El escenario de cambio climático con menor variación con el clima base es el RCP 4.5 futuro cercano (2015-2039), y el escenario con mayor variación con respecto al clima base es el RCP 8.5 futuro lejano (2075-2099).
- Es importante conocer las características climáticas de nuestra región de estudio, para poder ser objetivos en el análisis e identificar que tan confiables pueden ser los resultados que obtenemos con los escenarios de cambio climático.
- En muchas ocasiones es necesario subdividir nuestra región de análisis, ya que pueden presentarse fenómenos que una subdivisión como la propuesta puede aportar más información que con la regionalización de mayores dimensiones. En este caso, se subdividió la cuenca en la parte alta, media y baja. Sin embargo, cabe mencionar que se sugiere no reducir demasiado la escala espacial (ni temporal), pues puede incrementarse la incertidumbre asociada a los escenarios de cambio climático. La correspondencia entre la regionalización propuesta y la distribución espacial de la vegetación en la región de estudio permite suponer que la subdivisión propuesta es confiable.

Finalmente, podemos afirmar que los modelos coinciden en que la temperatura regional aumentará, y que la distribución espacial de la precipitación variará con respecto al clima base, en algunos meses se incrementa y en otros disminuye, siendo el modelo HADGEM2-ES, en el horizonte lejano, el que proyecta cambios más severos.

8 Recomendaciones

En este trabajo se utilizó la información disponible más actual, basada en lo sugerido por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático IPCC por sus siglas en inglés; IPCC 2013).

Se sugiere generar escenarios climáticos actuales y futuros con un enfoque territorial, como es el caso de cuencas, que determinan los usos y políticas públicas sobre el recurso hídrico, y que incluyen también diferentes ecosistemas en regiones altas, medias y bajas de la cuenca.

El desarrollo de este estudio percibimos la importancia de los estudios interdisciplinarios, en donde los usuarios de diferentes disciplinas dispongan de una herramienta sencilla, nutrida con datos accesibles, y con la flexibilidad para generar bases de datos y cartografía útil en sus estudios

Por supuesto, a futuro, se seguirán desarrollando los escenarios de cambio climático, pero una fortaleza de este estudio es proporcionar a los usuarios una metodología basada en herramientas públicas y de software libre para hacer más ágil la actualización de sus estudios.

En un futuro se contará con información más confiable y actualizada, que permita seguramente realizar un análisis más detallado, como podrían ser los nuevos escenarios que puedan surgir del Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados (CMIP6, por sus siglas en inglés) o incluso los escenarios con datos diarios que se utilicen para hacer estudios de posibles cambios en los eventos extremos.

Se espera que los asistentes a los seis talleres impartidos por el proponente de esta tesis (septiembre de 2017, abril, agosto y noviembre de 2018, marzo y mayo de 2019), empleen en sus estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación los escenarios ya generados por ellos. En particular, el taller que se impartió en la Universidad Veracruzana, con asistencia de más de 20 participantes, pueda rendir los frutos esperados con la aplicación de los escenarios generados. Cabe aclarar que los participantes de dichos talleres cuentan con material de divulgación (Anexo IV) que los va guiando paso a paso en el proceso. Un resultado posterior que sería relevante es que esos participantes a su vez se conviertan en divulgadores de los métodos para generación de escenarios aquí propuestos (incluido en ello las bases de datos y cartografía respectiva).

9 Referencias Bibliográficas

Acevedo, F., Luna, A. 2006. Principales Fenómenos Meteorológicos que afectaron al Estado de Veracruz en el Año 2005. En Inundaciones del 2005 en el Estado de Veracruz. A. Tejeda y C.M. Welsch (Eds), pp. 53-67 (Universidad Veracruzana: México, 2005).

<http://www.iingen.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/Libros/Documents/Veracruz/04.pdf>

Adem, J., Garduño, R. 1982. Preliminary Experiments on the Climatic Effect of an Increase of the Atmospheric CO₂, Using a Thermodynamic Model. Geofísica Internacional. Vol. 21 Núm. 4, Pag 309-324.

<http://revistas.unam.mx/index.php/geofisica/article/viewFile/39800/36217>

Adem, J., Garduño, R. 1984. Sensitivity Studies on the Climatic Effect of an Increase of Atmospheric CO₂. Geofísica Internacional. Vol. 23 Núm. 1, Pag 17-35. <http://revistas.unam.mx/index.php/geofisica/article/download/39273/35712>

Aguilar E., Barry, A. A., Brunet, M., Ekan, L., Fernandes, A., Massoukina, M., Mbah, J., do Nascimento, D. J., Peterson, T. C., Umba, O. T., Tomou, M., Zhang, X. 2009. Changes in Temperature and Precipitation Extremes in Western Central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955-2006. J. Geophys. Res. 114. <https://doi.org/10.1029/2008JD011010>

Arce, A., Monterroso, A., Gómez, J., Palacios, M., Navarro, E., López, J., Conde, C. 2019. Crop yield simulations in Mexican agriculture for climate change adaptation. *Atmósfera* DOI: 10.20937/ATM.52430. Acceptance date: 19 September 2019.

Arriaga, L., Aguilar, V., Alcocer, J. 2000. "Aguas continentales y diversidad biológica de México". Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. DOI: <https://doi.org/10.5962/bhl.title.118993>

Ayuntamiento de Xalapa. 2005. Apartado sobre recursos naturales locales. Iniciativas. <http://www.xalapa.gob.mx>

Banco Mundial. 2011. Guide to climate change adaptation in cities, Washington, D.C. The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank Group

http://www.iaii.int/admin/site/sites/default/files/uploads/Urban_Handbook_Final.pdf

Bolin, B. 1994. Science, Values and Climate Change. En: Equity and Social Considerations related to Climate Change. IPCC Workshop Proceedings. Nairobi, Kenya, 18-22 July, 1994. WMO, UNEP. 39 – 43.

URI: <http://hdl.handle.net/20.500.11822/29207>

Cavazos, T., Arriaga-Ramírez, S. 2012: Downscaled Climate Change Scenarios for Baja California and the North American Monsoon During the 21st Century. *J. Climate*, 25, 5904-5915.

<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-11-00425.1>

Cavazos, T., Salinas, J., Martínez, B., Colorado, G., De Grau, P., Prieto, R., Conde, C., Quintanar, A., Santana, J., Romero, R., Maya, M., Rosario, J., Ayala, M., Carrillo, H., Santiesteban, O., Bravo, M. 2013. Actualización De Escenarios De Cambio Climático Para México Como Parte De Los Productos De La Quinta Comunicación Nacional. Informe Final del Proyecto al INECC, 150 pp.

Cavazos, T. and De Grau, P. 2014. Estudio para la incorporación de nuevas variables en los escenarios de cambio climático para México utilizados en la Quinta Comunicación Nacional. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Cavazos, T., Luna-Niño, R., Cerezo-Mota, R., Fuentes-Franco, R., Méndez, M., Pineda, L., Valenzuela, E. 2019. Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean and Mexico) domain. *Int. J. Climatol.*, <http://doi.org/10.1002/joc.6276>

Colorado-Ruiz, G., Cavazos, T., Salinas, J., De Grau, P., Ayala, R. 2018: Climate change projections from Coupled Model Intercomparison Project phase 5 multi-model weighted ensembles for Mexico, the North American monsoon, and the mid-summer drought region. *Int. J. Climatol.* 38(15), 5699-5716, <https://doi.org/10.1002/joc.5773>.

CONABIO. 2000. Programa de Regiones Prioritarias Terrestres. CONABIO, México.

<http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/terrestres.html>

Conde C. 2003. Cambio y variabilidad climáticos. Dos estudios de caso en México. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias (Física de la Atmósfera). Posgrado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 227 pp.

Conde, C., Gay, C., Estrada, F., Fernández, A., López, F., Lozano, M., Magaña, V., Martínez, B., Sánchez, O., Ramírez, J., Zavala, J., Zermeño, D., 2008. Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 105 pp.

<http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/1/1574/CC019.pdf?sequen>

Conde, C., Estrada, F., Martínez, B., Sánchez, O., Gay, C. 2011. Regional Climate Change Scenarios for México. *Atmósfera* Vol. 24 Núm. 1, 125-140 . ISSN 0187-6236

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362011000100009

Cuevas, M. L., Garrido, A., y Sotelo, E. I. 2010. "Cuencas Hidrográficas de México" Escala; 1:250,000. En: Cotler H. (Coord). Las cuencas hidrográficas: diagnóstico y priorización, Instituto Nacional de Ecología-Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P., México, 232 pp.

<https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2011/02/CuencasHidrogra%CC%81ficas-1.pdf>

Deser, C., Phillips, A., Alexander, M., Smoliak, B. 2014. Projecting North American Climate over the Next 50 Years: Uncertainty due to Internal Variability. *J. Climate*, 27, 2271–2296.

<https://journals.ametsoc.org/jcli/article/27/6/2271/34846>

Díaz-Esteban, Y., Raga, G. 2018. Weather regimes associated with summer rainfall variability over southern Mexico. *International Journal of Climatology*. *Int. J. Climatol.* 38: 169–186. Published online 23 June 2017 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/joc.5168

<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.5168>

Díaz-Esteban, Y., Raga, G., Díaz, O. 2020. A Weather-Pattern-Based Evaluation of the Performance of CMIP5 Models over Mexico. *Climate* 2020.

<https://www.mdpi.com/610594>

Espinoza, T. B. 2009. Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático (102 pp.). Veracruz, México: Universidad Veracruzana.

Estrada, F., Martínez-López, B., C. Conde, C. Gay-García. 2012. The new national climate change documents of Mexico: what do the regional climate change scenarios represent?. *Climatic Change* 110: 1029-1046.

<https://doi.org/10.1007/s10584-011-0100-2>

Fernández, E., Zavala H. J., Romero C. R., Conde A. C., Trejo, V. I. 2014. Actualización de escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

https://atlasclimatico.unam.mx/inecc/Atlas_2_190215_documentacion.pdf

Gay, C. et al., Editores. 1995. Primer Taller de Estudio de País: México. México ante el cambio climático. Memorias, Cuernavaca, Mor. 18 al 22 de abril de 1994, México; Instituto Nacional de Ecología, US Country Studies Program. Support for Climate Change Studies, Coordinación de la Investigación Científica, Centro de Ciencias de la Atmósfera.

Gay, C. et al., (Eds.) 1996. Memorias del Segundo Taller del Estudio del País México ante el Cambio Climático. INE, CCA, UNAM, USCSP. Cuernavaca, Mor., 1995.

Gay, C. Comp. 2000. México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los estudios de la vulnerabilidad del país, coordinados por el INE con el apoyo del U.S. Country Studies Program, México Instituto Nacional de Ecología/ Universidad Nacional Autónoma de México/ U.S. Country Studies Program, 220 pp.

Gay C., Sánchez O., Martínez B., Nebot A., Estrada F. 2014. Fuzzy Models: Easier to Understand and an Easier Way to Handle Uncertainties in Climate Change Research. In: M.S. Obaidat *et al.* (eds.), Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, Advances in Intelligent Systems and Computing 256, DOI: 10.1007/978-3-319-03581-9_16. Springer International Publishing Switzerland.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-03581-9_16

Gestión Integral de la Cuenca de La Antigua –Libro Blanco- Universidad Anahúac Xalapa.

Gosling, S.N. & Arnell, N.W. 2016. A Global Assessment of the Impact of Climate Change on Water Scarcity. Climatic Change. 134: 371.
<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0853-x>

Held, I. M. 2005. The Gap between Simulation and Understanding in Climate Modeling. Am. Meteor. Soc. Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS). 1609-1614. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-11-1609>.

Henderson–Sellers, McGuffie, K. 1991. Introducción a los Modelos Climáticos. Ediciones Omega. 231 pp.

Hijmans, R.J., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., Jarvis, A. 2005. Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. International Journal of Climatology 25: 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>

IPCC, 2012. “Resumen para responsables de políticas” en el Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático [edición a cargo de Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., Qin, D., Dokken, D. J., Ebi, K. L., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Plattner, G. -K., Allen, S. K., Tignor, M., Midgley, P. M.]. Informe especial de los Grupos de trabajo I y II del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Nueva York, Estados Unidos de América, págs.1-20.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/IPCC_SREX_ES_web-1.pdf

IPCC – WGI, 2013: Summary for Policymakers. In: *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., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf

IPCC, 2013b: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_AnnexIII_FINAL.pdf

IPCC, 2014: Annex II: Glossary [Mach, K.J., Planton, S., Von Stechow C. (eds.)]. In: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 117-130.

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_Annexes.pdf

IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial 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* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J.B.R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M.I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., Waterfield, T. (eds.)].

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_AnnexI_Glossary.pdf

Kebede, A.S., Nicholls, R.J., Allan, A., Arto, I., Cazcarro, I., Fernandes, J.A., Hill, C. T., Hutton, C. W., Kay, S., Lázár, A. N., Macadam, I., Palmer, M., Suckall, N., Tompkins, E. L., Vincent, K., Whitehead, P.W. 2018. Applying the global RCP–SSP–SPA scenario framework at sub-national scale: A multi-scale and participatory scenario approach. *Science of The Total Environment*. 635: 659-672, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.368>

Kirtman, B., Power, S.B., Adedoyin, J.A., Boer, G.J., Bojariu, R., Camilloni, I., Doblas-Reyes, F.J., Fiore, A.M., Kimoto, M., Meehl, G.A., Prather, M., Sarr, A., Schär, C., Sutton, R., Van Oldenborgh, G.J., Vecchi, G., Wang, H.J. 2013: Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: *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., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter11_FINAL.pdf

Lipsset, L. 2000. Beyond El Niño. *Sci. Am.* 11(1): 76-83.

Nakicenovic et al. 2000. Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Cambridge University Press, Cambridge.

OCDE (Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos). 2009. Interacting Climate Change Adaptation into Development Co-operation: Policy Guidance, Paris.

Overpeck, J. T., Conde, C. 2019. A call to climate action. *Science*. Vol. 364 Issue 6443, pp. 807. DOI: 10.1126/science.aay1525
<https://science.sciencemag.org/content/364/6443/807.full>

Pérez Maqueo, Octavio y Miriam Ramos Escobedo. 2008. Análisis Técnico Ambiental para la Cuenca de La Antigua, Veracruz, México, México, Instituto de Ecología, A.C., Universidad Anáhuac Xalapa.

Pexioto, J.P., A. H. Oort. 1993. Physics of Climate. American Institute of Physics. New York.412-449.

Phillips, A., Deser, A., Fasullo, J. 2014. Evaluating Modes of Variability in Climate Models. *Eos*, 95(49):453 – 455. <https://eos.org/science-updates/evaluating-modes-variability-climate-models>

PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2005. Adaptation Policy Frameworks for climate change: Developing Strategies, Policies, and Measures, Nueva York, Naciones Unidas.

PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2010. Designing Climate Change Adaptation Initiatives. A UNDP Toolkit for Practitioners, Nueva York, Naciones Unidas.

Polvani, L.M., A.C. Clement, B. Medeiros, J.J. Benedict, I. R. Simpson. 2017. When less is more: Opening the Door to Simpler Climate Models. Opinion. EOS. <https://eos.org/opinions/when-less-is-more-opening-the-door-to-simpler-climate-models>

Prestele, R., Alexander, P., Rounsevell, M. D. A., Arneth, A., Calvin, K., Doelman, J., Eitelberg, D. A., Engström, K., Fujimori, S., Hasegawa, T.,

Havlik, P., Humpenöder, F., Jain, A. K., Krisztin, T., Kyle, P., Meiyappan, P., Popp, A., Sands, R. D., Schaldach, R., Schüngel, J., Stehfest, E., Tabeau, A., Van Meijl, H., Van Vliet, J., Verburg, P. H. 2016. Hotspots of uncertainty in land-use and land-cover change projections: a global-scale model comparison. *Global Change Biology* 22(12):3967-3983
<https://doi.org/10.1111/gcb.13337>

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H., Nykvist, B., De Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J. 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14(2): 32.
<http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>

Román-Jiménez A.R., Mendoza-Briseño, M. A., Velázquez-Martínez, A., Martínez-Ménez, M. R., Torres-Rojo, J. M., Ramírez-Maldonado, H. 2011. Usos y riesgos del agua en la cuenca La Antigua, Veracruz, México. *Madera y Bosques*. Vol. 17 Núm. 3, 2011:29-48. ISSN 2448-7597
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712011000300003

Ruiz-Barradas, A., Tejeda, M. A., Miranda, A. S., y Flores, Z. R. H. 2010. Climatología. Capítulo 3 en el libro *Atlas del Patrimonio Natural, Histórico y Cultural del Estado de Veracruz*, Vol. 1. Recursos Naturales. Pp. 65-84.
<http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/9649>

Salinas, J.A., Colorado, G., Montero, M., Maya, M., González, M. 2014. Actualización y divulgación de los nuevos escenarios de cambio climático aplicados a México para fortalecer las capacidades nacionales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Shepherd, T.G. 2014. Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections. *Nature Geoscience*. 7: 703-708.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2253>

Shuttle Radar Topography Mission. 2015. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

Schneider, S.H. 1992. Introduction to climate modeling. Chapter 1 in *Climate System Modeling*. K.E. Trenberth. (editor). Cambridge University Press. New York. NY. 3-26.
<https://climatehomes.unibe.ch/~stocker/papers/stocker14icm.pdf>

Stern, P.C., William, E. 1999 (ed). Making Climate Forecasts Matter. National Academy Press. (<http://www.nap.edu>). 175 pp.
<https://doi.org/10.17226/6370>

Stevens, B., S. Bony. 2013. What Are Climate Models Missing. *Science* 340(6136):1053-1054. DOI: 10.1126/science.1237554.
<https://science.sciencemag.org/content/340/6136/1053>

Anexo I

AI. Nivel de Cuenca

Como se ha podido observar en las secciones anteriores, existe una diferencia importante en las condiciones climáticas de cada uno de los niveles de la cuenca. Por tal motivo y para ver a detalle lo proyectado por los escenarios de cambio climático se hará en esta sección un análisis más profundo en cada uno de los niveles de la cuenca con el clima base y el escenario RCP 8.5 futuro lejano (2075-2099).

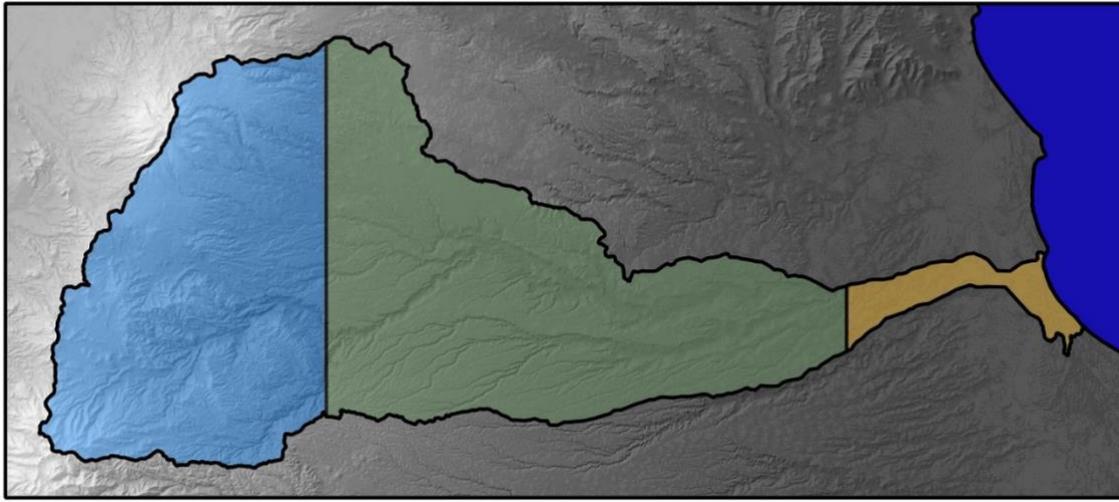


Figura 6.4.1 Niveles de cuenca del río La Antigua. De color azul tenemos la cuenca alta, de color verde la cuenca media y de color naranja la cuenca baja.

AI.1 Cuenca Alta

En esta sección se analizarán las variables de temperatura y precipitación en la cuenca alta del río La Antigua, tanto el clima base como el proyectado por el RCP 8.5 futuro lejano (2075-2099).

AI.1.1 Clima

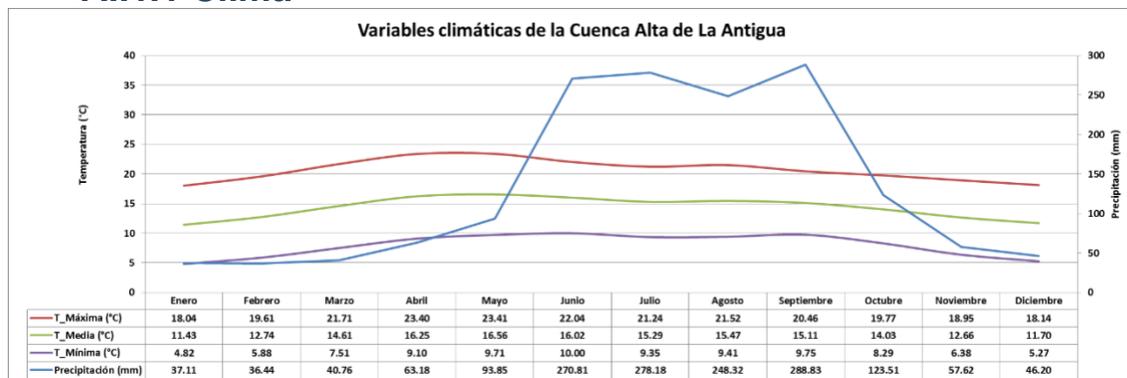


Figura AI.1.1 Ciclo anual del clima base de la temperatura y la precipitación de la cuenca alta del río La Antigua.

AI.1.2 Precipitación

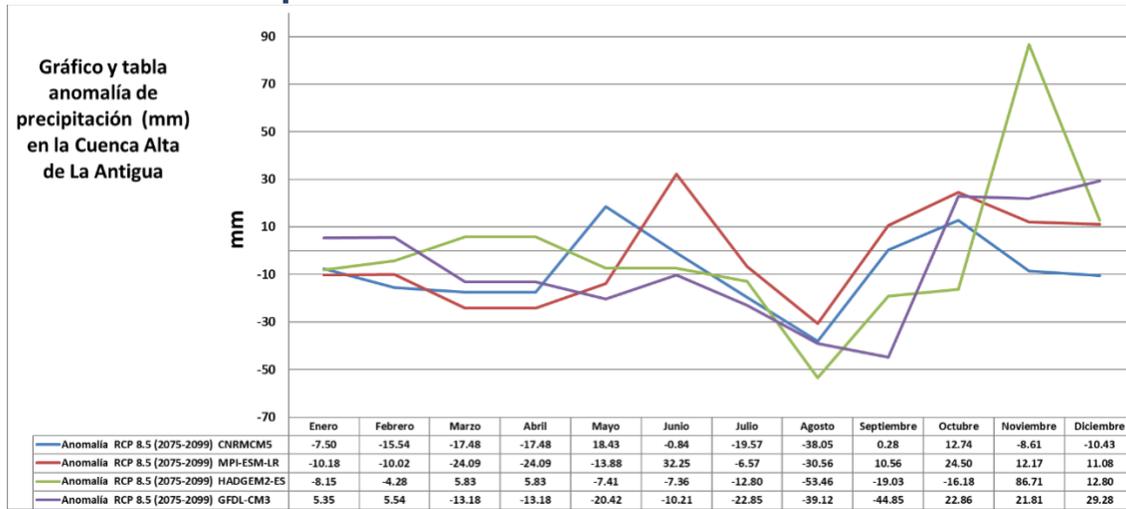


Figura AI.1.2.1 Ciclo anual de las anomalías de la precipitación proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca alta del río La Antigua.

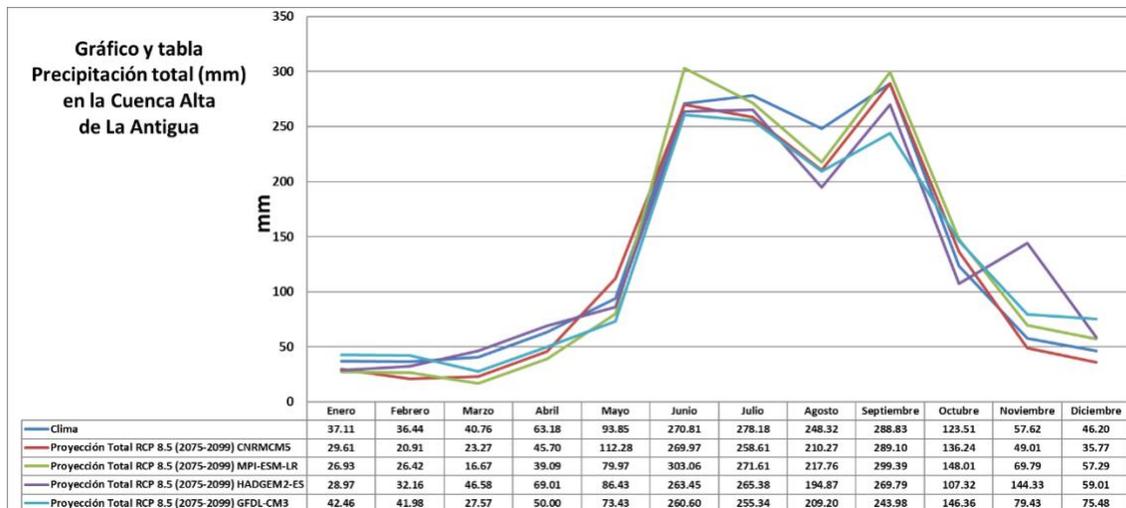


Figura AI.1.2.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la precipitación de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca alta del río La Antigua.

AI.1.3 Temperatura Máxima

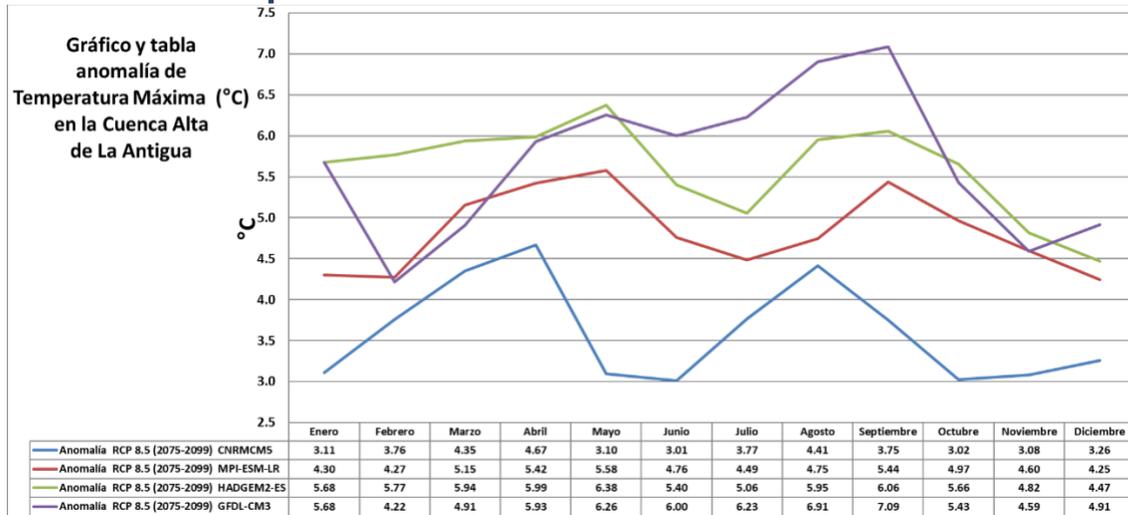


Figura AI.1.3.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura máxima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca alta del río La Antigua.

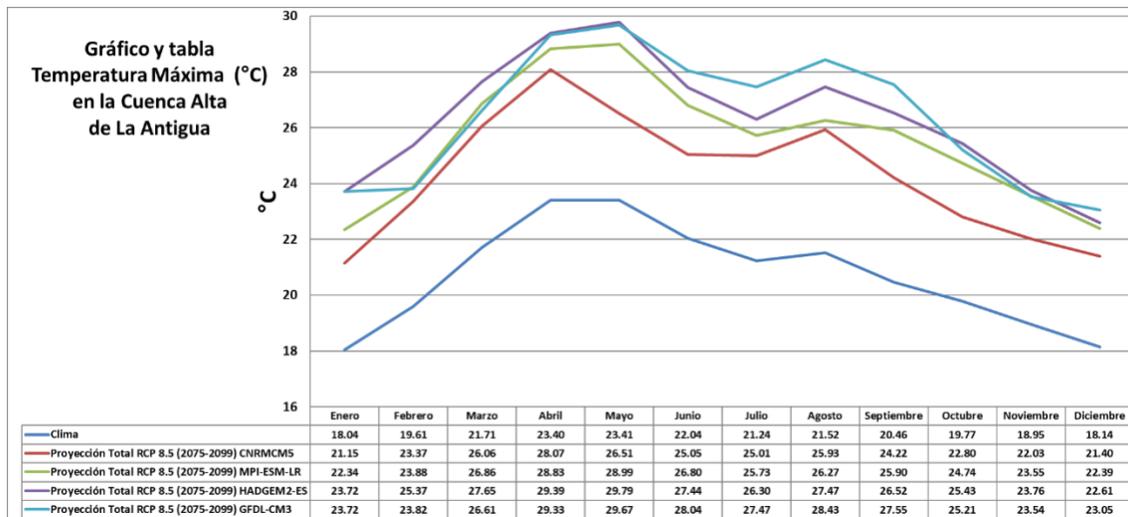


Figura AI.1.3.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura máxima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca alta del río La Antigua.

AI.1.4 Temperatura Mínima

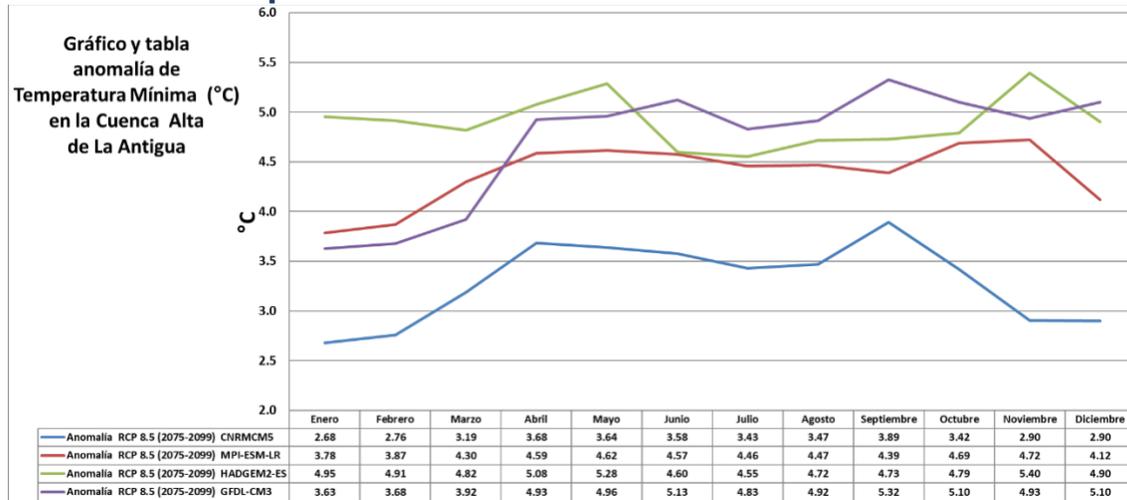


Figura AI.1.4.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura mínima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca alta del río La Antigua.

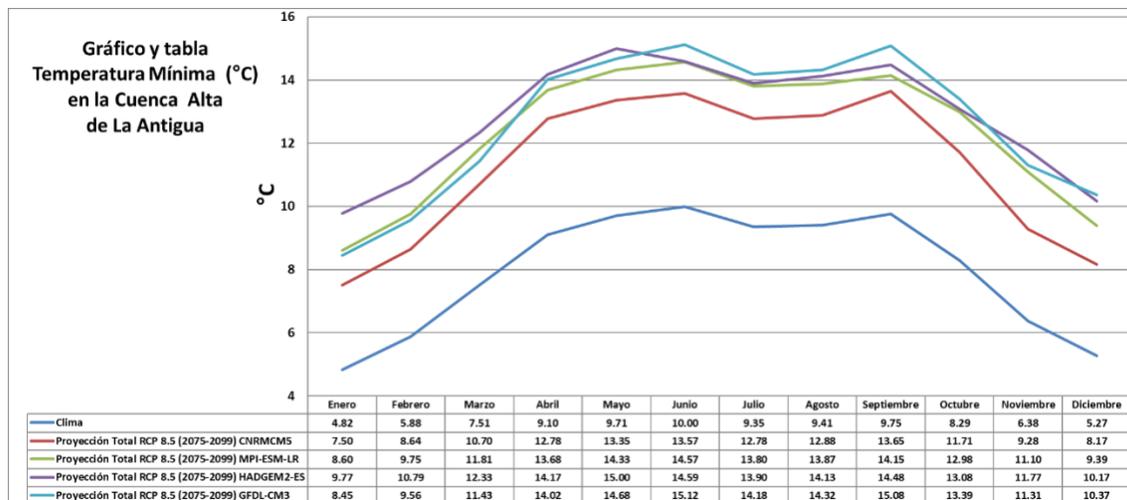


Figura AI.1.4.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura mínima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca alta del río La Antigua.

AI.2 Cuenca Media

En esta sección se analizarán las variables de temperatura y precipitación en la cuenca media del río La Antigua, tanto el clima base como el proyectado por el RCP 8.5 futuro lejano (2075-2099).

AI.2.1 Clima

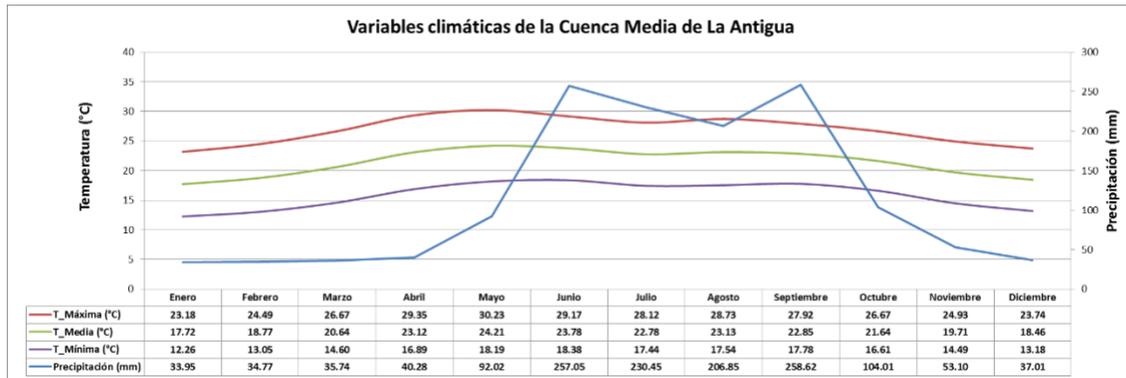


Figura AI.2.1 Ciclo anual del clima base de la temperatura y la precipitación de la cuenca media del río La Antigua.

AI.2.2 Precipitación

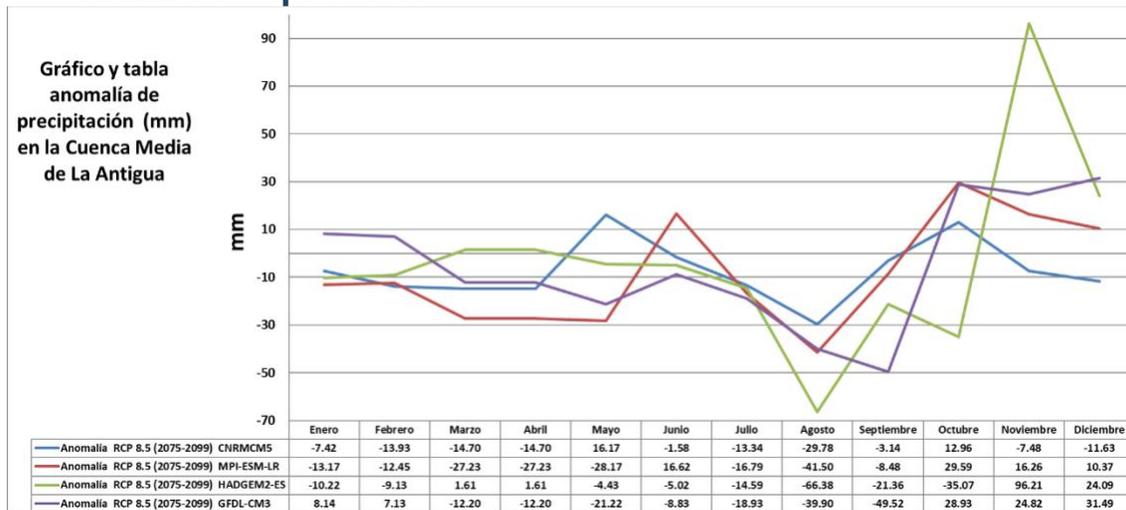


Figura AI.2.2.1 Ciclo anual de las anomalías de la precipitación proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca media del río La Antigua.

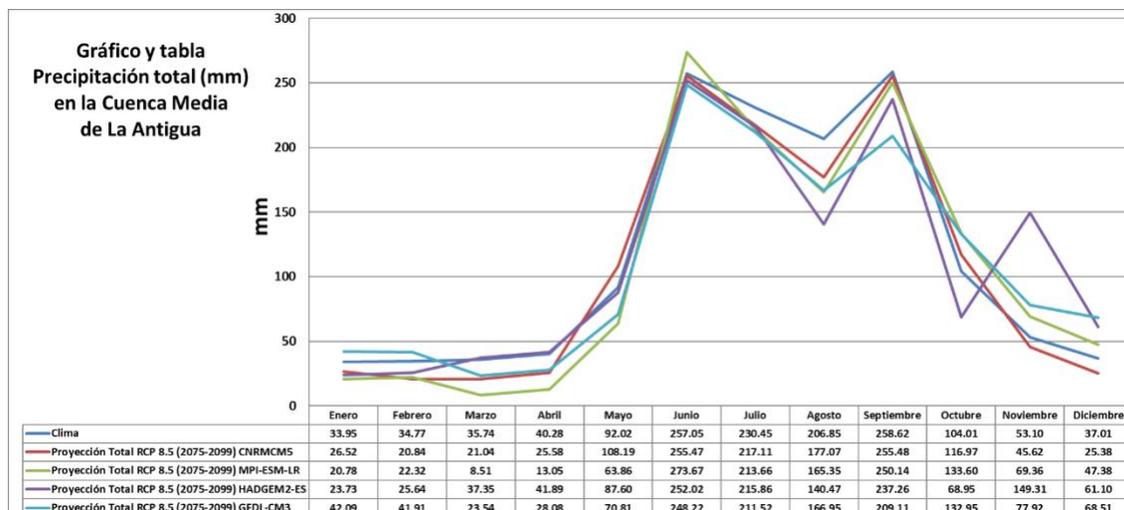


Figura AI.2.2.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la precipitación de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca media del río La Antigua.

AI.2.3 Temperatura Máxima

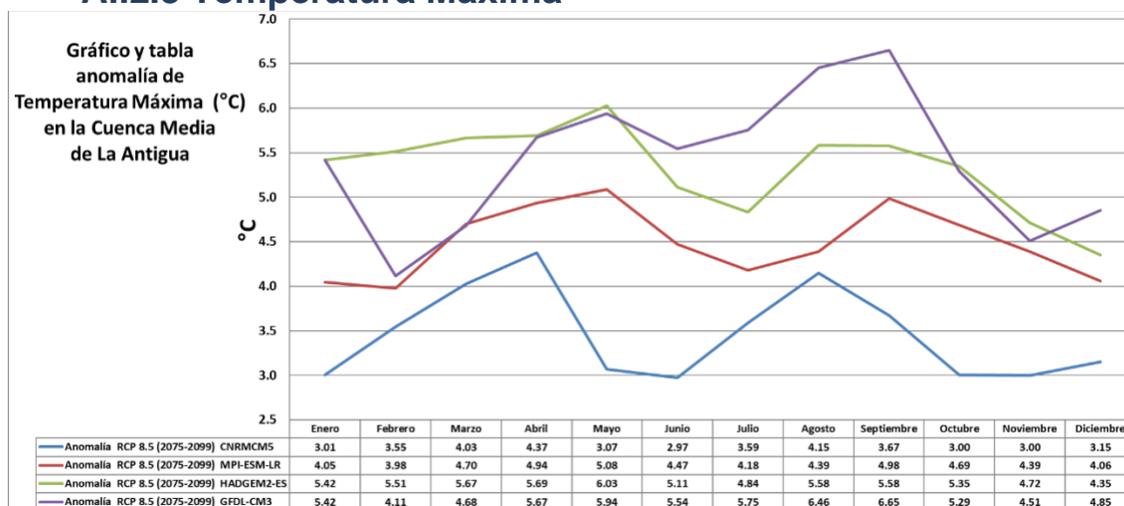


Figura AI.2.3.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura máxima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca media del río La Antigua.

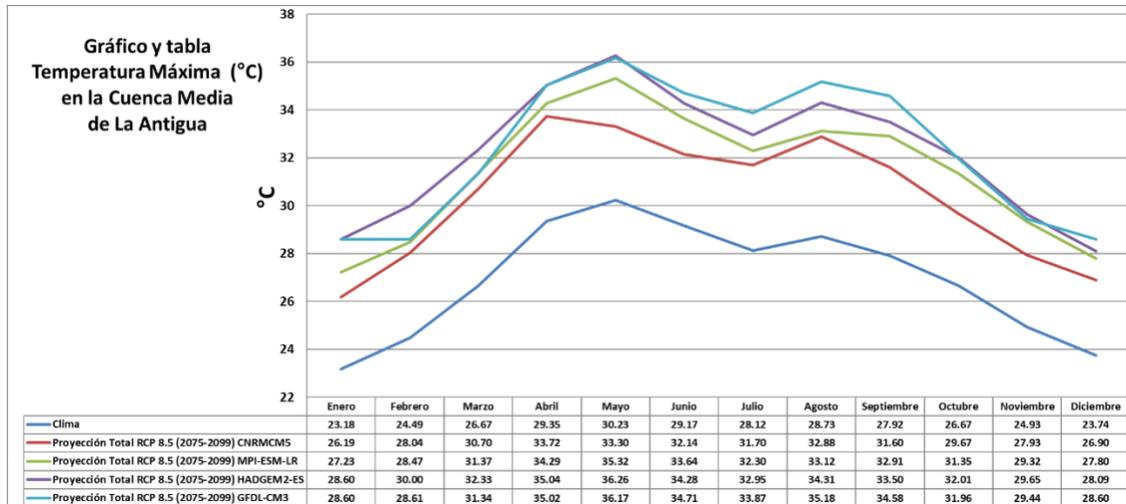


Figura AI.2.3.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura máxima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca media del río La Antigua.

AI.2.4 Temperatura Mínima

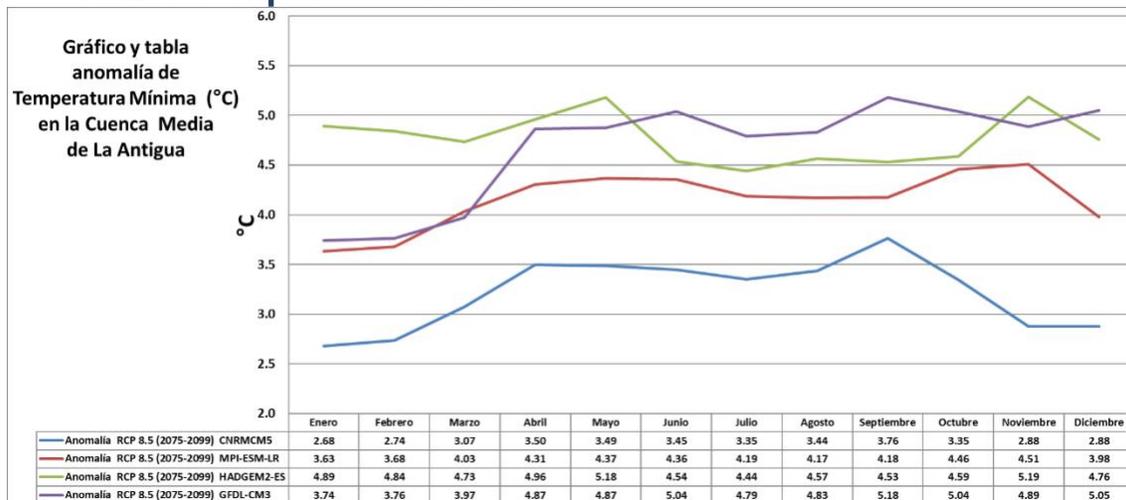


Figura AI.2.4.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura mínima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca media del río La Antigua.

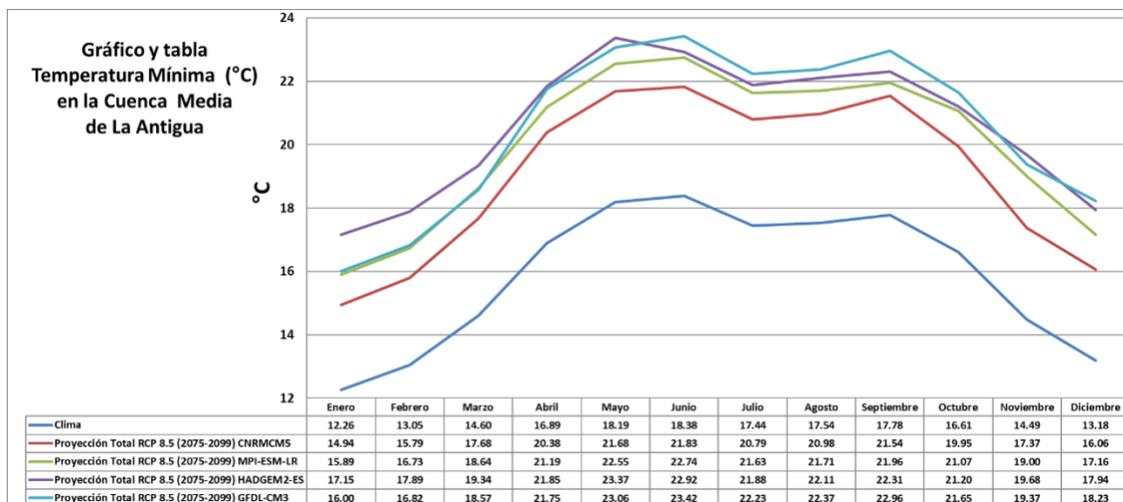


Figura Al.2.4.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura mínima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca media del río La Antigua.

Al.3 Cuenca Baja

En esta sección se analizarán las variables de temperatura y precipitación en la cuenca baja del río La Antigua, tanto el clima base como el proyectado por el RCP 8.5 futuro lejano (2075-2099).

Al.3.1 Clima

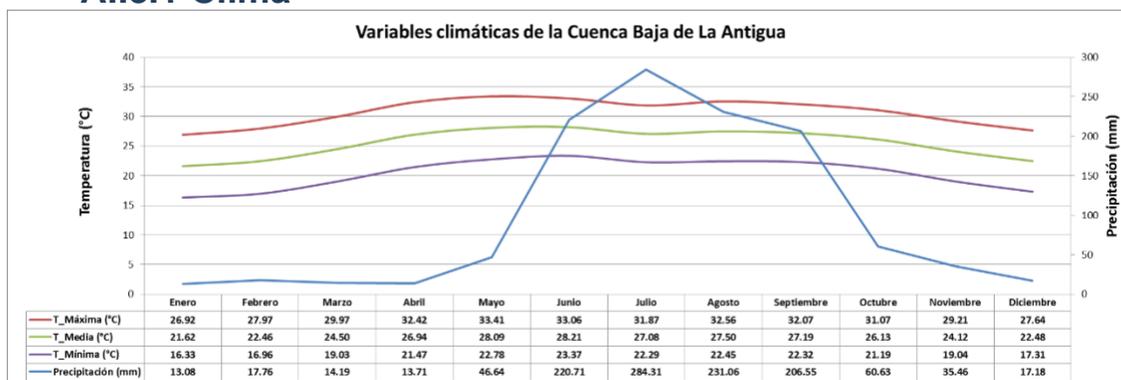


Figura Al.3.1 Ciclo anual del clima base de la temperatura y la precipitación de la cuenca baja del río La Antigua.

AI.3.2 Precipitación

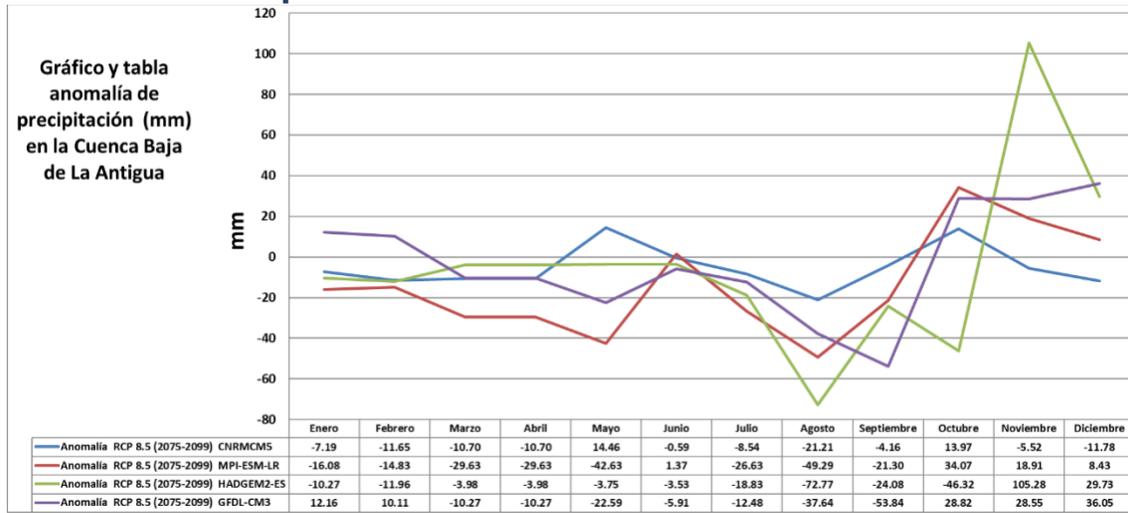


Figura AI.3.2.1 Ciclo anual de las anomalías de la precipitación proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca baja del río La Antigua.

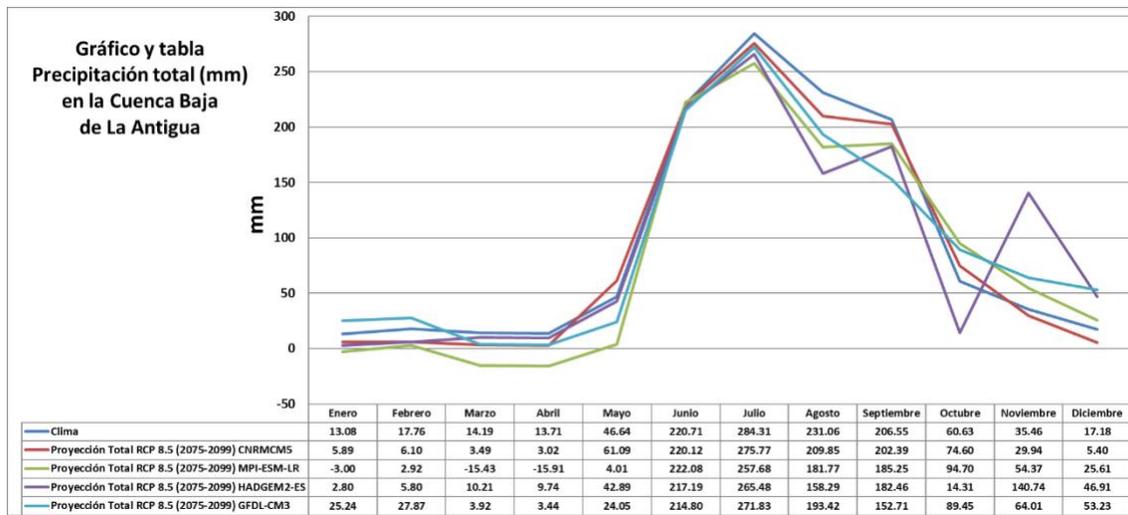


Figura AI.3.2.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la precipitación de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca baja del río La Antigua.

AI.3.3 Temperatura Máxima

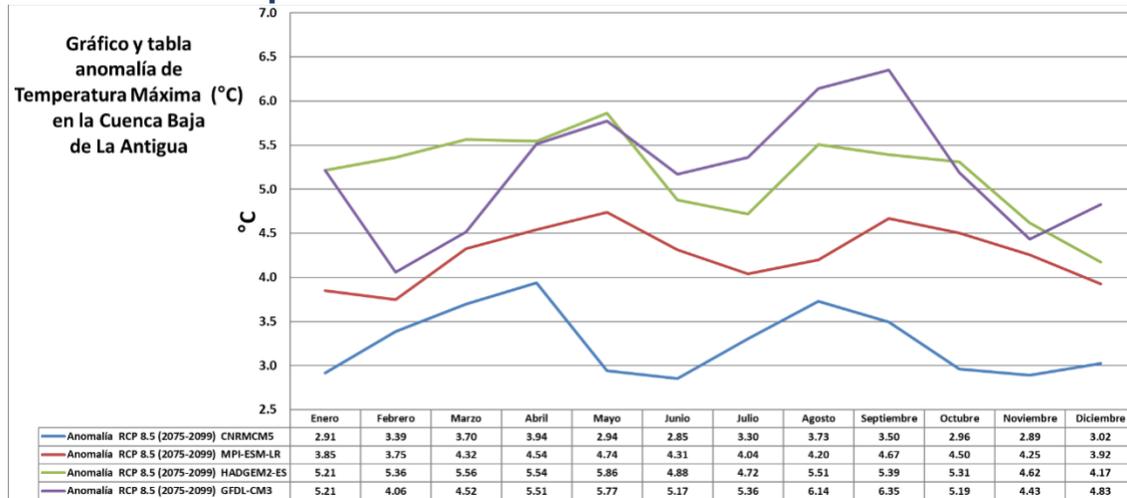


Figura AI.3.2.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura máxima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca baja del río La Antigua.

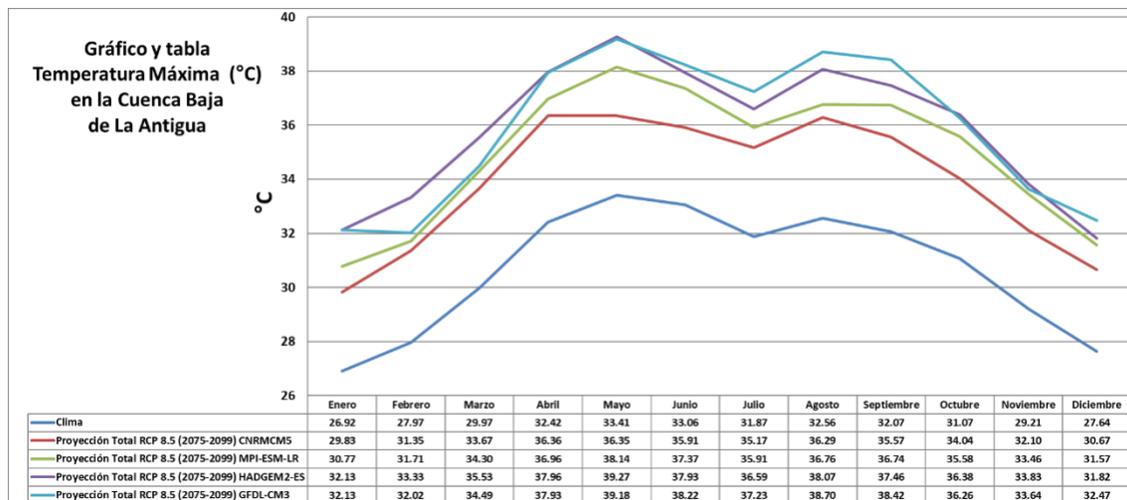


Figura AI.3.2.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura máxima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca baja del río La Antigua.

AI.3.4 Temperatura Mínima

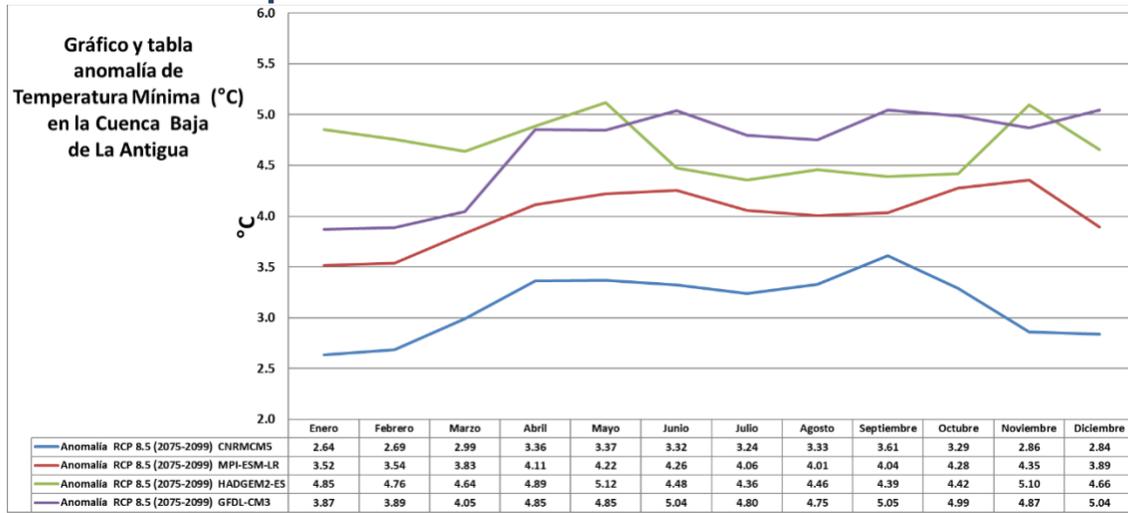


Figura AI.3.4.1 Ciclo anual de las anomalías de la temperatura mínima proyectadas por los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca baja del río La Antigua.

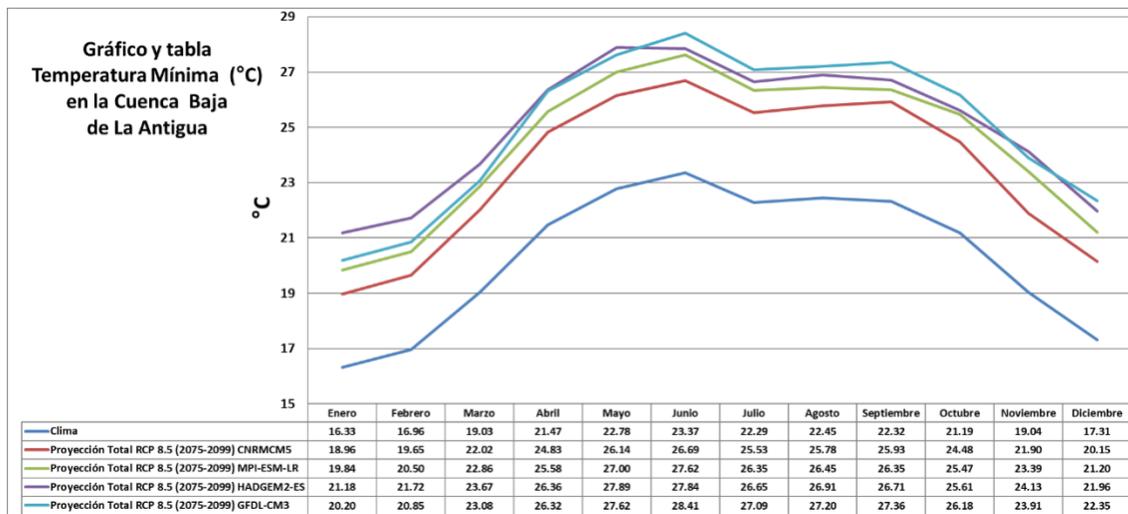


Figura AI.3.4.2 Ciclo anual del clima base y la proyección total de la temperatura mínima de los diferentes modelos bajo el escenario RCP 8.5 en el futuro lejano (2075-2099), de la cuenca baja del río La Antigua.

Anexo II

El Anexo II está enfocado en la aplicación desarrollada con el programa QlikView, con el cual se puede ver de manera interactiva los datos y gráficas tanto del clima base, como de los escenarios de cambio climático. La herramienta se puede descargar en el siguiente link <https://www.qlik.com/>

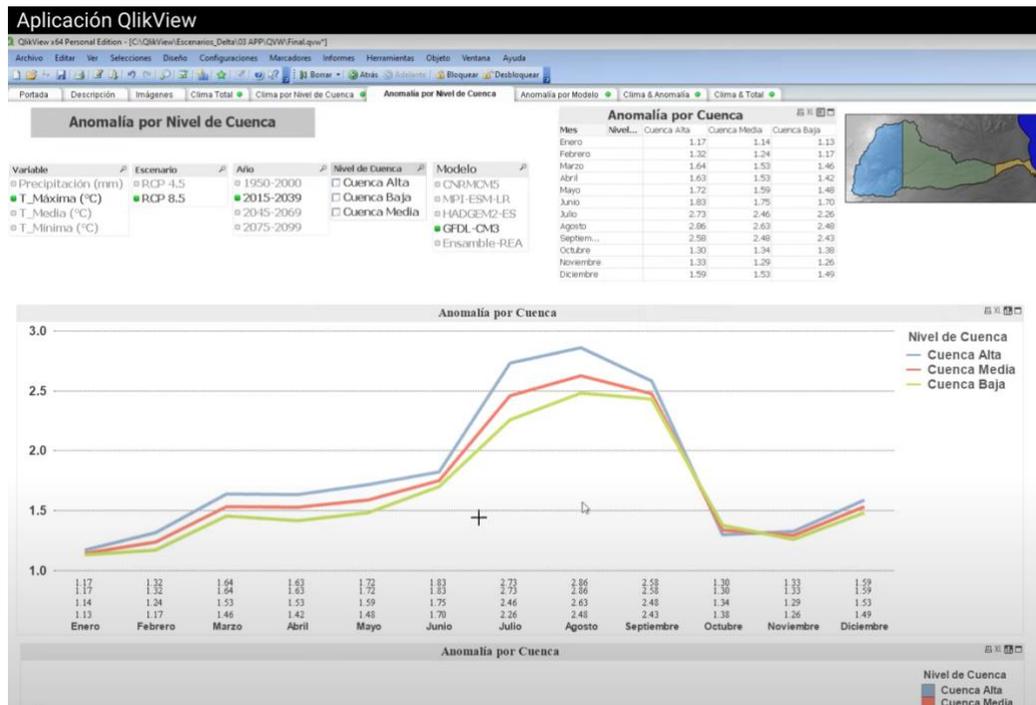
Es la manera más rápida y fácil de explorar y analizar datos.

- Gratuita para uso personal y profesional
- Carga de datos rápida y fácil
- Creación de cuadro de mando de arrastrar y soltar
- Visualizaciones inteligentes e interactivas
- Narración de datos para compartir conocimientos

En el siguiente link encontrarán un tutorial del QlikView https://help.qlik.com/en-US/qlikview/April2019/Content/QV_HelpSites/Tutorial.htm

La aplicación que se generó en este trabajo de tesis se puede descargar del siguiente link <https://www.dropbox.com/s/7sizyoftoc81bca/QlikView.zip?dl=0>

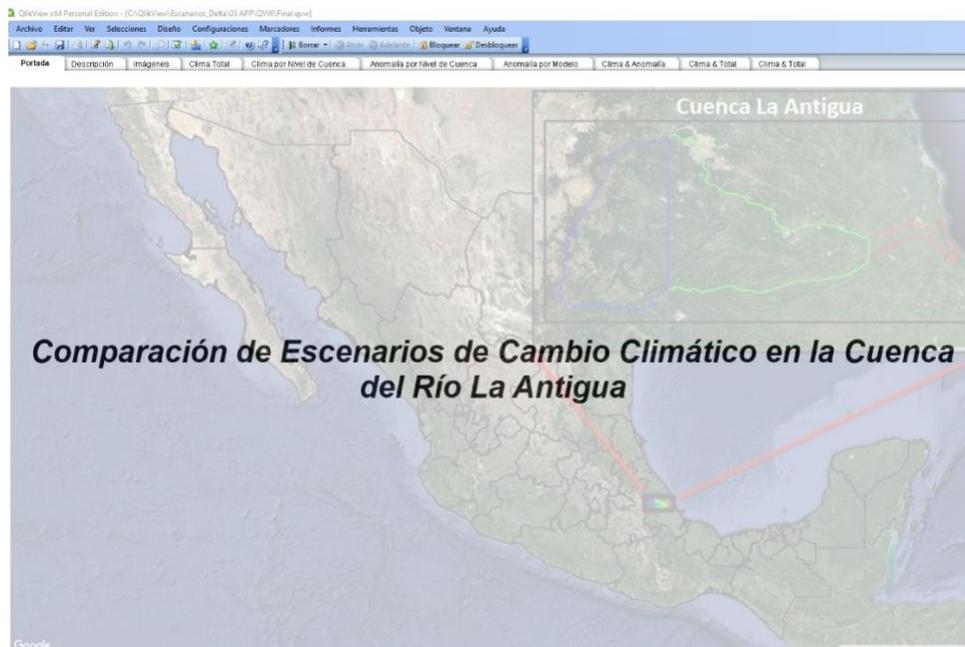
En el siguiente video se explica cómo instalar el programa QlikView, y como usar y navegar en la aplicación de este trabajo de tesis:



<https://youtu.be/RAGgWInbJ3Y>

All.1 Portada

En la portada se muestra una imagen de fondo con la ubicación de la cuenca hidrográfica del río La Antigua. También contiene el título de esta tesis “Comparación de Escenarios de Cambio Climático en la Cuenca del Río La Antigua”.



All.2 Descripción

En la descripción se incluye una introducción sobre los escenarios de cambio climático, sobre el clima y el cambio climático. Tiene un apartado donde se describe la zona de estudio y otro apartado de información sobre el clima base y los escenarios de cambio climático.



Introducción

En la actualidad se ha hecho imprescindible la generación de conocimiento, información y herramientas para analizar la variabilidad y cambio climático regional.

Las proyecciones asociadas a los escenarios de cambio climático regionalizados son cada vez más solicitadas por usuarios de diversos sectores, ya que cada día es más clara la estrecha relación entre sociedad y ambiente.

Para hacer más certera la información obtenida de las proyecciones de cambio climático y su regionalización, se requiere incorporar datos confiables obtenidos de modelos numéricos, conocimiento más profundo de la dinámica atmosférica local, así como diferenciar la variabilidad y el cambio climático regional, además de validar su desempeño tanto por regiones como por variable (Salinas et al., 2014).

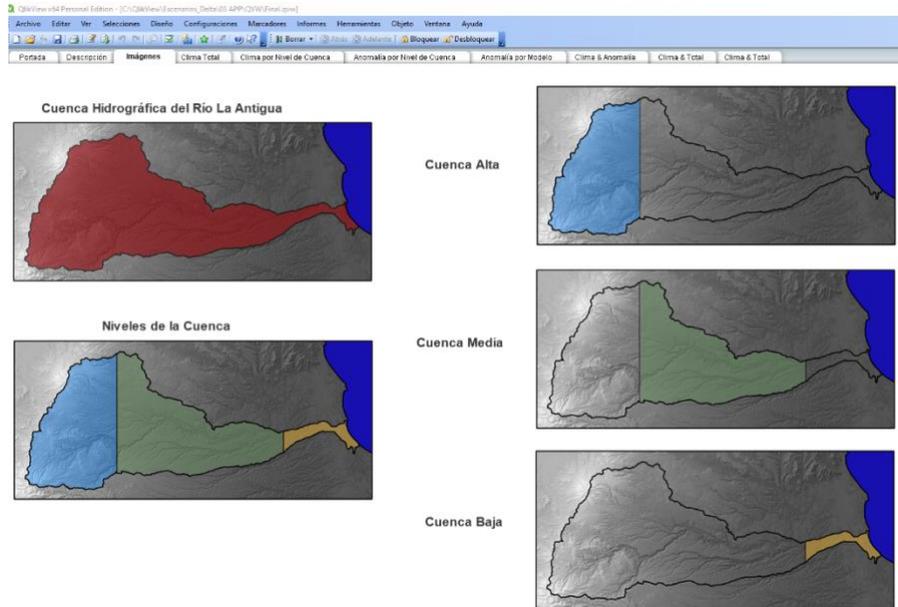
El clima regula los fenómenos meteorológicos (tormentas, heladas, olas de calor, episodios de inversión térmica) que se observan a diario en un lugar o región durante una determinada época del año, y hace que durante unos meses sean más frecuentes las lluvias u otros fenómenos. Las condiciones predominantes, o clima, dependen de lo lejos o cerca que un lugar o una región dados estén del Ecuador (latitud); de los metros que se encuentre por encima del nivel del mar (altitud); de cómo se ubique en relación con las montañas (orografía); de si ese lugar o región está en la costa o dentro del continente (continentalidad); del efecto de las corrientes marinas, y de la circulación predominante de los vientos (CEPAL, 2013).

Los cambios en el clima ocurren entonces por variabilidad natural interna del sistema climático, así como por factores externos, tanto naturales como antropogénicos. El efecto de factores externos en el clima se puede comparar usando el concepto de forzamiento radiativo (expresado en Wm^{-2}) que es una medida de la influencia que tiene cada factor para alterar el balance entre la energía entrante y saliente en el sistema tierra-atmósfera y revela su potencial para cambiar al clima (IPCC, WGI, 2013). Un forzamiento positivo, como el que producen los gases de efecto invernadero, como CO_2 , N_2O y CH_4 , tiende a calentar a la superficie. Un forzamiento negativo, que puede surgir por el incremento atmosférico en algunos aerosoles, por ejemplo, lo enfrían. Los factores naturales, como los cambios en la radiación solar o la actividad volcánica, también pueden causar forzamiento radiativo de diferente signo.

Cabe señalar que el proceso entre teoría y modelación del clima se ha convertido en sí mismo en un tema de investigación y debate. Algunas de las incertidumbres no resueltas en la modelación del cambio climático, por ejemplo, se encuentran en la sensibilidad de equilibrio del sistema climático (esto es, el calentamiento global se incrementa cuando se duplica el CO_2), la amplificación de los cambios de temperatura en el ártico, y las respuestas de la precipitación regional. Existen grandes problemas para simular las condiciones en los trópicos, en donde el signo de los cambios en la nubosidad y la estructura espacial de las respuestas en la precipitación difieren de manera importante de un modelo al otro. (e.g. Held, 2005; Steven, 2013; Shepherd, 2014).

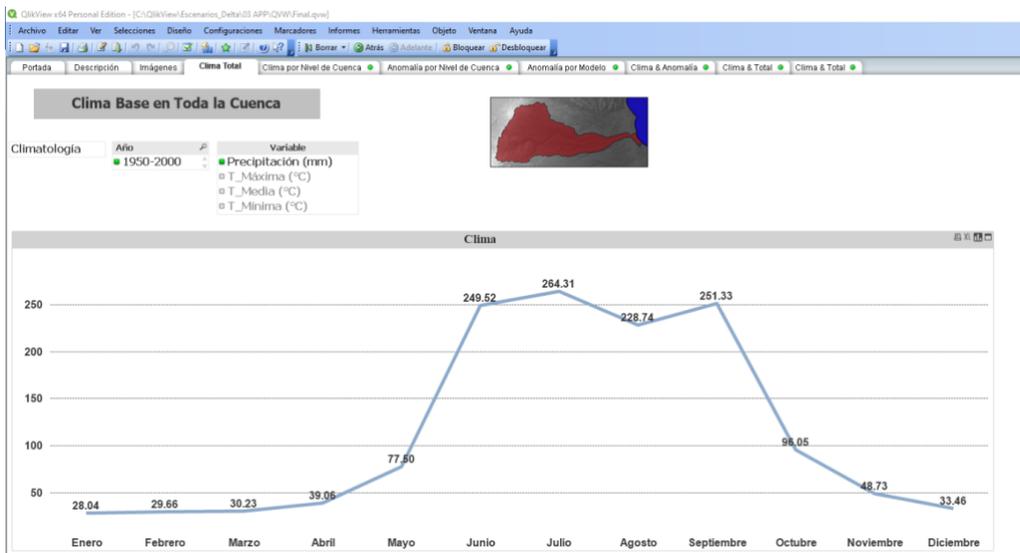
All.3 Imágenes

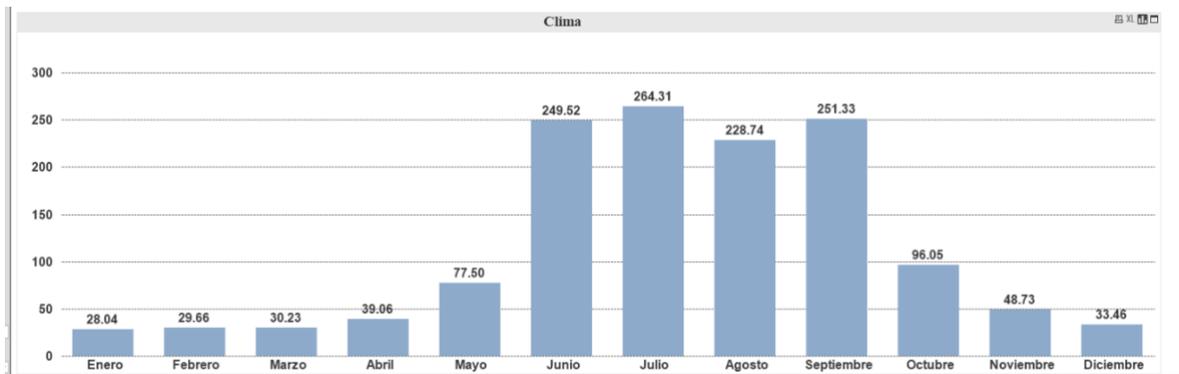
En las imágenes se incluyen cinco mapas de la cuenca de la antigua en donde se muestra como referencia cuando se habla sobre toda la cuenca o sobre los diferentes niveles, como son la cuenca alta, cuenca media y cuenca baja.



All.4 Clima Total

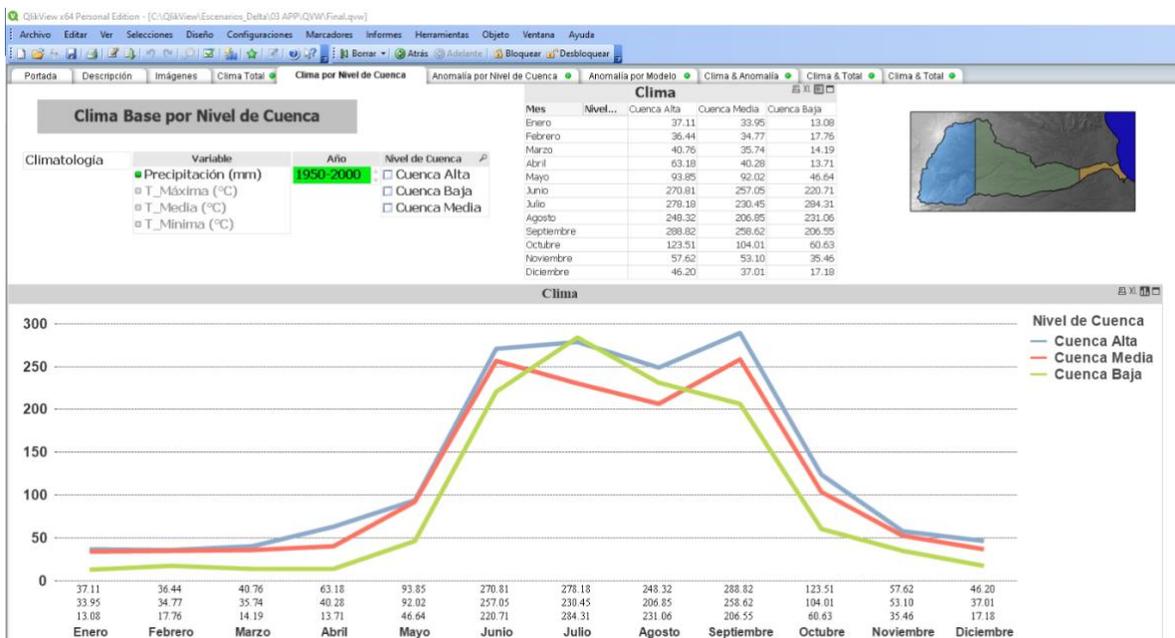
En la pestaña de clima total se muestra el clima base en toda la cuenca, la información del ciclo anual de las variables de precipitación, temperatura máxima, temperatura media y temperatura mínima, es representada en una gráfica de líneas y en una gráfica de barras. Las gráficas despliegan la información de la variable seleccionada.

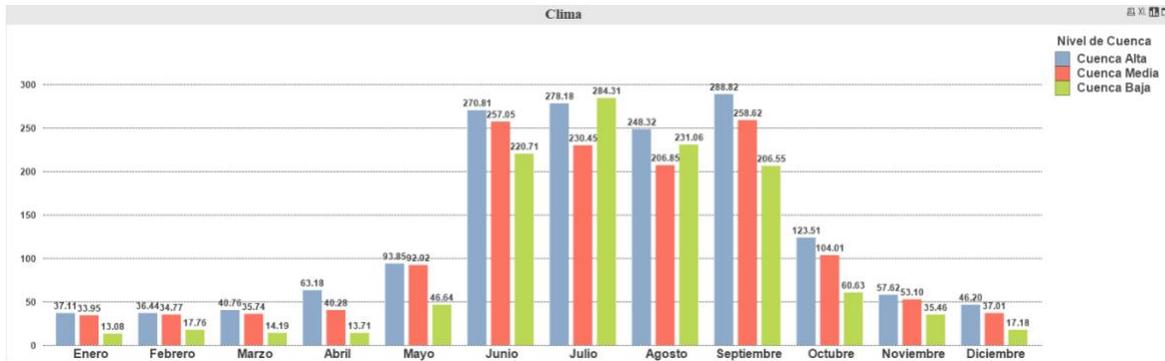




AII.5 Clima por Nivel de Cuenca

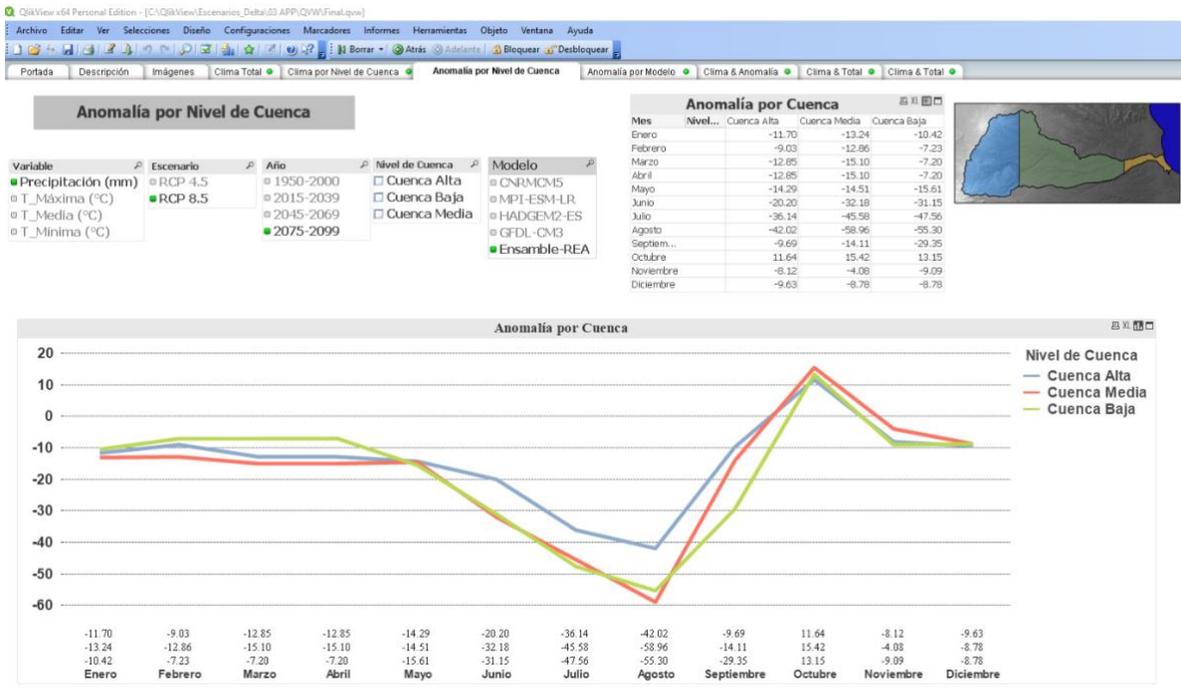
En la pestaña de clima por nivel de cuenca se muestra el clima base en los diferentes niveles de la cuenca, la información del ciclo anual de las variables de precipitación, temperatura máxima, temperatura media y temperatura mínima, es representada en una gráfica de líneas y en una gráfica de barras. Las gráficas despliegan la información de la variable seleccionada, también se puede seleccionar algún nivel en particular o se pueden ver los tres niveles al mismo tiempo. Se despliega una tabla que muestra los datos de la variable seleccionada.

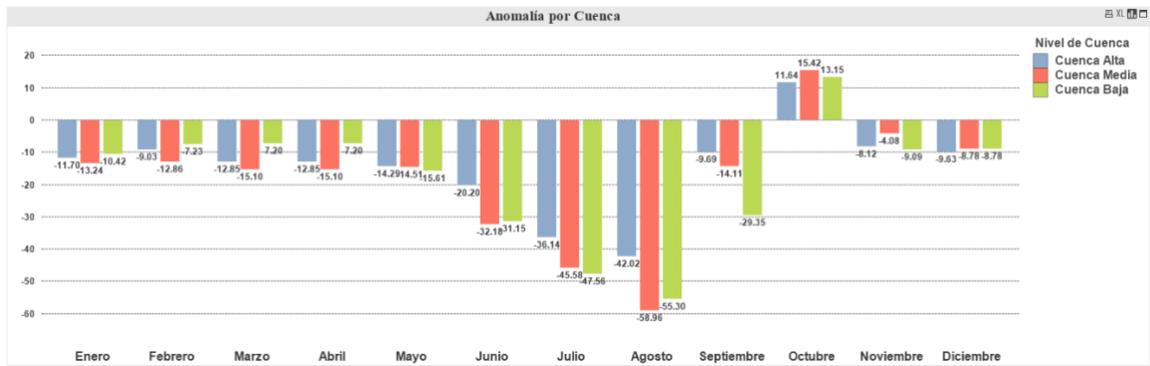




AII.6 Anomalía por Nivel de Cuenca

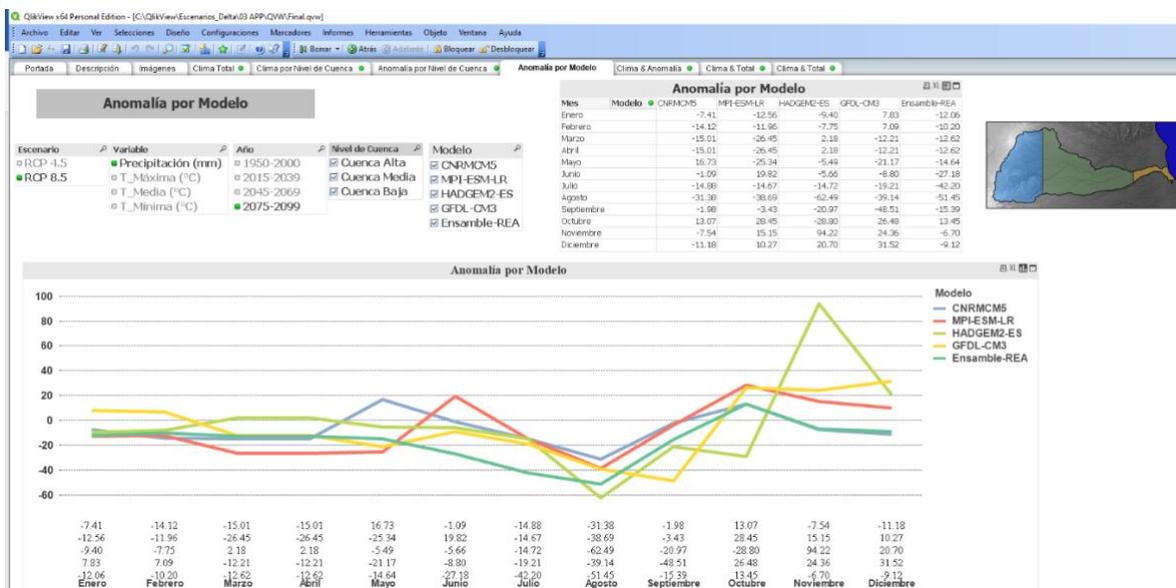
En la pestaña de anomalía por nivel de cuenca se muestra las anomalías de los modelos CNRMC5, MPI-ESM-LR, HADGEM2-ES, GFDL-CM3 y el ensamble ponderado REA, en los diferentes niveles de la cuenca, los diferentes periodos de tiempo y los dos escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. La información se presenta a través del ciclo anual de las variables de precipitación, temperatura máxima, temperatura media y temperatura mínima, es representada en una gráfica de líneas y en una gráfica de barras. Las gráficas despliegan la información de la variable seleccionada, también se puede seleccionar algún nivel en particular o se pueden ver los tres niveles al mismo tiempo. Se despliega una tabla que muestra los datos de la variable seleccionada.

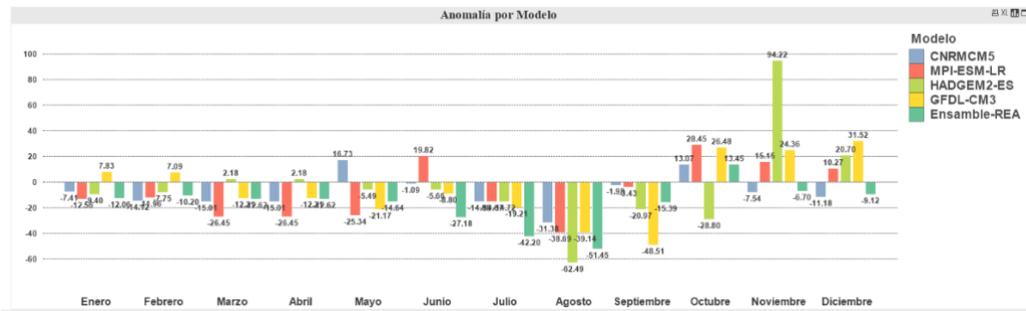




All.7 Anomalia por Modelo

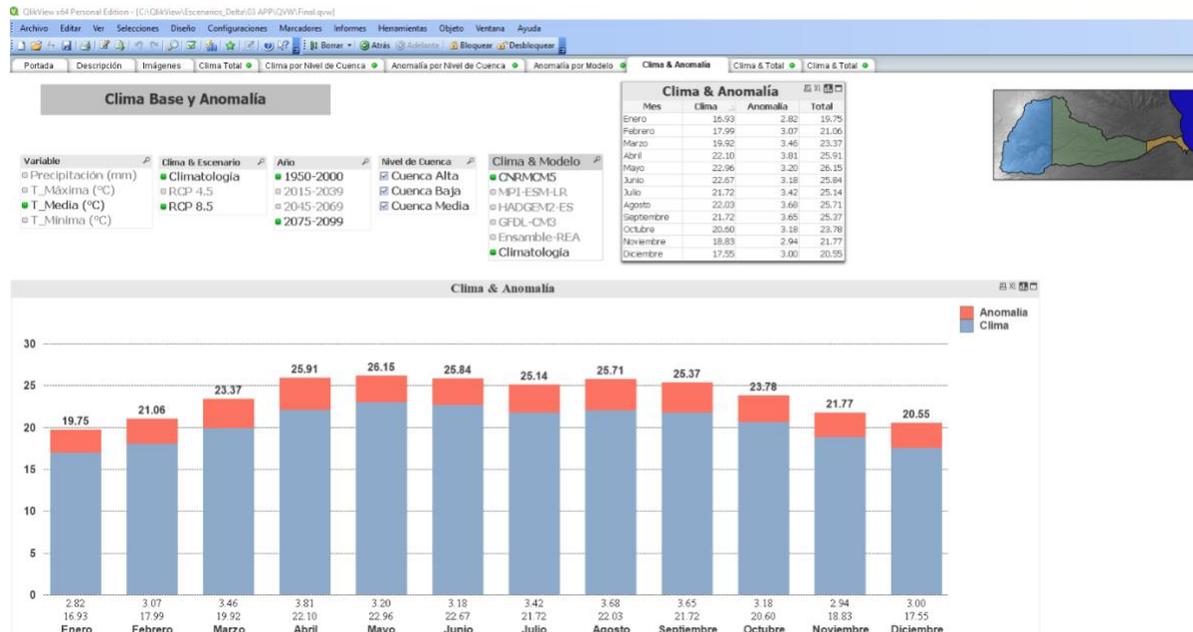
En la pestaña de anomalía por modelo se muestra las anomalías de los modelos CNRMC5, MPI-ESM-LR, HADGEM2-ES, GFDL-CM3 y el ensamble ponderado REA, en los diferentes niveles de la cuenca, los diferentes periodos de tiempo y los dos escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. La información se presenta a través del ciclo anual de las variables de precipitación, temperatura máxima, temperatura media y temperatura mínima, es representada en una gráfica de líneas y en una gráfica de barras. Las gráficas despliegan la información de la variable seleccionada, también se puede seleccionar algún nivel en particular o se puede ver el comportamiento de las anomalías de los diferentes modelos en toda la cuenca al mismo tiempo. Se despliega una tabla que muestra los datos de la variable seleccionada.





All.8 Clima & Anomalia

En la pestaña de clima & anomalía se muestra el clima base y la anomalía de alguno de los modelos CNRMCM5, MPI-ESM-LR, HADGEM2-ES, GFDL-CM3 y el ensamble ponderado REA, en los diferentes niveles de la cuenca, los diferentes periodos de tiempo y los dos escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. La información se presenta a través del ciclo anual de las variables de precipitación, temperatura máxima, temperatura media y temperatura mínima, es representada en una gráfica de barras. La gráfica despliega la información de la variable seleccionada, también se puede seleccionar algún nivel en particular o se puede ver el comportamiento del clima base y la anomalía de algún modelo en toda la cuenca. Se despliega una tabla que muestra los datos de la variable seleccionada.



All.9 Clima & Total

En la pestaña de clima & total se muestra el clima base y la proyección total de alguno de los modelos CNRMC5, MPI-ESM-LR, HADGEM2-ES, GFDL-CM3 y el ensamble ponderado REA, en los diferentes niveles de la cuenca, los diferentes periodos de tiempo y los dos escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. La información se presenta a través del ciclo anual de las variables de precipitación, temperatura máxima, temperatura media y temperatura mínima, es representada en una gráfica de líneas. La gráfica despliega la información de la variable seleccionada, también se puede seleccionar algún nivel en particular o se puede ver el comportamiento del clima base y la proyección total de algún modelo en toda la cuenca. Se despliega una tabla que muestra los datos de la variable seleccionada.

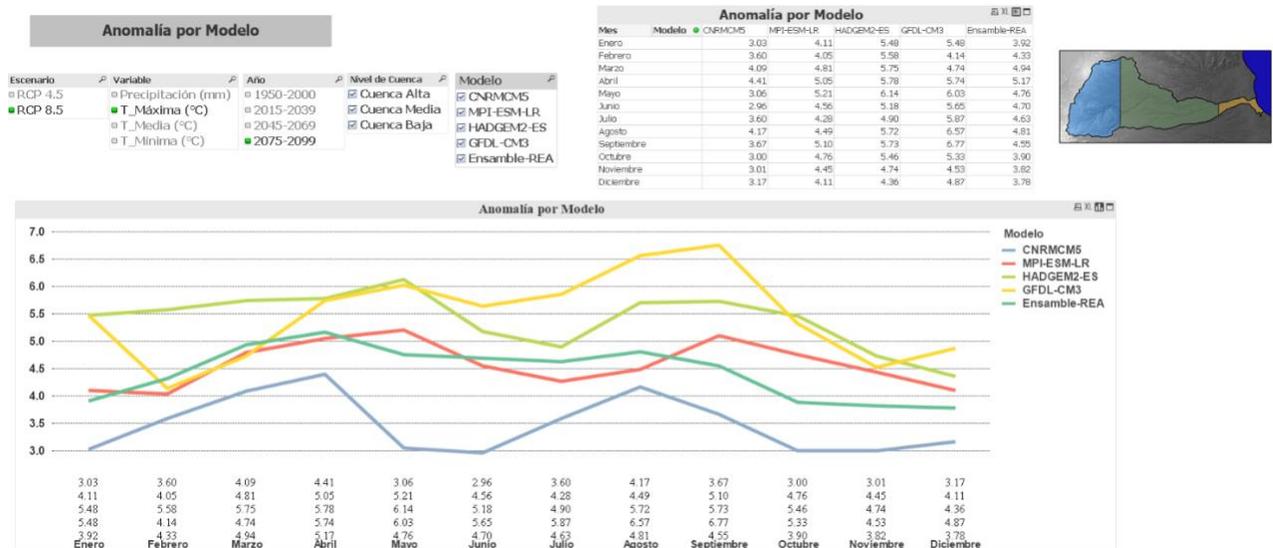


Anexo III

En este anexo se muestran las tablas que contienen el clima base, las anomalías y las proyecciones totales de los modelos CNRMCM5, MPI-ESM-LR, HADGEM2-ES, GFDL-CM3 y el ensamble ponderado REA, en el futuro cercano (2015-2039) y el futuro lejano (2075-2099), bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. El objetivo de este anexo es mostrar los resultados obtenidos con el ensamble ponderado REA y poderlo compara con los otros modelos. En el estudio “Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional” (Cavazos et al., 2013), se incluye el método REA, pero la base de datos para estas realizaciones ya no se encuentra disponibles en algún portal de acceso público, por lo que la información generada en este trabajo de tesis utilizando estos datos se muestra en este Anexo III.

Para mayor información sobre el ensamble ponderado REA, se recomienda leer el artículo científico “Climate change projections from Coupled Model Intercomparison Project phase 5 multi-model weighted ensembles for Mexico, the North American monsoon, and the mid-summer drought región” (Colorado-Ruiz et al. 2018). <https://doi.org/10.1002/joc.5773>.

Lo que se puede observar en las tablas en las diferentes variables es que los resultados obtenidos con el ensamble ponderado REA se encuentran dentro del rango de los resultados obtenidos por los otros modelos. Las anomalías de los modelos GFDL-CM3 y HADGEM2-ES son mayores a las del ensamble ponderado REA. Como ejemplo de lo aquí descrito, se muestra una imagen obtenida de la aplicación de QlikView (Anexo II) en donde se puede observar las anomalías de los diferentes modelos, bajo el RCP 8.5 en el futuro lejano en toda la cuenca hidrográfica del río La Antigua.



AIII.1 Precipitación

Precipitación (mm) de los Escenarios de Cambio Climático en la Cuenca de La Antigua										
Mes	Modelo	Anomalía RCP 4.5		Anomalía RCP 8.5		Clima	Total RCP 4.5		Total RCP 8.5	
		2015-2039	2075-2099	2015-2039	2075-2099		2015-2039	2075-2099	2015-2039	2075-2099
Enero	CNRMCM5	0.12	1.02	-1.54	-7.19	28.04	28.16	29.06	26.50	20.85
	MPI-ESM-LR	-0.04	-0.58	-13.02	-13.11	28.04	28.00	27.46	15.02	14.93
	HADGEM2-ES	-0.87	-9.33	-0.85	-9.31	28.04	27.17	18.71	27.19	18.73
	GFDL-CM3	-3.56	-10.01	7.14	6.88	28.04	24.48	18.03	35.18	34.92
	Ensamble-REA	-3.60	-5.34	-3.67	-13.07	28.04	24.44	22.70	24.37	14.97
Febrero	CNRMCM5	-6.91	-5.67	-0.03	-14.38	29.66	22.75	23.99	29.63	15.28
	MPI-ESM-LR	0.37	-11.01	-5.00	-12.42	29.66	30.03	18.65	24.66	17.24
	HADGEM2-ES	-3.22	-4.74	4.24	-8.04	29.66	26.44	24.92	33.90	21.62
	GFDL-CM3	-10.33	4.17	-2.32	6.50	29.66	19.33	33.83	27.34	36.16
	Ensamble-REA	-3.41	-6.13	-4.16	-11.93	29.66	26.25	23.53	25.50	17.73
Marzo	CNRMCM5	-5.97	-5.75	0.89	-15.60	30.23	24.26	24.48	31.12	14.63
	MPI-ESM-LR	-2.37	-11.65	-0.31	-26.26	30.23	27.86	18.58	29.92	3.97
	HADGEM2-ES	5.03	0.25	3.51	1.88	30.23	35.26	30.48	33.74	32.11
	GFDL-CM3	-11.35	-16.55	-7.65	-11.61	30.23	18.88	13.68	22.58	18.62
	Ensamble-REA	-4.89	-6.66	-5.24	-11.34	30.23	25.34	23.57	24.99	18.89
Abril	CNRMCM5	-5.97	-5.75	0.89	-15.60	39.06	33.09	33.31	39.95	23.46
	MPI-ESM-LR	-2.37	-11.65	-0.31	-26.26	39.06	36.69	27.41	38.75	12.80
	HADGEM2-ES	5.03	0.25	3.51	1.88	39.06	44.09	39.31	42.57	40.94
	GFDL-CM3	-11.35	-16.55	-7.65	-11.61	39.06	27.71	22.51	31.41	27.45
	Ensamble-REA	-4.89	-6.66	-5.24	-11.34	39.06	34.17	32.40	33.82	27.72
Mayo	CNRMCM5	-8.37	13.64	4.24	16.74	77.50	69.13	91.14	81.74	94.24
	MPI-ESM-LR	-0.05	2.80	5.40	-26.63	77.50	77.45	80.30	82.90	50.87
	HADGEM2-ES	6.91	16.11	-4.67	-4.30	77.50	84.41	93.61	72.83	73.20
	GFDL-CM3	-10.14	-10.54	-3.39	-20.92	77.50	67.36	66.96	74.11	56.58
	Ensamble-REA	-9.71	-7.57	-7.29	-14.65	77.50	67.79	69.93	70.21	62.85
Junio	CNRMCM5	-3.45	3.66	13.15	-0.59	249.52	246.07	253.18	262.67	248.93
	MPI-ESM-LR	15.73	11.26	8.19	18.12	249.52	265.25	260.78	257.71	267.64
	HADGEM2-ES	7.60	6.25	-10.11	-6.06	249.52	257.12	255.77	239.41	243.46
	GFDL-CM3	-3.60	0.95	-1.94	-8.82	249.52	245.92	250.47	247.58	240.70
	Ensamble-REA	-10.66	-18.33	-13.35	-29.63	249.52	238.86	231.19	236.17	219.89
Julio	CNRMCM5	-16.61	-25.14	18.47	-15.47	264.32	247.71	239.18	282.79	248.85
	MPI-ESM-LR	-3.36	-17.13	-8.33	-15.44	264.32	260.96	247.19	255.99	248.88
	HADGEM2-ES	21.71	22.21	-11.46	-18.83	264.32	286.03	286.53	252.86	245.49
	GFDL-CM3	-10.75	-22.61	-21.91	-20.87	264.32	253.57	241.71	242.41	243.45
	Ensamble-REA	-16.65	-31.35	-21.18	-44.53	264.32	247.67	232.97	243.14	219.79
Agosto	CNRMCM5	0.00	-17.40	9.62	-31.87	228.74	228.74	211.34	238.36	196.87
	MPI-ESM-LR	-6.20	-38.19	-5.66	-40.32	228.74	222.54	190.55	223.08	188.42
	HADGEM2-ES	-29.96	-62.53	-31.05	-63.69	228.74	198.78	166.21	197.69	165.05
	GFDL-CM3	-6.92	-23.29	-20.99	-37.64	228.74	221.82	205.45	207.75	191.10
	Ensamble-REA	-13.58	-38.19	-13.32	-53.10	228.74	215.16	190.55	215.42	175.64
Septiembre	CNRMCM5	-18.34	-6.43	12.97	-1.86	251.33	232.99	244.90	264.30	249.47
	MPI-ESM-LR	-0.75	2.35	7.18	-5.17	251.33	250.58	253.68	258.51	246.16
	HADGEM2-ES	0.65	-21.31	13.31	-22.66	251.33	251.98	230.02	264.64	228.67
	GFDL-CM3	-8.27	-15.51	-7.07	-48.50	251.33	243.06	235.82	244.26	202.83
	Ensamble-REA	-7.85	-18.90	-5.93	-13.70	251.33	243.48	232.43	245.40	237.63
Octubre	CNRMCM5	-23.23	37.74	1.53	13.34	96.05	72.82	133.79	97.58	109.39
	MPI-ESM-LR	-0.16	3.46	-0.76	29.28	96.05	95.89	99.51	95.29	125.33
	HADGEM2-ES	-25.96	-22.09	-5.42	-31.40	96.05	70.09	73.96	90.63	64.65
	GFDL-CM3	19.54	18.87	43.60	26.27	96.05	115.59	114.92	139.65	122.32
	Ensamble-REA	1.52	5.70	0.60	13.74	96.05	97.57	101.75	96.65	109.79
Noviembre	CNRMCM5	-6.32	-4.63	0.44	-7.61	48.73	42.41	44.10	49.17	41.12
	MPI-ESM-LR	5.93	8.30	6.29	15.11	48.73	54.66	57.03	55.02	63.84
	HADGEM2-ES	5.93	37.48	27.87	94.58	48.73	54.66	86.21	76.60	143.31
	GFDL-CM3	21.11	5.88	8.46	24.37	48.73	69.84	54.61	57.19	73.10
	Ensamble-REA	-4.96	-4.55	-4.03	-5.19	48.73	43.77	44.18	44.70	43.54
Diciembre	CNRMCM5	-9.31	-11.93	-3.10	-11.67	33.46	24.15	21.53	30.36	21.79
	MPI-ESM-LR	-4.06	3.44	1.79	9.68	33.46	29.40	36.90	35.25	43.14
	HADGEM2-ES	2.75	8.76	11.18	21.41	33.46	36.21	42.22	44.64	54.87
	GFDL-CM3	-3.21	16.10	-6.20	31.12	33.46	30.25	49.56	27.26	64.58
	Ensamble-REA	-5.47	-6.14	-4.88	-9.11	33.46	27.99	27.32	28.58	24.35

AIII.2 Temperatura Máxima

Temperatura Máxima (°C) de los Escenarios de Cambio Climático en la en la Cuenca de La Antigua											
Mes	Modelo	Anomalía RCP 4.5		Anomalía RCP 8.5		Clima	Total RCP 4.5		Total RCP 8.5		
		2015-2039	2075-2099	2015-2039	2075-2099		2015-2039	2075-2099	2015-2039	2075-2099	
Enero	CNRMCM5	0.54	1.47	0.69	3.03	22.71	23.25	24.18	23.40	25.74	
	MPI-ESM-LR	0.79	1.94	1.27	4.11	22.71	23.50	24.65	23.98	26.82	
	HADGEM2-ES	1.34	3.28	1.48	5.43	22.71	24.05	25.99	24.19	28.14	
	GFDL-CM3	1.34	2.79	1.15	5.43	22.71	24.05	25.50	23.86	28.14	
	Ensamble-REA	0.99	2.10	1.12	3.90	22.71	23.70	24.81	23.83	26.61	
Febrero	CNRMCM5	1.18	1.66	0.78	3.64	24.02	25.20	25.68	24.80	27.66	
	MPI-ESM-LR	1.27	2.21	1.33	4.04	24.02	25.29	26.23	25.35	28.06	
	HADGEM2-ES	1.15	3.19	1.14	5.57	24.02	25.17	27.21	25.16	29.59	
	GFDL-CM3	1.26	3.19	1.26	4.16	24.02	25.28	27.21	25.28	28.18	
	Ensamble-REA	1.23	2.48	1.24	4.22	24.02	25.25	26.50	25.26	28.24	
Marzo	CNRMCM5	1.23	2.44	0.82	4.17	26.11	27.34	28.55	26.93	30.28	
	MPI-ESM-LR	1.03	2.12	0.90	4.76	26.11	27.14	28.23	27.01	30.87	
	HADGEM2-ES	1.18	3.27	1.10	5.80	26.11	27.29	29.38	27.21	31.91	
	GFDL-CM3	1.86	3.77	1.57	4.74	26.11	27.97	29.88	27.68	30.85	
	Ensamble-REA	1.35	2.62	1.12	4.95	26.11	27.46	28.73	27.23	31.06	
Abril	CNRMCM5	0.99	2.57	0.96	4.50	28.39	29.38	30.96	29.35	32.89	
	MPI-ESM-LR	1.31	2.50	1.29	5.00	28.39	29.70	30.89	29.68	33.39	
	HADGEM2-ES	1.58	3.85	1.22	5.82	28.39	29.97	32.24	29.61	34.21	
	GFDL-CM3	1.89	3.75	1.53	5.75	28.39	30.28	32.14	29.92	34.14	
	Ensamble-REA	1.13	2.83	1.89	5.19	28.39	29.52	31.22	30.28	33.58	
Mayo	CNRMCM5	0.60	2.27	0.88	3.09	29.02	29.62	31.29	29.90	32.11	
	MPI-ESM-LR	1.31	2.60	1.33	5.20	29.02	30.33	31.62	30.35	34.22	
	HADGEM2-ES	1.37	3.66	1.98	6.20	29.02	30.39	32.68	31.00	35.22	
	GFDL-CM3	2.09	4.29	1.61	6.07	29.02	31.11	33.31	30.63	35.09	
	Ensamble-REA	1.39	2.55	1.27	4.76	29.02	30.41	31.57	30.29	33.78	
Junio	CNRMCM5	0.76	1.39	0.62	3.00	28.09	28.85	29.48	28.71	31.09	
	MPI-ESM-LR	1.00	2.25	1.17	4.59	28.09	29.09	30.34	29.26	32.68	
	HADGEM2-ES	1.30	3.06	1.36	5.17	28.09	29.39	31.15	29.45	33.26	
	GFDL-CM3	2.26	3.54	1.78	5.63	28.09	30.35	31.63	29.87	33.72	
	Ensamble-REA	1.36	2.62	1.37	4.67	28.09	29.45	30.71	29.46	32.76	
Julio	CNRMCM5	1.04	2.15	0.49	3.68	27.08	28.12	29.23	27.57	30.76	
	MPI-ESM-LR	1.13	2.03	0.95	4.34	27.08	28.21	29.11	28.03	31.42	
	HADGEM2-ES	1.23	2.73	1.56	4.94	27.08	28.31	29.81	28.64	32.02	
	GFDL-CM3	2.53	4.32	2.52	5.83	27.08	29.61	31.40	29.60	32.91	
	Ensamble-REA	1.26	2.54	1.30	4.48	27.08	28.34	29.62	28.38	31.56	
Agosto	CNRMCM5	0.78	1.96	0.63	4.27	27.60	28.38	29.56	28.23	31.87	
	MPI-ESM-LR	1.23	2.26	1.25	4.55	27.60	28.83	29.86	28.85	32.15	
	HADGEM2-ES	1.51	3.17	1.83	5.68	27.60	29.11	30.77	29.43	33.28	
	GFDL-CM3	1.51	4.36	2.71	6.58	27.60	29.11	31.96	30.31	34.18	
	Ensamble-REA	1.34	2.80	1.38	5.05	27.60	28.94	30.40	28.98	32.65	
Septiembre	CNRMCM5	0.92	2.03	0.79	3.71	26.82	27.74	28.85	27.61	30.53	
	MPI-ESM-LR	1.30	2.60	1.28	5.11	26.82	28.12	29.42	28.10	31.93	
	HADGEM2-ES	1.72	3.41	1.80	5.64	26.82	28.54	30.23	28.62	32.46	
	GFDL-CM3	2.14	3.98	2.53	6.77	26.82	28.96	30.80	29.35	33.59	
	Ensamble-REA	1.24	2.58	1.36	4.69	26.82	28.06	29.40	28.18	31.51	
Octubre	CNRMCM5	0.81	1.55	0.75	3.01	25.84	26.65	27.39	26.59	28.85	
	MPI-ESM-LR	1.06	2.25	1.46	4.78	25.84	26.90	28.09	27.30	30.62	
	HADGEM2-ES	1.70	3.38	1.79	5.42	25.84	27.54	29.22	27.63	31.26	
	GFDL-CM3	1.64	3.23	1.34	5.32	25.84	27.48	29.07	27.18	31.16	
	Ensamble-REA	1.01	2.09	1.11	3.68	25.84	26.85	27.93	26.95	29.52	
Noviembre	CNRMCM5	1.22	1.27	0.81	3.02	24.36	25.58	25.63	25.17	27.38	
	MPI-ESM-LR	1.22	1.98	0.88	4.47	24.36	25.58	26.34	25.24	28.83	
	HADGEM2-ES	1.77	2.77	1.62	4.74	24.36	26.13	27.13	25.98	29.10	
	GFDL-CM3	1.43	2.62	1.30	4.52	24.36	25.79	26.98	25.66	28.88	
	Ensamble-REA	1.11	1.85	1.13	3.59	24.36	25.47	26.21	25.49	27.95	
Diciembre	CNRMCM5	1.10	1.47	0.85	3.16	23.18	24.28	24.65	24.03	26.34	
	MPI-ESM-LR	0.95	2.18	0.89	4.13	23.18	24.13	25.36	24.07	27.31	
	HADGEM2-ES	1.47	2.65	1.03	4.39	23.18	24.65	25.83	24.21	27.57	
	GFDL-CM3	1.52	2.90	1.54	4.88	23.18	24.70	26.08	24.72	28.06	
	Ensamble-REA	1.06	2.03	1.05	3.75	23.18	24.24	25.21	24.23	26.93	

AIII.3 Temperatura Mínima

Temperatura Mínima (°C) de los Escenarios de Cambio Climático en la Cuenca de La Antigua										
Mes	Modelo	Anomalía RCP 4.5		Anomalía RCP 8.5		Clima	Total RCP 4.5		Total RCP 8.5	
		2015-2039	2075-2099	2015-2039	2075-2099		2015-2039	2075-2099	2015-2039	2075-2099
Enero	CNRMCM5	0.43	1.44	0.66	2.64	11.14	11.57	12.58	11.80	13.78
	MPI-ESM-LR	0.84	1.79	1.16	3.66	11.14	11.98	12.93	12.30	14.80
	HADGEM2-ES	1.20	2.89	1.36	4.90	11.14	12.34	14.03	12.50	16.04
	GFDL-CM3	1.16	2.04	1.10	3.74	11.14	12.30	13.18	12.24	14.88
	Ensamble-REA	0.73	1.60	0.88	3.03	11.14	11.87	12.74	12.02	14.17
Febrero	CNRMCM5	0.38	1.30	0.66	2.72	11.97	12.35	13.27	12.63	14.69
	MPI-ESM-LR	1.08	1.96	1.33	3.72	11.97	13.05	13.93	13.30	15.69
	HADGEM2-ES	1.14	2.86	1.09	4.86	11.97	13.11	14.83	13.06	16.83
	GFDL-CM3	0.91	1.89	1.13	3.73	11.97	12.88	13.86	13.10	15.70
	Ensamble-REA	0.82	1.70	0.87	2.91	11.97	12.79	13.67	12.84	14.88
Marzo	CNRMCM5	0.55	1.88	0.74	3.10	13.72	14.27	15.60	14.46	16.82
	MPI-ESM-LR	0.99	1.88	1.04	4.08	13.72	14.71	15.60	14.76	17.80
	HADGEM2-ES	0.86	2.76	0.92	4.75	13.72	14.58	16.48	14.64	18.47
	GFDL-CM3	0.87	2.09	1.11	3.95	13.72	14.59	15.81	14.83	17.67
	Ensamble-REA	1.03	2.01	0.95	3.40	13.72	14.75	15.73	14.67	17.12
Abril	CNRMCM5	0.66	1.87	0.93	3.56	15.82	16.48	17.69	16.75	19.38
	MPI-ESM-LR	1.19	2.12	1.22	4.37	15.82	17.01	17.94	17.04	20.19
	HADGEM2-ES	1.14	3.23	1.05	5.01	15.82	16.96	19.05	16.87	20.83
	GFDL-CM3	1.38	2.47	1.53	4.89	15.82	17.20	18.29	17.35	20.71
	Ensamble-REA	1.07	2.21	1.22	3.89	15.82	16.89	18.03	17.04	19.71
Mayo	CNRMCM5	0.48	2.12	1.09	3.56	16.89	17.37	19.01	17.98	20.45
	MPI-ESM-LR	1.13	2.22	1.26	4.45	16.89	18.02	19.11	18.15	21.34
	HADGEM2-ES	1.42	3.33	1.57	5.23	16.89	18.31	20.22	18.46	22.12
	GFDL-CM3	1.36	2.95	1.49	4.92	16.89	18.25	19.84	18.38	21.81
	Ensamble-REA	1.12	2.17	1.17	4.11	16.89	18.01	19.06	18.06	21.00
Junio	CNRMCM5	0.70	2.10	1.09	3.50	17.25	17.95	19.35	18.34	20.75
	MPI-ESM-LR	1.22	2.20	1.31	4.44	17.25	18.47	19.45	18.56	21.69
	HADGEM2-ES	1.22	2.72	1.18	4.55	17.25	18.47	19.97	18.43	21.80
	GFDL-CM3	1.60	3.09	1.71	5.09	17.25	18.85	20.34	18.96	22.34
	Ensamble-REA	1.14	2.21	1.20	3.85	17.25	18.39	19.46	18.45	21.10
Julio	CNRMCM5	0.66	1.48	1.01	3.39	16.36	17.02	17.84	17.37	19.75
	MPI-ESM-LR	1.13	2.08	1.19	4.29	16.36	17.49	18.44	17.55	20.65
	HADGEM2-ES	1.26	2.68	1.27	4.45	16.36	17.62	19.04	17.63	20.81
	GFDL-CM3	1.50	2.80	1.37	4.82	16.36	17.86	19.16	17.73	21.18
	Ensamble-REA	1.11	2.34	1.24	3.86	16.36	17.47	18.70	17.60	20.22
Agosto	CNRMCM5	0.98	1.69	0.99	3.46	16.47	17.45	18.16	17.46	19.93
	MPI-ESM-LR	1.06	2.11	1.24	4.27	16.47	17.53	18.58	17.71	20.74
	HADGEM2-ES	1.12	2.45	1.37	4.60	16.47	17.59	18.92	17.84	21.07
	GFDL-CM3	1.59	2.84	1.58	4.84	16.47	18.06	19.31	18.05	21.31
	Ensamble-REA	1.16	2.28	1.28	3.92	16.47	17.63	18.75	17.75	20.39
Septiembre	CNRMCM5	0.90	2.04	1.16	3.82	16.62	17.52	18.66	17.78	20.44
	MPI-ESM-LR	1.01	2.14	1.20	4.22	16.62	17.63	18.76	17.82	20.84
	HADGEM2-ES	1.38	2.57	1.62	4.61	16.62	18.00	19.19	18.24	21.23
	GFDL-CM3	1.66	2.95	1.84	5.19	16.62	18.28	19.57	18.46	21.81
	Ensamble-REA	1.11	2.11	1.27	3.90	16.62	17.73	18.73	17.89	20.52
Octubre	CNRMCM5	0.71	1.79	0.84	3.38	15.36	16.07	17.15	16.20	18.74
	MPI-ESM-LR	1.09	2.10	1.38	4.49	15.36	16.45	17.46	16.74	19.85
	HADGEM2-ES	1.27	2.76	1.59	4.61	15.36	16.63	18.12	16.95	19.97
	GFDL-CM3	1.72	2.95	1.69	5.05	15.36	17.08	18.31	17.05	20.41
	Ensamble-REA	1.02	2.14	1.13	3.59	15.36	16.38	17.50	16.49	18.95
Noviembre	CNRMCM5	0.89	1.42	0.78	2.89	13.30	14.19	14.72	14.08	16.19
	MPI-ESM-LR	1.33	1.97	1.25	4.55	13.30	14.63	15.27	14.55	17.85
	HADGEM2-ES	1.50	2.98	1.83	5.29	13.30	14.80	16.28	15.13	18.59
	GFDL-CM3	1.79	2.68	1.60	4.91	13.30	15.09	15.98	14.90	18.21
	Ensamble-REA	1.12	1.81	0.94	3.55	13.30	14.42	15.11	14.24	16.85
Diciembre	CNRMCM5	0.72	1.33	0.65	2.86	11.92	12.64	13.25	12.57	14.78
	MPI-ESM-LR	0.80	1.86	1.07	4.03	11.92	12.72	13.78	12.99	15.95
	HADGEM2-ES	1.41	2.85	1.27	4.82	11.92	13.33	14.77	13.19	16.74
	GFDL-CM3	1.43	2.82	1.34	5.08	11.92	13.35	14.74	13.26	17.00
	Ensamble-REA	0.81	1.68	0.97	3.21	11.92	12.73	13.60	12.89	15.13

Anexo IV

En este anexo se ponen las ligas de los videos que se generaron como material de apoyo para los talleres impartidos, los cuales sirvieron como una guía visual de la metodología planteada en esta tesis, sobre el uso de la herramienta Qgis para poder procesar y extraer la información de los escenarios de cambio climático regionalizados para México, la cual será nuestro insumo base para la generación de bases de datos, tablas y mapas.

AIV.1 Descarga de Qgis

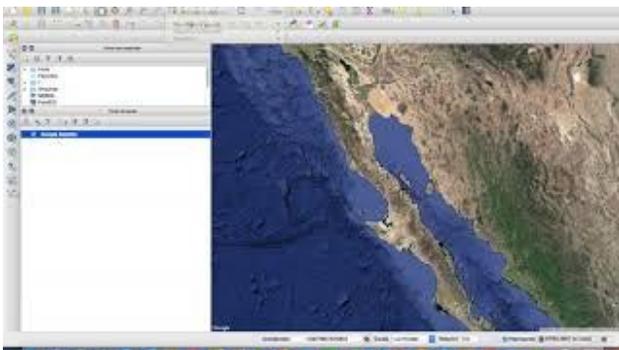
En este video se muestra la descarga del portal e instalación del sistema de información geográfica Qgis en un equipo de cómputo.



<https://youtu.be/8KX5xhsaFDA>

AIV.2 Interface del sistema de información geográfica Qgis

En este video se muestra la interface de Qgis, la distribución y función de algunas herramientas para el procesamiento de la información.



<https://youtu.be/oHeuVcQbglU>

AIV.3 Descarga de los datos de los escenarios de cambio climático

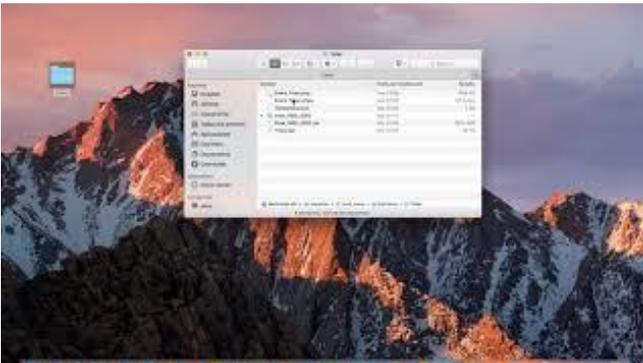
En este video se muestra la ruta a seguir para la selección y descarga de los datos tanto del clima base como de los escenarios de cambio climático del portal de UNIATMOS. Se describe el tipo de información que se encuentra en ese portal, así como los pasos a seguir para poder descargar los archivos. Se cargan los archivos al sistema de información geográfica y se crea una rampa de color adecuada para el tipo de variable que se analiza



<https://youtu.be/DexKr83NtwU>

AIV.4 Como realizar un proyecto de Qgis

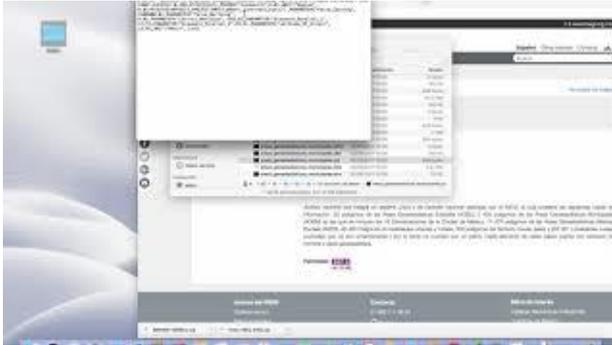
En este video se muestra como crear un proyecto de Qgis y como poder salvar los mapas como imágenes.



<https://youtu.be/F7kguasMzkU>

AIV.5 Descarga de datos del marco geostatístico de INEGI

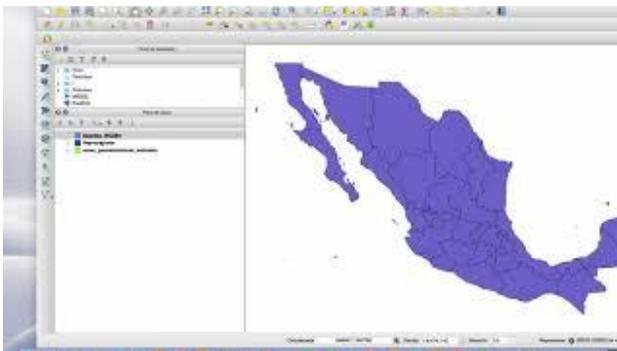
En este video se muestra la ruta a seguir para la selección y descarga de los datos del marco geostatístico de INEGI. Este archivo comprimido contiene capas en formato Shapefile de los estados, los municipios, localidades entre otras.



<https://youtu.be/1Bf46XPYwYc>

AIV.6 Cambio de proyección geográfica

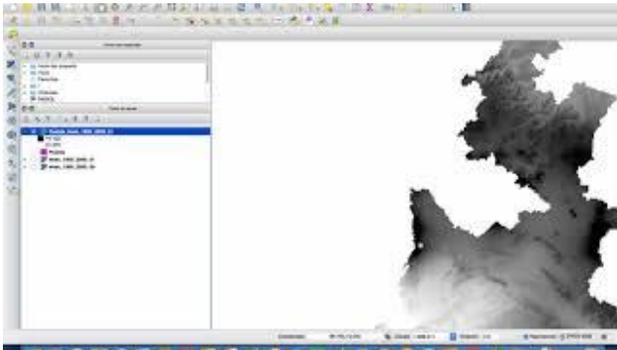
En este video se muestra como cambiar la proyección geográfica de una capa, ya que, para poder trabajar con capas de diferentes orígenes, primero nos tenemos que asegurar que tengan la misma proyección para que sean compatibles en el sistema de coordenadas que se encuentran.



<https://youtu.be/rjZaPYTieB4>

AIV.7 Recorte de la zona de interés

En este video se muestra como de la capa de estados se puede seleccionar uno, y hacer una nueva capa de solo ese estado. Tanto la capa de estados, como la nueva capa generada de un solo estado se pueden utilizar como capas de máscara para poder recortar la información tanto del clima base como la de los escenarios de cambio climático.



<https://youtu.be/Ej1obJJebjY>

AIV.8 Cálculos de la proyección total

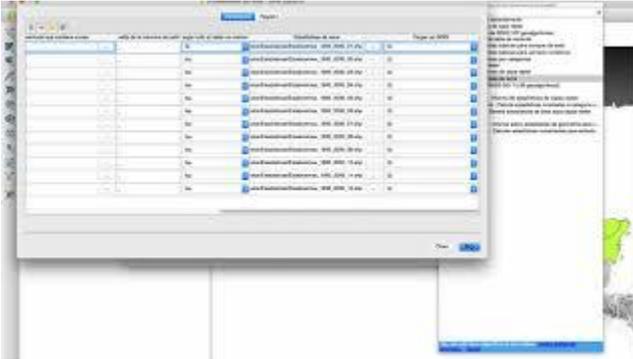
En este video se muestra como poder calcular y generar una nueva capa de la proyección total de los escenarios de cambio climático, a través de la información del clima base y las anomalías de los escenarios de cambio climático.



<https://youtu.be/wQfLo8BooVI>

AIV.9 Extracción de las estadísticas de zona

En este video se muestra el cálculo de diferentes variables estadísticas como son la media, la moda, la varianza, la desviación estándar, rango, valor máximo, valor mínimo, entre otros. Estos cálculos se realizan con la herramienta de Estadísticas de Zona.



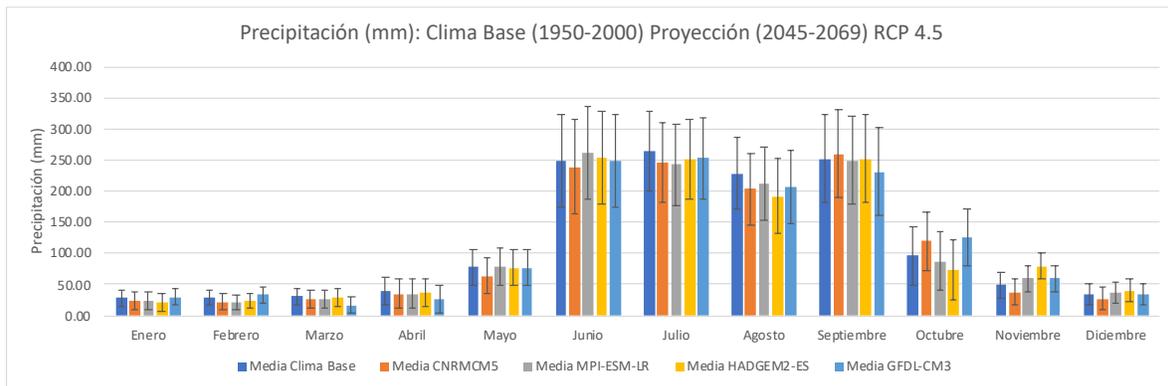
<https://youtu.be/KkntqgiWAq8>

Anexo V

La desviación estándar se obtuvo de los datos espaciales de la cuenca y no de los temporales, ya que solo se cuenta con el valor promedio de cada una de las variables en los diferentes periodos (historico:1950-2000, futuro cercano: 2015-2039, futuro intermedio: 2045-2069 y futuro lejano: 2075-2099) y no están desagregadas en el tiempo. A continuación se muestran algunos resultados obtenidos.

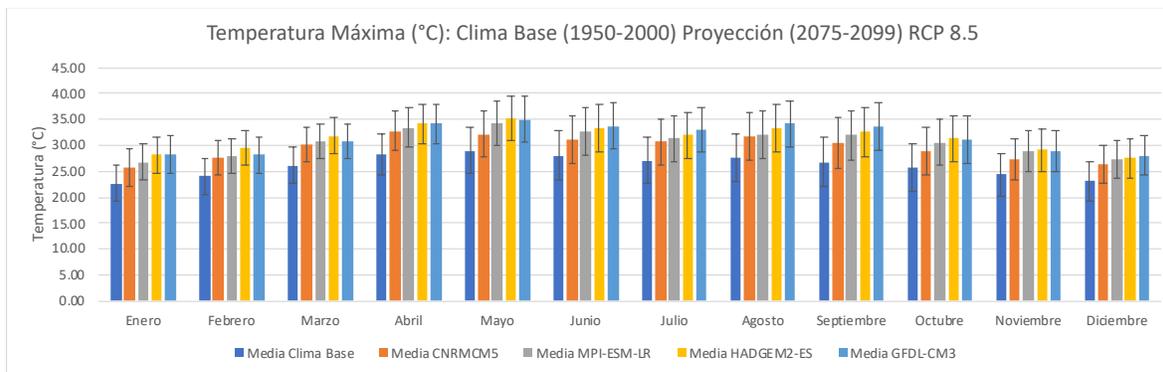
AV.1 Precipitación

Precipitación (mm): Clima Base (1950-2000) Proyección (2045-2069) RCP 4.5										
Mes	Media					Desviación Estándar				
	Clima Base	CNRMCM5	MPI-ESM-LR	HADGEM2-ES	GFDL-CM3	Clima Base	CNRMCM5	MPI-ESM-LR	HADGEM2-ES	GFDL-CM3
Enero	28.04	23.31	24.28	20.62	30.11	13.82	13.84	13.92	14.34	13.82
Febrero	29.66	22.05	21.44	23.21	32.86	12.06	12.05	12.17	12.22	11.92
Marzo	30.23	25.45	26.02	28.36	16.98	14.21	13.96	14.66	14.36	14.18
Abril	39.06	34.28	34.85	37.18	25.81	22.46	23.41	22.92	22.16	22.17
Mayo	77.50	63.09	78.97	76.50	76.70	28.75	28.70	29.52	28.89	28.78
Junio	249.52	239.27	260.72	254.28	248.57	74.64	74.89	74.66	74.49	74.52
Julio	264.32	245.59	242.52	251.17	252.87	65.02	64.26	64.88	65.32	64.84
Agosto	228.74	203.51	212.95	191.40	206.48	58.43	57.49	59.08	60.02	58.32
Septiembre	251.33	259.46	249.61	251.87	231.32	70.73	70.83	71.45	71.17	70.98
Octubre	96.05	119.27	86.89	73.63	125.48	47.02	46.77	47.23	49.15	46.09
Noviembre	48.73	37.15	59.63	79.34	59.66	20.77	20.81	20.76	20.65	20.65
Diciembre	33.46	26.77	36.64	40.56	34.09	17.48	17.87	18.06	17.59	17.61



AV.2 Temperatura Máxima

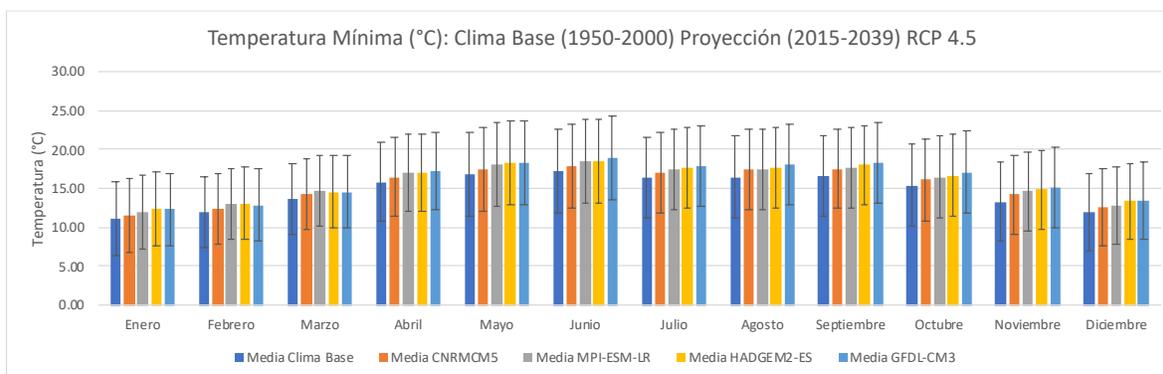
Temperatura Máxima (°C): Clima Base (1950-2000) Proyección (2075-2099) RCP 8.5										
Mes	Media					Desviación Estándar				
	Clima Base	CNRMCM5	MPI-ESM-LR	HADGEM2-ES	GFDL-CM3	Clima Base	CNRMCM5	MPI-ESM-LR	HADGEM2-ES	GFDL-CM3
Enero	22.71	25.74	26.82	28.20	28.20	3.59	3.54	3.48	3.49	3.55
Febrero	24.02	27.62	28.07	29.60	28.17	3.44	3.36	3.32	3.35	3.40
Marzo	26.11	30.21	30.92	31.87	30.85	3.50	3.37	3.31	3.41	3.41
Abril	28.39	32.80	33.44	34.17	34.13	3.98	3.86	3.78	3.87	3.88
Mayo	29.02	32.07	34.23	35.15	35.05	4.45	4.44	4.25	4.32	4.33
Junio	28.09	31.05	32.64	33.27	33.74	4.68	4.66	4.56	4.55	4.48
Julio	27.08	30.68	31.35	31.98	32.94	4.49	4.41	4.37	4.40	4.28
Agosto	27.60	31.77	32.10	33.32	34.18	4.69	4.57	4.55	4.56	4.50
Septiembre	26.82	30.49	31.92	32.55	33.59	4.84	4.80	4.65	4.65	4.66
Octubre	25.84	28.84	30.60	31.30	31.17	4.56	4.56	4.45	4.46	4.51
Noviembre	24.36	27.37	28.81	29.10	28.89	4.06	4.02	3.97	4.02	4.02
Diciembre	23.18	26.35	27.28	27.54	28.05	3.81	3.76	3.73	3.75	3.79



AV.3 Temperatura Mínima

Temperatura Mínima (°C): Clima Base (1950-2000) Proyección (2015-2039) RCP 4.5

Mes	Media					Desviación Estándar				
	Clima Base	CNRMCM5	MPI-ESM-LR	HADGEM2-ES	GFDL-CM3	Clima Base	CNRMCM5	MPI-ESM-LR	HADGEM2-ES	GFDL-CM3
Enero	11.14	11.57	11.97	12.34	12.29	4.68	4.69	4.67	4.67	4.72
Febrero	11.97	12.36	13.05	13.11	12.86	4.57	4.61	4.54	4.56	4.61
Marzo	13.72	14.26	14.69	14.58	14.59	4.56	4.57	4.54	4.56	4.62
Abril	15.82	16.48	16.99	16.97	17.20	5.00	4.99	4.97	5.00	5.01
Mayo	16.89	17.39	18.01	18.31	18.25	5.40	5.37	5.38	5.37	5.41
Junio	17.25	17.94	18.46	18.47	18.86	5.36	5.36	5.34	5.36	5.39
Julio	16.36	17.02	17.49	17.61	17.86	5.18	5.20	5.15	5.17	5.20
Agosto	16.47	17.43	17.52	17.60	18.06	5.20	5.18	5.19	5.20	5.20
Septiembre	16.62	17.52	17.62	18.00	18.28	5.13	5.11	5.12	5.11	5.12
Octubre	15.36	16.08	16.47	16.64	17.09	5.29	5.29	5.25	5.27	5.30
Noviembre	13.30	14.19	14.65	14.81	15.08	5.13	5.12	5.09	5.11	5.12
Diciembre	11.92	12.63	12.72	13.33	13.35	4.95	4.96	4.94	4.92	4.96



Anexo VI: Bibliografía

Atkinson, G.D. 2002. Forecasters' Guide to Tropical Meteorology. University Press of the Pacific. Reprinted from the 1971 edition. ISBN 1-4102-0193-7

Conde, C., G. Enríquez, N. Esquivel, J. López, F. López, R. Montes, Y. Nava, K. Ruiz. 2016. Variabilidad climática y escenarios de cambio climático. Herramientas para los estudios de impactos potenciales y vulnerabilidad actual y futura. Ejemplos para México, Centroamérica y El Caribe. En: *Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en América Latina y el Caribe. Propuestas para Métodos de Evaluación. Primera Versión.* 2016. pags. 25- 72. SEMARNAT, INECC, KOIKA, AMEXID. CdMx. México. Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/215402/CGACC_2016_Variabilidad_y_Cambio_Climatico_Impactos_Vulnerabilidad_y_Adaptacion.pdf

INECC. 2018. Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 1ª. Edición (libro electrónico). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. Disponible en: <https://cambioclimatico.gob.mx/sexta-comunicacion/>

INECC. 2019. Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático México. 1ª. Edición (libro electrónico). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. Disponible en: https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/fichas/ANVCC_LibroDigital.pdf

Gay, C., Cos, A., Peña, C. T. (Eds.). 2016. Reporte Mexicano de Cambio Climático. Grupo 1. Bases Científicas. Modelos y Modelación. 219-245. ISBN Volumen: 978-607-02-7522-7. Disponible en: http://www.pincc.unam.mx/libro_reportemex/RMCC_vol1.pdf

Tenorio, A. 2013. Variabilidad Climática de la Región Oriental de la Cuenca Pescadero Durante los Últimos 1450 años. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias (Geología Marina). Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 63 pp.

Drijfhout, S., S. Bathiany, C. Beaulieu, V. Brovkin, M. Claussen, C. Huntingford, M. Scheffer, G. Sgubin, D. Swingedouw. 2015. Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 112 (43) E5777-E5786; DOI: 10.1073/pnas.1511451112. Disponible en: <https://www.pnas.org/content/early/2015/10/07/1511451112>

Giorgi, F. 2019. Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres,* 124, 5696–5723. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>

Van Vuuren, D. P., Edmonds, J. A., Kainuma, M., Riahi, K., Weyant, J. 2011. A special issue on the RCPs. *Climatic Change*. 109. doi:10.1007/s10584-011-0157-y. Disponible en:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0157-y>

Meinshausen, M., Smith, S. J., Thomson, A., Velders, G. J. M., Van Vuuren, D. P. P., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J.-F., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C. B., & Riahi, K. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *The Representative Concentration Pathways in Climatic Change*, 109(1–2), 213–241. Disponible en:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0156-z>

Knutti, R., Sedláček, J. 2013. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Clim Change* 3, 369–373. Disponible en:

<https://doi.org/10.1038/nclimate1716>

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. Disponible en:

<https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>

Dufresne, J., Foujols, M., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benschila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., de Noblet, N., Duvel, J. P., Ethé, C., Fairhead, L., Fichefet, F., Flavoni, S., Friedlingstein, P., Grandpeix, J. Y., Guez, L., Guiyardi, E., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Ghattas, J., Joussaume, S., Kageyama, M., Krinner, G., Labetoulle, S., Lahellec, A., Lefebvre, M. P., Lefevre, F., Levy, C., Li, Z. X., Lloyd, J., Lott, F., Madec, G., Mancip, M., Marchand, M., Masson, S., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Mustajoki, I., Parouty, S., Polcher, J., Rio, C., Schulz, M., Swingedouw, D., Szopa, S., Talandier, C., Terray, P., Viovy, N., & Vuichard, N. 2013. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Clim Dyn* 40, 2123–2165. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>

Deser, C., Phillips, A. S., Alexander, M. A., & Smoliak, B. V. 2014. Projecting North American Climate over the Next 50 Years: Uncertainty due to Internal Variability. *Journal of Climate*, 27(6), 2271. Disponible en:

<https://journals.ametsoc.org/jcli/article/27/6/2271/34846/Projecting-North-American-Climate-over-the-Next-50>

Schleussner, C. F., Lissner, T. K., Fischer, E. M., Wohland, J., Perrette, M., Golly, A., Rogelj, J., Childers, K., Schewe, J., Frieler, K., Mengel, M., Hare, W., & Schaeffer, M. 2016. Differential climate impacts for policy-relevant limits

to global warming: the case of 1.5 °C and 2 °C. *Earth System Dynamics*, 7(2), 327–351. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/esd-7-327-2016>

James, R., Washington, R., Schleussner, C. F., Rogelj, J., Conaway, D. 2017. Characterizing half-a-degreedifference: a review of methods for identifying regional climate responses to global warming targets. *WIREs Clim Change* 8:e457. doi: 10.1002/wcc.457. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wcc.457>

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Shepherd, T. G. 2015. Attribution of climate extreme events. *Nature Climate Change*, 5(8), 725–730. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/nclimate2657>

Shepherd, T. G. 2014. Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections. *Nature Geoscience*, 7(10), 703–708. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/ngeo2253>

Stevens, B., & Bony, S. 2013. Climate change. What are climate models missing? *Science (New York, N.Y.)*, 340(6136), 1053–1054. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.1237554>

Yeh, S., Cai, W., Min, S., McPhaden, M. J., Dommenges, D., Dewitte, B., Collins, M., Ashok, K., An, S., Yim, B., Kug, J. 2018. ENSO Atmospheric Teleconnections and Their Response to Greenhouse Gas Forcing. *Reviews of Geophysics*, 56(1), 185–206. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/2017RG000568>.