

Universidad Autónoma de Baja California

Instituto de Ingeniería

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



**“El recurso hídrico en el Valle de Mexicali:
escenarios futuros por el cambio climático”**

Tesis que para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias

Presenta:
Benjamín Ernesto García Ávila

Director: Dr. Jaime Alonso Reyes López
Co-director: Dr. O. Rafael García Cueto

A mi esposa Aída con amor
A mis padres: Rodolfo y Enedina
A mi hermana: Ailene
A mi familia toda

Agradecimientos

La realización de esta tesis ha sido posible gracias al apoyo y colaboración de las siguientes personas y organismos, a las cuales deseo expresarles mi más sincero agradecimiento:

- A los Drs. Jaime Alonso Reyes López y Rafael García Cueto, por la oportunidad brindada en su momento para la realización de este trabajo, por su apoyo y su amistad.*
- Al Drs. Concepción Carreón Díazconti, Jorge Ramírez Hernández y Roberto Soto Ortiz por todas las horas dedicadas a la revisión de la tesis, sus comentarios y correcciones, pero sobre todo por su apoyo incondicional.*
- A todos los miembros del Instituto de Ingeniería por haberme brindado su amistad y apoyo en todo momento.*
- Al CONACYT por el otorgamiento de la Beca, que me permitió realizar la mayor parte del trabajo de tesis.*
- A mis compañeros del Instituto de Ingeniería quienes me han apoyado para llevar a su terminación los estudios de maestría, gracias por su apoyo.*
- A todos quienes de alguna manera me brindaron su amistad y han colaborado para la realización de la tesis: Juan Trejo, Eliana Rodríguez, Ramón Palomares y Adriana Camargo*

Contenido

RESUMEN	1
Capítulo I	3
Introducción	3
1.1 Planteamiento del problema.....	4
1.2 Objetivo General	5
1.2.1 Objetivos específicos.....	5
1.3 Justificación.....	5
1.4 Alcances.....	6
1.5 Área de estudio	6
Capítulo II	8
Antecedentes	8
2.1 El Río Colorado	12
2.2 Marco legal del Río Colorado: La Ley del Río.....	15
2.2.1 El Pacto del Río Colorado (1922)	16
2.2.2 El Proyecto de Ley Boulder Canyon (1928)	16
2.2.3 El Pacto de la Cuenca Alta del Río Colorado (1948).....	17
2.2.4 Arizona vs California (1964)	17
2.2.5 Tratado de aguas internacionales	18
2.3 Comportamientos climáticos históricos en la cuenca del Río Colorado.....	19
2.3.1 Temperatura	19
2.3.2 Precipitación	21
2.4 Distribución del volumen de recurso hídrico en la cuenca del Río Colorado.....	22
2.4.1 Crecimiento demográfico y aumento de la demanda de agua	23
2.5 Disponibilidad de recurso hídrico en el Valle de Mexicali	27
Capítulo III	31
Marco teórico	31
3.1 Tiempo y clima	31
3.2 Clima y sistema climático	32
3.2.1 Variabilidad climática	34
3.3 Cambio climático	34
3.3.1 Efecto invernadero.....	35
3.4 Escenarios de cambio climático	36
3.5 Reporte Especial de Escenarios de Emisiones.....	37
3.6 Modelos de Circulación General (MCG's).....	40
3.7 Incertidumbre en las proyecciones de clima	41
3.8 Downscaling (Reducción de escala)	43
3.9 Impacto del cambio climático en el recurso hídrico.....	45
3.9.1 El cambio climático y el agua	45
3.9.2 Cambios observados	47
3.9.3 La sequía y el cambio climático en la cuenca del Río Colorado.....	47
3.10 Evapotranspiración potencial	49
3.11 Evapotranspiración de Cultivo.....	50
3.12 Estrategias de adaptación y mitigación.....	51
Capítulo IV	53
Materiales y Métodos	53
4.1 Modelos de Circulación General (MCG's).....	54
4.2 Modelos regionales	55

4.3 Valle de Mexicali: modelos regionales y principales cultivos.	57
4.4 Cálculo de evapotranspiración potencial.....	59
4.5 Cálculo de evapotranspiración del Cultivo (estimación de necesidades hídricas).....	60
Capítulo V. Resultados y Discusión.....	62
5.1 Evaluación de Modelos de Circulación Generales.....	62
5.1.1 Modelo HADCM3.....	62
5.1.2 Modelo CGCM2.....	65
5.2 Evaluación de modelos regionales en la cuenca.....	67
5.2.1 Modelos BCCR-BCM2.0, HadCM3 y CGCM3.1.....	67
5.3 Evaluación del Valle de Mexicali con modelos regionales.....	69
5.3.1 Valle de Mexicali.....	69
5.3.1.1 Escenarios de temperatura y precipitación para los períodos 2020s y 2050s.....	70
5.3.2. Resultados de evapotranspiración potencial y el recurso hídrico.....	75
5.4 Implicaciones del cambio climático sobre el recurso hídrico y el tratado de aguas internacionales.....	81
Capítulo VI Conclusiones y Recomendaciones.....	82
Capítulo VII Bibliografía.....	85

Índice de figuras

Figura 1. Cuenca del Río Colorado adaptado de AMP (2011).	7
Figura 2. Cuenca Del Río Colorado adaptado de NAS (2007).	15
Figura 3 Media Anual de la temperatura de aire de la superficie de toda la cuenca del Río Colorado, 1895-2005. NOTA: rojo: valores anuales. Azul: La media de la corrida de 11 años (NAS, 2007).	20
Figura 4. 2000 - 2005 temperatura media de 1895-2000. Izquierda: se muestra en unidades de temperatura (° F). Derecha: se muestra en términos estandarizados (NAS, 2007).	20
Figura 5. La precipitación anual para la cuenca del Río Colorado por encima de Lees Ferry, 1895-2005. NOTA: rojo: valores anuales. Azul: La media de la corrida de 11 años (NAS, 2007).	21
Figura 6 Flujo natural del Río Colorado a Lees Ferry, AZ, 1906-2006. Datos de 1906-2003 (NAS, 2007).	22
Figura 7. Distribución promedio anual del recurso hídrico en la cuenca del Río Colorado en 1996.	24
Figura 8. Distribución promedio anual del recurso hídrico en la cuenca del Río Colorado promedio del 1996-2000.	25
Figura 9 Porcentaje de cambios de población en U.S., 1990-2000 (NAS, 2007).	26
Figura 10 Almacenamiento en el lago Powell, a través de 01 de diciembre 2006. Capacidad de Lago Powell es de 27 millones de acres-pies (NAS, 2007).	27
Figura 11. Delta del Río Colorado en México (Flessa et al., 2009).	29
Figura 12. Distribución del agua en el Delta del Río Colorado (Flessa et al., 2009).	30
Figura 13. Comportamiento de una variable meteorológica cualquiera (verde) y la predicción correspondiente (azul). La línea delgada corresponde a la componente inestable (tiempo) y la gruesa a la componente estable (clima) (Landa et al., 2008).	32
Figura 14 Visión esquemática de los componentes del sistema climático mundial que revisten importancia para los cambios climáticos a escala temporal de siglo, sus procesos e interacciones (flecha fina) y algunos elementos que pueden cambiar (flecha gruesa) (Houghton et al., 1997).	33
Figura 15. Diagrama de efecto invernadero (Martínez, 2004)	36
Figura 16. Ilustración esquemática de los escenarios SRES (Nakicenovic et al., 2000).	38
Figura 17 Esquema de las cuatro líneas evolutivas (Nakicenovic et al., 2000b).	39
Figura 18 Desarrollo de los diferentes escenarios SRES (IPCC, GTIII. 2001).	39
Figura 19 Cascada de incertidumbre en la secuencia entre emisiones de GEI e impactos (Zermeño, 2008).	43
Figura 20 Esquema que ilustra de manera general el enfoque de Downscaling (Wilby, 2007)..	45
Figura 21 Ejemplos de vulnerabilidad actual de los recursos de agua dulce y de su gestión; al fondo, un mapa de estrés hídrico (IPCC, 2008).	49
Figura 22. Localización de puntos de interés del MCG's (CGCM2) a lo largo de la cuenca del Río Colorado (cuadros azules, estos cuadros no son representativos de la escala de los modelos, es solo una guía de referencia). Se resalta que los MCG's cubre áreas que traslapan regiones hidrológicas bajas, medias y altas.	55
Figura 23. Localización de los "puntos" de interés a lo largo de la cuenca del Río Colorado para la utilización de modelos regionales (cuadros azules, esos cuadros no representan la escala real de los modelos).	57
Figura 24. Localización de áreas de interés en el Valle de Mexicali.	58
Figura 25 Ejemplo de resultados generados por el programa CROPWAT.	60
Figura 26. Análisis de temperatura base observada versus los resultados de los modelos utilizados.	70

Figura 27. Resultados de ETo para el período base 1961-1990 y los modelos BCM2, CGCM3 y HADCM3..... 76

Índice de tablas

Tabla 2.1 Datos del Río Colorado. Adaptado de Southern Nevada Water Authority (2010).	14
Tabla 2.2 Disposiciones del recurso hídrico en la cuenca baja del Río Colorado	17
Tabla 2.3 Reparto del recurso hídrico en la cuenca alta del Río Colorado.	18
Tabla 2.4 Distribución del recurso hídrico por estado en la cuenca del Río Colorado de 1996 a 2000. Las unidades son en millones de acres-pie (map), 1 acre-pie=1233.5m ³ . (USBR, 2004)	24
Tabla 2.5 Crecimiento de población EUA., 1990-2000 (NAS, 2007)	25
Tabla 2.6 Demanda de agua en Arizona (NAS, 2007).	26
Tabla 2.7 Uso y suministro de agua en el Delta del Río Colorado en México, 2001-2008, Millones acres pies (map) (Flessa et al., 2009)	28
Tabla 2.8 Población servida Mexicali, Tijuana, Ensenada y Tecate (INEGI, 2010).....	28
Tabla 3.1 Descripción de los escenarios SRES (IPCC, 2007).	37
Tabla 4.1 Coordenadas de las áreas de análisis en la cuenca con los MCG's HADCM3 y CGCM2.....	55
Tabla 4.2 Coordenadas de las áreas de análisis en la cuenca.	56
Tabla 4.2. Área de análisis en el Valle de Mexicali.....	58
Tabla 5.1 Período Base de temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C) y precipitación (mm/mes). Se resalta que los MCG's cubren áreas que traslapan regiones hidrológicas bajas, medias y altas.	63
Tabla 5.2 Anomalías de temperatura mínima (°C) para el período 2020s y 2050s escenario A2 y B2.....	63
Tabla 5.3 Anomalías de temperatura máxima (°C) para el período 2020s y 2050s escenario A2 y B2.....	64
Tabla 5.4 Anomalías de precipitación (mm/mes) para el período 2020s y 2050s escenario A2 y B2. Las celdas en gris claro y gris oscuro presentan anomalías negativas y positivas máximas, respectivamente.....	65
Tabla 5.5 Período Base de temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C) y precipitación (mm/mes).....	65
Tabla 5.6 Anomalías de temperatura mínima (°C) para el período 2020s y 2050s escenario A2 y B2.....	66
Tabla 5.7 Anomalías de temperatura máxima (°C) para el período 2020s y 2050s escenario A2 y B2.....	66
Tabla 5.8 Anomalías de precipitación (mm/mes) para el período 2020s y 2050s escenario A2 y B2.....	67
Tabla 5.11. Período base de 1961-1990 contiene datos medios mensuales de temperatura, precipitación, humedad relativa, viento del período 1982-1990 e insolación respecto a la latitud del área de estudio.	71
Tabla 5.12 Escenarios para el período 2020s y 2050s; contienen resultados del escenario A2 para anomalías de temperatura (°C) y de precipitación (mm/mes y %).	72
Tabla 5.13 Escenarios para el período 2020s y 2050s; contienen resultados del escenario B1 para temperatura (° c) y precipitación (mm/mes) y (%).	74
Tabla 5.14 Resultados de ETo para el período base 1961-1990 y los modelos BCM2, CGCM3 y HADCM3.....	75
Tabla 5.15 Resultados de ETo para el período 2020s y 2050s.....	77
Tabla 5.16 Datos para los tres principales cultivos en el Valle de Mexicali de hectáreas regadas y agua entregada para cada cultivo CONAGUA (2010).	77
Tabla 5.17 Resultados de evapotranspiración para los tres principales cultivos en el Valle de Mexicali.....	78
Tabla 5.19 Cambios de necesidades hídricas en alfalfa por hectárea	80
Tabla 5.20 Cambios de necesidades hídricas en algodón por hectárea	80

RESUMEN

El cambio climático es uno de los problemas ambientales más importantes que la humanidad está enfrentando en este siglo XXI. Las crecientes evidencias en el sistema atmosférico, y su impacto en ecosistemas y diversos sectores económicamente importantes a nivel global, en formas que apenas estamos empezando a entender, es un tema obligado de estudio en diversas áreas científicas y tecnológicas.

El recurso hídrico, sostén de vida en todas sus formas, se está viendo seriamente amenazado, no solamente por el cambio climático, sino también por el incremento de población en todo el planeta, y la consecuente presión sobre los recursos alimentarios. En ese sentido, en esta tesis se desarrolla un análisis de escenarios climáticos reducidos de escala, el impacto esperado en las demandas hídricas y en el desarrollo de cultivos económicamente importantes.

El área geográfica de análisis de escenarios de cambio climático es la cuenca del Río Colorado, mientras que el impacto en las demandas hídricas se centra en el valle de Mexicali, y la probable afectación para un período centrado en los 2020s y 2050, de los cultivos de trigo, alfalfa y algodón. Se usaron proyecciones de cambio climático de modelos regionales para dos escenarios de emisiones, el A2 (altas emisiones) y el B1 (bajas emisiones). Mediante el método de Penman-Monteith se estimó la evapotranspiración de un período base (1961-1990) y con los escenarios de cambio climático se realizaron proyecciones para los 2020s y 2050s. Estos resultados se utilizaron como insumos para relacionarlos con los posibles cambios en las necesidades hídricas de los cultivos mencionados.

Se realizó una revisión del Tratado de Aguas Internacionales entre México y Estados Unidos y se observó que el Valle de Mexicali es una zona vulnerable al cambio climático en el caso de que se presenten sequías en el vecino país, pues el volumen entregado podría ser reducido.

De acuerdo a los modelos climáticos reducidos de escala, es decir, regionales, se encontraron incrementos de temperatura para los 2020s y acentuados en los 2050s.

Para la precipitación se encontró incertidumbre pues se presentan anomalías, tanto positivas, como negativas. Se estimaron aumentos en la evapotranspiración, por lo que cultivos como el trigo, alfalfa y algodón demandarían una mayor cantidad de agua para satisfacer su ciclo completo.

Las recomendaciones más importantes son: a) hacer más eficientes los sistemas de riego en el Valle de Mexicali mediante su tecnificación, b) cambio en los tipos de cultivos de la región, c) cambios en los calendarios de siembra, d) mejorar o utilizar cultivos genéticamente resistentes al estrés térmico-hídrico.

Capítulo I

Introducción

El Cambio Climático se define como una variación en el estado del clima identificable a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos (IPCC, 2007). Este cambio del clima a lo largo del tiempo, no establece diferencias entre la variabilidad natural y la ocasionada por la actividad humana.

Conde (2003) señala que el estudio de cambio climático se ha visto impulsado por el apoyo de agencias internacionales como el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

En los estudios de cambio climático se utilizan los modelos de escenarios de cambio climático. Estos se han construido en base al Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés), desarrollados por el IPCC, los cuales son una representación futura de las emisiones de gases de efecto invernadero o aerosoles. Estos escenarios de emisiones se utilizan como insumos en la simulación climática y para las proyecciones de escenarios de cambio climático (Morita et al., 2000). El conjunto de escenarios de emisiones SRES son el punto de partida de numerosos estudios sobre la evaluación del impacto en los distintos sectores, como recursos hídricos, ecosistemas, seguridad alimenticia, sociedad y salud (IPCC, 2007). Este conjunto de escenarios está integrado por cuatro familias de escenarios, denominadas A1, A2, B1 y B2.

Como es bien conocido el recurso hídrico es finito así que uno de los problemas que avizoran estos escenarios es el impacto en el agua. Los resultados del estudio de las proyecciones climáticas lo evidencian como uno de los recursos más vulnerables; ya

que además se le suma la presión generada por el aumento de la población y la necesidad de cubrir su demanda (IPCC, 2007).

En el Valle de Mexicali, el impacto de estos escenarios sobre el recurso hídrico, es sin duda, de gran interés dado el carácter transfronterizo de su disponibilidad; debido a que la principal fuente de abastecimiento proviene del Río Colorado con una cuota fija que se estableció en el Tratado de Aguas Internacionales entre México y Estados Unidos de América (USA, por sus siglas en inglés) en 1944. En este Tratado se menciona que en casos de sequías el volumen podría ser reducido en la misma proporción para todos los usuarios de la cuenca (NAS, 2007). Esto hace que el Valle de Mexicali sea una zona vulnerable al cambio climático por lo que es necesario realizar un análisis a nivel regional de los escenarios de cambio climático para el Río Colorado y estimar los posibles impactos en el recurso hídrico para el Valle de Mexicali.

1.1 Planteamiento del problema

Las evidencias del cambio climático son los aumentos en el promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de glaciares y de la nieve en cúspides montañosas y el aumento en el promedio mundial del nivel del mar (IPCC, 2007).

Así, los estudios de cambio climático han planteado escenarios a nivel mundial que muestran las variaciones climatológicas a diferentes tiempos en el futuro. Estos escenarios están basados en las condiciones climáticas observadas generalmente durante un período de treinta años denominado escenario base. De las variables climatológicas que más se han estudiado y parece que se verán afectadas por este cambio serán la temperatura y la precipitación y por consiguiente el recurso hídrico.

El agua que llega al Valle de Mexicali proviene del Río Colorado, que es controlado en Estados Unidos por grandes obras hidráulicas. El tratado firmado en 1944 tiene como objetivo regular los volúmenes de agua superficial que fluyen entre ambos países. Según este tratado México debe recibir por esta frontera un volumen anual de 1,850 millones de metros cúbicos (hm^3). Además, en este mismo tratado se menciona que en

los casos de sequía se reducirá este volumen en la misma proporción en que se reduzcan los consumos en los Estados Unidos (CILA, 1944).

Por lo anterior, esta investigación tiene como propósito analizar las tendencias futuras del recurso hídrico en la cuenca del Río Colorado, a partir de los escenarios de cambio climático.

1.2 Objetivo General

- Estimar la disponibilidad futura del recurso hídrico en el Valle de Mexicali ante los escenarios de cambio climático.

1.2.1 Objetivos específicos

- Estimar la disponibilidad actual del recurso hídrico en el Valle de Mexicali y en la cuenca del Río Colorado.
- Realizar proyecciones de cambio climático local bajo distintos escenarios de emisiones y estimar los impactos en el recurso hídrico.
- Estimar los efectos del cambio climático en el sector agrícola en el Valle de Mexicali, mediante el cálculo de la evapotranspiración, y su aplicación a cultivos económicamente importantes.
- Establecer los posibles cambios de volumen de agua asignado a México (Mexicali) por la disminución del recurso hídrico en la cuenca del Río Colorado, conforme a lo establecido en el tratado de aguas internacionales.

1.3 Justificación

Actualmente, la carencia de disponibilidad de agua en cantidad o calidad suficientes resulta uno de los problemas más graves para el desarrollo de México, esto se debe en gran medida al aumento de población; con el cambio climático, el problema seguramente se agudizará (PECC, 2008).

Los últimos estudios del IPCC (2007) marcan que el cambio climático afectará la disponibilidad del recurso hídrico en el planeta. De este modo es necesario realizar estudios de los escenarios de cambio climático y hacer un análisis de la disponibilidad futura del recurso hídrico en todas las regiones de México. En este caso se realizará un análisis del cambio climático en la cuenca del Río Colorado y los impactos que provocaría en el Valle de Mexicali.

Actualmente el Valle de Mexicali se abastece con el agua del Río Colorado con una cuota establecida en el Tratado de Aguas Internacionales (1944). Esta cuota se puede ver afectada si el impacto del Cambio Climático provoca una reducción en el volumen del recurso hídrico en la cuenca del Río Colorado. En este caso entra el apartado del Tratado el cual indica que en casos de sequía se disminuirá la cuota para los usuarios.

Esto para el Valle de Mexicali significa recibir una menor cantidad de agua de la que se tiene establecida, provocando un reajuste en la distribución que afectará a los consumidores en los distintos sectores. Así, estimar los impactos del cambio climático en el recurso hídrico para el Valle de Mexicali, nos ayudará a dar sugerencias para establecer estrategias de mitigación y prevención ante la posible escasez de agua.

1.4 Alcances

En este estudio en primera instancia se observa el área que corresponde a la cuenca del Río Colorado, ya que dentro de los límites de la cuenca se encuentra el Valle de Mexicali y es aquí donde se realizará un análisis con los escenarios de cambio climático; esto debido a que el Valle de Mexicali puede verse afectado por cambios en el suministro del recurso hídrico.

1.5 Área de estudio

El estudio se realizó en el Valle de Mexicali (figura 1), tomando en cuenta que el área de influencia es la cuenca del Río Colorado que abarca siete estados de los Estados Unidos y dos de México. El Río Colorado inicia en la Montañas Rocosas en el estado de Wyoming y Colorado a lo largo de 2300 kilómetros hasta llegar al Golfo de California (Christensen et al., 2007).

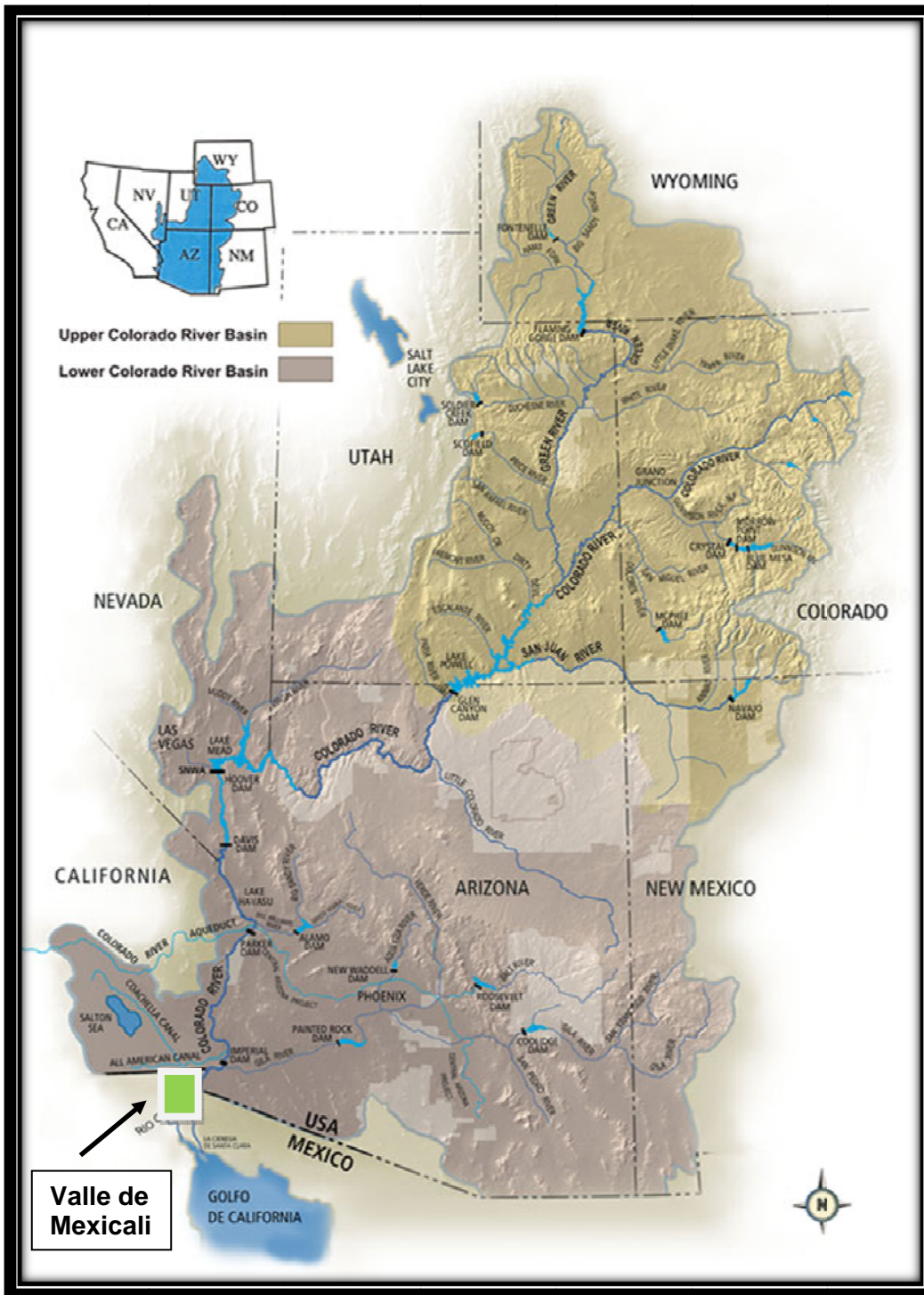


Figura 1. Cuenca del Río Colorado adaptado de AMP (2011).

Capítulo II

Antecedentes

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático es un organismo dedicado a evaluar el riesgo por cambio climático, fue creado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). El IPCC se divide en tres grupos: el grupo I estudia las bases científicas; el grupo II los impactos, adaptación y vulnerabilidad; y el grupo III la mitigación del cambio climático (IPCC, 2007).

Los efectos del cambio climático presentan severos riesgos globales y demandan una respuesta global urgente, de acuerdo a la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (IPCC, 1995). En esta reunión se estableció que el cambio de clima es atribuido directamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante un espacio comparable de tiempo. Este cambio de clima se manifiesta en un aumento de la temperatura promedio del planeta, directamente vinculado con el incremento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, relacionadas con la quema de combustibles fósiles y el cambio de uso de suelo. Además, el IPCC (2007) menciona que el aumento de la temperatura tiene consecuencias en la ocurrencia e intensidad de los fenómenos climáticos en todo el mundo.

El cambio climático constituye uno de los mayores problemas que la humanidad deberá enfrentar en este siglo XXI. El análisis económico de los impactos directos debidos al incremento de la temperatura, la elevación del nivel del mar y la intensificación de fenómenos meteorológicos extremos implicarán costos de al menos el 1% del PIB global anual y podrían incrementarse hasta un 15% o más si sigue el aumento de estos fenómenos (Nicholas, 2007). Se trata de un problema global en el que todos los países tienen una responsabilidad común, pero diferenciada de acuerdo con su grado de desarrollo y con su respectiva contribución actual e histórica de emisiones de gases de efecto invernadero (SEMARNAT, 2008).

Miller et al. (2003) utilizaron dos Modelos de Circulación General (MCG's) (HadCM2) y (PCM1), en relación con las proyecciones MCG's para California, que formaban parte de Tercer Informe del IPCC. Se utilizaron dos períodos de 30 años (2010 a 2039 y 2050 a 2079) y un período de 20 años (2080 a 2099). Los datos de los modelos generales fueron estadísticamente reducidos de escala e interpolados a una resolución espacial de 10 km. Los resultados mostraron menos días de congelación respecto al período base (1963 a 1992), lo que implica una disminución de la acumulación de nieve. Más flujos de agua a través del sistema en el invierno, y menos durante la estación seca en los meses de junio, julio y agosto. Un resultado importante que presentan las cuencas de escorrentía impulsado por el deshielo, es que a finales de invierno disminuye la acumulación de nieve en un 50 % hacia el final de este siglo.

Por otra parte, Christensen et al. (2004) evalúan los efectos potenciales del cambio climático en la hidrología y los recursos hídricos de la cuenca del Río Colorado mediante la simulación hidrológica alimentada con las variables climáticas de escenarios climáticos de reducción de escala (sección 3.8). Los cambios en la temperatura promedio fueron aumentos de 1.0, 1.7, 2.4 °C y decrementos precipitación de -3,-6 y -3%, para los períodos 2010-2039 (período 1), 2040-2069 (período 2), y 2070-2099 (período 3), respectivamente. Estos cambios de temperatura y precipitación estiman una reducción en agua equivalente de nieve de 24, 29, y 30% y una reducción de la escorrentía, de 14, 18, y 17% para los períodos de 1 al 3, respectivamente. Los resultados de este estudio en la cuenca del Río Colorado muestran que el cambio climático en los próximos siglos llevaría a una situación donde: La demanda total del sistema sería superior al depósito de entrada, dando lugar a una degradación importante en el rendimiento del sistema hídrico. Los efectos del cambio Climático disminuirían el volumen de agua en la cuenca del Río Colorado.

Lynd et al. (2006) utilizaron tres MCG's para analizar el estado de California en Estados Unidos, los modelos fueron del National Center for Atmospheric Research denominado Parallel Climate Model (PCM1), el segundo del Geophysical Fluids Dynamic Laboratory denominado (GFDL) y el tercero de United Kingdom Met Office Hadley Centre Climate Model, version 3 denominado (HadCM3). Los escenarios que se utilizaron fueron tres

B1, A2 y (A1fi) (estos escenarios se explican en la sección 3.4). Una parte de los resultados que se obtuvieron fueron los aumentos de temperatura, la disminución de la precipitación lo que podría reducir gravemente la capa de nieve en primavera, aumentando el riesgo de escasez de agua en verano.

Vicuna et al. (2007) utilizaron los MCG's, PCM y el HadCM3 para evaluar los impactos del cambio climático en la hidrología y el recurso hídrico en California, bajo dos diferentes escenarios de altas emisiones AIFI y de bajas emisiones B1. La salida de los MCG's fue estadísticamente reducidos de escala y se utilizaron en el modelo de capacidad variable de infiltración (VIC). Los resultados muestran un mayor impacto negativo en la hidrología de California y los recursos hídricos que en las evaluaciones previas (Miller et al., 2003) de cambio climático en la región. Estos impactos se traducen a menores caudales respecto al cifrado en el periodo base, baja de almacenamiento en embalse de la sierra de Nevada, disminución en el suministro de agua, esto será más pronunciado después del siglo 21.

Christensen et al. (2007) utilizaron 11 MCG's del IPCC con los escenarios de emisiones A2 y B1. Estos modelos proporcionan la base para el estudio climático más completo de la cuenca de Río Colorado hasta la fecha. A estos modelos se aplicó el método reducción de escala (sección 3.8) con datos de temperatura y precipitación y se aplicó el modelo de hidrología VIC (Variable Infiltration Capacity). Los resultados de los escenarios climáticos A2 y B1 mostraron cambio de la temperatura con el escenario A2 varió de 1.2 a 4.4 °C y para el escenario B1 de 1.3 a 2.7 °C. En cuanto a la precipitación, presentó cambios que van de -1 a -2% para el escenario A2 y de +1% a -2% para el escenario B1.

Miller et al. (2008) mencionan que las investigaciones recientes han sugerido que los cambios de temperatura y precipitación, debido al cambio climático han tenido un impacto significativo sobre la disponibilidad y el caudal del Río Colorado. En este estudio, se utilizaron datos de temperatura y precipitación, obtenidos en 29 estaciones climáticas que cubren toda la cuenca del Río Colorado y datos mensuales de flujo natural a lo largo y ancho del Río Colorado. Se utilizaron pruebas estadísticas para

analizar los cambios y tendencias en la temperatura, precipitación y datos de caudal entre 1951 y 2005. Las tendencias de aumento de la temperatura se hicieron evidentes a lo largo de la cuenca y fueron más significativas en el primer trimestre de (enero a marzo). La precipitación solo se incrementó notablemente en el mes de febrero. Estos resultados corresponden con los cambios en los caudales durante el año donde el incremento de caudales se registró entre noviembre y febrero, pero muestra una tendencia decreciente durante el pico tradicional que es cuando se presenta la temporada de escorrentía entre abril y julio. Es probable que el aumento de temperatura haya afectado la precipitación en la cuenca, provocando un cambio en el calendario de eventos de escorrentía.

Hidalgo et al. (2009) utilizaron un conjunto de modelos de simulación de cambio climático para reconocer los cambios observados en los caudales de tres grandes regiones hidrológicas en California. Este autor empleó los modelos CCSM3-IV (Community Climate System Model) y el PCM (Parallel Climate Model) y dos factores antropogénicos PCM y MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate). Los cambios observados con la modelación se atribuyeron a los cambios climáticos inducidos por los gases de efecto invernadero, aunque también al cambio del uso del suelo. Se concluyó que el cambio climático es una señal importante, pero también que otros procesos han contribuido a la variabilidad hidrológica de las cuencas del oeste de Estados Unidos.

En el estudio de Hurkmans et al. (2009) se menciona que el Río Colorado es una de las más importantes fuentes de agua superficial en el oeste de Estados Unidos y es vital para el abastecimiento de agua potable en el suroeste del país. En este estudio se hizo una estimación inter-anual de la variabilidad de almacenamiento de agua en la cuenca, mediante los modelos TWS (Terrestrial Water Storage) y BSWB (Basin-Scale Water Balance) y datos de los períodos 1958 a 2005 y 1979 a 2005, con el objetivo de mejorar la comprensión interanual del Río Colorado, los resultados obtenidos parecen encontrar una relación con la precipitación de invierno y la humedad del suelo superficial de la cuenca del Río Colorado por lo tanto ofrece la posibilidad de predicción.

Estudios a nivel nacional

En 1992, México desarrolla acciones específicas para hacer frente al cambio climático, en esta fecha se realizó la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, la denominada “Cumbre de Río” donde se adoptó la Convención Marco sobre Cambio Climático (CMNUCC, Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). México firmó la CMNUCC ese mismo año y, una vez aprobada por el Senado de la República, la ratificó en 1993. En 1997 se firmó el Protocolo de Kioto (PK), el cual fue aprobado por el Senado y ratificado en el 2000. La CMNUCC, que hoy día es de membresía prácticamente universal pues cuenta con 191 países signatarios, entró en vigor el 21 de marzo 1994 y el PK el 16 de febrero 2005. Desde entonces, con base en el artículo 133 Constitucional, forman parte de la legislación mexicana (SEMARNAT, 2008).

Por otro lado, México ha desarrollado estudios sobre la economía del cambio climático a nivel nacional. Todos ellos avalan la factibilidad de la meta indicativa de reducción de emisiones al 50% en 2050. El estudio de la UNAM cifra entre 3.5 y 4.2% del PIB el costo anual previsible por el cambio climático, en función de la pérdida de producción agropecuaria, menor disponibilidad de agua, deforestación, efectos en la salud y pérdida de biodiversidad, mientras el cumplimiento de la meta indicada representaría un costo de 0.56% del PIB (PECC, 2008).

2.1 El Río Colorado

El Río Colorado representa una importante fuente de agua para el suroeste de los Estados Unidos y noroeste de México. Nace en las montañas de Colorado y Wyoming, por el sur y el oeste atravesando los estados de Utah, Nuevo México, Arizona, Nevada y California; en México abarca partes de Sonora y Baja California.

El Río Colorado ha sido controlado con un sistema de 10 grandes presas y más de 80 desviaciones para uso agrícola y otros usos a lo largo de su recorrido de 2,300 km (1,430 millas), desde su origen hasta el fin de su canal principal en la Isla Montague en el Golfo de California (NAS, 2007). Con la construcción de la Presa Hoover y Glen

Canyon, se regula el flujo, para que el agua pueda ser distribuida equitativamente entre los usuarios. En la actualidad, el Río Colorado irriga más de 1.5 millones de hectáreas (3.7 millones de acres) de tierras de cultivo en el suroeste de Estados Unidos y noroeste de México, y abastece de agua a cerca de 30 millones de personas (NAS, 2007). Es uno de los ríos más regulados y desviados de Estados Unidos: cada gota es virtualmente contabilizada en la asignación de agua entre 9 estados (7 en Estados Unidos y 2 en México). Mientras que la agricultura de riego encabeza la lista del uso de agua del Río Colorado en Estados Unidos y México, el segundo consumo lo constituye la evaporación en las represas, el tercer uso mayoritario son las desviaciones fuera de la Cuenca del Colorado como el agua enviada a Los Ángeles, seguido por el uso municipal e industrial (Luecke, 1999).

La cuenca del Río Colorado tiene una tasa anual media de flujo de unos 18,502 hm³/año (15 millones de acres-pies –map-) es la fuente más importante de agua en Estados Unidos y aunque atraviesa una de las regiones más secas de América del Norte, le ha ofrecido a esta región oportunidades de desarrollo económico y crecimiento (NAS, 2007). Durante los últimos 100 años estas posibilidades han impulsado innumerables contiendas políticas entre las empresas, políticos, tribus, ganaderos, funcionarios públicos y todos los que buscan una asignación del flujo del Río Colorado. Estos conflictos se deben a la realidad hidrológica de que aproximadamente el 90 por ciento del flujo del río se origina en el estados de la cuenca alta del Colorado (Nuevo México, Utah y Wyoming) y, gran parte de la demanda de agua del río proviene de la parte baja de la cuenca que comprende los estados de Arizona, California y Nevada (NAS, 2007). Otra característica notable de la cuenca del Río Colorado es la construcción de una gran cantidad de obras de almacenamiento en relación con el flujo del río. Los embalses del sistema del Río Colorado tienen aproximadamente un total de 74,010 hm³/año (60 map) de capacidad de almacenamiento que es aproximadamente cuatro veces el flujo medio anual. Los principales embalses de almacenamiento de la cuenca han atenuado los efectos del clima y la variabilidad hidrológica, aunque la cantidad de agua almacenada sigue siendo sensible a las fluctuaciones del clima, otros datos de la cuenca se mencionan en la tabla 2.1. Dada la fuerte dependencia que la creciente población está dando al río y a

su sistema de almacenamiento, las variaciones en los flujos del Río Colorado y el clima en la cuenca han provocado una mayor preocupación para los usuarios (NAS, 2007).

Tabla 2.1 Datos del Río Colorado. Adaptado de Southern Nevada Water Authority (2010).

Datos del Río Colorado	
Longitud del Río:	Aproximadamente 2,300 km (1,400 millas)
Estados de la Cuenca Superior:	Colorado, New México, Utah y Wyoming
Estados de la Cuenca Inferior:	Arizona, California y Nevada
Población Servida:	Aproximadamente 25 millones
Promedio Anual de Lluvia en la Cuenca:	355.56 mm (14 pulgadas)
Promedio Anual de Flujo:	6,137 hm ³ (5 millones acres-pie) y hasta 29,604 hm ³ (24 millones acres-pie).
Recurso de Agua:	La nieve que se derrite en las Montañas Rocosas es el recurso principal de agua

El valor económico sustancial de agua del Río Colorado ha fomentado la competencia entre los Estados y los usuarios de agua. Durante las últimas décadas, las negociaciones y legislaciones relacionadas con el agua del Colorado han sumado un cuerpo considerable de leyes, pactos, tratados y acuerdos para asignar sus aguas; gran parte de este cuerpo legal ha sido diseñado para adaptarse a las variaciones hidrológicas y del clima (NAS, 2007). Estas tensiones se producen por el hecho de que durante muchos años las estimaciones de flujo y las asignaciones negociadas en el año 1920 se basaron en datos extraídos de un período relativamente corto y muy húmedo, por lo que resultó ser demasiado optimista. Por otra parte, los nuevos escenarios de cambio climático que predicen cambios en las condiciones del clima regional pueden reducir aún más el suministro de agua (NAS, 2007).

Las dos presas más grandes sobre el Río Colorado son la presa Hoover, ubicada cerca de Las Vegas, Nevada y la presa de Glen Canyon, ubicado a 15 kilómetros al sur de la frontera entre Arizona y Utah. Estas presas embalsan el Lago Mead y el Lago Powell, con capacidades de almacenamiento de aproximadamente 34,538 hm³/año y 33,304 hm³/año (28 y 27 map, respectivamente), cada uno de estos depósitos es capaz de almacenar cerca de 2 años de caudal medio anual del río (NAS, 2007). Los niveles de

almacenamiento y la capacidad disponible del Lago Mead y el Lago Powell son muy importantes en la distribución del flujo a través del sistema del Río Colorado (figura 2).



Figura 2. Cuenca Del Río Colorado adaptado de NAS (2007).

2.2 Marco legal del Río Colorado: La Ley del Río

El término "Ley del Río" no se refiere a una sola ley, sino más bien a una serie de acuerdos, leyes, decisiones judiciales, decretos, contratos, dos importantes acuerdos en varios estados y fallos de la Corte Suprema e incluyendo un tratado con México. En muchos sentidos la base de La Ley del Río se definió en la década de 1920 por El

Pacto del Río Colorado y el Proyecto de Ley Boulder Canyon; en las décadas siguientes se expandió y evolucionó en numerosas maneras incorporando nuevas demandas y cambios de las tendencias sociales y económicas (NAS, 2007).

Así el Río Colorado es administrado y operado en numerosos pactos, leyes federales, decisiones judiciales, decretos, contratos, y las directrices de reglamentación colectiva conocida como "Ley del Río". Esta colección de documentos distribuye el agua, regula el uso y manejo del Río Colorado entre los siete estados de la cuenca y México (NAS, 2007).

2.2.1 El Pacto del Río Colorado (1922)

Este pacto del Río Colorado se firmó en 1922 siendo piedra angular de La Ley del Río. En términos de la ley de agua fue un impulso clave para la negociación de Pactos derivados de la decisión de la Corte Suprema de los EE.UU. El Pacto define el área de la cuenca alta a fin de incluir la mayor parte de Colorado, Utah y Wyoming y partes más pequeñas del norte de Arizona y el noroeste de Nuevo México; mientras que la cuenca baja se compone de parte de Arizona y California, Nevada, Nuevo México y Utah.

Tal como se negoció en el Pacto de 1922, el agua del Río Colorado se distribuye de la siguiente manera, para la cuenca alta y cuenca baja 9,251 hm³/año (7,5 map/año). El Pacto también menciona que el agua entregada a México se repartirá en partes iguales entre la cuenca baja y alta del Río Colorado (Colorado River Compact, 1922).

2.2.2 El Proyecto de Ley Boulder Canyon (1928)

Las principales disposiciones de esta legislación federal son: (1) El Pacto del Río Colorado sería efectiva con la aprobación de los seis Estados de la cuenca si California por la ley estatal limita su uso garantiza a 5,427 hm³/año (4,4 map) de agua, (2) La autorización para la construcción de Boulder / Presa Hoover y el Canal Todo Americano y (3) una autorización para dividir la cuota de la cuenca baja de 9,251 hm³/año (7,5 map) entre los tres Estados asignando a California 5,427 hm³/año (4,4 map), Arizona 3,453 hm³/año (2,8 map) y Nevada 0,330 hm³/año (0,300 map) debido a

su baja densidad de población. La tabla 2.2 presenta la disposición del recurso hídrico en la cuenca baja del Río Colorado (Boulder Canyon Project Act, 1928).

Tabla 2.2 Disposiciones del recurso hídrico en la cuenca baja del Río Colorado

Proyecto de Ley Boulder Canyon (1928)			
Estado	Cantidad (map*/año)	Cantidad (hm ³ /año)	% aproximado
California	4,4	5,427	58.6
Arizona	2,8	3,453	37.4
Nevada	0,3	0,330	4
Total	7,5	9,251	100
Tabla elaborada por (García, 2010) el cual adoptó la columna de porcentajes. (*)Millones acres-pie			

2.2.3 El Pacto de la Cuenca Alta del Río Colorado (1948)

Firmado en 1948, el Pacto de la Cuenca Alta del Río Colorado reparte los 9,251 hm³/año (7.5 map) asignados a la cuenca superior en el Pacto de 1922 como sigue: Colorado recibe 51.75 por ciento, Nuevo México recibe el 11.25 por ciento, Utah recibe el 23 por ciento y Wyoming recibe el 14 por ciento. Además Arizona recibe una cantidad fija de 61 hm³/año (50,000 acres-pies por año) en reconocimiento al territorio que drena hacia el río por encima de Lees Ferry. La tabla 2.3 presenta el reparto del recurso hídrico en la cuenca alta del Río Colorado (Upper Colorado River Basin Compact, 1948).

2.2.4 Arizona vs California (1964)

El caso de Arizona vs California tratado en la Suprema Corte que resolvió la larga disputa sobre los créditos para el flujo del Río Colorado. Arizona presentó su demanda inicial contra California en La Corte Suprema en 1952, posteriormente se agregaron como parte del procedimiento Nevada, Nuevo México y Utah.

Según lo expresado por La Corte, la controversia fundamental del caso es la cantidad de agua y que cada Estado tiene el derecho legal del uso de las aguas del Río Colorado y sus afluentes. El Tribunal nombró un Maestro Especial para la obtención de pruebas, determinar los hechos, las conclusiones del estado de derecho y recomendar

un decreto. Así se nombro en 1955, a Simon H. Rifkin quien en 1961, presentó un informe a La Corte Suprema de Justicia. Este informe contiene las conclusiones y recomendaciones, la mayoría de los cuales, La Corte, las adoptó en el decreto. Además, La Corte concluyó que el proyecto de Ley Boulder Canyon refleja un "reparto equitativo" y ratificó la asignación de la cuenca baja de 9,251 hm³/año (7,5 map) tal como se mencionó en el apartado 2.2.2 (Arizona vs California, 1964).

Tabla 2.3 Reparto del recurso hídrico en la cuenca alta del Río Colorado.

El Pacto de la Cuenca Alta del Río Colorado (1948)			
Estado	% Asignado	Aprox. (hm ³ /año) ⁺	Aprox. (map/año) ⁺
Colorado	51.75	4,787	3,881,250
Nuevo Mexico	11.25	1,040	0,843,750
Utah	23	2,127	1,725,000
Wyoming	14	1,295	1,050,000
Total	100	9,255	7,500,000
+ Cantidades aproximadas, datos adoptados por (García 2010). (*)Millones acres-pies. Además Arizona recibe una cantidad extra de 61 hm ³ /año (50,000 acre-pies por año), en reconocimiento de su territorio que drena hacia el río por encima de Lees Ferry.			

2.2.5 Tratado de aguas internacionales

El tratado que se firmó entre México y Estados Unidos garantiza un volumen de 1,850 hm³/año (1.5 map) y estipula no exceder de 2,096 hm³/año (1.7 map). También establece que el agua asignada a México se reducirá en los casos de extraordinaria sequía o de serio accidente al sistema de irrigación de los Estados Unidos, que haga difícil a éstos entregar la cantidad garantizada de 1,850 hm³/año (1.5 map), esta reducción se hará en la misma proporción en los consumos de los Estados Unidos (CILA, 1944).

El tratado establece además que México no adquiere ningún derecho para cualquier propósito, en exceso de 1,850 hm³/año (1,5 map) de agua. De este modo las tres condiciones por lo que puede ser reducida la entrega a México son: 1.- Por "sequía extraordinaria" o un accidente en el sistema de riego. 2.- Por "dificultad" de los Estados

Unidos en la entrega de 1.5 millones acres-pies, sin ninguna disposición de quién va a determinar la dificultad que el hecho existe. 3.- Por la reducción de los usos consuntivos en EUA. Esta última condición señala que se requiere de 1,5 millones de acres-pies para entregar anualmente a México a menos que se reduzcan los usos consuntivos de los Estados Unidos. El Tratado no especifica las fuentes de agua que se asignan a México (NAS, 2007).

2.3 Comportamientos climáticos históricos en la cuenca del Río Colorado

2.3.1 Temperatura

La temperatura media anual en la cuenca del Río Colorado para el período de 1895 a 2000 se muestra en la figura 3 (NAS, 2007). Las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas son similares y tienen un gran parecido a las encontradas en el oeste de Estados Unidos, así como con las tendencias mundiales. De esta figura se resalta que desde finales de 1970 la región ha mostrado una tendencia constante al alza; además de que el promedio más reciente de 11 años supera los valores anteriores en los más de 100 años de registros. Las temperaturas en la cuenca hoy en día son por lo menos 1,5 ° F más caliente que durante la sequía de 1950. El aumento de las temperaturas en la región tiene muchas implicaciones hidrológicas importantes, incluyendo los impactos de la sequía (NAS, 2007).

La figura 4 muestra temperaturas promedio del período (2000-2005), comparándolo con los promedios del período (1895-2000). La cuenca del Río Colorado se ha calentado más que cualquier otra región de los Estados Unidos un hecho que debe ser de gran interés en toda la región. Esta tendencia ha continuado en el primer semestre de 2006 (NAS, 2007).

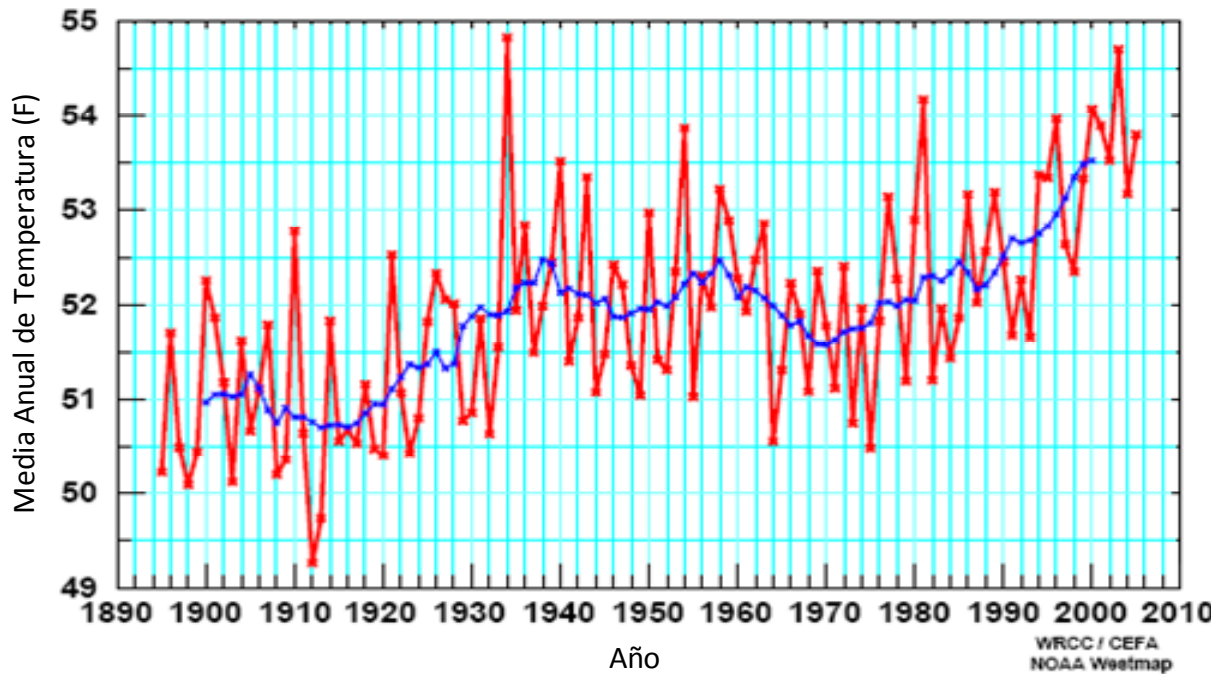


Figura 3 Media Anual de la temperatura de aire de la superficie de toda la cuenca del Río Colorado, 1895-2005. NOTA: rojo: valores anuales. Azul: La media de la corrida de 11 años (NAS, 2007).

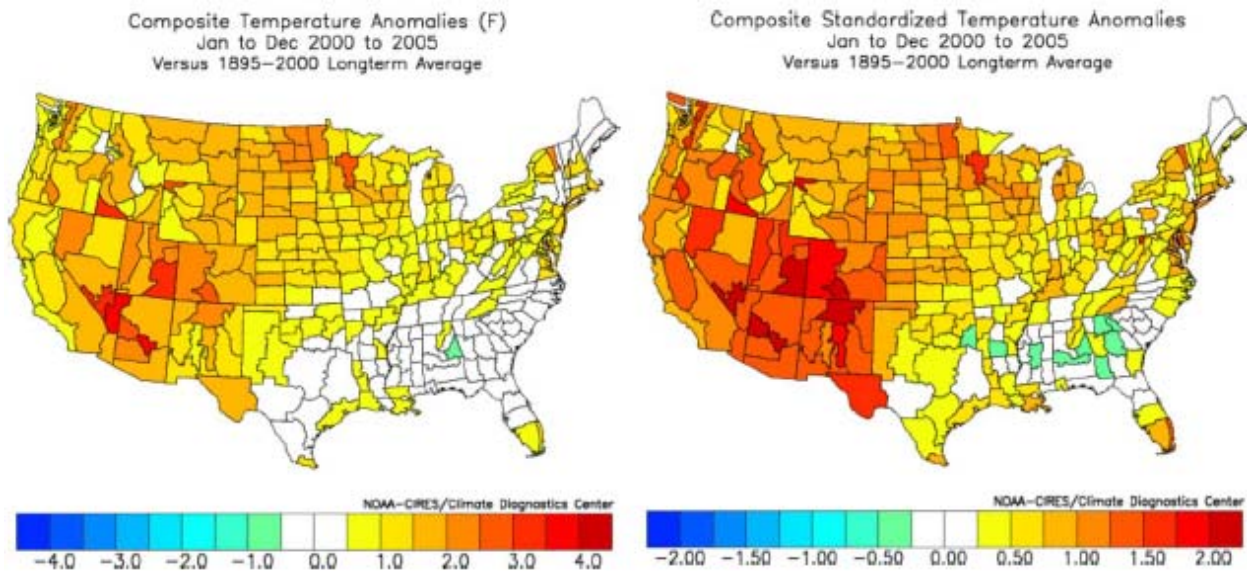


Figura 4. 2000 - 2005 temperatura media de 1895-2000. Izquierda: se muestra en unidades de temperatura (° F). Derecha: se muestra en términos estandarizados (NAS, 2007).

2.3.2 Precipitación

En la figura 5 se muestra la variabilidad interanual de las precipitaciones en la cuenca alta del Río Colorado de Lees Ferry hacia arriba. En esta figura se observa la alta variabilidad de precipitación año tras año (interanual).

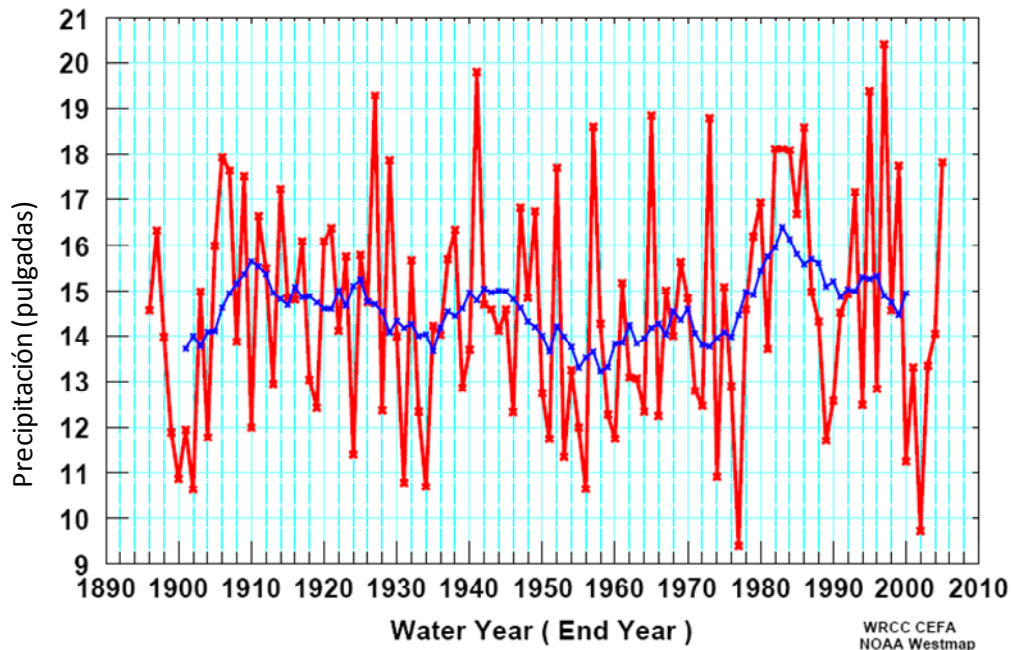


Figura 5. La precipitación anual para la cuenca del Río Colorado por encima de Lees Ferry, 1895-2005. NOTA: rojo: valores anuales. Azul: La media de la corrida de 11 años (NAS, 2007).

Proyecciones de precipitación

En la cuenca del Río Colorado, las proyecciones de precipitación de los modelos climáticos sugieren posibles cambios en la precipitación anual. Los resultados de los modelos muestran una variación anual relativamente baja. En los próximos 10-40 años, hay una tendencia en los resultados de modelos climáticos de poco aumento de la precipitación anual, en el noroeste de Estados Unidos presentan un aumento de poco más del 10% mientras que en el suroeste de los Estados Unidos se presentan reducciones en menos de 10 % de los valores actuales, los cambios en la precipitación anual de las cabeceras de las regiones del Río Colorado son relativamente bajos (NAS, 2007).

Los cambios en la estacionalidad de la precipitación o cambios en el tipo de precipitación (lluvia o nieve) pueden ser tan importantes como los cambios en las cantidades anuales de precipitación. Un estudio de Nevada (a la misma latitud que la parte alta del Colorado), con 11 modelos de escenarios climáticos, mostraron una disminución en primavera, a principios del verano y al final del invierno; el aumento de precipitación se mostraron en invierno (Maurer, 2007).

La figura 6 muestra el flujo anual del Río Colorado hacia Lees Ferry en el período 1906-2006, el valor promedio del flujo del período 1906-2006 (línea roja) y un valor promedio de caudal de 5 años (línea oscura). El valor promedio anual del flujo es aproximadamente 15 millones de acres-pies (NAS, 2007).

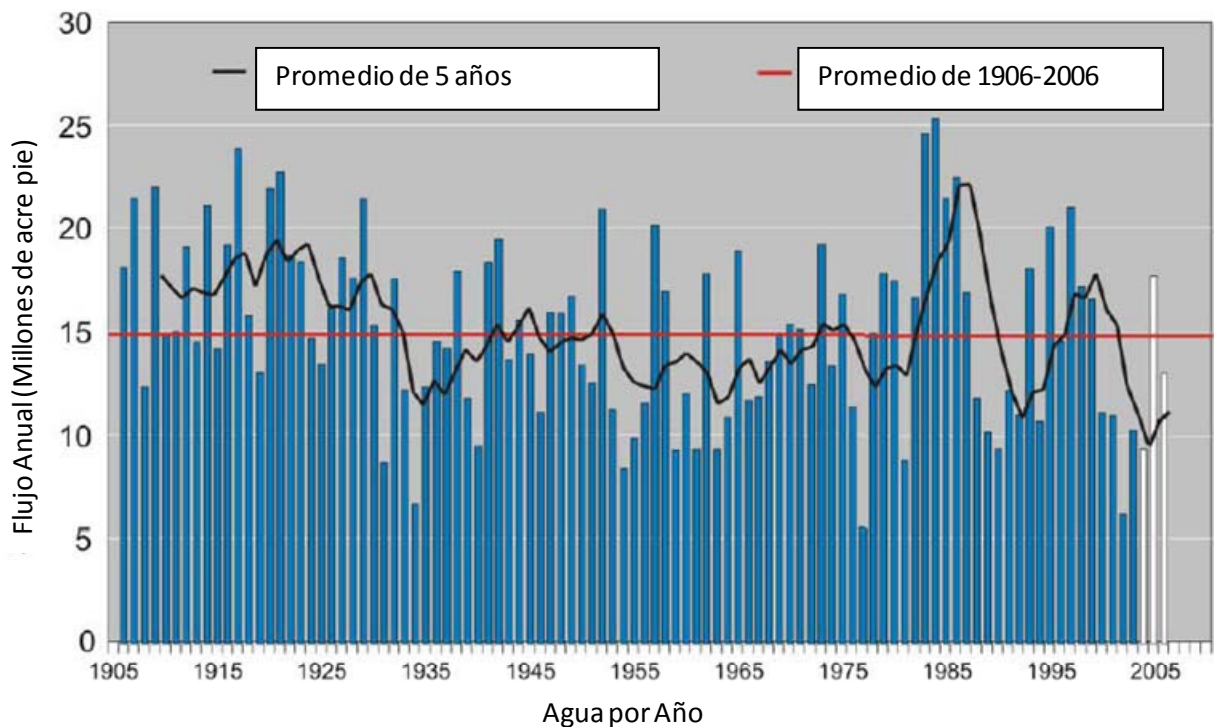


Figura 6 Flujo natural del Río Colorado a Lees Ferry, AZ, 1906-2006. Datos de 1906-2003 (NAS, 2007).

2.4 Distribución del volumen de recurso hídrico en la cuenca del Río Colorado.

El Río Colorado ha sido la principal fuente de abastecimiento de agua para el desarrollo de la región y se utiliza para el sector agrícola, para uso público-urbano, para la generación de energía eléctrica, para la actividad minera, para la ganadería, para la

vida silvestre. La tabla 2.4 presenta la distribución del agua en los distintos estados de la cuenca para el período 1996-2000. En la figura 7 se presenta el porcentaje de agua utilizada por cada estado para el año de 1996 y en la figura 8 la utilizada en el quinquenio de 1996 al 2000 (USBR, 2004). En estas figuras se resalta que para ese quinquenio, California se encuentra en el primer lugar de consumo, seguido de Arizona, México, Colorado y el resto de los estados con un porcentaje menor. Vale la pena señalar la categoría de “Otro” dado que el consumo es alto y representa la evaporación en los embalses a lo largo de la cuenca.

2.4.1 Crecimiento demográfico y aumento de la demanda de agua

A finales del siglo XX e inicios del XXI se presentó una de las más altas tasas de crecimiento de la población en todo el oeste de los Estados Unidos. Por ejemplo la población en Arizona, pasó de alrededor de 3,7 millones en 1990 a más de 5,1 millones en 2000, un aumento de aproximadamente el 40 por ciento (con este porcentaje se duplicaría la población de Arizona en menos de 20 años). En Colorado, la población pasó de poco menos de 3,3 millones en 1990 a alrededor de 4,3 millones en 2000, un aumento del 30 por ciento (NAS, 2007). Estas cifras no son necesariamente equivalentes al aumento de la demanda de agua, los hábitos y preferencias del consumidor influyen en los usos del agua por habitante. La expansión de la población ha llevado a un aumento significativo en la demanda de agua urbana. Por ejemplo el consumo de agua en el Condado de Clark, Nevada (que incluye Las Vegas), aproximadamente se duplicó en el período 1985-2000. Las tasas de crecimiento demográfico y las proyecciones futuras están en un marcado aumento en esta región y apuntan a las demandas de agua. La Tabla 2.5 enumera las tasas de crecimiento de la población de 1990-2000 de varios estados de EUA y la figura 9 muestra los cambios demográficos a través de todo Estados Unidos durante el mismo período, En la tabla 2.6 se muestra la tasa de crecimiento de la población y la demanda de agua para el período 1990-2040 para el estado de Arizona (NAS, 2007).

Tabla 2.4 Distribución del recurso hídrico por estado en la cuenca del Río Colorado de 1996 a 2000. Las unidades son en millones de acres-pie (map), 1 acre-pie=1233.5m³. (USBR, 2004)

Agua Usada por Estados	1996	1997	1998	1999	2000	1996-2000 (promedio)
ARIZONA	5,090	4,906	4,662	4,717	4,794	4,833
CALIFORNIA	5,226	5,162	4,953	5,107	5,258	5,141
COLORADO	2,088	1,966	2,032	1,853	2,383	2,064
NEVADA	0,392	0,378	0,349	0,393	0,45	0,392
NEW MEXICO	0,385	0,447	0,417	0,398	0,347	0,410
UTAH	0,919	0,916	0,976	0,995	0,897	0,940
WYOMING	0,496	0,442	0,390	0,415	0,421	0,433
OTRO	2,024	1,974	17,592	2,154	2,102	2,003
MÉXICO	1,617	2,962	4,832	2,973	2,145	2,906
VOLUMEN TOTAL	18,256	19,158	20,379	19,01	18,813	19,123

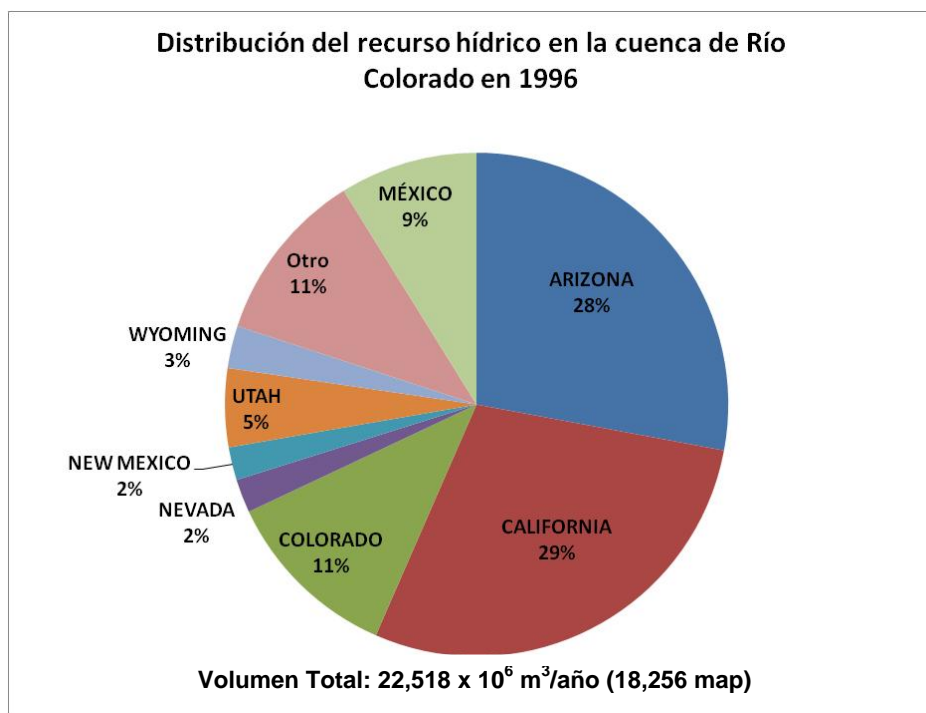
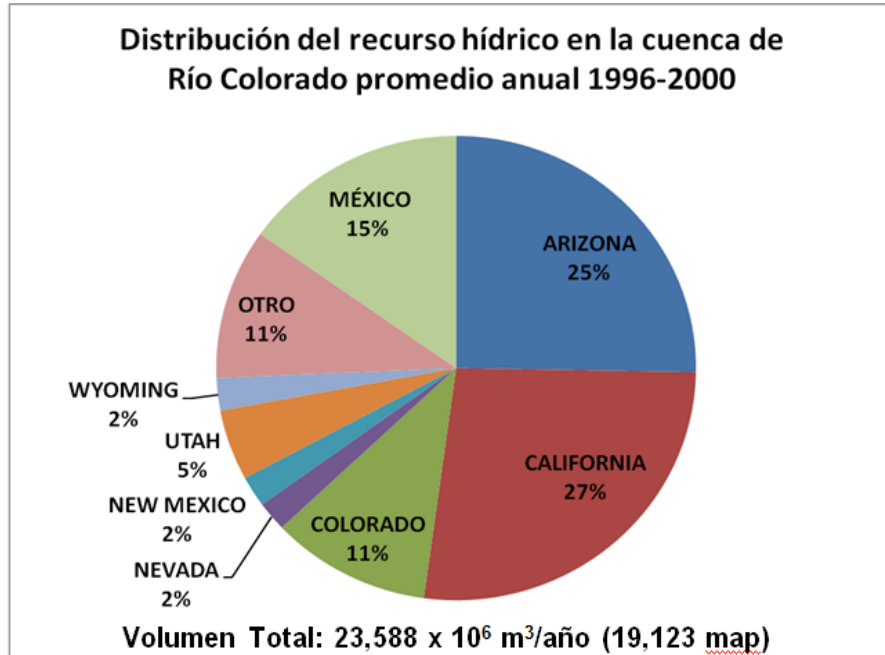


Figura 7. Distribución promedio anual del recurso hídrico en la cuenca del Río Colorado en 1996.



(Otro) Evaporación en los embalses a lo largo de la cuenca baja y alta

Figura 8. Distribución promedio anual del recurso hídrico en la cuenca del Río Colorado promedio del 1996-2000.

Tabla 2.5 Crecimiento de población EUA., 1990-2000 (NAS, 2007)

Rank	Estado	Censo Población		Cambios de Población	
		April 1, 2000	April 1, 1990	Number	Percent
1	Nevada	1,998,257	1,201,833	796,424	66.3
2	Arizona	5,130,632	3,665,228	1,465,404	40.0
3	Colorado	4,301,261	3,294,394	1,006,867	30.6
4	Utah	2,233,169	1,722,850	510,319	29.6
5	Idaho	1,293,953	1,006,749	287,204	28.5
6	Georgia	8,186,453	6,478,216	1,708,237	26.4
7	Florida	15,982,378	12,937,926	3,044,452	23.5
8	Texas	20,851,820	16,986,510	3,865,310	22.8
9	N. Carolina	8,049,313	6,628,637	1,420,676	21.4
10	Washington	5,894,121	4,866,692	1,027,429	21.1
12	New Mexico	1,819,046	1,515,069	303,977	20.1
18	California	33,871,648	29,760,021	4,111,627	13.8
32	Wyoming	493,782	453,588	40,194	8.9

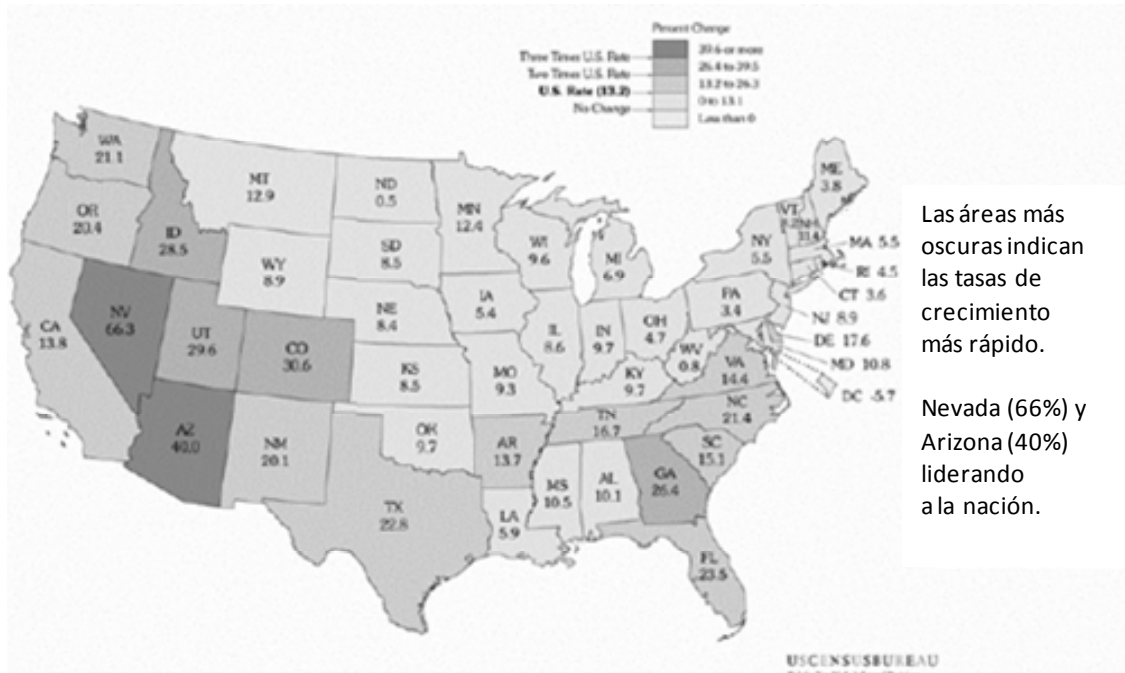


Figura 9 Porcentaje de cambios de población en U.S., 1990-2000 (NAS, 2007).

Tabla 2.6 Demanda de agua en Arizona (NAS, 2007).

Categoría	Demanda de Agua (acre/pies)			Cambio 1990-2040	% Cambio 1990-2040
	1990	2015	2040		
Municipal e Industrial	1,332,000	1,922,000	2,605,000	1,273,000	96
Agricultura	5,339,000	5,220,000	5,037,000	-302,000	-6
Total	6,671,000	7,142,000	7,642,000	971,000	15

SOURCE: http://geochange.er.usgs.gov/sw/impacts/society/water_demand/.

La sequía de la década del 2000 fue muy grave, el lago Powell a principios de 2005, se encontraba en su nivel más bajo de almacenamiento desde que se estaba llenando en 1969 (figura 3), y el Lago Mead no había sido tan bajo desde 1967 (NAS, 2007).

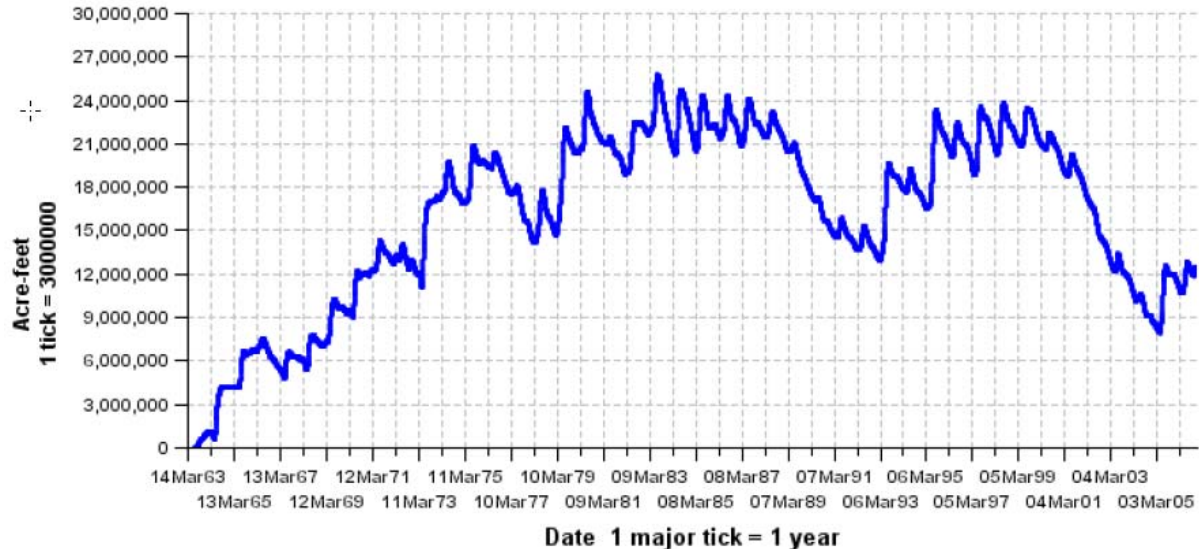


Figura 10 Almacenamiento en el lago Powell, a través de 01 de diciembre 2006. Capacidad de Lago Powell es de 27 millones de acres-pies (NAS, 2007).

2.5 Disponibilidad de recurso hídrico en el Valle de Mexicali

El Río Colorado ha constituido la principal fuente de abastecimiento de agua para el Valle Imperial, CA y el Estado de Baja California. El impresionante sistema de regulación de su flujo hace posible controlar un volumen de 18,502 hm³/año (Román y Ramírez-Hernández, 2003).

En 1944, Estados Unidos pactó con México entregar 1,850 hm³/año. En ese momento, la población de Mexicali que recibía agua del Río Colorado, únicamente era de 43 mil habitantes, con un consumo de 3 millones de m³ anuales. Actualmente la población en Mexicali es de aproximadamente de un millón de habitantes, con un consumo de agua de 100 hm³/año. Sin embargo se debe considerar el consumo de las ciudades de Tijuana y Tecate, que con 121 hm³/año, incrementan el caudal a 221 hm³/año (Román y Ramírez- Hernández, 2003).

Al llegar el Río Colorado a la frontera con México, la Presa Morelos constituye la última gran obra hidráulica en la corriente del río. A lo largo de 12 km (8 millas), el río constituye la frontera con Estados Unidos, después el río se interna completamente en México (NAS, 2007). Las figuras 11 y 12 muestran el Delta del Río Colorado en México y el suministro y distribución de agua a su arribo a México, y en la tabla 2.7 se presentan los valores puntuales (Flessa et al., 2009). Cabe resaltar que aquí se incluye

el agua generada en toda la región, en la que se considera el agua subterránea de los Valles de Mexicali y San Luis Río Colorado (SLRC), Sonora. De este modo las entradas y suministros de agua son: el agua que entra por el lindero norte y sur, las aguas subterráneas del Valle de Mexicali y la Mesa Arenosa de SLRC. La distribución para los diferentes usos (salidas) incluyen: el agua que se envía a Tijuana, Tecate y Ensenada, el agua consumida por las mismas ciudades de Mexicali y SLRC y el agua para uso agrícola y doméstico en ambos valles. El número de habitantes por ciudad que utiliza el agua del Valle de Mexicali se presenta en la tabla 2.8.

Tabla 2.7 Uso y suministro de agua en el Delta del Río Colorado en México, 2001-2008, Millones acres pies (map) (Flessa et al., 2009)

	Suministro de agua	map/año	Mm³/año
A	Agua del Río Colorado del Lindero Internacional Norte	1460	1800
I	Agua del Río Colorado del Lindero Internacional sur	120	150
J	Agua subterránea del Valle de Mexicali	570	700
L	Agua subterránea Mesa Arenosa	160	200
	Total	2,310	2,850

	Usos de agua	map/año	Mm³/año
E	Ciudad de Tijuana, Ensenada y Tecate	75	92
G	Ciudad de Mexicali	66	82
K	Ciudad de San Luis	19	23
H y J	Uso en la agricultura y doméstico en el Valle de Mexicali	1,420	1,760
R	Uso en la agricultura y doméstico en el Valle de San Luis	290	360
	Total	1,870	2,317

Tabla 2.8 Población servida Mexicali, Tijuana, Ensenada y Tecate (INEGI, 2010).

Mexicali	936,826
Tijuana	1,559,683
Tecate	101,079
Ensenada	466,814
Total	3,064,402



Figura 11. Delta del Río Colorado en México (Flessa et al., 2009).

Capítulo III

Marco teórico

3.1 Tiempo y clima

Es importante conocer la diferencia entre estado de tiempo y clima ya que estos nos permiten distinguir las características, alcances y limitaciones de la información. Lorenz (1960) de manera coloquial dijo que... "tiempo es lo que usted tiene; mientras que clima es lo que usted espera"... Implícita en esta observación está la aseveración de que mientras el tiempo es determinista, el clima es probabilista. El "*estado del tiempo atmosférico*" o del tiempo meteorológico se refiere según la Academia Nacional de Ciencias (2008) (NAS, por sus siglas en inglés) a "*...las condiciones atmosféricas en un plazo de uno a dos días. Se caracteriza con información de temperatura, lluvia, presión atmosférica, vientos, nubosidad o humedad en un lugar y momento determinados...*", mientras que clima se refiere a "*... las condiciones promedio del tiempo meteorológico en un período de varios años*"; según la Organización Meteorológica Mundial, se requiere por lo menos de 30 años de datos para caracterizar al clima (Bates et al 2008). *Las variables básicas que se analizan son temperatura y precipitación, pero también puede incluir, por ejemplo, la frecuencia de tormentas o sequías* (Conde, 2003).

En la ecuación para la predicción del estado del tiempo se representan los cambios de una variable en el espacio y en el tiempo (figura 13); estos cambios temporales se pueden expresar como la combinación de una componente estable y otra componente inestable (Landa et al., 2008).

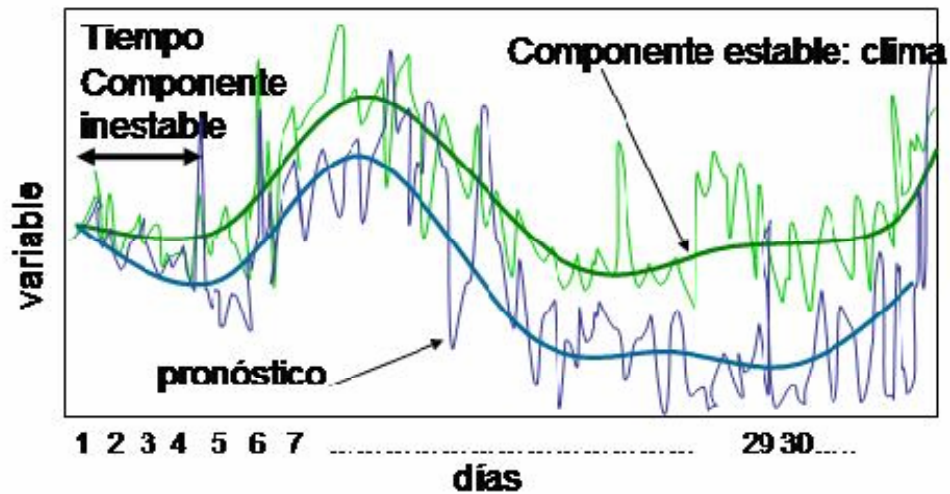


Figura 13. Comportamiento de una variable meteorológica cualquiera (verde) y la predicción correspondiente (azul). La línea delgada corresponde a la componente inestable (tiempo) y la gruesa a la componente estable (clima) (Landa et al., 2008).

La componente estable de la ecuación, correspondiente al clima permite hacer predicciones sobre dichas estadísticas ya que se conocen los factores que modulan el clima como son: la energía del sol, la velocidad de rotación del planeta, la masa del planeta, composición química de la atmósfera, la distribución del océano y los continentes. Por ello la predicción del clima es factible aunado a un extraordinario avance de la calidad de los modelos del clima en la última década hacen que sea posible hacer afirmaciones sobre el estado medio de la atmósfera esperado para los próximos meses e incluso años (Magaña, 2010).

3.2 Clima y sistema climático

Es habitual definir el clima como el “tiempo medio” o, con más rigor, como la descripción estadística del tiempo en términos de la media y la variabilidad de ciertas magnitudes importantes al menos durante tres decenios.

El sistema climático está compuesto de los siguientes subsistemas: a) la atmósfera, b) los océanos, c) la biosfera terrestre y marina, d) la criosfera (hielo marino, cubierta de nieve estacional, glaciares de montaña y capas de hielo a escala continental), y e) la superficie terrestre. Estos componentes interactúan entre sí y, como resultado de esa interacción colectiva, determinan el clima de la superficie de la tierra. Las interacciones

se producen a través de flujos de energía de diversas formas, de intercambios de agua, de flujos de otros gases en trazas radiativamente importantes, entre los que figuran el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), y del ciclo de nutrientes. La dinámica del sistema climático lo origina la energía solar, equilibrada por la emisión de energía infrarroja (“calor”) hacia el espacio. La energía solar es la componente más importante del sistema climático, origina los movimientos de la atmósfera y el océano, los flujos de calor y agua, y de la actividad biológica (Houghton et al., 1997).

La figura 14 es una representación esquemática del sistema climático y muestra algunas interacciones clave entre los diversos componentes y las propiedades de los componentes que pueden cambiar.

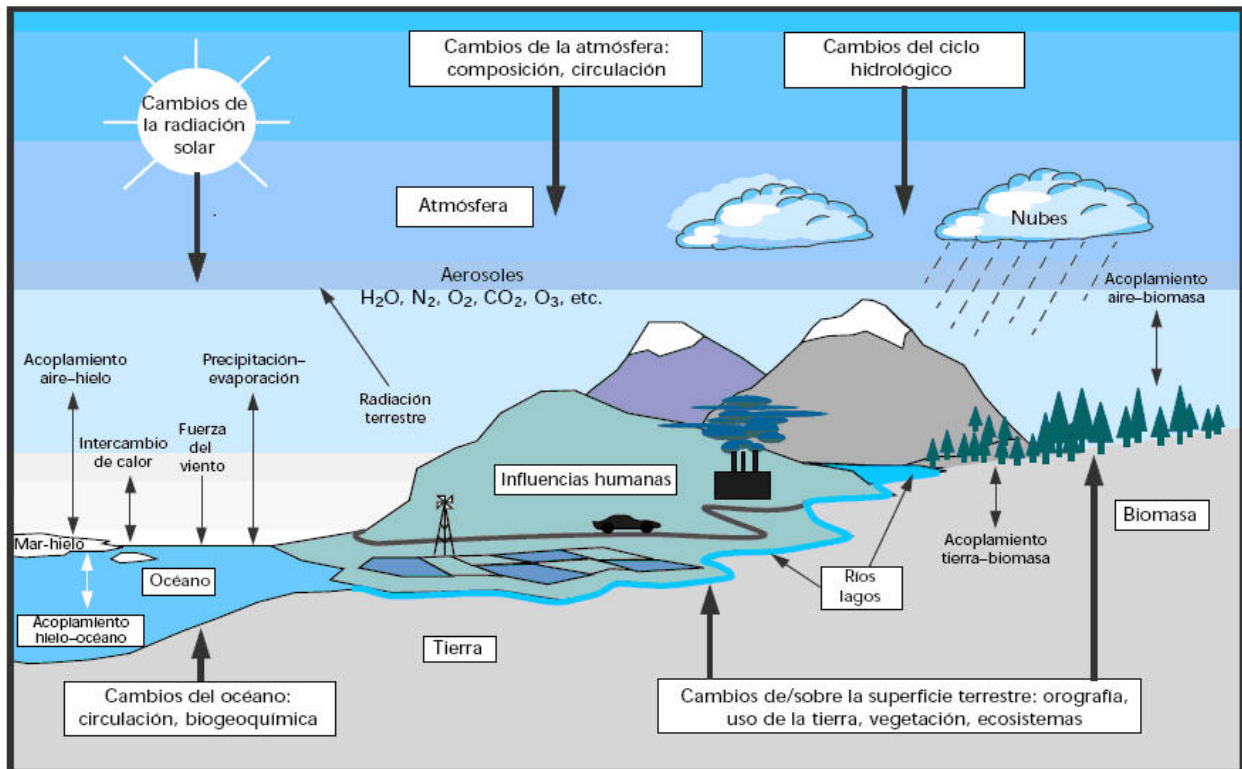


Figura 14 Visión esquemática de los componentes del sistema climático mundial que revisten importancia para los cambios climáticos a escala temporal de siglo, sus procesos e interacciones (flecha fina) y algunos elementos que pueden cambiar (flecha gruesa) (Houghton et al., 1997).

3.2.1 Variabilidad climática

El concepto de variabilidad climática denota las variaciones del estado medio y otras características estadísticas del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones del forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad externa) (IPCC, 2007).

3.3 Cambio climático

Para el IPCC, el término “cambio climático” denota un cambio en el estado del clima identificable en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos (IPCC, 2007). Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), describe el cambio climático como un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que viene a sumarse a la variabilidad climática natural observada en períodos de tiempo comparables. También es conocido como cambio climático antropogénico; si el cambio en el clima es producido por causas naturales se denomina variabilidad natural.

La principal alteración en la composición de la atmósfera por causas humanas es por el incremento en la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI); estos gases modifican el balance global de radiación bloqueando parcialmente más radiación de onda larga saliente y alterando el balance radiativo que se tenía durante décadas antes de la Revolución Industrial, por lo que un porcentaje mayor de energía queda atrapada en la atmósfera por los GEI, dando como resultado un incremento en la temperatura conocido como efecto invernadero (Zermeño, 2008).

3.3.1 Efecto invernadero

La radiación solar atraviesa la atmósfera y llega a la superficie (continentes y océanos) que la absorbe. Entonces la superficie se calienta y emite radiación terrestre, la cual es absorbida por el vapor de agua y el CO₂ contenidos en la atmósfera. Como esta radiación va de abajo hacia arriba y los gases absorbente se atenúan (mas rápido el vapor de agua que el CO₂) en la misma dirección, también la radiación terrestre se va distribuyendo más o menos en el mismo sentido. Al simplificar la figura 15 quedan fuera muchos elementos que son de importantes en el proceso del efecto invernadero: la radiación solar reflejada (hacia el espacio exterior) por las nubes y la superficie, la radiación solar dispersada (en todas direcciones) por la atmósfera, la radiación terrestre emitida en direcciones contrarias a la vertical, la radiación (terrestre) reemitida por la atmósfera y las nubes, la radiación terrestre que se fuga al espacio exterior, la presencia y acción de los gases traza (Martínez, 2004).

El efecto invernadero siempre ha existido; es consecuencia de la composición natural de la atmósfera y debido a ese efecto tenemos en la tierra una temperatura relativamente alta, que ha propiciado el surgimiento y la evolución de la vida. Sin embargo esta situación normal y natural ha sido alterada anormal y artificialmente por el progreso humano y la industrialización.

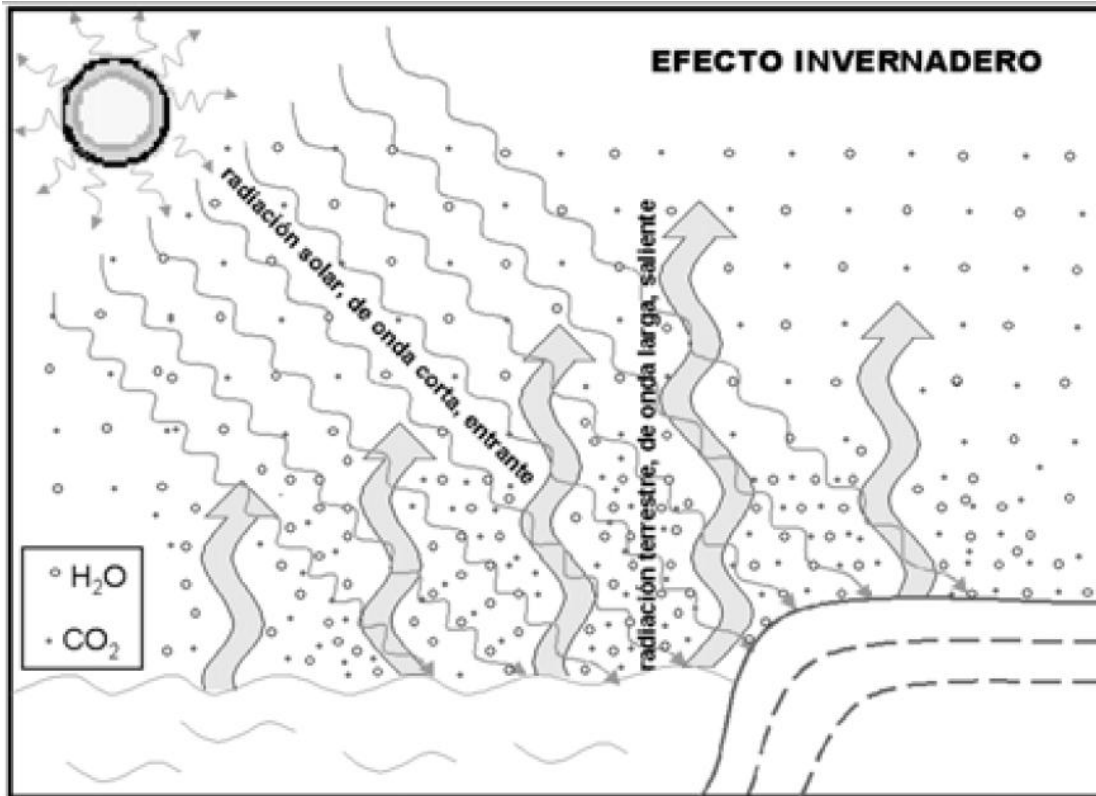


Figura 15. Diagrama de efecto invernadero (Martínez, 2004)

3.4 Escenarios de cambio climático

En 1990 y 1992 el IPCC desarrolló varios escenarios de emisiones a largo plazo, los cuales se han venido utilizando para el análisis de un posible cambio climático. En 1995 el IPCC evaluó los escenarios que se habían desarrollado en 1992, posteriormente en 1996 desarrollaron un nuevo conjunto de escenarios de emisiones que sirvieron de base para el Tercer Informe de Evaluación del IPCC. Los escenarios desarrollados forman parte del Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés); estos escenarios están conformados por cuatro "familias": A1, A2, B1 y B2. En la tabla 3.1 se presenta una descripción para cada una de estas familias.

Tabla 3.1 Descripción de los escenarios SRES (IPCC, 2007).

Escenario	Descripción
A1	Supone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos, que reflejan tres direcciones alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B).
A2	Describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento y cambio tecnológico lento.
B1	Describe un mundo convergente, con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información.
B2	Describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sustentabilidad económica, social y medioambiental.

3.5 Reporte Especial de Escenarios de Emisiones

El término SRES designa los escenarios descritos en el Informe Especial del IPCC sobre escenarios de emisiones (Nakicenovic et al., 2000). Estos escenarios están agrupados en cuatro familias como se ha mencionado (A1, A2, B1 y B2) que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando toda una serie de fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas, junto con las emisiones de GEI. Los escenarios SRES no contemplan otras políticas climáticas además de las existentes. Las proyecciones de emisiones son utilizadas para conjeturar el cambio climático futuro y sus supuestos respecto de la evolución socioeconómica, demográfica y tecnológica.

Los escenarios “A” describen un mundo futuro con alto crecimiento económico, mientras que en los “B” ese crecimiento es más moderado. Las familias de escenarios A1 y A2 ponen el énfasis en el desarrollo económico pero difieren en cuanto al grado de convergencia económica y social; las familias B1 y B2 hacen hincapié en el desarrollo sustentable pero también difieren en cuanto al grado de convergencia (Figura 16) Dentro de cada familia y grupo de escenarios, algunos de ellos comparten

supuestos “armonizados” sobre la población mundial, el producto interior bruto y la energía final (Nakicenovic et al., 2000). Éstos están marcados con los grupos de letras “HS”, en el caso de los escenarios armonizados, y con “OS” para los escenarios que exploran las incertidumbres asociadas a las fuerzas determinantes más allá de los escenarios armonizados. Se indica también el número de escenarios desarrollados en cada categoría. En total se utilizaron seis modelos para generar 40 escenarios que comprenden los seis grupos de escenarios, los cuales deben considerarse igualmente válidos (IPCC, 2007).

Cada escenario representa una interpretación cuantitativa específica de las cuatro líneas evolutivas diferentes.

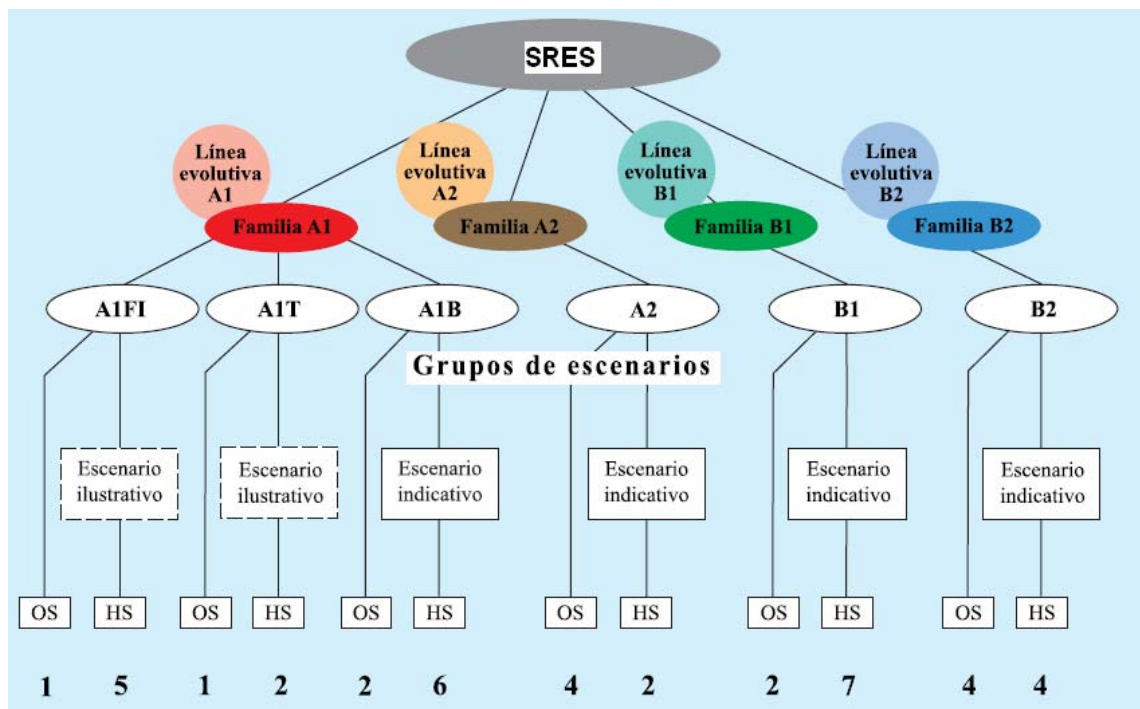


Figura 16. Ilustración esquemática de los escenarios SRES (Nakicenovic et al., 2000).

El esquema de las cuatro líneas evolutivas de los SRES del IPCC se muestran en la figura 17, cada escenario es una representación de diferentes desarrollos demográficos, sociales, económicos, tecnológicos y ambientales (Nakicenovic et al., 2000b).

SRES esenarios

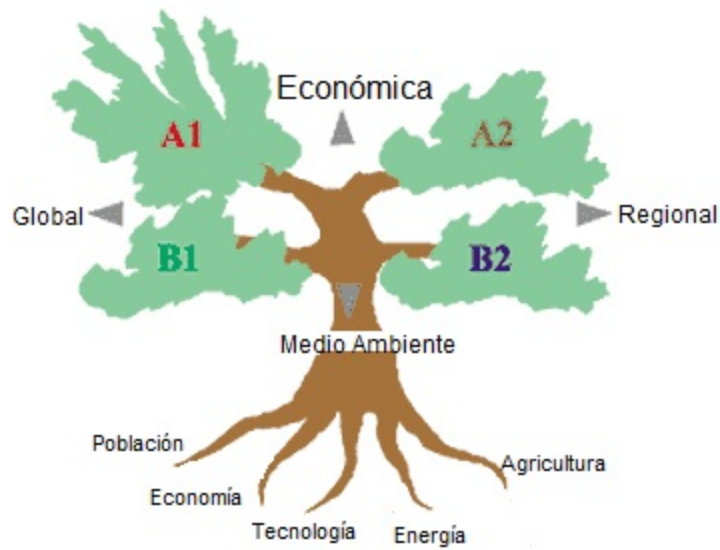


Figura 17 Esquema de las cuatro líneas evolutivas (Nakicenovic et al., 2000b).

Dirección cualitativa de los diferentes escenarios SRES para los diferentes indicadores

Escenario	Población	Economía	Medio ambiente	Equidad	Tecnología	Mundialización
A1FI	↘	↗	↘	↗	↗	↗
A1B	↘	↗	↗	↗	↗	↗
A1T	↘	↗	↗	↗	↗	↗
B1	↘	↗	↗	↗	↗	↗
A2	↗	↗	↘	↘	↗	↘
B2	↗	↗	↗	↗	↗	↘

Figura 18 Desarrollo de los diferentes escenarios SRES (IPCC, GTIII. 2001).

3.6 Modelos de Circulación General (MCG's)

Los MCG's son una de las herramientas que más se utilizan actualmente para crear escenarios de cambio climático para simular el comportamiento futuro del sistema climático global. Los resultados desarrollados por los MCG's pueden ser combinados con las salidas de generadores de escenarios climáticos (GEC) para poder evaluar los resultados, bajo una gran variedad de supuestos sobre las futuras emisiones de los GEI.

Se han desarrollado distintos programas para la construcción de escenarios de cambio climático, un ejemplo es la integración de: 1) Modelo para la Evaluación de Gases de Invernadero inducidos por Cambio Climático (MAGICC, por sus siglas en inglés), el cual es un modelo climático unidimensional que ofrece estimaciones internamente consistentes de las concentraciones de GEI, temperatura media global y elevación del nivel medio del mar entre los años 1990 y 2100; 2) Generador de Escenarios (SCENGEN, por sus siglas en inglés) que combina los resultados de MAGICC y los de un conjunto de MCG's para producir escenarios de cambio climático regionalizados, tomando en cuenta un grupo de variables climáticas, particularmente la precipitación y la temperatura.

El programa MAGICC/SCENGEN convierte escenarios de emisiones de los GEI y dióxido de azufre (aerosoles) en estimaciones de la temperatura media mundial del aire de superficie y del cambio del nivel del mar y posteriormente en descripciones de cambios futuros en el clima regional medio.

En los países en desarrollo, se planteó la posibilidad de disponer de paquetes computacionales que facilitaran la presentación de las salidas de MCG's utilizados en el IPCC. Las fuentes más comunes de información bajo este esquema fueron:

1) Centro de Distribución de Datos del IPCC

2) MAGICC-SCENGEN

3) Otras fuentes de datos [(NCAR, (National Climate Atmospheric Research), Instituto Canadiense para Estudios del Clima]

La ventaja de dichos manejadores de datos es que de forma directa permiten una representación inmediata de los escenarios disponibles con MCG's. Sin embargo, mantienen una rigidez que no permite representaciones probabilísticas de escenarios de productos diseñados a la medida de las necesidades del usuario como lo requiere una aproximación al problema de adaptación ante cambio climático (Zermeño, 2008).

En el cuarto reporte del IPCC se ha realizado un análisis regional de escenarios de cambio climático en un sentido probabilístico en regiones climáticas de gran extensión territorial.

3.7 Incertidumbre en las proyecciones de clima

El IPCC (2007) ha presentado en su cuarto reporte de evaluación una gama de modelos y escenarios sobre los cambios que el clima puede presentar si se continúa incrementando la concentración de GEI por actividades humanas. Las proyecciones de temperatura y sus rangos son positivos por lo que no hay duda de que el planeta se calentará de seguir aumentando las emisiones de GEI.

Así, estimar cómo podría ser el clima futuro resulta en gran medida un problema relacionado con establecer las características del forzante que lo lleve a una condición determinada. Dado que el futuro del clima dependerá de cómo sean las emisiones de gases de efecto invernadero globales y en consecuencia de la magnitud del forzante radiativo, se tiene que pensar en que más que pronósticos del clima futuro, se harán proyecciones o escenarios de cambio climático. Un escenario es: “una descripción de un estado futuro del mundo, coherente, internamente consistente y plausible”. No es un pronóstico o una predicción. Es como una serie de imágenes de cómo se podría ver el mundo en el futuro (Zermeño, 2008).

Hay dos fuentes fundamentales de incertidumbre en los escenarios de cambio climático que deben ser consideradas:

1) Las incertidumbres en las emisiones futuras, que afectan el forzamiento radiativo del sistema climático. El IPCC ha generado escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, a partir de consideraciones socioeconómicas, los cuales aparecen en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés, 2000) que proveen una estimación de la incertidumbre en éstas. Este elemento cobra importancia pues los cambios en temperatura y precipitación, incluso a escala regional, pueden variar de acuerdo a las concentraciones globales proyectadas.

2) Incertidumbre en la sensibilidad global del clima y los cambios de patrones de circulación a escala regional que simulan los modelos del clima. Las diferencias en la formulación de los MCG's llevan a que se generen diferencias entre escenarios aún para un mismo forzante. Así, mientras un modelo proyecta un cambio de 1 °C, otro puede indicar un cambio de 2° C, debido principalmente a la formulación física de procesos de escala menor a la resolución espacial del modelo, en lo que se conoce como parametrizaciones. Similarmente, algunos modelos predicen incrementos en la precipitación, mientras que otros sugieren una disminución. Tales diferencias entre modelos son fuente de incertidumbre.

Una fuente adicional de incertidumbre, se encuentra en la variabilidad natural del sistema climático, que en gran medida es el resultado de inestabilidades internas, o forzamientos externos, como los que resultan de la actividad volcánica o la actividad solar. El verdadero propósito de los escenarios es dar una idea de la incertidumbre, ya que ayudan a determinar las posibles ramificaciones de un hecho (en este caso, cambio climático) a lo largo de uno o más caminos, plausibles pero indeterminados (Magaña, 2010).

La incertidumbre se propaga de una estimación a otra, es decir, los escenarios de emisiones produce incertidumbre en el ciclo del carbono para los modelos, y ésta se propaga en las proyecciones del clima global y regional proyectados en los modelos, que a su vez genera incertidumbre cuando se estiman los impactos en una región o localidad (Figura 19). No se piense sin embargo que el incremento de incertidumbre conduce a un desconocimiento de lo que pasará. Es necesario, tener una idea de la

magnitud de la señal y de la incertidumbre para darle valor a las proyecciones climáticas (Zermeño, 2008).

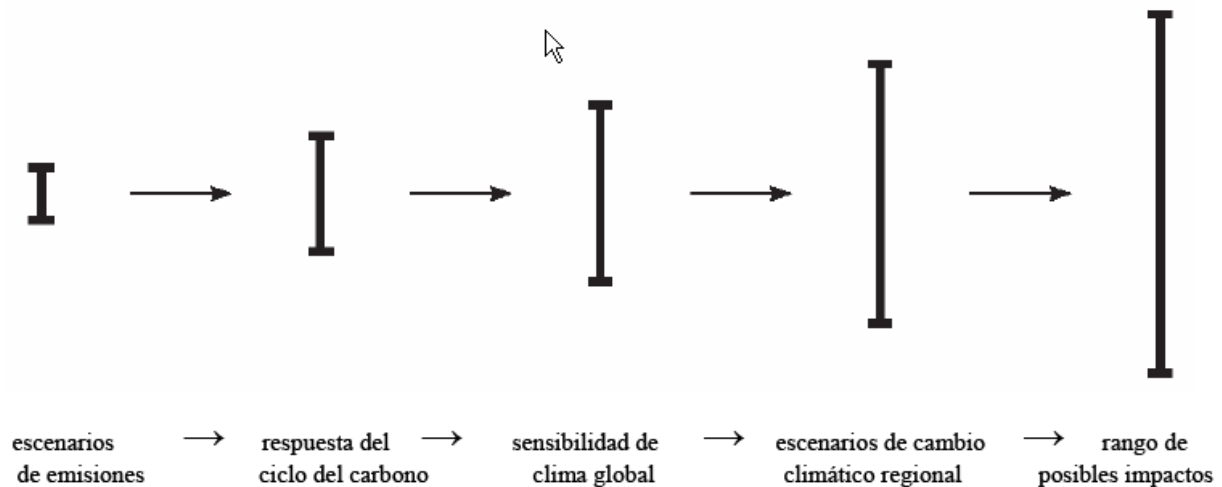


Figura 19 Cascada de incertidumbre en la secuencia entre emisiones de GEI e impactos (Zermeño, 2008).

3.8 Downscaling (Reducción de escala)

Escenarios de cambio climático regionales se pueden obtener a través de técnicas de reducción de escala (downscaling), las cuales pueden ser dinámicas o estadísticas. En las técnicas estadísticas de reducción de escala las variables del clima regional o local se obtienen generando un modelo estadístico que las relaciona con las variables de gran escala del modelo de circulación general. Esta técnica ha cobrado gran importancia por permitir utilizar las salidas de los MCG's para establecer escenarios probabilísticos.

Una opción adicional para la reducción de escala son los Modelos de Clima Regional, estos modelos son similares a los MCG's pero de mayor resolución espacial (hasta de 100 km²) y por lo tanto contienen una mejor representación de elementos como la topografía o el uso de suelo dentro del dominio de interés. Dependiendo de la resolución del modelo, se puede también resolver explícitamente algunos de los procesos en los MCG's, como la interacción de orografía y uso de suelo en escala regional. Dicha opción requiere de grandes capacidades humanas y computacionales para poder representar los escenarios en forma probabilística, con múltiples

experimentos y modelos, por lo que la mayoría de los experimentos en esta línea se enfocan al análisis de procesos.

Existe así una gran variedad de herramientas de reducción de escala de las salidas de los MCG's, tanto dinámicas como estadísticas, que en su mayoría son libres. Algunos de los más populares son el MM5, PRECIS, RegCM3 y SDSM. El MM5, PRECIS y RegCM3 son de tipo dinámico y el SDSM es de tipo estadístico. Los desarrollos dinámicos existentes para escenarios regionales más actualizados son del tipo del proyecto PRUDENCE en Europa, o NARCCAP para Norte América. PRUDENCE surgió en Europa con el propósito de proveer una gran cantidad de escenarios de cambio climático de alta resolución (del orden de 400 km²) y una medida de la incertidumbre asociada. NARCCAP se ha iniciado en años recientes como un esfuerzo de instituciones científicas de Estados Unidos, Canadá y México para analizar proyecciones de cambio climático de alta resolución espacial, con especial énfasis en los procesos y escenarios en el sentido probabilístico. NARCAAP sin embargo, adolece de un problema cuando se trata de analizar escenarios de cambio climático para México y es que el dominio utilizado por muchas instituciones solo llega a 20° N de latitud en su frontera sur, por lo que el país no queda representado adecuadamente en los escenarios. Sólo algunos modelos cubren México, Centroamérica y el Caribe en su totalidad y corresponden a las proyecciones del Centro Hadley con el modelo de mesoescala PRECIS, o el del Instituto de Investigación Meteorológica de Japón con el Simulador de la Tierra conocido como Earth Simulator (Zermeño, 2008).

Por el lado estadístico, el Método Estadístico de Reducción de Escala (SDSM, por sus siglas en inglés) es una de las herramientas de escalamiento espacial más utilizadas en la proyección local, pues su esquema se basa en la regresión lineal múltiple en un punto, ocupando campos meteorológicos de precipitación, temperatura, radiación solar de los MCG's y locales observados (Zermeño, 2008).

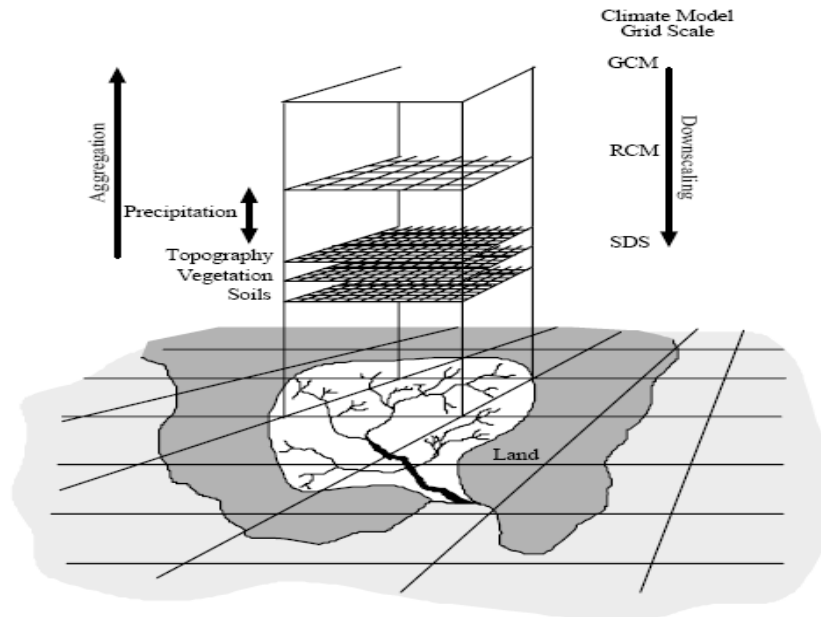


Figura 20 Esquema que ilustra de manera general el enfoque de Downscaling (Wilby, 2007).

3.9 Impacto del cambio climático en el recurso hídrico

3.9.1 El cambio climático y el agua

De acuerdo con el IPCC (2007) se espera que el cambio climático intensifique el estrés sobre el recurso hídrico, aunado al crecimiento de la población, cambio económico, usos de la tierra y a la urbanización. De este modo se espera que el cambio climático afecte a los bancos de nieve, los glaciares y los pequeños casquetes de hielo que son una fuente esencial de agua dulce. Según las proyecciones, las pérdidas de masa generalizadas de los glaciares y las reducciones de la cubierta de nieve de los últimos decenios se acelerarían durante el siglo XXI, reduciendo así la disponibilidad de agua y alterando la estacionalidad de los flujos en regiones abastecidas de agua de nieve, donde vive actualmente más de la sexta parte de la población mundial.

Los cambios en la precipitación y en la temperatura inducen cambios de la escorrentía y de la disponibilidad de agua. La escorrentía aumentaría entre un 10% y un 40% de aquí a mediados de este siglo en latitudes superiores y en ciertas áreas tropicales lluviosas, y disminuiría entre un 10% y un 30% en ciertas regiones secas de latitudes medias y en los trópicos secos, debido a la disminución de las lluvias y a tasas de

evapotranspiración más altas. También numerosas áreas semiáridas como el oeste de Estados Unidos padecerán una disminución de sus recursos hídricos por efecto del cambio climático. Las áreas afectadas por sequías aumentarían en extensión, y ello podría repercutir negativamente en múltiples sectores: agricultura, suministro hídrico, producción de energía o salud. A nivel regional, la demanda de agua de riego aumentaría sustancialmente por efecto de los cambios climáticos.

El aumento de las temperaturas afectaría también las propiedades físicas, químicas y biológicas de los lagos y ríos de agua dulce y sus efectos sobre numerosas especies de agua dulce, sobre la composición de las comunidades y sobre la calidad del agua serían predominantemente adversos. En las áreas costeras, el aumento de nivel del mar agravaría las limitaciones de los recursos hídricos, debido a una mayor salinización de los suministros de agua subterránea.

El agua dulce es indispensable para todas las formas de vida, y necesaria en grandes cantidades para casi todas las actividades humanas. El clima, el agua dulce y los sistemas biofísicos y socioeconómicos están íntimamente interconectados, por lo que un cambio en uno de ellos induce un cambio en el otro. El cambio climático antropogénico agrava la presión que están experimentando ya las naciones ante el problema de la utilización sostenible del agua potable. Los problemas que habrá que resolver en relación con el agua potable son: exceso de agua, escasez de agua y exceso de polución. Cada uno de esos problemas puede ser amplificado por el cambio climático. Los problemas relacionados con el agua dulce desempeñan un papel crucial en el conjunto de las vulnerabilidades regionales y sectoriales clave. Por ello, la relación entre el cambio climático y los recursos de agua dulce suscita una preocupación y un interés de primer orden (Bates et al., 2008).

Hasta la fecha, los problemas relacionados con los recursos hídricos no han sido adecuadamente abordados en los análisis del cambio climático, ni en la formulación de políticas sobre el clima. En la mayoría de los casos, no se han tenido en cuenta tampoco adecuadamente los problemas que plantea el cambio climático en relación con los análisis, la gestión o la formulación de políticas relativas a los recursos hídricos.

Según numerosos expertos, tanto el agua como su disponibilidad y calidad serán los principales factores de presión y el principal tema de debate en el contexto de las sociedades y del medio ambiente afectado por el cambio climático (Bates et al., 2008).

3.9.2 Cambios observados

En las evaluaciones de escala mundial, se considera que una cuenca padece estrés hídrico cuando su disponibilidad de agua por habitante es inferior a 1,000 m³/año. Un volumen de agua superior a 1,000 m³ por habitante por año es normalmente más de lo necesario para usos domésticos, industriales y agrícolas. El estrés hídrico es un concepto que describe en qué medida está expuesta la población al riesgo de falta de agua.

3.9.3 La sequía y el cambio climático en la cuenca del Río Colorado.

El Río Colorado satisface gran parte de las necesidades hídricas de siete de los Estados Unidos, de dos Estados mexicanos, que en total suman aproximadamente 25 millones de habitantes, y que, según las proyecciones, alcanzaría los 38 millones para el 2020s. En los últimos 100 años, el porcentaje total de superficie afectada por sequías climáticas graves o extremas en Estados Unidos ha sido de un 14% anual en promedio, con un máximo de 65% en 1934 (Bates et al., 2008).

La expansión de la población y de las actividades económicas hacia el oeste de USA, y las respuestas concomitantes a los episodios de sequía, han dado lugar a adaptaciones estructurales importantes, entre ellas los cientos de depósitos, proyectos de riego e instalaciones de extracción de aguas subterráneas, desarrolladas en entornos semiáridos. Está ampliamente documentado que la asignación de las aguas del Río Colorado a los Estados de la cuenca tuvo lugar durante el período más húmedo de un intervalo de 400 años entre 1905 y 1925. Recientemente, el oeste de Estados Unidos ha padecido una sequía sostenida, el 30-40% de la región ha estado sometida a una sequía severa desde 1999, y el Río Colorado ha tenido, entre 2000 y 2004, el caudal quinquenal más bajo nunca registrado. Además, los Estados del suroeste de Estados Unidos están experimentando uno de los crecimientos más rápidos del país y

generando una demanda social, económica y medioambiental de recursos hídricos (Pulwarty et al., 2005).

Una pequeña porción de la cuenca del Río Colorado (un 15%, aproximadamente) aporta la mayor parte (85%) de su caudal. Las estimaciones muestran que, con el aumento del calentamiento climático y de la evaporación, la disminución de la escorrentía alcanzaría el 30% durante el siglo XXI. En esas condiciones, y teniendo en cuenta las extracciones previstas, sólo podrían satisfacerse las necesidades estipuladas en el Pacto del Río Colorado durante un 60-75% del tiempo de lo que actualmente se tiene al 2025 (Christensen et al., 2004). Bates (2008) menciona que para el 2050, las condiciones de humedad promedio en el suroeste de Estados Unidos podrían igualar a las que se observaron a mediados del siglo XX. Tales cambios se deberían al incremento de las temperaturas (por el aumento de la sublimación y de la evaporación, y por la disminución de la humedad del suelo, aunque el nivel de precipitación permaneciera razonablemente constante).

La mayoría de los escenarios de flujo del Río Colorado en Lees Ferry (que separa la cuenca superior de la inferior) indican que, dentro de 20 años, la descarga podría ser insuficiente para cubrir la demanda actual de recursos hídricos (Pulwarty et al., 2005). La experiencia reciente sugiere que las condiciones son ya 'críticas' en esa cuenca. La variabilidad y el cambio climático, sumados a una presión creciente por efecto del desarrollo, ocasionarán sequías de magnitud desconocida para las instituciones de la región, y agravarán los conflictos entre los usuarios del agua (Bates et al., 2008).

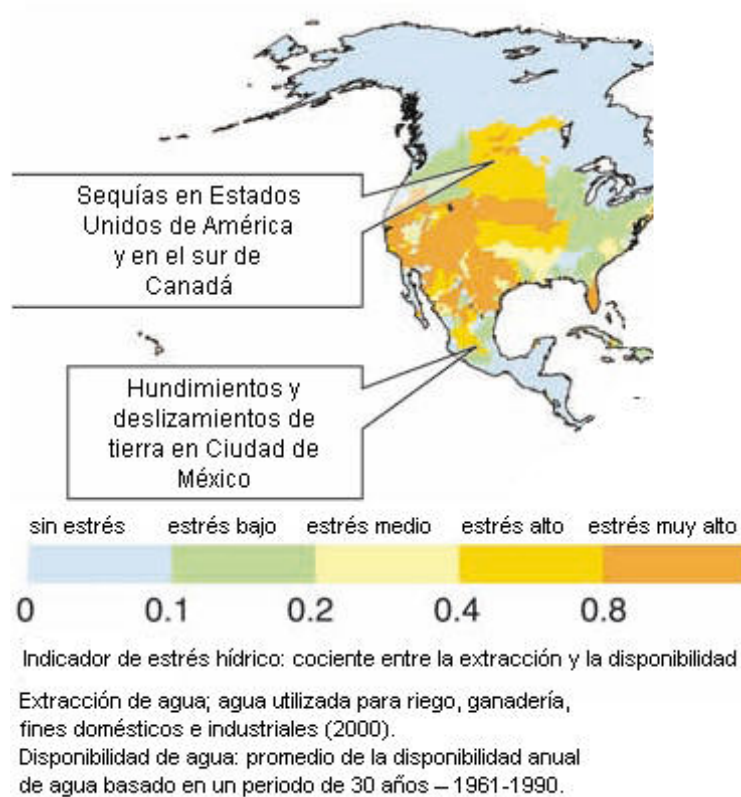


Figura 21 Ejemplos de vulnerabilidad actual de los recursos de agua dulce y de su gestión; al fondo, un mapa de estrés hídrico (IPCC, 2008).

3.10 Evapotranspiración potencial

Proceso de evapotranspiración

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración de árboles, pastos, cultivos, etc. La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor) (Allen et al., 2006). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación húmeda. La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. La transpiración, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad

atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación (Allen et al., 2006).

Diversas clases de plantas pueden tener distintas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración.

La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, un día, 10 días, un mes, un año o incluso un período completo de cultivo.

Como una hectárea tiene una superficie de 10 000 m² y 1 milímetro es igual a 0,001m, una pérdida de 1 mm de agua corresponde a una pérdida de 10 m³ de agua por hectárea. Es decir 1 mm/día es equivalente 10 m³ ha/día. Los factores que afectan la evapotranspiración son el clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo (Allen et al., 2006).

La evapotranspiración potencial (ET_o), o también conocida como evapotranspiración de referencia (ET_r), es la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde, bien regada de pasto uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo.

3.11 Evapotranspiración de Cultivo

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina ET_c, y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas (Allen et al., 2006).

La evapotranspiración del cultivo puede ser calculada a partir de datos climáticos e integrando directamente los factores de la resistencia del cultivo, el albedo y la resistencia del aire en el enfoque de Penman-Monteith. Debido a que todavía existe

una considerable falta de información para los diferentes cultivos, el método de Penman-Monteith se utiliza solo para la estimación de la tasa de evapotranspiración del cultivo estándar de referencia (ET_o). La relación ET_c/ET_o que puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos y es conocida como Coeficiente del Cultivo (K_c), y se utiliza para relacionar ET_c a ET_o de manera que $ET_c = K_c \times ET_o$ (Allen et al., 2006).

3.12 Estrategias de adaptación y mitigación

Como otros problemas ambientales, el riesgo ante el cambio climático debe manejarse, por un lado, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero que se conoce como mitigación y, por otro, preparándose para las nuevas condiciones climáticas mediante procesos de adaptación. En el primer caso, se reduce la amenaza y en el segundo, la vulnerabilidad.

Para enfrentar el riesgo del cambio climático es importante la participación de todos los sectores de la población, académicos, gubernamentales y organismos internacionales. En el proceso de mitigación y de adaptación, la innovación tecnológica será muy importante para impulsar cambios de métodos de producción y utilización de la energía que llevan a medidas de desarrollo sostenible.

El diseño de estrategias de adaptación para realidades concretas es una tarea complicada debido a las incertidumbres inherentes a las proyecciones del desarrollo socioeconómico, de las emisiones de gases de efecto invernadero y del clima. No es posible determinar con precisión los impactos futuros del cambio climático sobre un sistema en particular o en un lugar dado. En los últimos años, el conocimiento sobre el clima y sus impactos se ha incrementado enormemente, pero más investigaciones y monitoreo seguirán siendo esenciales para lograr un mayor comprensión de los impactos y las estrategias de adaptación necesarias para aminorarlas. La gestión del riesgo seguirá siendo desarrollada considerando las probabilidades de cambios, sean estas de temperatura, precipitación o de la vulnerabilidad misma de los sistemas.

La adaptación corresponde a un ajuste de los sistemas humanos a cambios de condiciones climáticas, con el objeto de reducir la vulnerabilidad. La adaptación resulta de un proceso de toma de decisiones y representa una oportunidad de mejorar a través de transformaciones en tecnologías, educación, comportamientos, políticas públicas, o infraestructura (Aldunce et al., 2008).

De acuerdo al consenso alcanzado por el IPCC en su Cuarto Informe de Evaluación (IPCC, 2007), el futuro del planeta está en riesgo por el cambio climático a menos que se actúe en dos direcciones: la mitigación y la adaptación. La mitigación busca reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) e incrementar los sumideros de carbono, y con ello disminuir el calentamiento del planeta, es decir, reducir la amenaza. Por otro lado, la adaptación busca desarrollar estrategias y acciones para reducir la vulnerabilidad al cambio climático de grupos sociales, regiones o sectores económicos por mencionar algunos, de forma tal que los impactos negativos esperados bajo cambio climático sean menores o eliminados, y se pueda incluso aprovechar las oportunidades asociadas a un nuevo clima (IPCC, 2007).

Capítulo IV

Materiales y Métodos

Esta tesis tiene como punto de partida los antecedentes de investigaciones en la cuenca del Río Colorado, tomando en cuenta el marco legal de la cuenca conocida como la Ley del Río (1920). En esta ley se engloban una serie de pactos y acuerdos que se han recopilado a lo largo de la historia de la cuenca, pudiéndose mencionar los siguientes: Colorado River Compact (1922), Boulder Canyon Project Act (1928), y el Tratado de Aguas Internacionales (1944) que se firmó entre México y Estados Unidos, entre otros.

A partir de datos sobre la distribución del recurso hídrico entre los estados de Estados Unidos y México para el período 1996-2000 (USBR, 2004), y, sobre el suministro y usos de agua en el Valle de Mexicali para el período 2001-2008 (Flessa, et al., 2009), se pudo establecer un panorama de la cuenca del Río Colorado y el Valle de Mexicali, respecto a la disponibilidad y uso de agua. Se utilizaron como base los últimos resultados de modelación del IPCC (2007). Además se incluyen algunos estudios que se han realizado en la cuenca del Río Colorado (Christensen et al., 2007, Miller et al., 2003, Hidalgo et al., 2009, Hurkman et al., 2009).

En este estudio se realizó un análisis climático en la cuenca con modelos de circulación general y modelos de reducción de escala. Los modelos que se utilizaron fueron el HADCM3 y CGCM2 que son de circulación general. Los modelos de reducción de escala que se utilizaron fueron el BCM2, CGCM2 y HadCM3 para cinco áreas de aproximadamente 12 km X 12 km a lo largo de cuenca, lo que permitió explorar el posible impacto del cambio climático en distintas zonas de la cuenca. Con estos mismos modelos de reducción de escala se realizó un análisis en el Valle de Mexicali. A continuación se describen los modelos con mayor detalle.

4.1 Modelos de Circulación General (MCG's)

Los modelos de circulación general que se utilizaron para este estudio fueron los siguientes, HADCM3 (Hadley Centre Coupled Model 3) y CGCM2 (Canadian Global Coupled Model 2) (CICS, 2003).

Las proyecciones utilizadas para los modelos HADCM3 y CGSM2 del proyecto CCIS son las recomendadas por el IPCC (periodos 2010-2039 y 2040-2069). Estos modelos forman parte de un grupo que proporcionan la base para el estudio sobre el cambio climático de la cuenca del Río Colorado; se eligieron solo dos modelos que el IPCC (2007), recomienda utilizar, los resultados de estos modelos solamente son una referencia sobre lo que está sucediendo a lo largo de la cuenca respecto a cambios de temperatura y precipitación a gran escala.

El CGCM2 utiliza una escala espacial de 3.75° de latitud y 3.75° de longitud (aproximadamente 416 km X 416 km) del cual se usaron dos escenarios de emisiones, el A2 y el B2. El A2 corresponde a un escenario de altas emisiones, mientras que el B2 a uno de bajas emisiones (CICS, 2003).

El HADCM3 utiliza una escala espacial de 2.5° de latitud y 3.75° de longitud (aproximadamente 277 km X 416 km) para este modelo se utilizaron también los mismos escenarios de emisiones, A2 y B2 (CICS, 2003).

De los modelos anteriores se obtuvieron los datos de temperatura mínima (Tmin), temperatura máxima (Tmax) y precipitación (P). Los períodos de interés fueron tres: un período climatológico base correspondiente a 1961-1990, y dos escenarios climáticos, de 2010 a 2039, llamado de los 2020s, y de 2040 a 2069, llamado de los 2050s. En el proceso se hizo una selección de las áreas de interés que se determinaron por la escala que maneja cada modelo y la localización dentro de la cuenca; en la figura 22 se puede ver una representación de estas áreas. Para los dos modelos se eligieron tres áreas en la cuenca.

Tabla 4.1 Coordenadas de las áreas de análisis en la cuenca con los MCG's HADCM3 y CGCM2.

	Modelo HADCM3		Modelo CGCM2	
	Latitud	longitud	Latitud	longitud
Cuenca parte baja	35	-112.5	35.2556	-112.5
Cuenca parte media	40	-108.75	38.9666	-108.75
Cuenca parte alta	42.5	-108.75	42.6776	-108.75

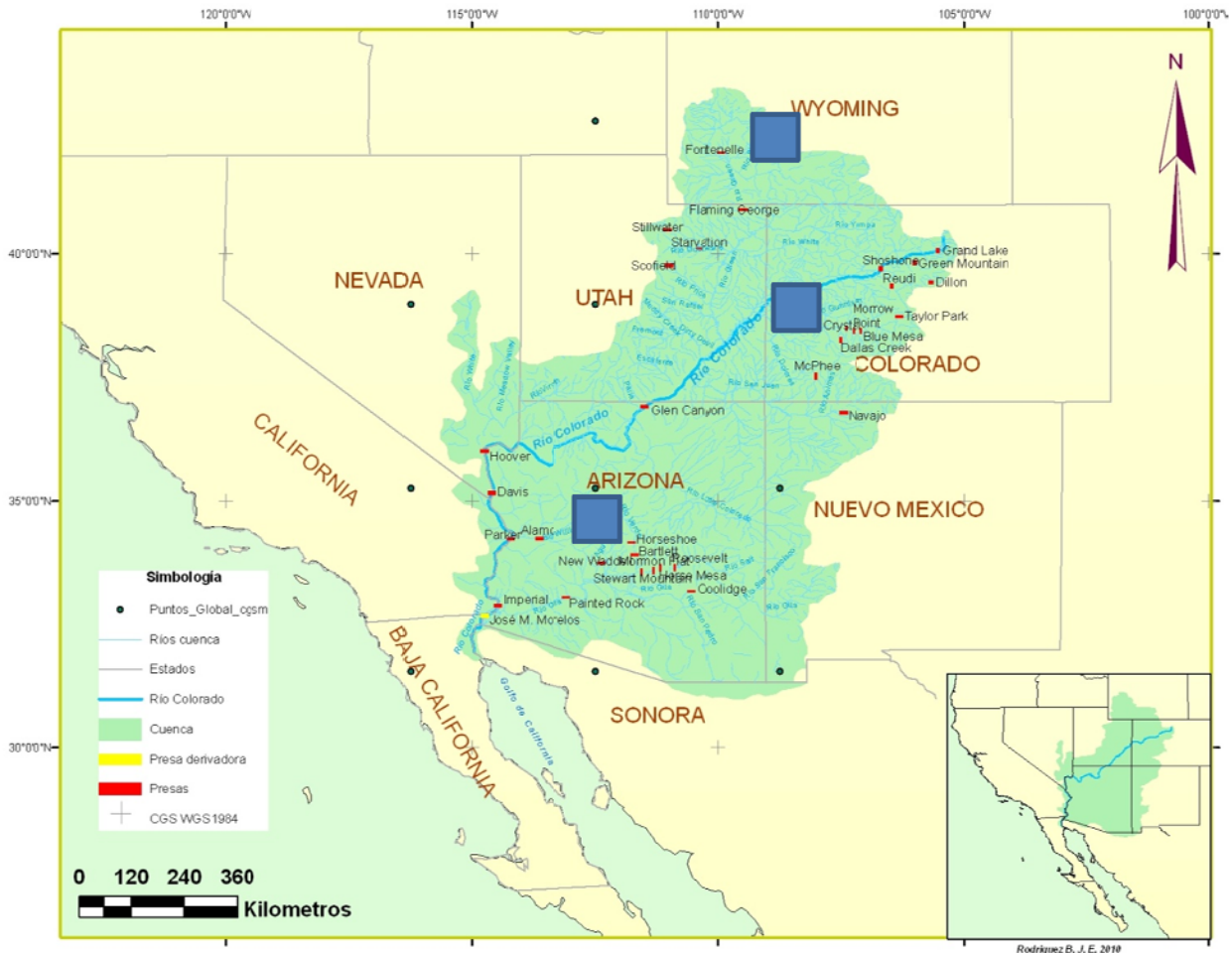


Figura 22. Localización de puntos de interés del MCG's (CGCM2) a lo largo de la cuenca del Río Colorado (cuadros azules, estos cuadros no son representativos de la escala de los modelos, es solo una guía de referencia). Se resalta que los MCG's cubre áreas que traslapan regiones hidrológicas bajas, medias y altas.

4.2 Modelos regionales

A partir del programa Proyecciones Re-escaladas de Clima y Corregidas por Sesgo, (Maurer et al., 2007), se utilizaron las proyecciones regionales. Las proyecciones

climáticas utilizadas para manejar el impacto sectorial en escala reducida (1/8° latitud x 1/8° longitud, ~12km x 12km) están disponibles para Estados Unidos y el norte de México.

Los 3 modelos regionales que se eligieron para el análisis de la cuenca fueron el BCCR-BCM2.0, CGCM3.1 (T47) y UKMO-HadCM3 (Maurer et al., 2007). El BCCR-BCM2.0 fue desarrollado en el Centro Bjerknes de Investigación Climática en Noruega. El CGCM3.1 (T47) fue desarrollado en el Centro Canadiense para la modelación y análisis del clima. El UKMO-HadCM3 fue desarrollado en el Centro Hadley para la Predicción e Investigación del Clima de Reino Unido.

En todos los modelos regionales se utilizaron los escenarios de emisiones A2 y B1. Las variables obtenidas fueron la temperatura media superficial (°C) y la precipitación diaria (mm/día). Al igual que en los MCG's, se obtuvieron las series para los mismos períodos temporales (período base 1961-1990, 2020s y 2050s), pero se analizaron las variables antes mencionadas. Primero propusieron cinco “puntos” a lo largo de la cuenca con una escala espacial de aproximadamente 12km x 12km con el fin se observar los cambios de temperatura en distintos puntos de la cuenca y se añadieron tres “puntos” más, aledaños a la cuenca; en la tabla 4.2 se dan las coordenadas que representan el centro de cada una de las áreas y en la figura 23 se representa la localización de los ocho puntos en la cuenca del Río Colorado.

Tabla 4.2 Coordenadas de las áreas de análisis en la cuenca.

Localización	Latitud	Longitud
VALLE DE MEXICALI, B.C., MEX.	32.4375	-115.0625
MEXICALI, B.C., MEX.	32.5625	-115.4375
CALEXICO, CA, USA	32.6875	-115.4375
VALLE IMPERIAL, CA, USA	33.0625	-115.4375
LAGO MEAD, NV, USA	36.4375	-114.3125
COLLINS CANYON, UT, USA	37.4375	-110.1875
NEW CASTLE, CO, USA	39.5625	-107.5625
EDEN, WY, USA	42.0625	-109.5625

Figura 23. Localización de los “puntos” de interés a lo largo de la cuenca del Río Colorado para la utilización de modelos regionales (cuadros azules, esos cuadros no representan la escala real de los modelos).

4.3 Valle de Mexicali: modelos regionales y principales cultivos.

En el Valle de Mexicali se analizaron dos áreas (tabla 4.2) con los tres modelos regionales antes mencionados y dos escenarios de emisiones A2 y B1 para los periodos base, 2020s y 2050s; los datos obtenidos fueron temperatura (°C) y precipitación (mm/día). El área de análisis está representada por rectángulos de 12 km x 24 km (288 km² aproximadamente) como se puede observar en la figura 24. La suma de las áreas da una superficie aproximada de 576 km². En el Valle de Mexicali se siembra una superficie aproximada de 1340 km² (CONAGUA, 2010), por consiguiente el área de análisis representa aproximadamente un 43% de la superficie sembrada. Este porcentaje es representativo para realizar el análisis climático e hídrico en este

estudio ya que las áreas elegidas son precisamente las áreas de siembra de los cultivos elegidos trigo, alfalfa y algodón. (Soto, 2011, comunicación personal).

Tabla 4.2. Área de análisis en el Valle de Mexicali.

Localización	Latitud(°)	Longitud(°)
1-VALLE DE MEXICALI, B.C., MEX.	32.375	-115.062
2-VALLE DE MEXICALI, B.C., MEX.	32.500	-114.937



Figura 24. Localización de áreas de interés en el Valle de Mexicali.

Del informe de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010) denominado "Distribución de aguas en el Distrito de Riego 014 Río Colorado riego por gravedad",

del ciclo agrícola 2009/2010 se obtuvieron los cultivos sembrados en el Valle de Mexicali, la superficie regada y el agua entregada a los usuarios.

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)(Guzmán, et al., 2008) realizó un estudio sobre las necesidades hídricas de los principales cultivos en el Valle de Mexicali, los resultados aportan datos relevantes sobre la necesidad hídrica para los cultivos que se van analizar; una parte de los resultados del INIFAP se presentan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Necesidades hídricas para los principales cultivos el Valle de Mexicali INIFAP (2008).

CULTIVO	mm/ciclo	CICLO
TRIGO	571.3	DICIEMBRE-MAYO
ALFALFA	1892.86	ENERO-DICIEMBRE
ALGODÓN	1053.1	MARZO-SEPTIEMBRE

4.4 Cálculo de evapotranspiración potencial

Para el propósito de este estudio el cálculo de la ETo es fundamental ya que permitirá realizar una estimación de las necesidades hídricas en algunos cultivos económicamente importantes en el Valle de Mexicali. Para obtener el máximo beneficio y hacer el uso óptimo de cada metro cúbico de agua utilizado en el riego de las plantas, se debe conocer cuánta agua aplicar, cuándo y cómo aplicarla.

Para esto es importante conocer la evapotranspiración potencial (ETo), también conocida como evapotranspiración de referencia (ETr), que se refiere a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde, bien regado a una altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo (Allen et al., 2006). La ETo se puede calcular utilizando datos meteorológicos; como resultado del estudio de Penman-Monteith (1990), la FAO lo recomienda como el método estándar para la definición y el cálculo de la ETo. Este método requiere datos de radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento (Allen et al., 2006). También requiere la fecha y las coordenadas geográficas del sitio.

Para realizar el cálculo de la ETo para el Valle de Mexicali se obtuvieron datos promedio de humedad relativa en Mexicali, B.C., para el período climatológico base 1961-1990, porcentajes simulados promedio para cada mes, que se generaron a partir de datos locales de temperatura. Los datos de viento (m/s) se obtuvieron de una estación ubicada en el condado de Imperial (Brawley), latitud 32°57' N y longitud 115°33' O. Esta estación climática cuenta con datos diarios del 1 agosto de 1981 a la fecha, pero se tomó como base para este estudio el período de 1982 – 1990. Las horas luz se obtuvieron tomando en cuenta la latitud del área en estudio. Con estos datos se calculó la evapotranspiración potencial utilizando el programa CROPWAT 8.0 (FAO, 2009) que utiliza el método de Penman-Monteith (Figura 21).

Mes	Prom Temp °C	Humedad %	Viento m/s	Insolación horas	Rad MJ/m²/día	ETo mm/mes
Enero	12.9	73	1.0	10.3	15.1	46.43
Febrero	15.2	72	1.4	11.0	18.5	65.30
Marzo	17.4	69	2.0	12.0	23.2	108.33
Abril	20.8	67	2.1	13.0	27.5	142.14
Mayo	24.9	64	1.8	13.9	30.3	181.16
Junio	29.7	62	1.7	14.3	31.4	206.48
Julio	33.0	65	1.4	14.1	30.7	224.25
Agosto	32.6	66	1.5	13.3	28.4	210.11
Septiembre	29.3	66	1.5	12.4	24.6	165.50
Octubre	23.4	67	1.6	11.4	19.9	118.15
Noviembre	17.1	70	1.3	10.5	15.8	66.87
Diciembre	12.9	73	1.0	10.0	13.9	43.80
Promedio	22.4	68	1.5	12.2	23.3	1578.52

Figura 25 Ejemplo de resultados generados por el programa CROPWAT.

4.5 Cálculo de evapotranspiración del Cultivo (estimación de necesidades hídricas)

Se puede calcular la evapotranspiración de un cultivo a partir de datos climáticos, integrando además los factores de resistencia propios de cada cultivo. La FAO en su estudio de Riego y Drenaje No 56, recomienda el método de Penman Monteith para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_r), a partir de datos climatológicos, en este caso utilizamos los datos climáticos de la región del Valle de Mexicali.

De acuerdo al enfoque del coeficiente del cultivo, la evapotranspiración del cultivo (ET_c) se calcula como el producto de la evapotranspiración de referencia del cultivo (ET_r) y el coeficiente del cultivo (K_c):

$$ET_c = K_c \times ET_r$$

El cálculo de la evapotranspiración del cultivo bajo estas condiciones supone que no existen limitaciones de ningún tipo en el desarrollo de los mismos, esto es, que no existe ninguna limitación debida a estrés hídrico o salino, densidad del cultivo, plagas y enfermedades, presencia de malezas o baja fertilidad. Debido a las variaciones en las características propias del cultivo durante las diferentes etapas de crecimiento, K_c cambia desde la siembra hasta la cosecha (Allen et al., 2006).

Capítulo V. Resultados y Discusión

5.1 Evaluación de Modelos de Circulación Generales

Los MCG's que se utilizaron para el análisis del cambio climático en la cuenca del Río Colorado fueron el HADCM3 y CGCM3; que como se mencionó en el capítulo anterior son algunos de los modelos recomendados por el IPCC (2007). La información obtenida de los MCG's es una aproximación de las condiciones climáticas esperadas en el futuro. Los resultados obtenidos son temperatura (C°) y precipitación (mm/anuales), el análisis de los resultados da como resultado una anomalías, definidas como la diferencia entre el escenario modelado y el escenario base para cada variable climática. Por lo tanto, "anomalías positivas" o "anomalías negativas" indican un aumento o disminución en las condiciones de cada variable climática, respectivamente.

5.1.1 Modelo HADCM3

Los resultados con este modelo proyectaron incrementos de temperatura (°C) en las tres regiones de análisis a lo largo de la cuenca, respecto al período base 1961-1990 (tabla 5.1). Estos resultados se presentan en las tablas 5.2 y 5.3 para las temperaturas máximas y mínimas, respectivamente; donde las celdas en gris claro representan las temperaturas con anomalías positivas menores, mientras que las celdas de gris oscuro representan las anomalías positivas máximas. En general se obtuvieron anomalías similares a las obtenidas en Christensen et al. (2007) y Miller et al. (2008) donde se presentaron aumentos de temperatura a lo largo de la cuenca.

Cabe aclarar que los resultados que se describen a continuación (tabla 5.2 y 5.3) son indicadores de anomalías en forma de rangos, independientemente del escenario de emisiones utilizado. Esta manera descriptiva es útil para mostrar el mejor y peor escenario climático proyectado; pero, en donde se desee subrayar la importancia del escenario de emisiones se nombrará explícitamente. De este modo, para la temperatura mínima se presenta un rango de anomalías positivas entre 0.3 °C a 2.8 °C para el período 2020s y para el período 2050s continúa la tendencia con aumentos de temperatura en la cuenca aunque con un rango de 1.0 °C a 4.4 °C. La temperatura máxima presenta aumentos de temperatura de 0.2 °C a 3.1 °C para los 2020s y para

los 2050s un rango de 0.7 °C a 5.6 °C. Estos resultados concuerdan con los escenarios del IPCC (2007).

Tabla 5.1 Período Base de temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C) y precipitación (mm/mes). Se resalta que los MCG's cubre áreas que traslapan regiones hidrológicas bajas, medias y altas.

	Periodo base 1961-1990								
	Temperatura mínima (°C)			Temperatura máxima (°C)			Precipitación (mm/mes)		
	Región baja	Región media	Región alta	Región baja	Región media	Región alta	Región baja	Región media	Región alta
Enero	-3.7	-15.4	-16.2	5.3	-4.4	-6.5	65.0	50.8	51.4
Feb	-2.2	-13.6	-14.2	8.1	-2.4	-4.4	59.2	48.9	48.1
Marzo	-0.9	-8.9	-12.8	12.3	1.3	-2.0	44.3	68.0	65.3
Abril	1.8	-1.7	-4.8	18.2	8.5	4.1	24.6	89.9	92.8
Mayo	5.9	2.4	1.6	27.3	15.5	12.5	8.6	85.4	114.8
Junio	10.9	6.3	5.8	34.8	23.5	18.7	4.1	44.2	81.8
Julio	15.7	9.3	8.8	39.5	31.0	24.2	5.6	27.1	43.1
Ago	15.2	9.1	7.5	38.2	30.5	26.1	12.1	29.5	32.3
Sep	10.4	4.5	2.7	32.2	24.0	20.0	21.1	30.0	33.5
Oct	3.9	-1.4	-2.5	23.7	13.5	8.9	15.8	37.5	56.1
Nov	-2.0	-7.5	-9.6	12.8	1.2	-2.3	29.1	52.5	64.8
Dic	-3.8	-14.6	-15.9	6.3	-4.3	-6.6	53.8	52.5	57.1

Tabla 5.2 Anomalías de temperatura mínima (°C) para el período 2020s y 2050s escenario A2 y B2.

	Modelo HADCM3 Anomalías de Temperatura mínima (°C)											
	Periodo 2020's escenario A2 y B2						Periodo 2050's escenario A2 y B2					
	Región baja		Región media		Región alta		Region baja		Region media		Region alta	
	A2 20	B2 20	A2 20	B2 20	A2 20	B2 20	A2 50	B2 50	A2 50	B2 50	A2 50	B2 50
Enero	0.7	1.1	1.5	2.4	1.3	1.7	1.6	1.4	2.7	2.7	2.0	2.3
Feb	0.6	0.3	1.3	0.6	1.0	0.7	1.2	1.0	2.6	2.7	1.3	1.3
Marzo	0.8	1.0	2.2	1.7	1.3	0.9	1.6	1.9	3.8	3.6	2.3	2.3
Abril	0.8	1.4	0.6	0.9	1.6	1.4	2.1	2.2	1.6	1.4	2.6	2.9
Mayo	1.3	1.3	0.9	0.9	0.8	0.8	2.5	2.4	2.2	1.9	2.2	1.6
Junio	1.6	1.8	1.4	1.4	1.6	1.7	3.7	3.1	3.0	2.7	3.1	2.9
Julio	2.2	2.8	2.1	2.2	1.9	2.0	4.1	3.8	4.0	3.9	3.8	3.8
Ago	2.1	2.4	2.0	2.0	2.2	2.3	4.1	3.6	4.0	3.6	4.1	3.8
Sep	2.3	2.5	2.1	2.0	2.0	1.9	4.4	3.7	4.0	3.2	4.0	3.1
Oct	2.1	1.8	1.6	1.3	1.4	1.2	3.7	2.8	3.2	2.2	3.0	2.0
Nov	1.0	1.5	1.1	2.1	1.1	1.8	2.1	2.2	2.7	2.9	2.8	2.9
Dic	0.7	1.4	1.6	3.2	1.4	1.9	1.4	1.7	3.7	3.9	2.9	3.0

Tabla 5.3 Anomalías de temperatura máxima (°C) para el período 2020s y 2050s escenario A2 y B2.

	Modelo HADCM3 Anomalías de Temperatura máxima (°C)											
	Periodo 2020's escenario A2 y B2						Periodo 2050's escenario A2 y B2					
	Región baja		Región media		Región alta		Región baja		Región media		Región alta	
	A2 20	B2 20	A2 20	B2 20	A2 20	B2 20	A2 50	B2 50	A2 50	B2 50	A2 50	B2 50
Enero	1.7	1.9	0.9	1.0	0.9	1.1	2.8	2.9	1.5	1.5	1.4	1.4
Feb	1.4	1.6	0.8	0.5	0.7	0.4	2.4	2.4	1.2	1.5	0.7	1.0
Marzo	1.2	1.7	1.5	1.3	0.6	0.2	2.5	2.5	2.8	2.8	1.0	1.1
Abril	1.6	1.9	1.3	1.7	1.5	1.7	3.4	2.5	2.8	2.4	3.2	3.2
Mayo	1.4	1.3	1.4	1.4	1.2	1.1	3.0	2.5	3.1	2.5	2.9	2.2
Junio	2.1	1.9	3.3	2.9	2.4	2.2	3.5	2.7	5.6	4.0	4.4	3.6
Julio	1.6	2.0	2.0	2.3	3.1	3.0	3.0	2.6	3.7	3.2	5.2	4.7
Ago	1.8	2.3	2.0	2.3	2.8	2.8	3.4	3.3	3.6	3.4	4.8	4.2
Sep	0.5	1.3	0.9	1.7	1.5	2.4	2.7	1.9	3.1	2.2	4.1	3.2
Oct	0.5	1.3	1.1	1.5	1.6	1.9	2.4	1.8	2.8	2.1	3.3	2.6
Nov	1.1	1.5	1.1	1.4	1.0	1.4	2.2	1.9	2.3	2.1	2.1	2.0
Dic	1.4	2.3	0.9	1.8	0.9	1.6	2.9	3.3	2.0	2.5	1.8	2.2

Los resultados para la precipitación consistieron en aumentos y disminuciones a lo largo de la cuenca (tabla 5.4). Entre lo más notable para los 2020s se encuentra, una disminución de -6.5 a -10.4 mm anuales en la región baja de la cuenca; en la región media con el escenario A2 se presenta una disminución de -12.6 mm anuales mientras que con el escenario B2 un aumento de 6.1 mm anuales. En la región alta de la cuenca se proyecta un aumento de entre 1.1 mm a 27.3 mm anuales. Ya para los 2050s los resultados para la región baja difieren, con el escenario A2 hay una disminución de -14.1 mm anuales y el escenario B2 hay un aumento de 8.8 mm anuales. En la región media se presentó un aumento con respecto al escenario B2 de 31 mm anuales, para el escenario A2 hay una disminución de -5.8. En la región alta de la cuenca hay aumento de precipitación de hasta 37.5 mm anuales.

Tabla 5.4 Anomalías de precipitación (mm/mes) para el período 2020s y 2050s escenario A2 y B2. Las celdas en gris claro y gris oscuro presentan anomalías negativas y positivas máximas, respectivamente.

	Modelo HADCM3 Anomalías de Precipitación (mm/mes)											
	Período 2020's escenario A2 y B2						Período 2050's escenario A2 y B2					
	Región baja		Región media		Región alta		Región baja		Región media		Región alta	
	A2 20	B2 20	A2 20	B2 20	A2 20	B2 20	A2 50	B2 50	A2 50	B2 50	A2 50	B2 50
Enero	-4.8	2.8	1.4	13.5	4.5	14.5	0.1	-0.9	3.0	6.7	4.3	6.6
Feb	-2.6	-12.5	1.2	-1.9	3.2	1.7	-2.8	-3.9	4.3	-0.6	4.7	0.5
Marzo	1.2	-1.8	1.3	6.1	1.0	4.6	-6.7	0.8	3.7	9.3	6.3	5.8
Abril	-5.6	-6.0	-2.1	-4.4	5.9	3.9	-9.6	-0.7	-6.6	-3.6	4.3	7.0
Mayo	-3.0	-0.6	-12.0	-4.7	1.3	7.1	-4.8	-0.6	-19.5	-8.0	-3.5	4.7
Junio	-2.3	-0.7	-15.2	-12.0	-17.7	-13.1	-1.7	1.0	-20.9	-4.8	-24.6	-8.4
Julio	0.8	1.3	3.3	2.3	-1.1	1.5	2.1	3.4	7.7	13.3	3.0	9.0
Ago	1.4	-0.3	0.7	-2.9	-0.9	-1.0	2.5	3.8	2.6	0.3	-0.6	-0.5
Sep	14.8	4.2	10.3	1.3	7.3	-2.3	11.2	13.7	6.9	8.3	1.3	3.5
Oct	5.3	-2.4	3.1	-0.9	-1.1	-4.4	9.4	2.9	8.1	3.7	8.3	-2.9
Nov	-3.2	5.4	-1.3	6.5	-1.6	9.9	-2.0	0.9	3.2	4.5	7.6	6.2
Dic	-8.4	0.3	-3.3	3.2	0.3	5.0	-11.7	-11.7	1.9	1.9	5.7	5.9
Anual	-6.5	-10.4	-12.6	6.1	1.1	27.3	-14.1	8.8	-5.8	31.0	16.7	37.5

5.1.2 Modelo CGCM2

Al igual que en el modelo anterior, se presentaron incrementos en las anomalías de temperatura en las tres regiones de análisis a lo largo de la cuenca, respecto al período base 1961-1990 (tabla 5.5). Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5.6 y 5.7.

Tabla 5.5 Período Base de temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C) y precipitación (mm/mes).

	Período base 1961-1990								
	Temperatura mínima (°C)			Temperatura máxima (°C)			Precipitación (mm/mes)		
	Región baja	Región media	Región alta	Región baja	Región media	Región alta	Región baja	Región media	Región alta
Enero	-6.1	-16.8	-16.1	2.5	-3.8	-7.5	23.1	45.5	75.7
Feb	-2.6	-15.0	-15.8	6.2	-2.4	-6.6	24.8	46.2	63.1
Marzo	0.2	-7.6	-12.5	13.1	-0.3	-3.2	32.5	62.0	70.2
Abril	1.0	-0.8	-8.6	19.2	4.3	-0.7	43.4	68.2	59.8
Mayo	3.3	2.1	-1.8	26.5	12.5	3.2	29.3	55.7	70.4
Junio	8.3	4.9	7.5	34.1	20.5	14.8	18.4	47.6	91.7
Julio	12.9	8.7	12.2	38.0	25.7	19.8	33.9	80.7	82.3
Ago	13.0	9.7	13.1	36.8	25.1	21.0	45.5	103.3	72.1
Sep	9.2	6.4	8.4	31.8	20.6	17.3	29.8	54.5	46.4
Oct	2.9	1.3	2.1	23.9	12.3	9.5	22.1	30.9	47.7
Nov	-1.0	-3.6	-2.9	13.7	2.5	0.9	26.2	36.0	63.3
Dic	-4.5	-14.7	-12.9	5.3	-2.7	-5.4	23.2	45.9	71.5

Para las anomalías de temperatura mínima se presenta un incremento de entre 0.2 °C a 3.5 °C para los 2020s y, para los 2050s continúa la tendencia con aumentos de

temperatura en la cuenca con un rango de 0.5 °C a 6.8 °C. Para la anomalía de temperatura máxima se presentan aumentos de temperatura de 0.3 °C a 2.1 °C para los 2020s y, para los 2050s los aumentos se presentan entre 1.0 °C a 7.8 °C. Se puede observar que todos los resultados que se obtuvieron son aumentos de temperatura respecto al escenario base de 1961-1990.

Tabla 5.6 Anomalías de temperatura mínima (°C) para el período 2020s y 2050s escenario A2 y B2.

Modelo CGCM2 Anomalías de Temperatura mínima (°C)												
	Periodo 2020's escenario A2 y B2						Periodo 2050's escenario A2 y B2					
	Región baja		Región media		Región alta		Región baja		Región media		Región alta	
	A2 20	B2 20	A2 20	B2 20	A2 20	B2 20	A2 50	B2 50	A2 50	B2 50	A2 50	B2 50
Enero	2.0	2.1	1.1	1.3	2.0	1.5	4.3	3.2	3.6	2.8	4.3	3.0
Feb	1.1	1.3	1.9	2.2	2.1	2.6	2.2	2.1	4.7	3.8	4.3	3.8
Marzo	0.2	0.2	1.8	1.6	0.9	0.3	0.5	0.6	4.1	3.6	2.0	1.8
Abril	0.4	0.3	0.7	0.8	1.6	1.2	1.0	0.7	1.5	1.2	4.0	3.1
Mayo	1.1	1.0	1.0	0.8	3.4	3.0	2.5	2.2	2.0	1.6	6.8	5.4
Junio	2.0	1.8	0.8	1.0	1.9	1.9	3.5	3.3	2.3	1.8	3.4	2.9
Julio	2.2	1.3	1.8	1.1	1.9	1.6	3.3	2.8	3.0	2.5	2.7	2.5
Ago	1.6	1.2	1.5	1.3	1.3	1.3	2.7	2.1	2.2	1.9	2.0	1.8
Sep	1.7	1.2	1.1	1.0	1.2	1.3	2.8	2.5	2.4	2.0	2.2	2.1
Oct	1.9	1.3	0.9	0.5	0.8	0.3	3.2	2.4	1.3	1.2	1.4	1.2
Nov	1.0	0.5	1.6	1.2	1.9	1.5	1.9	1.6	3.0	2.7	2.8	2.5
Dic	2.2	1.8	3.4	2.9	3.5	3.1	3.5	3.0	5.9	4.6	6.1	4.9

Tabla 5.7 Anomalías de temperatura máxima (°C) para el período 2020s y 2050s escenario A2 y B2.

Modelo CGCM2 Anomalías de Temperatura máxima (°C)												
	Periodo 2020's escenario A2 y B2						Periodo 2050's escenario A2 y B2					
	Región baja		Región media		Región alta		Región baja		Región media		Región alta	
	A2 20	B2 20	A2 20	B2 20	A2 20	B2 20	A2 50	B2 50	A2 50	B2 50	A2 50	B2 50
Enero	0.6	0.7	0.9	0.8	1.4	1.1	2.3	1.6	2.0	1.6	3.2	2.2
Feb	1.1	1.4	0.7	0.8	1.5	1.8	2.6	2.7	1.5	1.3	2.9	2.5
Marzo	1.2	1.3	0.4	0.3	0.6	0.3	2.1	2.3	1.3	1.1	1.2	1.0
Abril	1.3	1.0	1.3	1.3	0.4	0.3	1.8	2.2	3.3	2.7	1.6	1.0
Mayo	1.5	1.4	1.5	1.4	3.4	3.0	2.2	2.8	3.8	3.0	7.8	6.2
Junio	1.9	1.9	2.1	2.1	2.1	2.1	2.3	2.9	3.8	3.3	3.8	3.0
Julio	1.8	1.3	1.9	1.5	1.7	1.6	2.3	2.3	2.7	2.4	2.9	2.3
Ago	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.6	2.4	2.1	2.2	1.9	3.0	2.3
Sep	1.3	1.2	1.3	1.6	1.6	1.8	1.8	2.2	2.8	2.6	3.7	3.0
Oct	1.5	1.5	1.8	1.4	1.8	1.3	2.3	2.5	3.5	2.8	3.8	2.8
Nov	1.1	1.4	1.2	1.3	1.4	1.3	2.1	2.4	3.1	2.4	3.2	2.4
Dic	1.5	1.8	1.3	1.2	2.2	2.1	2.5	2.6	2.2	1.8	3.7	3.1

Los resultados obtenidos con las proyecciones para la precipitación fueron tanto aumentos como disminuciones a lo largo de la cuenca (tabla 5.8). Entre lo más notable se puede comentar que los 2020s se presentaría una disminución de 3.5 mm anuales con el escenario A2, mientras que con el escenario B2 un aumento de 0.5 mm anuales en la región baja de la cuenca. En la región media se presentan aumentos de 17.7 a

28.6 mm anuales y en la región alta de la cuenca las tendencias siguen presentando un aumento de entre 9.5 a 26.2 mm anuales. Ya para el período 2050s los resultados para la región baja presentan aumentos en un rango de 5.2 mm a 26.7 mm anuales, mientras que en la región media se presentan un aumento de 15.6 mm a 21.6 mm anuales. En región alta de la cuenca se presentan disminuciones y aumentos de 6.4 mm a 30 mm anuales, respectivamente.

Tabla 5.8 Anomalías de precipitación (mm/mes) para el período 2020s y 2050s escenario A2 y B2.

Modelo CGCM2 Anomalías de Precipitación (mm/mes)												
	Periodo 2020's escenario A2 y B2						Periodo 2050's escenario A2 y B2					
	Región baja		Región media		Región alta		Región baja		Región media		Región alta	
	A2 20	B2 20	A2 20	B2 20	A2 20	B2 20	A2 50	B2 50	A2 50	B2 50	A2 50	B2 50
Enero	-0.5	-0.5	0.4	1.7	4.9	5.2	0.2	-0.9	0.5	1.8	10.4	13.7
Feb	-3.1	-2.6	-0.9	0.5	3.5	3.1	1.4	1.3	-1.3	1.2	2.4	9.1
Marzo	-1.3	-0.5	0.1	0.4	-2.6	-6.5	-3.9	-2.6	2.1	-0.7	-6.0	-6.8
Abril	-9.2	-2.3	-0.5	3.8	1.0	4.0	-4.4	-8.0	2.6	1.2	7.3	4.4
Mayo	-5.5	-7.4	2.3	-3.5	13.4	9.9	-2.0	-5.9	-3.0	-4.2	16.7	17.2
Junio	0.2	0.8	-6.4	-8.3	-5.2	-6.6	4.0	0.9	-3.4	-4.7	-18.5	-9.1
Julio	-0.7	9.3	12.0	13.6	4.7	0.0	6.1	11.7	14.3	25.8	-5.4	1.2
Ago	-2.4	1.1	5.2	2.0	6.9	-5.1	2.0	-3.1	1.7	-2.4	-3.0	-1.5
Sep	0.1	-1.4	4.9	3.0	-0.2	3.7	-2.7	0.2	1.9	-4.1	-3.4	-1.3
Oct	9.5	1.2	5.7	0.6	-4.7	-1.5	8.3	2.2	-1.5	1.6	-5.0	0.0
Nov	2.6	-1.8	-0.8	0.6	0.2	-1.4	5.4	2.1	4.9	-1.8	-3.0	-0.2
Dic	6.7	4.6	6.8	3.4	4.5	4.7	12.4	7.2	2.8	1.8	1.0	3.4
Anual	-3.5	0.5	28.6	17.8	26.2	9.5	26.7	5.2	21.6	15.6	-6.4	30.0

5.2 Evaluación de modelos regionales en la cuenca

5.2.1 Modelos BCCR-BCM2.0, HadCM3 y CGCM3.1.

Los resultados de temperatura para los modelos regionales se presentan en la tabla 5.9. En el período de los 2020s el modelo CGCM3.1 y HadCM3 presentaron los valores más altos con un aumento de temperatura de 1.8 °C, ubicándose en la región del Lago Mead, Nevada, mientras que con el modelo BCCR-BCM2.0 presentó un aumento mínimo de 0.6 °C ubicado en la región cercana a Calexico, CA, que fue el valor más bajo de los modelos analizados. En el período de los 2050s el modelo CGCM3.1 presentó en la mayor parte de la región los resultados más altos con un aumento máximo de temperatura de 3.1 °C de nuevo para la región del Lago Mead, mientras que el modelo BCCR-BCM2.0 presentó un aumento mínimo 1.1 °C para la región cercana a Calexico, CA. Los resultados de temperatura que se obtuvieron con los modelos

regionales a lo largo de la cuenca del Río Colorado presentaron aumentos de temperatura. Específicamente para la región del Valle de Mexicali presentó el incremento más bajo, de 1.1 °C para los 2020s y el incremento más alto, de 2.9 °C para los 2050s.

Tabla 5.9 Anomalías de Temperatura (°C) para los 2020s y 2050s escenarios A2 y B1.

Modelos Escenario/Periodo	Periodo base 2020's						Periodo base 2050's					
	BCCR-BCM2.0		HADCM3		CGCM3.1		BCCR-BCM2.0		HADCM3		CGCM3.1	
	A2 20	B1 20	A2 20	B1 20	A2 20	B1 20	A2 50	B1 50	A2 50	B1 50	A2 50	B1 50
VALLE DE MEXICALI, B.C., MEX.	1.2	1.1	1.5	1.6	1.6	1.5	1.9	1.6	2.7	2.4	2.9	2.2
MEXICALI, B.C., MEX.	0.9	0.8	1.2	1.2	1.3	1.2	1.5	1.3	2.3	2.1	2.6	1.8
CALEXICO, CA, USA	0.7	0.6	1.0	1.0	1.1	1.0	1.4	1.1	2.2	1.9	2.4	1.7
VALLE IMPERIAL, CA, USA	1.0	0.9	1.3	1.3	1.4	1.3	1.7	1.4	2.5	2.2	2.7	1.9
LAGO MEAD, NV, USA	1.4	1.2	1.7	1.8	1.8	1.7	2.3	2.0	3.2	2.9	3.1	2.4
COLLINS CANYON, UT, USA	1.0	0.9	1.4	1.5	1.5	1.4	2.1	1.7	2.9	2.6	2.9	2.1
NEW CASTLE, CO, USA	1.1	1.0	1.5	1.6	1.7	1.6	2.1	1.8	3.0	2.6	3.1	2.3
EDEN, WY, USA	1.0	0.8	1.3	1.3	1.4	1.4	1.9	1.5	2.8	2.6	2.7	2.1

En la tabla 5.10 se presentan las anomalías de precipitación. Para los 2020s el modelo BCCR-BCM2.0 presentó las anomalías negativas más altas de toda la cuenca, siendo el valor mayor, en la región alta de la cuenca (Collins Canyon, UT) y, el modelo HADCM3 presentó anomalías positivas en la mayoría de los puntos de análisis de la cuenca a excepción de los sitios de Collins Canyon, UT; Eden, WY y Lago Mead, NV. El modelo CGM3.1 presenta indistintamente anomalías positivas y negativas en toda la cuenca. Cabe resaltar que solo el sitio de Collins Canyon, UT localizado en la región alta de la cuenca presenta disminución de la precipitación para todos los modelos y escenarios presentados.

Para los 2050s la tendencia que presentan los escenarios continúa de la misma manera que para los 2020s; el modelo BCCR-BCM2.0 continúa presentando disminuciones en gran parte de los puntos de análisis de la cuenca a excepción de los sitios situados en el Valle de Imperial y de Mexicali, con las disminuciones mayores en la región de Collins Canyon y New Castle. El modelo HADCM3, para el escenario A2, presentó anomalías positivos en todos los puntos de análisis de la cuenca; aunque, el escenario B1 presentó en la mayoría de los sitios anomalías negativas, al igual que el modelo CGCM3.1 (para ambos escenarios). Solo el modelo HADCM3, en el escenario A2, presentó anomalías positivas en todos los puntos de análisis de la cuenca.

Cabe resaltar que aunque las anomalías de precipitación de los diferentes modelos y proyecciones no son del todo consistentes, algunos sitios en la región alta de la cuenca presentan disminuciones (como Collins Canyon, UT). Estos valores dependen en gran medida a la diversidad natural de clima que se tiene a lo largo de la cuenca.

Tabla 5.10 Anomalías de precipitación (mm/mes) para el período 2020s y 2050s escenario A2 y B1.

Modelos Escenario/Periodo	Periodo base 2020's						Periodo base 2050's					
	BCCR-BCM2.0		HADCM3		CGCM3.1		BCCR-BCM2.0		HADCM3		CGCM3.1	
	A2 20	B1 20	A2 20	B1 20	A2 20	B1 20	A2 50	B1 50	A2 50	B1 50	A2 50	B1 50
VALLE DE MEXICALI, B.C., MEX.	3.81	8.20	3.71	18.29	-5.34	0.82	-6.84	4.91	23.46	-1.43	-11.98	-6.64
MEXICALI, B.C., MEX.	14.07	20.19	12.08	28.41	1.46	8.58	1.38	14.44	37.61	6.28	-5.62	0.79
CALEXICO, CA, USA	-0.57	1.85	2.85	12.46	-7.71	-2.40	-8.73	1.60	17.66	-4.67	-12.82	-8.84
VALLE IMPERIAL, CA, USA	-0.28	3.34	2.31	10.77	-6.38	-1.42	-7.66	1.41	14.99	-3.79	-11.68	-7.45
LAGO MEAD, NV, USA	-5.32	0.55	-5.32	4.82	-1.39	2.88	-17.53	-1.31	20.12	-4.50	-8.09	-3.24
COLLINS CANYON, UT, USA	-27.83	-16.57	-13.85	-8.11	-12.78	-11.85	-34.04	-19.44	9.54	-13.52	-23.19	-12.94
NEW CASTLE, CO, USA	-22.18	18.56	3.25	26.19	21.98	15.69	-32.13	-6.45	39.44	14.18	18.10	27.04
EDEN, WY, USA	-16.78	6.00	-7.96	0.39	5.45	1.82	-20.38	-12.64	1.45	-9.82	8.49	4.73

5.3 Evaluación del Valle de Mexicali con modelos regionales.

Los modelos regionales que se utilizaron para el análisis de cambio climático en el Valle de Mexicali fueron el BCM2, CGCM3 y HadCM3 estos se eligieron ya que son algunos de los modelos que mejor reproducen la climatología de la región (Conde et al., 2011). Para estos modelos se utilizaron los escenarios de emisiones A2 y B1, con el propósito de contrastar resultados, ya que el A2 es un escenario de altas emisiones, y el B1 es de bajas emisiones. El análisis de las proyecciones del cambio climático sobre el recurso hídrico con énfasis en una zona agrícola del Valle de Mexicali se realizó en dos áreas denominadas “Área 1” y “Área 2” (figura 24) como se describió en el apartado 4.3.

5.3.1 Valle de Mexicali

En esta sección se analizan los resultados de los escenarios de cambio climático en el Valle de Mexicali. Como primer paso se comparó la temperatura base observada de la región contra los resultados obtenidos con los distintos modelos. Como se aprecia en la figura 26, los modelos reproducen bastante bien el período base observado de la región. Esto nos indica que los resultados que están arrojando los modelos están reproduciendo bastante bien la temperatura de la región.

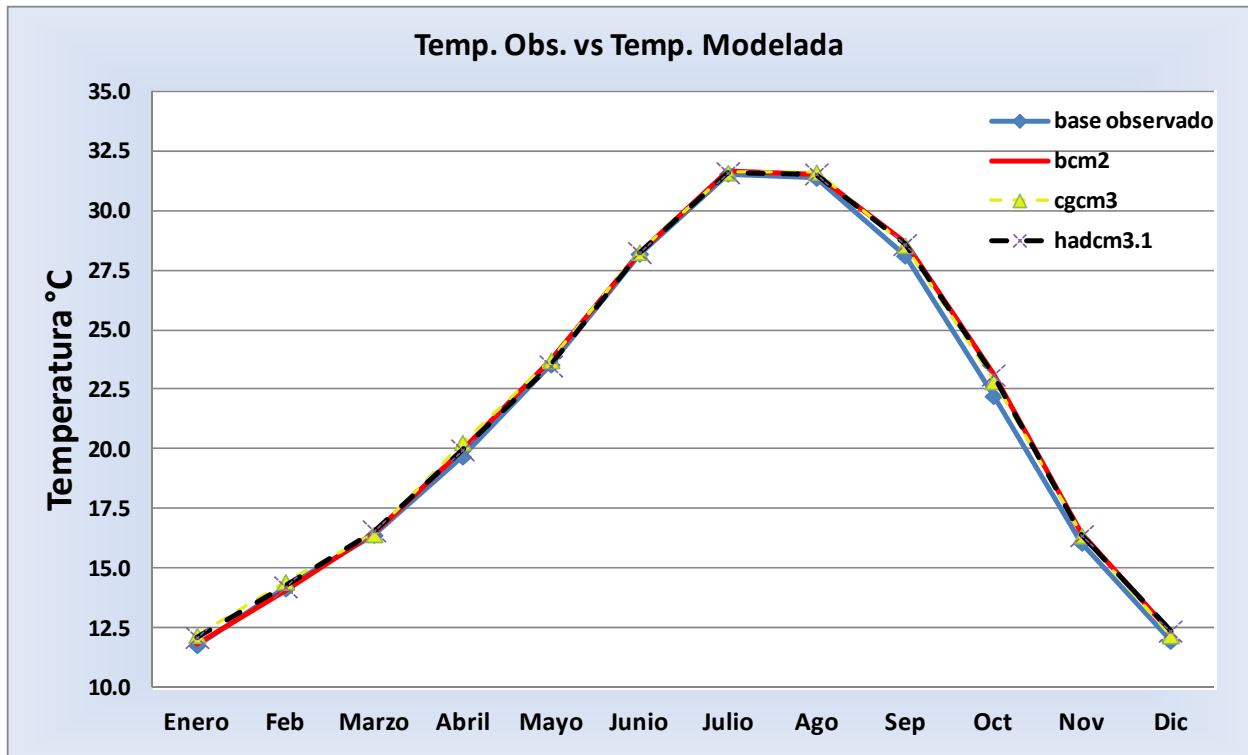


Figura 26. Análisis de temperatura base observada versus los resultados de los modelos utilizados.

En la tabla 5.11 se presentan los valores del período base (1961 a 1990) utilizado por los diferentes modelos de escenarios de cambio climático. Como se mencionó en el apartado 4.4, para realizar las estimaciones de ETo, es necesario tener las variables de precipitación, humedad relativa, viento e insolación que se presentan también en la tabla 5.11. A excepción de la variable viento, de la que solo se encontraron datos de 1982 a 1990, el resto de las variables representan la climatología de la región para el período base del Valle de Mexicali.

5.3.1.1 Escenarios de temperatura y precipitación para los períodos 2020s y 2050s.

Los escenarios de las anomalías de temperatura y precipitación mensual para los 2020s y 2050s con el escenario de emisiones A2 se muestran en la tabla 5.12. Para los 2020s se observan con los tres modelos BCM2, CGCM3 y HADCM3 incrementos de temperatura en el Valle de Mexicali en todos los meses. Estos valores varían desde 0.8 °C con el modelo BCM2 en el mes de julio, hasta 2.8 °C con el modelo HADCM3 en el mes de octubre; en este período el modelo que muestra mayores aumentos mes con

mes en el año es el CGCM3 respecto al escenario base a aceptación del mes de Enero. Para los 2050s continúan los aumentos de temperatura, el valor más bajo es de 1.3 °C con el modelo BCM2 en el mes de febrero, y de hasta 4 °C con el modelo CGCM3 en el mes de octubre; al igual que en el período de los 2020s con el modelo CGCM3 se presentaron los aumentos mayores de temperatura, lo cual indicar que el comportamiento de los modelos es estable sin olvidar que se maneja el mismo escenario de emisiones.

Tabla 5.11. Período base de 1961-1990 contiene datos medios mensuales de temperatura, precipitación, humedad relativa, viento del período 1982-1990 e insolación respecto a la latitud del área de estudio.

	Temp (°c)	Preci (mm/mes)	Viento (m/s)	Hum. Rel. (%)	Hrs insolacion
Enero	11.8	10.8	1.0	73.0	10.4
Feb	14.2	8.4	1.4	71.9	11.0
Marzo	16.4	6.3	2.0	69.2	12.0
Abril	19.7	2.2	2.2	66.6	13.0
Mayo	23.5	0.5	1.8	64.0	13.9
Junio	28.2	0.2	1.7	61.8	14.3
Julio	31.5	3.0	1.4	64.7	14.1
Ago	31.4	11.8	1.5	65.6	13.3
Sep	28.1	8.2	1.5	65.6	12.4
Oct	22.2	9.2	1.6	66.9	11.4
Nov	16.1	7.5	1.3	70.0	10.5
Dic	12.0	11.4	1.0	73.0	10.0

En cuanto a la precipitación media mensual para los 2020s y 2050s (tabla 5.12), se puede observar que los modelos tienen variaciones en los resultados. Con el BCM2 se presentan disminuciones en cuatro meses (marzo, septiembre, octubre y noviembre) y, el resto de los meses se tienen ligeros aumentos de precipitación. De la misma manera se comporta el modelo HADCM3 con disminuciones en cinco meses (junio, agosto, octubre noviembre y diciembre) y el resto de los meses con ligeros aumentos. El modelo CGCM3 presenta disminuciones en cinco meses (agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre), mientras que en los meses restantes aumentos, pero más pequeños que los modelos anteriores. En el período de los 2050s se sigue presentando variaciones entre los modelos, pero en este caso hay una tendencia hacia la disminución de la precipitación.

Tabla 5.12 Escenarios para el período 2020s y 2050s; contienen resultados del escenario A2 para anomalías de temperatura (°C) y de precipitación (mm/mes y %).

2020s	BCM2	BCM2 PRECIPITACIÓN		CGCM3	CGCM3 PRECIPITACIÓN		HADCM3	HADCM3 PRECIPITACIÓN	
	Anomalías Temp (°C)	(mm/mes)	(%)	Anomalías Temp (°C)	(mm/mes)	(%)	Anomalías Temp (°C)	(mm/mes)	(%)
Enero	1.8	1.98	18.3	1.6	0.39	3.6	1.2	3.68	34.0
Feb	1.1	3.71	44.4	1.4	1.47	17.6	1.1	0.73	8.7
Marzo	1.1	-0.83	-13.1	1.3	1.00	15.8	1.1	1.71	27.0
Abril	1.7	0.29	13.3	1.9	0.68	31.7	1.3	1.04	48.4
Mayo	1.1	0.84	174.7	1.5	0.47	97.4	1.3	0.17	35.3
Junio	0.8	0.36	186.5	1.6	0.34	173.5	1.4	-0.06	-31.6
Julio	1.3	0.63	21.3	1.4	0.47	15.8	1.0	1.01	33.9
Ago	0.9	2.98	25.2	1.8	-3.89	-32.9	1.6	-4.01	-34.0
Sep	1.2	-1.65	-20.1	1.9	-0.35	-4.3	2.6	6.91	84.3
Oct	2.1	-2.85	-30.9	2.6	-2.18	-23.6	2.8	-1.64	-17.8
Nov	1.4	-3.58	-48.1	1.8	-1.95	-26.1	1.7	-3.58	-48.1
Dic	0.9	0.90	7.9	1.5	-2.63	-23.1	1.5	-3.28	-28.8

2050s	BCM2	BCM2 PRECIPITACIÓN		CGCM3	CGCM3 PRECIPITACIÓN		HADCM3	HADCM3 PRECIPITACIÓN	
	Anomalías Temp (°C)	(mm/mes)	(%)	Anomalías Temp (°C)	(mm/mes)	(%)	Anomalías Temp (°C)	(mm/mes)	(%)
Enero	1.9	0.24	2.2	2.8	1.33	12.3	2.2	2.29	21.2
Feb	1.3	-0.22	-2.6	2.6	-0.82	-9.8	1.8	4.05	48.4
Marzo	1.9	-1.92	-30.2	2.7	0.45	7.1	2.3	-0.22	-3.5
Abril	1.8	-1.01	-46.7	3.1	0.07	3.4	2.7	-0.53	-24.7
Mayo	1.8	0.15	31.2	2.8	0.24	49.8	2.3	0.34	70.2
Junio	1.7	0.54	278.7	2.3	0.33	167.7	3.5	0.09	47.7
Julio	1.8	1.46	49.1	2.7	0.04	1.3	2.6	3.76	126.4
Ago	1.9	1.92	16.2	3.3	-5.19	-44.0	3.0	3.69	31.3
Sep	2.3	-3.66	-44.6	3.6	-0.93	-11.3	3.5	3.43	41.8
Oct	2.6	-2.33	-25.3	4.0	-2.40	-26.1	3.5	11.86	128.8
Nov	1.9	-3.48	-46.7	3.0	-2.75	-36.9	2.5	-3.00	-40.3
Dic	2.1	1.20	10.5	2.8	-2.71	-23.8	2.7	-3.01	-26.4

Los resultados para los 2020s y 2050s con el escenario B1 se muestran en la tabla 5.13. Para los 2020s se presentan aumentos de temperatura en el Valle de Mexicali en todos los meses y varían de 0.6 °C con el modelo BCM2 en los meses de mayo y junio, a 2.5 °C con el modelo CGCM3 en el mes de octubre siendo este el aumento más alto que se presenta en este período. Para los 2050s continúan los incrementos de temperatura, el más bajo es de 1.2 °C con el BCM2 para el mes de febrero, y el más alto de 3.3 °C con el modelo CGCM3 y HADCM3 en el mes de octubre. Al igual que

para los 2020s con el modelo HADCM3 se obtuvieron los mayores aumentos de temperatura. Cabe resaltar que aún utilizando un escenario de bajas emisiones (B1) se presentan aumentos en todos los meses para el Valle de Mexicali.

Para la precipitación en los 2020s y 2050s con el escenario B1 se observa que los modelos muestran contraste en sus resultados al igual que con el escenario A2. Para el modelo BCM2 se presentan disminuciones en los meses de marzo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre; el resto de los meses se presentan ligeros aumentos de precipitación. Con el modelo HADCM3 se observan disminuciones en los meses de agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre; en los demás meses ligeros aumentos. Finalmente el modelo CGCM3 presenta disminuciones en los meses de agosto, noviembre y diciembre; el resto de los meses ligeros aumentos. Para los 2050s continúan las variaciones entre los modelos, los resultados para los tres modelos se asemejan a los de los 2020s.

El análisis de cambios (o anomalías) en temperatura para el Valle de Mexicali con los tres modelos y los dos escenarios de emisiones, concuerdan con los resultados obtenidos en otros estudios realizados en la cuenca de Río Colorado o zonas aledañas, en el sentido de que se presentan incrementos de temperatura (Christensen et al., 2004; Christensen et al., 2007; Hidalgo et al., 2009; IPCC 2007; Miller et al., 2003; Miller et al., 2008; entre otros). Cabe resaltar que el patrón de calentamiento global para finales del siglo XXI muestra en general un calentamiento mayor en el Hemisferio Norte, en latitudes medias y altas, así como sobre las regiones continentales (IPCC, 2007).

Así, las proyecciones para el Valle de Mexicali, ya sea para un escenario de altas emisiones o bajas emisiones, presenta un incremento de temperatura superficial, del mismo modo que con el patrón global. Las tendencias al calentamiento en todas las proyecciones se indican por un cambio positivo. Además la magnitud del incremento de temperatura depende del escenario de GEI que se elija. El promedio de incremento que se tendría, como mínimo para el periodo 2020s de 1.1 °C y el más alto 2.2 °C. Para el 2050s se incremento mínimo es de 1.8 °C y más alto de 3.2 °C

Tabla 5.13 Escenarios para el período 2020s y 2050s; contienen resultados del escenario B1 para temperatura (° c) y precipitación (mm/mes) y (%).

2020s	BCM2	BCM2 PRECIPITACIÓN		CGCM3	CGCM3 PRECIPITACIÓN		HADCM3	HADCM3 PRECIPITACIÓN	
	Anomalías Temp (°C)	(mm/mes)	(%)	Anomalías Temp (°C)	(mm/mes)	(%)	Anomalías Temp (°C)	(mm/mes)	(%)
Enero	2.0	5.32	49.2	1.5	1.22	11.2	2.2	3.81	35.2
Feb	0.8	3.90	46.6	1.4	1.79	21.4	1.3	4.56	54.5
Marzo	1.1	-1.65	-26.0	1.2	1.63	25.7	1.0	2.89	45.5
Abril	1.6	0.08	3.8	1.8	0.75	35.0	1.7	1.32	61.1
Mayo	0.6	0.70	145.7	1.5	0.65	134.5	0.8	0.40	84.2
Junio	0.6	0.46	238.9	1.0	0.36	184.4	1.4	0.29	148.8
Julio	1.2	0.85	28.5	1.4	0.61	20.4	2.0	0.99	33.4
Ago	0.7	7.32	62.0	1.6	-2.76	-23.4	2.3	-2.04	-17.3
Sep	1.6	-1.99	-24.3	2.0	-0.13	-1.6	2.0	2.91	35.5
Oct	1.6	-4.54	-49.3	2.5	-2.21	-24.0	1.6	6.19	67.2
Nov	0.8	-2.84	-38.0	1.5	-1.83	-24.5	1.2	-3.71	-49.7
Dic	1.1	-0.73	-6.4	1.5	-0.16	-1.4	1.6	-0.59	-5.2

2050s	BCM2	BCM2 PRECIPITACIÓN		CGCM3	CGCM3 PRECIPITACIÓN		HADCM3	HADCM3 PRECIPITACIÓN	
	Anomalías Temp (°C)	(mm/mes)	(%)	Anomalías Temp (°C)	(mm/mes)	(%)	Anomalías Temp (°C)	(mm/mes)	(%)
Enero	1.6	2.08	19.3	2.0	2.28	21.1	2.3	-0.76	-7.0
Feb	1.2	0.16	1.9	1.8	1.32	15.8	2.4	-0.87	-10.5
Marzo	1.6	-1.27	-19.9	2.0	0.50	7.9	2.3	3.22	50.7
Abril	1.8	-0.31	-14.2	2.1	-0.01	-0.5	2.2	0.60	27.8
Mayo	1.9	0.09	18.3	1.9	0.94	196.9	2.0	0.25	52.4
Junio	1.5	0.44	227.2	1.9	0.46	239.1	2.0	0.15	77.8
Julio	1.6	1.28	42.9	1.9	0.14	4.7	2.6	1.93	65.0
Ago	1.4	3.50	29.7	2.4	-4.29	-36.3	2.5	0.09	0.7
Sep	2.0	0.23	2.8	2.8	-1.33	-16.2	3.3	0.89	10.9
Oct	2.2	0.28	3.0	3.3	-1.55	-16.9	3.3	-0.75	-8.2
Nov	1.6	-3.35	-44.9	2.4	-2.66	-35.7	2.5	-1.82	-24.5
Dic	1.7	1.31	11.5	2.2	-1.42	-12.5	2.2	-4.53	-39.8

En cuanto a la precipitación existen resultados contradictorios en la magnitud dependiendo del escenario de emisiones utilizado. Cabe resaltar que en el Valle de Mexicali la precipitación prácticamente no se toma en cuenta al momento de elegir un cultivo, pues el riego que necesitan los cultivos se da por medio de los derechos de agua que reciben los agricultores por medio de la Comisión Nacional del Agua. De este modo, con las proyecciones obtenidas en este trabajo, no se prevé que el patrón de riego pueda ser modificado por los cambios en las precipitaciones futuras; aunque, los

cambios en la temperaturas si pueden modificar los requerimientos de agua por los cultivos.

5.3.2. Resultados de evapotranspiración potencial y el recurso hídrico.

Como se había comentado en el apartado 4.4, para el cálculo de la evapotranspiración potencial (Eto) se utilizaron datos históricos de temperatura, viento, humedad relativa e insolación representativos del Valle de Mexicali así como los resultados de temperatura que se obtuvieron de los modelos para los dos periodos de análisis. En la tabla 5.14 y figura 27 se presentan los resultados de evapotranspiración potencial para el período base y los obtenidos para los modelos BCM2, CGCM3 y HADCM3 para el mismo período, claramente se observa que los resultados obtenidos reproducen bastante bien la ETo del Valle de Mexicali.

Tabla 5.14 Resultados de ETo para el período base 1961-1990 y los modelos BCM2, CGCM3 y HADCM3.

	1961-1990			
	Eto Base	Eto BCM2	Eto CGCM3	Eto HADCM3
	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)
Enero	44.83	45.29	45.77	45.77
Feb	63.12	62.32	63.44	62.86
Marzo	104.89	105	104.65	105.41
Abril	137.6	138.11	139.78	138.68
Mayo	174.55	175.72	175.88	174.81
Junio	198.53	198.2	198.7	198.08
Julio	215.96	215.73	215.73	215.73
Ago	203.32	203.8	204.44	203.86
Sep	160.31	162.17	161.58	161.79
Oct	113.91	117.52	116.01	117.15
Nov	64.6	66.06	65.68	65.73
Dic	42.56	43.33	42.94	43.32
Total	1524.18	1533.25	1534.6	1533.19

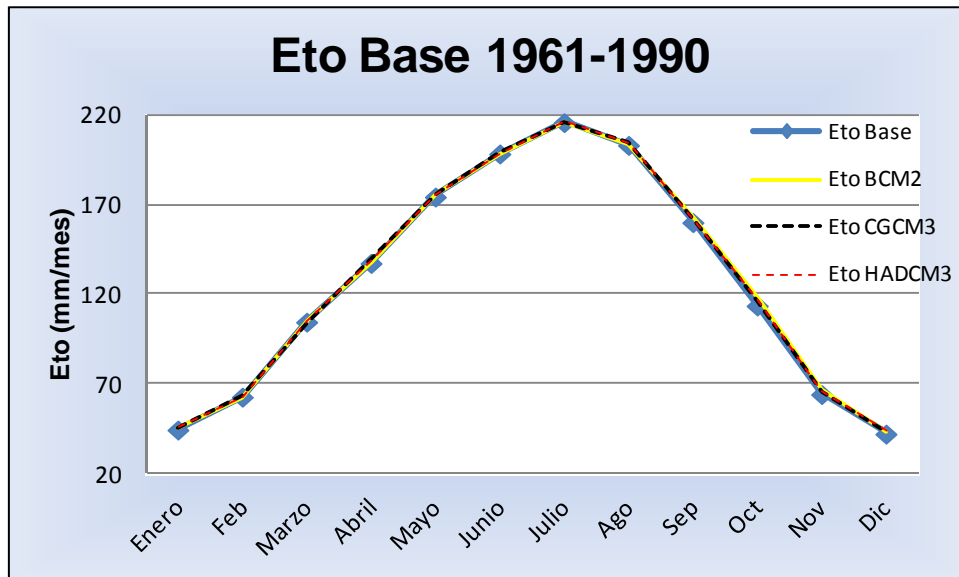


Figura 27. Resultados de ETo para el período base 1961-1990 y los modelos BCM2, CGCM3 y HADCM3.

Las estimaciones de ETo para los períodos 2020s y 2050s obtenidos a partir de las proyecciones de los modelos regionales de cambio climático se presentan en la tabla 5.15. En esta tabla se observa un aumento de ETo para todos los meses del año, ya sea utilizando el escenario A2 ó B1. En el período base se tiene una ETo de 1524.18 mm/año y, el aumento más significativo, de 1599.01 mm/año, se da en los 2020s con el modelo CGCM3 y escenario de emisiones A2. El aumento más bajo se da con el modelo BCM2 y escenario de emisiones B1 con 1571.65 mm/año. En los 2050s los resultados de ETo son mayores con respecto al período base y varían de 1658.46 a 1598.28 mm/año. Estos aumentos de ETo para el Valle de Mexicali son, sin duda, de mucho interés, en primera instancia para el sector agrícola, ya que estos aumentos de ETo pueden afectar o modificar el ciclo que se maneja para los distintos tipos de cultivos, una modificación práctica consistiría cambiar en los patrones de fecha de siembra de los cultivos; además, surge la necesidad de utilizar más agua para suplir la pérdida por los aumentos de Eto.

Tabla 5.15 Resultados de ETo para el período 2020s y 2050s.

	1961-1990	A2 2020s			A2 2050s			B1 2020s			B1 2050s		
	Eto Base	BCM	CGCM	HADCM3	BCM	CGCM	HADCM3	BCM	CGCM	HADCM3	BCM	CGCM	HADCM3
	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)
Enero	44.8	48.2	47.8	47.4	48.7	50.1	49.5	48.7	47.7	49.0	48.1	48.9	49.2
Feb	63.1	65.4	66.1	65.2	65.5	68.7	67.0	65.0	65.9	66.3	65.6	66.8	68.2
Marzo	104.9	108.5	109.3	108.7	111.5	114.4	112.8	108.4	109.0	108.3	110.4	111.9	113.3
Abril	137.6	144.7	145.4	142.4	145.1	150.7	149.0	144.4	144.5	144.8	144.9	146.5	146.6
Mayo	174.6	180.5	182.2	180.9	183.5	189.4	186.0	178.6	182.8	178.7	184.1	184.0	184.5
Junio	198.5	202.1	205.7	204.8	206.8	209.9	215.5	200.9	203.3	204.0	205.9	207.7	207.9
Julio	216.0	222.2	223.1	220.9	224.8	229.9	229.7	221.7	222.4	225.4	223.9	225.7	229.0
Ago	203.3	207.8	212.8	211.0	213.3	220.2	218.5	206.5	211.6	215.3	210.7	215.8	216.4
Sep	160.3	164.6	168.1	171.1	170.0	176.0	175.6	166.6	168.4	169.3	168.5	172.2	174.6
Oct	113.9	121.8	123.4	124.7	123.6	129.2	127.8	120.1	123.7	120.5	122.1	126.3	126.6
Nov	64.6	68.6	69.6	69.2	69.6	72.5	71.3	66.9	68.9	67.4	68.7	71.2	71.2
Dic	42.6	43.8	45.4	45.4	46.4	47.5	47.4	44.0	45.3	44.9	45.4	46.5	46.4
Total	1524.2	1578.0	1599.0	1591.8	1608.7	1658.5	1649.9	1571.7	1593.4	1593.9	1598.3	1623.4	1633.8

Los resultados obtenidos de evapotranspiración para cada período se utilizan como insumos con el fin de crear una relación con los posibles cambios en las necesidades hídricas para la agricultura en el Valle de Mexicali. Se eligieron los tres cultivos principales en la región: trigo, alfalfa y algodón. En la tabla 5.16 se presentan los datos obtenidos de la Comisión Nacional del Agua para el ciclo hidrológico 2009-2010, sobre el número de hectáreas regadas (m^3) y el agua entregada (m^3/ha) para los tres cultivos elegidos.

Tabla 5.16 Datos para los tres principales cultivos en el Valle de Mexicali de hectáreas regadas y agua entregada para cada cultivo CONAGUA (2010).

Cultivos	Hectáreas Regadas	Agua Entregada m^3	m^3/ha
Trigo	70,619	560,144,000	7,932
Alfalfa	23,223	311,741,000	13,424
Algodonero	10,228	132,059,000	12,912

Adicionalmente se tiene información de un estudio realizado en el Valle de Mexicali por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), respecto a las necesidades hídricas para el cultivo de trigo, alfalfa y algodón (tabla 5.17). Estos resultados de INIFAP reportados por Guzmán et al, (2008) presentan magnitudes similares a los obtenidos en este trabajo.

Tabla 5.17 Resultados de evapotranspiración para los tres principales cultivos en el Valle de Mexicali.

		mm/ciclo		
	CICLO	ETc INIFAP	ETc Base	ETc Modelada
TRIGO	dic-may	571.3	425.7	426.4
ALFALFA	ene-dic	1892.9	1591.5	1521.7
ALGODON	mar-sep	1053.1	1036.3	1001.3

Los datos obtenidos de CONAGUA sobre consumo de agua por hectárea y los resultados de evapotranspiración son una parte muy importante para la estimación de la necesidad hídrica para los cultivos en el Valle de Mexicali tomando en cuenta los escenarios climáticos futuros. Debido a que los cultivos se manejan por ciclos agrícolas estos se discutirán de acuerdo a esa temporalidad.

5.3.2.1 Trigo Ciclo Otoño- Invierno (Diciembre-Mayo).

En la tabla 5.18 se presentan los resultados para el trigo. Se observa que se tienen cambios importantes en los consumos de agua por hectárea lo que puede repercutir en su disponibilidad, ya que la asignación de agua para el ciclo 2009-2010 es de 7,932 m³/ha (CONAGUA, 2010), y la ETc calculada para el período base es de 425.7 mm/ciclo que es la suma de los valores del mes de diciembre a mayo. Los aumentos de ETc propician mayor consumo de agua por hectárea, que es la base para la discusión y análisis de los potenciales aumentos en los consumos de agua.

Así, los cambios de consumos estimados para el período de los 2020s, proyectan aumentos de 7,932 m³/ha a 8,344 m³/ha, es decir se requerirían 402 m³/ha de agua adicional para satisfacer las necesidades hídricas de este cultivo con el modelo CGCM3 y escenario de emisiones A2. Para este mismo período el aumento menor es de 8,238 m³/ha con el modelo HADCM3 escenario A2; es decir, se requieren aproximadamente 307 m³/ha adicionales de agua para satisfacer las necesidades proyectadas del cultivo. Para los 2050s el mayor aumento es de 8,691 m³/ha con el modelo CGCM escenario A2 y el mínimo de 8,356 m³/ha con el modelo BCM escenario

B1, es decir se requerirán 759 m³/ha y 349 m³/ha, respectivamente, de agua adicional para satisfacer las necesidades del cultivo.

Tabla 5.18 Cambios de necesidades hídricas en trigo por hectárea

base 1961-1990	ETc base (mm/ciclo)		Consumo de agua por hectárea (m ³)					
	425.7		7,932					
	A2 2020-2039		A2 2040-2069		B1 2020-2039		B1 2040-2069	
	ETc (mm/ciclo)	Consumo /ha	ETc (mm/ciclo)	Consumo /ha	ETc (mm/ciclo)	Consumo /ha	ETc (mm/ciclo)	Consumo /ha
BCM	444.9	8,290.2	450.8	8,399.2	444.4	8,281.0	448.5	8,356.3
CGCM	447.8	8,344.4	466.4	8,691.0	446.1	8,311.5	454.4	8,466.0
HADCM3	442.2	8,238.7	459.6	8,562.7	446.8	8,324.6	457.9	8,532.3

5.3.2.2 Cultivo de Alfalfa: Ciclo perenne (Enero-Diciembre).

En la tabla 5.19 se presentan los resultados para el cultivo de alfalfa; también se observan cambios importantes en los consumos de agua por hectárea. Así, la disponibilidad en este cultivo disminuirá, tomando en cuenta que para el ciclo 2009-2010 la asignación de agua fue de 13,424 m³/ha (CONAGUA, 2010). La ETc calculada para el período base es de 1,591 mm/ciclo. Como se mencionó para el trigo, los aumentos de ETc generan un mayor consumo de agua por hectárea.

Los resultados para los 2020s indican aumento de 13,424 m³/ha a 14,921 m³/ha. Así, se requerirían 1497 m³/ha adicionales de agua para satisfacer las necesidades hídricas de este cultivo con el modelo CGCM3 y escenario de emisiones A2. Para este mismo período el requerimiento más bajo es de 14,658 m³/ha; con el modelo BCM escenario B1 es decir, se requieren aproximadamente 1234 m³/ha adicionales para cubrir las necesidades del cultivo. Para los 2050s el requerimiento total más alto es de 15,469 m³/ha con el modelo CGCM escenario A2 y el más bajo de 14,912 m³/ha con el BCM escenario B1; es decir se requerirán 2,045 m³/ha y 1,488 m³/ha adicionales, respecto al período base, para satisfacer las necesidades del cultivo, respectivamente.

5.3.2.3 Cultivo del Algodón: Primavera-Otoño (Marzo-Septiembre).

En la tabla 5.20 se presentan los resultados de algodón, donde al igual que con los anteriores cultivos se tienen importantes aumentos en los consumos de agua por hectárea. Estos aumentos se estiman considerando el consumo de agua asignado para

el ciclo 2009-2010 de 12,912 m³/ha (CONAGUA, 2010) y el resultado de ETc para el período base de 1,000.6 mm/ciclo. Como se ha señalado para los anteriores cultivos, los aumentos de ETc propician mayor consumo de agua por hectárea, lo que inducirá potenciales aumentos en los consumos del recurso hídrico.

Tabla 5.19 Cambios de necesidades hídricas en alfalfa por hectárea

base 1961-1990	ETc base (mm/ciclo)		Consumo de agua por hectárea (m ³)					
	1591.5		13,424					
	A2 2020-2039		A2 2040-2069		B1 2020-2039		B1 2040-2069	
	ETc mm/ciclo	Consumo /ha	ETc (mm/ciclo)	Consumo /ha	ETc (mm/ciclo)	Consumo /ha	ETc (mm/ciclo)	Consumo /ha
BCM	1745.7	14,724.8	1778.7	15,003.2	1737.9	14,658.8	1767.9	14,912.0
CGCM	1769.0	14,921.0	1834.0	15,469.6	1762.7	14,867.8	1795.4	15,143.7
HADCM3	1760.9	14,853.1	1824.8	15,391.7	1762.5	14,866.7	1807.2	15,243.2

Estos cambios de consumos para los 2020s podrían aumentar de 12,916 m³/ha a 13,459.8 m³/ha; es decir, se requerirían 547.8 m³/ha adicionales para satisfacer las necesidades hídricas de este cultivo con el modelo CGCM3 y escenario de emisiones A2. Para este mismo período el requerimiento total más bajo es de 13,234 m³/ha; con el modelo BCM escenario es decir, se requieren aproximadamente 322 m³/ha de agua adicional para satisfacer las necesidades en el ciclo del cultivo. Para los 2050s el requerimiento total más alto es de 13,911.6 m³/ha con el modelo CGCM escenario A2 y el más bajo de 13,470 m³/ha, con el modelo BCM escenario B1 es decir se requerirán 999.6 m³/ha y 558 m³/ha adicionales de agua por hectárea para satisfacer las necesidades del cultivo, respectivamente.

Tabla 5.20 Cambios de necesidades hídricas en algodón por hectárea

base 1961-1990	ETc base (mm/ciclo)		Consumo de agua por hectárea (m ³)					
	1000.6		12,912					
	A2 2020-2039		A2 2040-2069		B1 2020-2039		B1 2040-2069	
	ETc mm/ciclo	Consumo /ha	ETc (mm/ciclo)	Consumo /ha	ETc (mm/ciclo)	Consumo /ha	ETc (mm/ciclo)	Consumo /ha
BCM	1029.6	13,286.0	1048.8	13,533.5	1025.6	13,234.7	1043.9	13,470.8
CGCM	1043.1	13,459.8	1078.1	13,911.6	1038.7	13,403.3	1056.0	13,626.2
HADCM3	1035.6	13,363.8	1076.0	13,884.0	1042.3	13,449.7	1062.1	13,705.5

Se puede ver que para los tres cultivos en el Valle de Mexicali hay aumentos de ETc los cuales propician claramente aumentos en los consumos de agua. Estos resultados son de suma importancia debido a que el agua con la que se cuenta en el Valle de

Mexicali ya está asignada para los distintos usuarios, como se indicó en el capítulo 2 (tabla 2.7). De este modo, sería difícil aumentar la oferta de agua para los cultivos del Valle de Mexicali, ya que además en los resultados de los estudios de proyecciones realizados en la cuenca del Río Colorado (Christensen et al., 2004; Hidalgo et al., 2009, Miller et al., 2008, Christensen et al., 2007, Miller et al., 2003, IPCC 2007) se mencionan que las entregas de agua a México se pueden ver reducidas por los efectos del cambio climático.

5.4 Implicaciones del cambio climático sobre el recurso hídrico y el tratado de aguas internacionales.

Los resultados obtenidos con este estudio sobre los aumentos de temperatura lo que implica el aumento de evapotranspiración, esto para la agricultura involucra la necesidad de mayor cantidad de agua para satisfacer la necesidad natural para el desarrollo del cultivo. La magnitud de esta demanda hídrica proyectada en este estudio muestra para los tres cultivos de referencia: trigo, alfalfa y algodón, un aumento de la demanda para los 2020s del 12% y para los 2050s de 19%, tomando como base el consumo anual de estos cultivos, que para el ciclo 2009-2010 fue de 1,003 hm³ CONAGUA (2010). Los resultados obtenidos, proyectan que la entrega pactada entre México y Estados Unidos de 1,850 hm³/año puede verse afectada por los cambios de clima. Los resultados que se presentan en el estudio de Christensen et al (2007) son: se proyecta para el período de los 2020s (2010-2039) con el escenario B2 una reducción en la entrega a 1,780 hm³/año, para el período de los 2050s (2040-2069) a 1,720 hm³/año y en el período de los 2080s (2070-2099) a 1,750 hm³/año. Con el escenario A2 se proyectan que las entregas a México serán de 1,780 hm³/año, 1,630 hm³/año y 1,620 hm³/año para los tres periodos anteriores, respectivamente.

Capítulo VI Conclusiones y Recomendaciones

Los principales resultados se enlistan a continuación:

1. Con la finalidad de mostrar el contraste en las proyecciones climáticas en la cuenca del Río Colorado, en el caso de los Modelos de Circulación General se utilizó un escenario de altas emisiones de gases de efecto invernadero (A2), y uno de bajas emisiones (B2). Para los Modelos Regionales se utilizaron los escenarios de emisiones A2 y B1, de altas y bajas emisiones, respectivamente. A partir del análisis de esta información se puede concluir que:
 - a) Los Modelos de Circulación General presentaron aumentos de temperatura a lo largo de la cuenca del Río Colorado, siendo los incrementos más elevados en la región alta de la cuenca.
 - b) La precipitación presentó anomalías positivas y negativas. Aún con la incertidumbre en estos modelos las proyecciones indican un desbalance hídrico en la cuenca que pondría en riesgo la cantidad de agua que se envía a México.
2. Respecto a los resultados más importantes obtenidos de los Modelos Regionales para el Valle de Mexicali, se encontraron, respecto al período base, incrementos de temperatura, destacándose lo siguiente: a) para los 2020s, con el escenario de emisiones A2, el incremento mensual varía de 0.8°C a 2.8°C, mientras que a nivel anual el incremento promedio de los tres modelos es de 1.5°C; b) para los 2020s, con el escenario de emisiones B1, el incremento mensual varía de 0.6°C a 2.5°C, y a nivel anual el incremento promedio de los tres modelos es de 1.4°C; c) para los 2050s, con el escenario de emisiones A2, el incremento mensual varía de 1.3°C a 4.0°C, mientras que a nivel anual el incremento promedio obtenido de los tres modelos es de 2.5°C; d) para los 2050s, con el escenario de emisiones B2, el incremento mensual varía de 1.2°C a 3.3°C, y a nivel anual el incremento promedio de los tres modelos es de 2.1°C. Estos resultados están acorde con las investigaciones realizadas a lo largo de la cuenca del Río Colorado. Para la precipitación, con los tres modelos regionales,

y ambos escenarios de emisiones (A2 y B1) se presentan anomalías mensuales, tanto negativas como positivas. Uno de los problemas inherentes en esta variable es que para un mismo mes, pero con diferente modelo, se obtuvieron resultados contradictorios. De manera general se puede comentar que en meses que habitualmente llueve en el valle de Mexicali, como son los meses de invierno, podría decrecer su volumen, tanto para los 2020s, como para los 2050s. La incertidumbre de los resultados encontrados en la precipitación no permite saber si las anomalías encontradas con los diferentes modelos afectarían el balance hídrico del Valle de Mexicali.

3. El impacto más importante en el recurso hídrico, analizado en términos de la evapotranspiración (ET), es que, respecto al escenario base, en el que se tiene un total acumulado de 1524.18 mm, en un escenario climático de altas emisiones (A2), para los 2050s, la ET se incrementará un 9%, mientras que para un escenario de bajas emisiones (B1), para el mismo período, el incremento se estima en un 7%. Si se supone que no hay cambio en las condiciones actuales de precipitación, por la incertidumbre asociada en los escenarios analizados, el balance relativo de los factores de temperatura y evapotranspiración descritos, conducirá inevitablemente a que haya menor humedad en el suelo y menor agua superficial como para que organismos o ecosistemas en el valle de Mexicali puedan subsistir en el futuro.
4. Por los aumentos previstos en la evapotranspiración, se encontró que algunos cultivos económicamente importantes como el trigo, algodón y alfalfa demandarían una mayor cantidad de recurso hídrico para satisfacer su ciclo completo, lo que generaría un déficit de agua. Bajo la premisa de una asignación del volumen de agua constante o incluso a la baja según el Tratado Internacional del 1944 este déficit de agua se traducirá en una reducción de hectáreas cultivadas. Los resultados que se obtuvieron, por los aumentos de la ETo fueron: a) para el trigo puede generar una reducción máxima de 3,187 ha para los 2020s con el modelo CGCM, y escenario de emisiones A2, y de 6,757 ha para el periodo de los 2050's; b) para el algodón se pueden generar una reducción

máxima de 1,591 ha para los 2020s con el modelo CGCM, y escenario de emisiones A2, y de 2,026 ha para el periodo de los 2050's; c) para la alfalfa se pueden generar una reducción máxima de 2,589 ha para los 2020s con el modelo CGCM, y escenario de emisiones A2, y de 3,559 ha para el periodo de los 2050's.

Las recomendaciones que surgen de este estudio son:

- 1) Es obvio que los sistemas de observación hidrológico y climático actual no se diseñaron específicamente para detectar cambio climático o sus efectos sobre los recursos hídricos por lo que un aspecto importante para realizar estudios confiables en el futuro es la de fomentar el fortalecimiento, o la creación, de redes de monitoreo de información, tanto de variables hídricas, como climáticas.
- 2) Hacer más eficientes los sistemas de riego mediante su tecnificación en el Valle de Mexicali; esto se debe hacer trabajando conjuntamente con el gobierno municipal y estatal estableciendo estrategias para la implementación para todos los usuarios. Teniendo programa estratégicos para generar líneas de financiamiento para la aplicación de la tecnificación.
- 3) Cambios en los tipos de cultivos que se manejan en la región.
- 4) Cambios en los calendarios de siembra para los cultivos de la región.
- 5) Mejorar o utilizar variedades de cultivos resistentes al estrés térmico hídrico y que soporten temperaturas mayores a las que se presentan actualmente.

Capítulo VII Bibliografía

Aldube P., Neri C., Szlafsztein C., 2008. Hacia la evaluación de prácticas de adaptación ante la variabilidad y el cambio climático, ISBN 978-85-88998-23-0.

Allen R., Pereira L., Raes D., and Smith M., 2006. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudios FAO Riego y Drenaje 56, Roma.

AMP (Adaptive Management Program), 2011. Disponible online: <http://www.gcdamp.gov/aboutamp/crb.html>, [noviembre 2011].

Bates, B., Kundzewicz Z., Wu S. y Palutikof J., 2008. El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, 224 pp.

BOULDER CANYON PROJECT ACT, 1928. US Bureau of Reclamation. Disponible online: <http://www.usbr.gov/lc/region/pao/pdfiles/bcpact.pdf>, [15 de abril 2010].

Cambio climático 2001: Mitigación, Resumen Técnico. Informe del Grupo de Trabajo III del IPCC, Ginebra, Suiza, 84 pp.

Christensen N. S. and Lettenmaier D. P., 2007. A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River Basin.

Christensen N., Wood A., Voisin N., Lettenmaier D., Palmer R., 2004. The Effects of Climate Change on the Hydrology and Water Resources of the Colorado River Basin. Climatic Change, 62, 337–363.

Colorado River Compact, 1922. US Bureau of Reclamation. Disponible online: <http://www.usbr.gov/lc/region/pao/pdfiles/crcompct.pdf> [abril 2010].

Comisión Internacional de Límites de Agua (CILA), 1944. Tratado sobre Distribución de aguas internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América. Disponible online <http://www.sre.gob.mx/cila/> [noviembre 2010]

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2007. Programa Nacional Hídrico 2007 – 2012. Comisión Nacional del Agua, SEMARNAT, México.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2010. Informe de distribución de aguas 2009/2010. Dirección de Infraestructura Hidroagícola, Distrito de Riego 014 Río Colorado.

Conde C., 2003. Cambio y Variabilidad Climáticos. Dos Estudios de Caso en México. Tesis para obtener el doctorado en Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de México.

Conde C., Estrada F., Martínez B., Gay C., 2011. Regional Climate Change Scenarios for Mexico. *Atmosfera* 24, 1:125-140

Flessa K., Onken J., Zamora F., 2009. Design and artwork by Colleen Hench Colorado River Delta, Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson, Arizona.

Guzmán R., Valenzuela S., Félix V., Jiménez T., Ruiz C., 2008. Necesidades hídricas de los principales cultivos en el estado de Baja California. Folletos técnicos. CEMEXI, CIRNO, INIFAP, SAGARPA.

Hidalgo, Das, Dettinger, Cayan, Pierce, Barnett, Bala, Mirin, Wood, Bonfils, Santer, and Nozawa, 2009. Detection and Attribution of Streamflow Timing Changes to Climate Change in the Western United States.

Houghton J., Meira F., Griggs K., 1997. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el segundo informe de evaluación del IPCC, Documento técnico II del IPCC Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 51 pp.

Hurkmans R., Troch P., Uijendoet R. and Torfs P., Durcik M., 2009. Effects of Climate Variability on Water Storage in the Colorado River Basin. American Meteorological Society.

IPCC, 1995. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: Síntesis del Segundo Informe de Evaluación del IPCC sobre la información científica y

técnica pertinente para interpretar el Artículo 2 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Segundo Informe de Evaluación.

IPCC, 2000. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: Informe especial del grupo de trabajo III, escenarios de emisiones, resumen para responsables políticos.

IPCC, 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 pp.

Landa R., Magaña V., & Neri C., 2008. Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático. Instituto Nacional de Ecología, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Luecke D., Pitt J., 1999. El Delta una vez más: Restaurando el hábitat ribereño y los humedales del delta del Río Colorado.

Lynd L., Cayan D., Franco G, Hanemann M., and Croes B., 2006. Our Changing Climate Assessing the Risks to California, A Summary Report from the California Climate Change Center.

Magaña R. V., 2010. Guía para Generar y Aplicar Escenarios Probabilísticos Regionales de Cambio Climático en la toma de decisiones. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. 70 pp.

Martínez J., Fernández A., 2004. Cambio Climático: una visión desde México, Instituto Nacional de Ecología, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 521 pp.

Maurer E., 2007. Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios Climatic Change 82:309–325.

Maurer E., Brekke T., Pruitt, and Duffy P., 2007. Fine-resolution climate projections enhance regional climate change impact studies, Bias-corrected and spatially downscaled climate projections derived from CMIP3 data and served. Disponible online: http://gdo-dcp.ucllnl.org/downscaled_cmip3_projections/, [10 Nov. 2010]

Miller N., Bashford K., and Strem E., 2003. Potential Impacts of Climate Change on California Hydrology. *J. of the American Water Resources Association*. 39(4):771-784.

Miller W., Piechota T., 2008. Regional Analysis of Trend and Step Changes Observed in Hydroclimatic Variables around the Colorado River Basin. *American Meteorological Society*.

Morita T., Nakicenovic N. and Robinson J., 2000. Overview of mitigation scenarios for global climate stabilization based on new IPCC emission scenarios, *Environmental Economics and Policy Studies*.

Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grübler A., Yong T., Kram T., Lebre E., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Riahi K., Roehrl A., Rogner H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., Rooijen V., Nadejda V., Dadi Z., 2000. Escenarios de emisión. Informe especial para IPCC.

Nakicenovic, N., Alcamo J., Davis G., Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grübler A., Yong T., Kram T., Lebre E., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Riahi K., Roehrl A., Rogner H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., Rooijen V., Nadejda V., Dadi Z., 2000b. *Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 pp. Available online at: http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/emission/index.htm[abr il 2010].

NAS (National Academy of Sciences), 2007: *Committee on the Scientific Bases of Colorado River Basin Water Management*, National Research Council ISBN: 0-309-

10525-0, 222 pages, Colorado River Basin Water Management: Evaluating and Adjusting to Hydroclimatic Variability, Disponible online: <http://www.nap.edu/catalog/11857.html> [22 abril 2010].

Nicholas S. 2007. The Economics of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 692 pp.

PECC (Programa Especial de Cambio Climático), 2008. Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012. DOF 28/08/2009.

Proyecto Canadiense para Escenarios de Impacto Climático (CCIS, por sus siglas en ingles). Disponible online: <http://www.cics.uvic.ca/scenarios/data/select.cgi> [Octubre 2010].

Pulwarty R., Jacobs K. and Dole R., 2005. The hardest working river: drought and critical water problems on the Colorado. Drought and Water Crises: Science, Technology and Management.

Reporte Técnico de la Universidad Autónoma de México UNAM, 2009. El cambio climático y las cuencas hidrológicas.

Román C. y Ramírez J., 2003. Interdependent Border Water Supply Issues: The Imperial and Mexicali Valleys. The U.S.-MEXICAN Border Binational Water Management Planning. San Diego State University Press. P. 95-144.

Samaniego M., 2008. El control del Río Colorado como factor histórico. P. 53-54..

SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2008. Reporte sobre las acciones de México de mitigación y adaptación ante el cambio climático global. Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental, México, Versión X.

Southern Nevada Water Authority, 2010. Disponible online: http://www.snwa.com/html/spanish/esp_colorado.html [Octubre 2010].

The National Academies, 2008. Understanding and responding to climate change, pag. 12.

U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Upper Colorado Region and Lower Colorado Region, Revised December 2004, Colorado River System Consumptive Uses and Losses Report 1996-2000. Disponible online: <http://www.usbr.gov/uc/library/envdocs/reports/crs/crsul.html>, [abril 2010].

Upper Colorado River Basin Compact, 1948: US Bureau of Reclamation. Disponible online: <http://www.usbr.gov/lc/region/pao/pdf/ucbsnact.pdf>, [abril 2010].

US Bureau of Reclamation, supreme corte of the United States No. 8, original state of Arizona, plaintiff v. state of California, et al., defendant. Disponible online: <http://www.usbr.gov/lc/region/pao/pdf/supctdec.pdf>, [abril 2010].

Vicuna S., Maurer E., Joyce B., Dracup J., and Purkey D., 2007. The Sensitivity of California Water Resources to Climate Change Scenarios. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 43(2):482-498. DOI: 10.1111Vj.l752-1688.2007.00038.

Wilby R. and Dawson C., 2007. SDSM 4.2- A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. 94 pp.

Zermeño D., 2008. Análisis probabilístico de escenarios escalados de precipitación y temperatura bajo cambio climático en México. Tesis de Maestría en Ciencias. UNAM 83pp.