



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

El cambio climático y la dinámica de procesos hidrológicos en la cuenca  
Lerma-Chapala

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería

**Presenta**

Gerardo Núñez González

**Dirigido por:**

Dr. Aldo Ivan Ramírez Orozco

**Co-dirigido por:**

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos

Santiago de Querétaro, Querétaro  
Julio de 2012



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Doctorado en Ingeniería

El cambio climático y la dinámica de procesos hidrológicos en la cuenca  
Lerma-Chapala  
**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería

**Presenta:**

Gerardo Núñez González

**Dirigido por:**

Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco

**Co-dirigido por:**

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos

SINODALES

Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco  
Presidente

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos  
Secretario

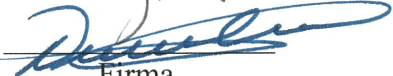
Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez  
Vocal

Dr. Miguel A. Domínguez Cortazar  
Suplente

Dr. Alfonso Gutiérrez López  
Suplente

  
Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad

  
Firma

  
Firma

**RÚBRICA**  
Firma

  
Firma

**RÚBRICA**  
Firma

  
Dr. Irineo Torres Pacheco  
Director de Investigación y Posgrado

# **Resumen**

En este trabajo se presenta un análisis de la problemática actual del sector hídrico de la cuenca Lerma-Chapala poniendo especial atención en la problemática adicional que podría darse de acuerdo con los efectos del cambio climático. Lo anterior con el objetivo de determinar los mecanismos que favorecen la vulnerabilidad del sector hídrico de la cuenca. Para ello se hace un análisis de sensibilidad de los principales procesos hidrológicos que influyen en la disponibilidad del agua, a saber, evapotranspiración y escurrimiento. Además, se hace un análisis de la vulnerabilidad a partir de la relación existente entre la disponibilidad de agua en la cuenca y la demanda de los distintos usuarios. Los resultados obtenidos muestran que tanto la evapotranspiración como el escurrimiento son sensibles a los cambios propuestos por los escenarios de cambio climático, encontrando que en el caso de la evapotranspiración se pueden dar aumentos que en promedio están alrededor del 10% de acuerdo con el escenario A2, mientras que en el caso del escurrimiento se pueden esperar disminuciones de hasta un 8 % del escurrimiento con base en el escenario A2 y aumentos del mismo del 1.5% tomando como base el escenario B1, todo ello a nivel global. Las tendencias encontradas en el caso del escurrimiento resultaron estadísticamente significativas con un nivel de significancia menor o igual al 5%. Además se encontró una fuerte variabilidad interanual la cual a nivel global puede causar disminuciones en la disponibilidad entre 100 y 600 hm<sup>3</sup>/año. A nivel subcuenca los escenarios muestran que el escurrimiento puede disminuir hasta en un 21.5% respecto del valor histórico con base en el escenario A2 y aumentar en un 14.7% de acuerdo con el escenario B1. Por otro lado, se encontró que los factores que favorecen la vulnerabilidad en la cuenca son tanto naturales como sociales, encontrando que la mayor vulnerabilidad social se da en la zona del Alto Lerma seguida del Medio Lerma la cual es impulsada por una alta concentración de población y por la falta de cobertura en los servicios de agua potable y alcantarillado. De acuerdo con los resultados obtenidos es notoria la necesidad de establecer estrategias y medidas de adaptación enfocadas al aumento de la disponibilidad de agua en la cuenca o al control de la demanda en la misma.

(Palabras clave: **cambio climático, adaptación, procesos hidrológicos, cuenca Lerma-Chapala**)

# ***Summary***

This study presents an analysis of the current problems of the water sector in the Lerma-Chapala basin paying special attention to the effects of climate change. The objective of the study was to determine the mechanisms which propitiate the vulnerability of the water sector in the basin. The methodology consisted in a sensitivity analysis of the hydrological processes which affects the water availability, i.e. evapotranspiration and runoff. In addition, an analysis of vulnerability based on the relationship between water availability and demand was made. Results show that both the evapotranspiration and runoff are sensitive to the changes proposed by climate change scenarios, finding that in the case of the evapotranspiration in average can be given increases about 10% under scenario A2, while in the case of runoff can be expected decreases of up to 8% based on A2 scenario and increases of 1.5% based on B1 scenario. The trends founded for runoff were statistically significant with a significance level less than or equal to 5%. It was also founded a strong interannual variability which can cause at basin level decreases in availability between 100 and 600 hm<sup>3</sup>/year. At subbasin level the scenarios show that runoff may decrease by up to 21.5% based on the historical value according to scenario A2 and increase by 14.5% under scenario B1. On the other hand, it was founded that the factors allowing the vulnerability in the basin are both natural and social, finding that most of the vulnerability occurs in the Upper Lerma region followed by Middle region. The vulnerability in these regions is driven by a high concentration of population and by the lack of coverage in the water supply and sewerage. According to the results it is evident the need for adaptation strategies aimed at increasing the availability of water in the basin or aimed to the control of the water demand.

**(Key words: climatic change, adaptation, hydrologic processes, Lerma-Chapala basin)**

# ***Dedicatorias***

*A Lupita,  
a mis Padres,  
a mis Hermanos  
y a todas las personas que me apoyaron en la  
realización de esta etapa de mi formación académica.*

# ***Agradecimientos***

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico recibido y a todas las personas que me apoyaron durante el transcurso de mis estudios, así como en la realización y evaluación de este trabajo.

# Índice

	Página
<b>Resumen</b>	<b>i</b>
<b>Summary</b>	<b>ii</b>
<b>Dedicatorias</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>iv</b>
<b>Índice</b>	<b>v</b>
<b>Índice de cuadros</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Capítulo 1</b>	<b>1</b>
Introducción	1
<b>1.1 Antecedentes</b>	1
1.1.1 Impactos del cambio climático en los procesos hidrológicos	1
1.1.2 Adaptación al cambio climático en el sector hídrico	3
<b>1.2 Justificación</b>	3
<b>1.3 Descripción del problema</b>	5
<b>1.4 Hipótesis</b>	6
<b>1.5 Objetivos</b>	6
1.5.1 General	6
1.5.2 Específicos	6
<b>Capítulo 2</b>	<b>7</b>
Revisión de literatura	7
<b>2.1 Panorama general del Cambio Climático</b>	7
<b>2.2 El Cambio Climático y los recursos hídricos</b>	11
2.2.1 <i>Precipitación</i>	12
2.2.2 <i>Evaporación</i>	12
2.2.3 <i>Escurrimiento</i>	13
2.2.4 <i>Humedad del suelo</i>	13
<b>2.3 El Cambio Climático en México</b>	14
<b>2.4 El cambio climático y los recursos hídricos en México</b>	17
<b>2.5 Vulnerabilidad ante el Cambio Climático</b>	18
<b>2.6 Adaptación al Cambio Climático</b>	23
<b>2.7 Adaptación al Cambio Climático en el sector hídrico</b>	25
2.7.1 <i>Experiencias en la adaptación al Cambio Climático en el sector hídrico</i>	27
2.7.2 <i>Factores determinantes de la capacidad de adaptación</i>	28
<b>Capítulo 3</b>	<b>30</b>
Metodología	30
<b>3.1 Descripción del área de estudio</b>	30
<b>3.2 Caracterización del sector hídrico de la cuenca Lerma-Chapala</b>	33
<b>3.3 Análisis de la disponibilidad de agua ante el cambio climático</b>	35
<b>3.4 Análisis de los factores que favorecen la vulnerabilidad del sector hídrico</b>	41
<b>3.5 Identificación de medidas para la adaptación al cambio climático</b>	50

<b>Capítulo 4</b>	<b>52</b>
Resultados y discusión	52
<b>4.1 Caracterización del sector hídrico de la cuenca Lerma-Chapala</b>	<b>52</b>
4.1.1 Disponibilidad de agua en la cuenca	52
4.1.2 Situación de los usos del agua en la cuenca	54
<b>4.2 Análisis de la disponibilidad de agua ante el cambio climático</b>	<b>56</b>
4.2.1 <i>Análisis de sensibilidad de la evapotranspiración</i>	56
4.2.2 <i>Análisis de sensibilidad del escurrimiento</i>	61
4.2.3 <i>Análisis de la disponibilidad natural ante el cambio climático</i>	64
<b>4.3 Análisis de los factores que favorecen la vulnerabilidad del sector hídrico</b>	<b>71</b>
<b>4.4 Identificación de medidas para la adaptación al cambio climático</b>	<b>82</b>
<b>Capítulo 5</b>	<b>92</b>
Conclusiones	92
5.1 Limitaciones del estudio	96
5.2 Nuevas líneas de investigación	97
<b>Literatura citada</b>	<b>98</b>
<b>Apéndice</b>	<b>108</b>
<b>A.</b>	<b>108</b>
a.1 Escenarios de Temperatura por subcuenca	109
a.2 Escenarios de Precipitación por Subcuenca	114
a.3 Escenarios de Escurrimiento por Subcuenca	119
a.4 Distribución de frecuencia acumulada del escurrimiento por subcuenca	129
a.5 Gráficas del índice de vulnerabilidad social por subcuenca	134



# Índice de cuadros

<b>Cuadro</b>		<b>Página</b>
1	Subcuencas que forman parte de la cuenca Lerma-Chapala	33
2	Estaciones utilizadas para el análisis de sensibilidad de la evapotranspiración	37
3	Modelos utilizados para la construcción de escenarios	42
4	Pendiente de la tendencia lineal observada en los escenarios de cambio climático a nivel subcuenca	44
5	Indicadores utilizados para determinar el índice de vulnerabilidad social	49
6	Porcentaje de cambio en $ET_0$ debido a un incremento en múltiples parámetros	59
7	Pendiente de la tendencia lineal observada en el escurrimiento natural con base en los escenarios de cambio climático a nivel subcuenca	67
8	Estadísticos descriptivos del porcentaje de variación anual del escurrimiento natural bajo las condiciones de cambio climático respecto del escurrimiento natural histórico observado en la cuenca	69
9	Probabilidad de no exceder el escurrimiento histórico de acuerdo con los escenarios de cambio climático	70

# Índice de Figuras

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1	Localización de la cuenca Lerma-Chapala	30
2	Proporción de pertenencia de la cuenca a cada uno de los Estados que la conforman	31
3	Localización de las estaciones utilizadas para el análisis de sensibilidad de la evapotranspiración	38
4	Anomalías de temperatura promedio para la cuenca de acuerdo al ensamble para los escenarios COM, A1B, A2 y B1	43
5	Anomalías de precipitación para la cuenca de acuerdo con el ensamble para los escenarios COM, A1B, A2 y B1	43
6	Relación hipotética entre la disponibilidad y la demanda de agua en una cuenca	45
7	Demanda global anual de agua por sector, periodo 1900-2000	48
8	Disponibilidad natural media en la cuenca Lerma-Chapala	54
9	Demanda de agua por sector usuario en la cuenca Lerma-Chapala	55
10	Aportación por fuente de abasto para la satisfacción de la demanda	56
11	Sensibilidad de la evapotranspiración respecto a un cambio en la temperatura, humedad relativa, radiación y velocidad del viento (Enero-Junio)	57
12	Sensibilidad de la evapotranspiración respecto a un cambio en la temperatura, humedad relativa, radiación y velocidad del viento (Julio-Diciembre)	58
13	Sensibilidad del escurrimiento y del coeficiente de escurrimiento respecto a un cambio en la precipitación anual	61
14	Sensibilidad del escurrimiento y del coeficiente de escurrimiento respecto a un cambio en la precipitación mensual (Enero-Junio)	62
15	Sensibilidad del escurrimiento y del coeficiente de escurrimiento respecto a un cambio en la precipitación mensual (Julio-Diciembre)	63
16	Disponibilidad natural de agua en la cuenca Lerma-Chapala de acuerdo con los escenarios de cambio climático	65
17	Comportamiento de la precipitación y escurrimiento superficial generado en la cuenca Lerma-Chapala durante el periodo 1992-2007	66
18	Distribución de frecuencia acumulada del escurrimiento bajo las condiciones de cambio climático	70
19	Comportamiento de la demanda de los usos agrícola y público urbano para el periodo 1940-2000	72
20	Análisis de la relación disponibilidad-demanda en la cuenca Lerma-Chapala bajo la hipótesis de crecimiento limitado	73
21	Comportamiento de la demanda y de su cambio por unidad de tiempo bajo la hipótesis de crecimiento limitado	74
22	Comportamiento de la demanda bajo las condiciones de cambio climático para los escenarios COM y A1B	77

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
23	Comportamiento de la demanda bajo las condiciones de cambio climático para los escenarios A2 y B1	78
24	Comportamiento de la demanda y su derivada bajo las condiciones de cambio climático para los escenarios COM y A1B	79
25	Comportamiento de la demanda y su derivada bajo las condiciones de cambio climático para los escenarios A2 y B1	80
26	Índice de vulnerabilidad social en la cuenca Lerma-Chapala años 1995 y 2000	81
27	Índice de vulnerabilidad social en la cuenca Lerma-Chapala año 2005	82
28	Tendencia de la demanda de agua en la cuenca para el año 2025 para los escenarios a) COM y A1B, y b) A2 y B1	83
29	Tendencia de la demanda de agua del uso público urbano en la cuenca para el año 2100 para los escenarios a) COM y A1B, y b) A2 y B1	85
30	Análisis de sensibilidad de la demanda de agua en la cuenca ante un cambio en la dotación de los usuarios: agrícola y público urbano	86

# **Capítulo 1**

## **Introducción**

### **1.1 Antecedentes**

El calentamiento global se ha vuelto un tema familiar para mucha gente y se ha convertido en uno de los tópicos ambientales más importantes en nuestros días (IPCC, 2001; Houghton, 2005). Algunos de los efectos que se espera sean producidos por el cambio climático tienen que ver con la alteración de la temperatura y la precipitación media, su distribución estacional, posibles incrementos en la intensidad de la precipitación, incrementos en la evapotranspiración y pérdidas de humedad del suelo, cambios en la cobertura vegetal, cambios en el uso y manejo de la tierra, derretimiento de glaciares, riesgos de incendio, incrementos en el nivel del mar, elevados niveles de dióxido de carbono en la fisiología de las plantas, etc. (IPCC, 2001; Goudie, 2006; Lehner *et al.*, 2006).

#### **1.1.1 Impactos del cambio climático en los procesos hidrológicos**

El agua es una de las principales fuentes de vida sobre la Tierra; sin embargo, su distribución en nuestro planeta es muy variada, ya que podemos encontrar lugares donde este recurso es muy abundante mientras que existen otros donde la escasez de este vital líquido es muy marcada. En este sentido, el ciclo hidrológico juega un papel muy importante en la circulación y conservación del agua en nuestro planeta.

El agua forma parte de todos los componentes del sistema climático (atmósfera, hidrosfera, criósfera, biosfera y superficie terrestre), de tal manera que los cambios ocurridos en el clima tienen un efecto directo en ella a través de diferentes mecanismos. En forma general, el ciclo hidrológico es sensible a los cambios de temperatura y al balance de radiación atmosférica (Bates *et al.*, 2008). Los principales cambios asociados con el ciclo hidrológico que se espera ocurran como producto del cambio climático son: cambios en los patrones de precipitación, y de eventos extremos como sequías e inundaciones (Bates *et al.*, 2008; May, 2008; Sheffield y Wood, 2008), cambios en la duración y magnitud de los escurrimientos y la carga de sedimentos (Marshall y Randhir, 2008), e incrementos en la evapotranspiración y en la humedad del suelo (Bates *et al.*, 2008). El signo y la magnitud de estos efectos pueden presentar una alta variabilidad dependiendo de las características propias de cada lugar.

En América Latina, las proyecciones realizadas con diferentes modelos climáticos indican que para el año 2100 se presentará un aumento de temperatura entre 1°C y 4°C para el escenario de emisiones B2\*, y de 2°C a 6°C para el escenario A2†. Como puede observarse, actualmente se mantiene una alta incertidumbre sobre las tasas de cambio que pueden ser esperadas, pero es claro que estos cambios se incrementarán y se manifestarán en forma importante y tangible (Kart y Trenberth, 2003; Held y Soden, 2006).

Bajo este contexto, la estimación de los posibles efectos del calentamiento global sobre los recursos hídricos a nivel regional o a nivel de cuenca con el propósito de mejorar la toma de decisiones y la prevención de efectos que se extiendan a la economía se vuelve necesaria (Sato *et al.*, 2006).

---

\* Escenario con énfasis en soluciones sustentables locales en los sectores económico, social y ambiental, y una tasa de crecimiento de población más baja que el escenario A2.

† Escenario que contempla un mundo heterogéneo con un crecimiento continuo de la población.

### 1.1.2 Adaptación al cambio climático en el sector hídrico

Actualmente son pocos los países que han incluido dentro de sus planes y programas de manejo de recursos hídricos las estrategias de adaptación al cambio climático, esto es debido a que tales estrategias representan un cambio en la forma en la que son llevados a cabo los procedimientos y métodos para la administración y manejo de estos recursos (Bates *et al.*, 2008). Aquí, es muy importante resaltar la importancia que tiene el que las estrategias de adaptación sean definidas no sólo por los responsables de administrar los recursos hídricos, sino también por los usuarios directos del agua, incluyendo a la industria, agricultores y a la población en general, ya que son estos últimos los encargados de implementar tales estrategias. En la formulación de las estrategias de adaptación al cambio climático el principal objetivo que se persigue, es minimizar los efectos negativos y tratar de potenciar los posibles efectos positivos que pudieran generar beneficios a la sociedad, sin embargo, la realización de estos objetivos en ocasiones es un tanto difícil ya que se tienen que evaluar de forma conjunta las implicaciones que estas medidas traerán de manera conjunta en las áreas ecológica y física, técnica, operativa, política y social, económica y cultural de la región donde se planean utilizar (IPCC, 2001).

## 1.2 Justificación

En México el cambio climático se ha convertido en un tema prioritario para las comunidades académica y científica, prueba de ello son los trabajos que han sido realizados por Mundo y Martínez (1993, 1994), Jauregui (1995, 1997), Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez (1998), Gay *et al.* (2004), Conde *et al.* (2006, 2011), Mendoza *et al.* (2006), Sánchez *et al.* (2008), Gutiérrez-García y Ricker (2011), Martínez *et al.* (2011), Monterroso *et al.* (2011), Prieto-González *et al.* (2011), Sánchez *et al.* (2011), Martínez y Patiño (2012), entre otros. Sin embargo, no existen muchos estudios de este tipo enfocados a la cuenca Lerma-Chapala aunque si hay iniciativas en progreso para atender mejor este asunto.

Hoy en día, los expertos señalan que la cuenca Lerma-Chapala atraviesa por una crisis debida a la escasez de agua, cuyas principales manifestaciones son la sobreexplotación de los acuíferos y la contaminación (Boehm-Schoendube *et al.*, 2002), lo que podría empeorar debido a las alteraciones originadas por el cambio climático, el acelerado y desordenado crecimiento demográfico, la destrucción de fábricas naturales de agua, así como la contaminación provocada por actividades industriales, agrícolas y sociales (Martínez, 2008).

La cuenca Lerma-Chapala ha sido objeto del desarrollo de un número considerable de trabajos (Boehm-Schoendube y Sandoval-Manzo, 1999; Ramos-Osorio y Wester, 2000; Wester *et al.*, 2001; Boehm-Schoendube *et al.*, 2002; Vargas-Velázquez, 2003; Sotelo *et al.*, 2005; Aparicio *et al.*, 2006) cuyo objetivo principal ha sido el diagnóstico de la cantidad y calidad del agua que circula por ella, así como de la problemática existente ante la escasez y contaminación que se ha venido dando en años recientes. Sin duda, el gran reto en la cuenca Lerma-Chapala no sólo es conservar los recursos naturales para incrementar la generación de agua dulce, sino también modificar y hacer más eficientes los procesos en los que el agua se utiliza para poder asignar más equitativamente este recurso entre el funcionamiento natural de los ecosistemas por un lado y las necesidades extractivas de la sociedad por el otro.

De esta manera, es importante estudiar cuales serán los posibles efectos provocados por el cambio climático en la forma como se desarrollan los procesos hidrológicos y en la forma como se utilizan los recursos hídricos en la cuenca Lerma-Chapala, y así contar con un escenario base para la evaluación de estrategias de adaptación en la búsqueda de un mejor manejo de los recursos hídricos, lo cual puede contribuir a la solución de los problemas planteados en las Tercera y Cuarta Comunicaciones Nacionales ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático por el Instituto Nacional de Ecología, y en el Programa Nacional Hídrico 2007-2012 de la Comisión Nacional del Agua.

### 1.3 Descripción del problema

Para el planteamiento del problema de investigación, este trabajo se basa en las premisas que se exponen a continuación:

- Actualmente es bien conocido que el cambio climático es una realidad, y qué de no tomar las medidas necesarias sus efectos pueden aumentar drásticamente en los próximos años (IPCC, 2001; Houghton, 2005; Sato *et al.*, 2006).
- Existe una fuerte interconexión entre el clima y el ciclo hidrológico, lo que hace a este último, altamente sensible a los efectos del cambio climático (Semarnat, 2006; Lehner *et al.*, 2006; Sato *et al.*, 2006).
- La cuenca Lerma-Chapala atraviesa por una fuerte crisis debida a la escasez de agua (Boehm-Schoendube *et al.*, 2002; Semarnat, 2006; Martinez, 2008).
- Los resultados obtenidos de la modelación de escenarios al 2020-2025 indican que la cuenca Lerma-Chapala-Santiago es una de las más vulnerables a los efectos del cambio climático en el sector hídrico (Semarnat, 2006).
- Las políticas de manejo de los recursos hídricos de una cuenca pueden tener una influencia sustancial sobre los efectos esperados del cambio climático en los sectores ecológico, económico y social.

Bajo el contexto anterior, nuestro problema de investigación se centra en la identificación de los mecanismos que favorecen la vulnerabilidad en el sector hídrico de la cuenca Lerma-Chapala para contar con una base sólida para el establecimiento de medidas de adaptación que puedan ser incluidas en los planes de manejo de los recursos hídricos de la cuenca; para ello se plantean la siguiente hipótesis y objetivos.



## **1.4 Hipótesis**

El conocimiento de los mecanismos que favorecen la vulnerabilidad del sector hídrico de la cuenca Lerma-Chapala constituye la base para el establecimiento de las medidas de adaptación necesarias en los planes de manejo de los recursos hídricos de la cuenca.

## **1.5 Objetivos**

### 1.5.1 General

Determinar los mecanismos que favorecen la vulnerabilidad en el sector hídrico de la cuenca Lerma-Chapala para contar con una base sólida para el establecimiento de medidas de adaptación para los planes de manejo de los recursos hídricos de la cuenca.

### 1.5.2 Específicos

- Analizar la sensibilidad de la disponibilidad de agua ante los escenarios de cambio climático en la cuenca.
- Determinar los factores adicionales al cambio climático que favorecen la vulnerabilidad en la cuenca.
- Analizar la interacción de los factores que determinan la vulnerabilidad del sector hídrico de la cuenca.
- Identificar los tipos de estrategias y medidas de adaptación al cambio climático que pudieran aplicarse en la cuenca.

# **Capítulo 2**

## **Revisión de literatura**

### **2.1 Panorama general del Cambio Climático**

El clima depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja. A diferencia del concepto tradicional de clima, como el promedio de alguna variable, hoy en día se piensa en éste como un estado cambiante de la atmósfera, mediante sus interacciones con el mar y el continente en diversas escalas de tiempo y espacio. De acuerdo con Lozano (2004) y Magaña (2004), cuando un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura sale de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos (inestabilidades en la atmósfera y/o el océano) o forzamientos externos (cambios en la intensidad de la radiación solar recibida o incluso cambios en las características del planeta producto de la actividad humana).

Desde la aparición del primer informe del IPCC en 1990, el tema del calentamiento global se ha vuelto familiar y se ha convertido en una de las preocupaciones más importantes en nuestros días (IPCC, 2001; Houghton, 2005). El fenómeno del calentamiento global fue reconocido por primera vez por el científico francés Jean-Baptiste Fourier en 1827 (Houghton, 2005), pero fue hasta el año de 1860 cuando el científico británico John Tyndall pudo medir la absorción de radiación infrarroja por el dióxido de carbono y el vapor de agua, lo cual lo llevó a sugerir que una posible causa de la edad de hielo pudo haber sido la disminución del efecto invernadero del dióxido de carbono (Houghton, 2005).

El clima de la tierra depende en gran medida del flujo continuo de energía procedente del sol. Cerca del 30% de esta energía se dispersa inmediatamente y vuelve al espacio, mientras que la mayor parte del 70% restante atraviesa la atmósfera para calentar la superficie terrestre. Para mantener el balance de energía a largo plazo, la Tierra debe regresar hacia la atmósfera una cantidad similar de energía. Sin embargo, la Tierra al ser más fría que el sol no emite energía como luz visible, sino como radiación infrarroja o térmica.

El efecto invernadero natural producido por algunos de los gases que componen la atmósfera, impide que la radiación infrarroja pueda escapar directamente hacia el espacio, provocando que la temperatura superficial de la Tierra sea mayor ( $\sim 15^{\circ}\text{C}$ ) a la esperada de acuerdo al balance de energía ( $-6^{\circ}\text{C}$ ) lo cual resulta favorable para el desarrollo de la vida que conocemos.

El aumento en los niveles de los gases de efecto invernadero puede resultar en cambios importantes en el sistema climático, ya que la temperatura superficial debe ajustarse para mantener el balance de energía en equilibrio. El ajuste de la temperatura puede incluir un calentamiento global de la superficie de la Tierra y la capa inferior de la atmósfera, así como la cobertura de las nubes y los patrones de circulación de los vientos (IPCC, 2001; Houghton, 2005).

De acuerdo con el IPCC, el cambio climático se refiere al estado del clima que puede ser identificado por cambios en su variabilidad sobre periodos de tiempo prolongados (IPCC, 2001). De forma natural, el clima global ha presentado una serie de cambios desde la propia formación de la Tierra y el desarrollo de la atmósfera (Lange, 2008). Sin embargo, según los últimos informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, el clima está cambiando de tal forma que los cambios ocurridos no pueden ser atribuidos únicamente a la variabilidad natural (IPCC, 2001). A este respecto, las evidencias apuntan a que el cambio climático actual tiene su origen en actividades humanas. La quema de

combustibles fósiles, la deforestación o la agricultura intensiva resultan en alteraciones de la composición atmosférica que gradual pero consistentemente comienzan a reflejarse en el clima (IPCC, 2001; Magaña *et al.*, 2004).

Si los cambios en la temperatura global registrados desde la era preindustrial son producidos principalmente por el incremento de los gases de efecto invernadero, es evidente que en el futuro inmediato, el clima global dependerá de la capacidad de las sociedades para limitar o disminuir el consumo de combustibles fósiles y en general, de controlar las emisiones de los gases de efecto invernadero, así como de crear condiciones para que sean absorbidos mediante procesos naturales (Martínez, 2008).

Debido a que la emisión de gases de efecto invernadero depende de variables sociales y económicas, el IPCC construyó cuatro familias de escenarios para la evaluación de los impactos producidos por el cambio climático, cada una de ellas fundamentada en una descripción de las condiciones en las que posiblemente se encuentre el mundo en el futuro. Estas familias de escenarios son conocidas como A1, A2, B1 y B2 (IPCC, 2001).

La familia de escenarios A1 describe un mundo caracterizado por un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su máximo a mediados del presente siglo, empieza a declinar a partir de entonces y adopta tecnologías más eficientes. Esta familia de escenarios se subdivide conforme a las tecnologías a usar: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), con fuentes alternas de energía (A1T), y con un balance entre diferentes fuentes de energía (A1B).

La familia A2 se refiere a un mundo venidero caracterizado por un incremento continuo de la población, aunque con un crecimiento económico mucho menor que en los escenarios A1. Los escenarios A2 son pesimistas en cuanto a que se mantiene un elevado aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, en particular de dióxido de carbono.

Los escenarios de la familia B1 comprende un futuro en el que la población al igual que en los escenarios de la familia A1, alcanza su máximo a mediados del siglo XXI, con un crecimiento económico acelerado, pero orientado a los servicios y las tecnologías de la información, con un uso menor de materias primas y con un aprovechamiento sustentable de los recursos, pero aún sin tomar medidas específicas respecto al clima.

Por último, los escenarios B2 describen un porvenir en el que se asumieron previsiones locales y regionales, para la protección del medio ambiente, con un crecimiento de la población menor que en los escenarios A1 y B1. Este escenario se percibe muy optimista, tal como se han observado las tendencias hasta ahora. Cabe mencionar que en ninguno de los escenarios se asume el cumplimiento pleno de los compromisos tanto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, como los de Kioto.

Alrededor del mundo se han observado y documentado cambios en el comportamiento del clima, los resultados de las investigaciones realizadas muestran que desde finales del siglo XIX se ha observado un incremento en la temperatura del aire entre 0.4 y 0.8°C (IPCC, 2001; Zang *et al.*, 2008).

En América Latina, los cambios en el clima durante el último siglo han incluido un aumento de la temperatura media de la superficie terrestre, particularmente en latitudes medias y altas, así como cambios en las cantidades e intensidades de la precipitación en varios países de la región (GIECC, 2000). El problema del cambio climático, desde el punto de vista del desarrollo de un país o de una región, cobra sentido cuando se considera la manera como las anomalías en el clima afectan a los sectores socio-económicos (Magaña *et al.*, 2004).

## 2.2 El Cambio Climático y los recursos hídricos

Desde las primeras investigaciones sobre cambio climático se observó que la modificación de la temperatura media del planeta acarrearía impactos importantes en el ciclo hidrológico, ya que de ella dependen varias de sus componentes principales como son la precipitación y la evaporación, mismas que a su vez tienen efectos en el escurrimiento, en el contenido de humedad de los suelos y en la recarga de los acuíferos, principalmente (Vicuna y Dracup, 2007; Sheffield y Wood, 2008), lo que puede ocasionar impactos profundos en la disponibilidad de los recursos hídricos (Akhtar *et al.*, 2008; Elgaali *et al.*, 2007).

Como puede observarse, el agua es uno de los recursos que se plantea será afectado más severamente a futuro por el cambio climático (Minville *et al.*, 2008). Este tipo de conclusiones resultan de estudios que han mostrado que pequeñas perturbaciones en la cantidad y/o frecuencia de la precipitación pueden resultar en impactos significativos en los escurrimientos anuales medios (Whitfield y Cannon, 2000; Muzik, 2001). Más aún, autores como Christensen *et al.* (2004) mencionan que cambios pequeños en los escurrimientos pueden resultar en grandes cambios en su almacenamiento, lo cual tiene grandes repercusiones, ya que cualquier cambio ocurrido en el ciclo hidrológico afecta actividades como la producción agrícola (Akhtar *et al.*, 2008; Elgaali *et al.*, 2007), la generación de energía y el control de inundaciones (Xu y Singh, 2004).

Más allá de las tendencias promedio, los cambios en la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos tales como inundaciones y sequías pueden ser una de las consecuencias más importantes del cambio climático (Lehner *et al.*, 2006). En el caso de las sequías, Sheffield y Wood (2008) encontraron que el Mediterráneo, el oeste de África y las regiones centrales de Asia y América muestran grandes incrementos en la frecuencia de ocurrencia de sequías de largo plazo (más de 12 meses de duración). Como puede observarse, el cambio climático afecta a los recursos hídricos a través de numerosos mecanismos y de

distinta manera a cada una de las variables relacionadas con ellos como se muestra a continuación.

### 2.2.1 Precipitación

Como respuesta al cambio climático se espera que ocurran cambios importantes en la cantidad, intensidad, duración, tipo y estacionalidad de la precipitación, lo cual tiene un efecto directo en la producción de escurrimientos y la recarga de acuíferos (Goudie, 2006). La tendencia de la precipitación ha sido analizada utilizando diferentes bases de datos así como los resultados de la reconstrucción de datos de precipitación del pasado. Los resultados de estos análisis han mostrado que la precipitación, en general, incrementó durante el siglo XX entre las latitudes 30 y 85°N, mientras que en el caso de las latitudes 10°S a 30°N se observó un notable decremento ocurrido durante los pasados 30-40 años (Bates *et al.*, 2008). Asimismo, los resultados de estudios teóricos y de modelos climáticos sugieren que en un clima más caluroso, producto del calentamiento global, uno podría esperar un incremento mayor en la ocurrencia de eventos de precipitación extremos que en la media (Bates *et al.*, 2008).

### 2.2.2 Evaporación

Los pronósticos indican que los aumentos de temperatura producto del cambio climático incrementarán la tasa de evaporación, lo cual puede provocar tormentas convectivas más intensas (Elgaali *et al.*, 2007) así como la reducción de la humedad del suelo (Elgaali *et al.*, 2007; Mellander *et al.*, 2007). En décadas recientes se han encontrado tendencias decrecientes en las mediciones de evaporación realizadas en tanques evaporímetros en los Estados Unidos, India, Australia, Nueva Zelanda, China y Tailandia, aunque cabe mencionar que las tendencias observadas pueden ser causadas por una radiación solar superficial menor, así como por la disminución de las horas de sol, lo cual puede estar relacionado con el incremento de partículas contaminantes del aire y un aumento de la nubosidad (Bates *et al.*, 2008). En el caso de la evapotranspiración, las mediciones directas con las que se cuenta actualmente son muy limitadas para

realizar análisis de tendencias (Bates *et al.*, 2008). Sin embargo, en el Tercer informe del IPCC se reportó de acuerdo con los resultados publicados por Golubev (2001) que la evapotranspiración actual incrementó durante la segunda mitad del siglo XX sobre la mayor parte de las regiones secas de los Estados Unidos y Rusia (Bates *et al.*, 2008).

### 2.2.3 *Escurrecimiento*

Un gran número de estudios han examinado las tendencias potenciales de los escurrimientos durante el siglo XX tanto a escala de cuenca como a escala global (Bates, *et al.*, 2008). Bonell (1998), por ejemplo, observó que cualquier cambio en las características de la lluvia que favorece el aumento de su intensidad propicia la ocurrencia de escurrimientos y la erosión del suelo. De acuerdo con los estudios realizados por Labat *et al.* (2004) sobre series históricas de escurrimiento se puede esperar un aumento del mismo en un 4% por cada 1°C de aumento en la temperatura. Por otro lado, a escala regional, los resultados obtenidos por Milly *et al.* (2005) indican un incremento de 10-40% en los escurrimientos de la zona ecuatorial de África y en latitudes altas de Norte América y Eurasia, mientras que en el Sur de África y Europa, y las latitudes medias de Norte América se espera un decremento en los escurrimientos entre 10 y 30% para el año 2050. Sin embargo, estos resultados tienen que ser tomados con precaución, ya que los escurrimientos dependen en buena medida de otras variables como por ejemplo el cambio de uso de suelo, el cual puede incluso llegar a tener un mayor impacto en los escurrimientos que el provocado por las variaciones del clima.

### 2.2.4 *Humedad del suelo*

Datos históricos sobre el contenido de humedad del suelo medidos *in situ* están disponibles sólo para un número limitado de regiones y a menudo son de corta duración (Bates, *et al.*, 2008). Robock *et al.* (2005) encontraron a partir de una investigación realizada con las bases de datos más completas sobre humedad del suelo (~45 años) una tendencia positiva en la humedad del suelo para todo el periodo de observaciones, con una marcada tendencia en las últimas dos décadas.



### 2.3 El Cambio Climático en México

México comprende una región de extensa diversidad y variabilidad climática. Latitudinalmente, las partes centro y sureste del país están situadas en los trópicos y parte de la zona noreste en la región sub-tropical, generando como resultado, distintos climas entre la zona norte y la región central del país (Endfield, 2007). Las características topográficas presentes también ejercen una influencia importante en la variación del clima de México.

El clima de México está influenciado por la posición y fuerza de los sistemas de alta presión subtropical del Atlántico Norte y el noreste del océano Pacífico, así como por la ubicación de la zona de convergencia intertropical situada al sur del país (Mendoza *et al.*, 2007).

De esta manera, por su ubicación geográfica, topografía y aspectos socioeconómicos, México es especialmente vulnerable a los impactos de la variabilidad y el cambio climático (Magaña *et al.*, 2004). Los fenómenos de El Niño y La Niña, así como las condiciones hidrometeorológicas extremas han resultado en graves daños y desastres en diversos sectores socio-económicos del país (Semarnat, 2006).

El fenómeno de El Niño, en México se ha manifestado generalmente como un aumento en las lluvias invernales, principalmente en Baja California Norte y parte de Sonora. Sin embargo, la señal de El Niño en verano provoca una disminución generalizada de las lluvias en gran parte del país, lo que se puede ver reflejado en sequías y problemas por la falta de agua, como los ocurridos entre los años 1997-1998 donde la agricultura tuvo enormes pérdidas y se observó un récord en incendios forestales (Magaña *et al.*, 2004).

Desde 1994, en que se elaboró el denominado Estudio de País, México ha venido desarrollando un esfuerzo continuo de análisis sobre el cambio climático y

sus efectos en su territorio. El Estudio de País abarcó tres aspectos principales: inventarios de gases de efecto invernadero, escenarios de cambio climático y estudios de vulnerabilidad.

Además del Estudio de País, México ha presentado cuatro extensas Comunicaciones Nacionales ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. La primera de ellas fue publicada en 1997, la segunda en 2001, la tercera en 2006 y la cuarta en 2009. En la primera de ellas se reportó lo relativo a la vulnerabilidad y mitigación, esencialmente, los resultados del Estudio de País (Semarnap, 1997). La segunda se centró en los avances en el inventario de gases de efecto invernadero y en acciones de mitigación en el área forestal y en el sector energético (Semarnat, 2001). La tercera presentó una actualización del inventario de gases de efecto invernadero, así como estudios de mitigación y adaptación al cambio climático (Semarnat, 2006) y finalmente en la Cuarta Comunicación Nacional se presentan los avances logrados en materia de cambio climático a nivel País a partir de la publicación de la Tercera Comunicación Nacional (Semarnat, 2009). Otros esfuerzos han sido encaminados a la creación del Programa Especial de Cambio Climático (DOF, 2009) y la Estrategia Nacional de Cambio Climático (CICC, 2007).

En la Tercera Comunicación Nacional (Semarnat, 2006) se llegó a las conclusiones que se presentan a continuación, para ello se tomaron como base los resultados de los escenarios climáticos generados con ayuda de Modelos de Circulación General para los escenarios de emisión A2 y B2.

1. Es muy probable que el clima de México sea más cálido para los años 2020, 2050 y 2080 principalmente en el norte del país.
2. Se proyectan disminuciones en la lluvia, así como cambios en su distribución temporal respecto al escenario base de 1961-1990. Por ejemplo, se esperan reducciones de hasta 15% en regiones del centro y de

menos de 5% en la vertiente del Golfo de México, principalmente entre enero y mayo.

3. El ciclo hidrológico se volverá más intenso, por lo que aumentará el número de tormentas severas y la intensidad de los periodos de sequía.
4. Las componentes del ciclo hidrológico indican que en México cerca del 75% de la precipitación se pierde por evapotranspiración y 5% recarga los acuíferos. El balance hídrico sugiere que el aumento de temperatura hará que la evapotranspiración se incremente y la humedad del suelo disminuya. Las evaluaciones del IPCC indican que México puede experimentar una disminución significativa en el escurrimiento del orden del 10 al 20% a nivel nacional, y mayor al 40% en los humedales costeros del Golfo.
5. En el caso de los fenómenos extremos como los frentes fríos, es posible que estos se vuelvan menos frecuentes. Es incierto en qué medida dicha disminución podría afectar a las precipitaciones, pero se espera que éstas tiendan a disminuir principalmente en la vertiente del Golfo de México.
6. La temperatura de la superficie del mar en el Caribe, Golfo de México y Pacífico Mexicano podría aumentar entre 1 y 2°C. Con base en consideraciones físicas puede esperarse que aumente la eficiencia de los ciclones tropicales, favoreciendo las probabilidades de que éstos alcancen categorías mayores.
7. A partir del 2020, los mayores incrementos de temperatura se darán bajo el escenario A2 en comparación con el B2, debido principalmente a la diferencia de emisiones de gases de efecto invernadero entre ambos escenarios.

Mientras que en la cuarta comunicación nacional (Semarnat, 2009) se pone especial énfasis en las necesidades de investigación del país, de las cuales, las relacionadas con el tópico central de este trabajo tienen que ver con:

1. Evaluar impactos, vulnerabilidad, y desarrollo de medidas de adaptación en sectores prioritarios de México ante la variabilidad y el

cambio climático, así como de los fenómenos hidrometeorológicos extremos.

2. Evaluar las medidas de adaptación identificadas en cada uno de los sistemas y sectores, con el análisis de costos, beneficios, fortalezas, deficiencias, obstáculos, necesidades y factibilidad para su instrumentación.
3. Generar información sobre impactos y costo beneficio de medidas de adaptación ante el cambio climático en los centros de población.

## **2.4 El cambio climático y los recursos hídricos en México**

En México, a principios de los 90's se reconoció la importancia de analizar la influencia del cambio climático sobre los recursos hídricos del país, prueba de ello son los trabajos desarrollados por Mundo y Martínez (1993, 1994) donde en el primero de ellos presentan los principios que rigen el fenómeno del cambio climático y los principales efectos que podría ocasionar sobre los recursos hídricos, mientras que en el segundo presentan un análisis de los efectos potenciales sobre los recursos hídricos del Valle del Yaqui, Sonora, al ser considerado como una región donde el agua es escasa. En dicho estudio se encontró de acuerdo con los escenarios de cambio climático y los datos del observatorio de Guaymas que tanto la evapotranspiración potencial como la real podrían aumentar hasta en un 14%, lo cual traería como resultado mayores necesidades de agua para cubrir las demandas del sector agrícola. Por otro lado, Mendoza *et al.* (1997) encontraron a través de su estudio sobre la vulnerabilidad de las cuencas de México ante el cambio climático, que los impactos se manifestarían en general de forma negativa en la magnitud de los escurrimientos, la humedad del suelo, la evaporación y el nivel de aridez, sin embargo, también se encontró que en algunas regiones hidrológicas como la de las planicies de Campeche-Yucatán-Quintana Roo los efectos resultarían positivos. Asimismo, Mendoza *et al.* (2005) a través de su proyecto: Disponibilidad de agua superficial y vulnerabilidad de las cuencas hidrológicas Lerma-Santiago-Pacífico y Balsas ante

el cambio climático encontraron que más de la mitad de la región hidrológica Lerma-Santiago-Pacífico podría presentar una vulnerabilidad importante a la sequía prolongada debido a que 5 cuencas de esta región podrían presentar una disponibilidad natural media per cápita extremadamente baja, 3 cuencas una disponibilidad muy baja y otras 7 cuencas una disponibilidad baja, mientras que en el caso de la región hidrológica del Balsas, aunque con más incertidumbre, se encontró que las cuencas del Río Atoyac y del Río Grande de Amacuzac podrían presentar una disponibilidad natural media per cápita extremadamente baja. En años recientes, en estudios como el realizado por Sánchez-Cohen *et al.* (2008) se ha manifestado que los impactos del cambio climático pueden observarse en el sector agrícola, a partir de las superficies siniestradas por la sequía en zonas de temporal y a partir de la disminución del almacenamiento de agua para la agricultura en las zonas de riego, trayendo como resultado la emigración de la población de comunidades rurales. De la misma manera, Prieto *et al.* (2011) a través del análisis de variabilidad del índice de precipitación estandarizada, bajo las condiciones del escenario de cambio climático A2, encontraron que para el periodo 2000-2098 la tendencia en la mayor parte del territorio mexicano es hacia una condición seca, proyectando en promedio una sequía moderada para mediados del siglo XXI, seguida de una sequía severa para finales del mismo. Finalmente, en su estudio: Efectos del cambio climático en la disponibilidad del agua en México, Martínez y Patiño (2012) concluyen que como respuesta a los cambios pronosticados en la temperatura y la precipitación se observará una disminución en el escurrimiento superficial y la recarga de acuíferos, y por lo tanto, en la disponibilidad de agua, lo que se sumará al estrés hídrico que producirá el crecimiento poblacional y económico previsto para el siglo XXI. Donde por ejemplo, en la cuenca del Río Conchos se esperan disminuciones del escurrimiento de hasta un 23% en promedio.

## **2.5 Vulnerabilidad ante el Cambio Climático**

Desde los años 70 la evaluación de la vulnerabilidad se ha venido incrementado de manera importante (Romieu *et al.*, 2010), acentuándose los

últimos diez años (Patt *et al.*, 2009) debido principalmente al fenómeno del calentamiento global. En sus inicios tanto el concepto como las metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad fueron desarrollados en el área de manejo de riesgo, donde la vulnerabilidad era relacionada con el grado de pérdidas debidas a fenómenos naturales extremos (Romieu *et al.*, 2010). A pesar de que en décadas pasadas se ha desarrollado una cantidad importante de investigación sobre vulnerabilidad tanto desde la perspectiva de manejo de riesgo como del área de cambio climático, ambas comunidades han trabajado de forma más bien independiente, lo que ha llevado a la conceptualización de definiciones hasta cierta medida diferentes (Renaud y Perez, 2010). Algunos investigadores como Romieu *et al.* (2010) atribuyen estas diferencias a los objetivos perseguidos en cada área, ya que por un lado el objetivo final es la reducción de riesgos mientras que por el otro lado el objetivo es encontrar las opciones más eficientes de adaptación al cambio climático. Asimismo, las diferencias observadas en cuanto a la conceptualización de la vulnerabilidad han provocado que de manera similar existan diferentes metodologías para su evaluación (Hinkel, 2009).

A pesar de las diferencias existentes, en ambas comunidades se reconoce que la vulnerabilidad presenta tres dimensiones principales, siendo estas: social, económica y ambiental (Pine, 2009), las cuales en su conjunto definen la vulnerabilidad de un determinado sistema o sector. En un contexto histórico se pueden identificar dos generaciones de evaluaciones sobre vulnerabilidad (Füssel y Klein, 2006). En ellas se puede apreciar que el salto de las evaluaciones de impactos climáticos a la primera generación de métodos para la evaluación de la vulnerabilidad está caracterizado por tomar en cuenta los efectos de los impactos en la sociedad y por la consideración de opciones de adaptación potenciales, mientras que los métodos de segunda generación hacen una evaluación más profunda de la capacidad de adaptación de la sociedad, cambiando así la orientación de medidas de adaptación potenciales a medidas de adaptación posibles (Füssel y Klein, 2006).

Probablemente, la causa más importante por la que se le ha puesto especial atención a la vulnerabilidad en los últimos años es por el hecho de reconocer que el cambio climático global es de magnitud importante, ya que como se ha podido observar los cambios en el clima y en el uso de suelo ya están teniendo lugar y de acuerdo con algunos ejercicios de modelación, la naturaleza y magnitud de sus impactos podrían ser drásticos (Schroter *et al.*, 2005).

La vulnerabilidad desde el punto de vista del área de manejo de riesgo se refiere a la susceptibilidad o potencial de daño de los sistemas social, económico y ecológico. Expresada de otra manera, la vulnerabilidad es el resultado de la exposición a los peligros y la capacidad que tiene un determinado sistema o sector para hacerles frente y recuperarse (Pine, 2009). Con base en este enfoque, Landa *et al.* (2010) definen a la vulnerabilidad como la probabilidad de que una comunidad o grupo de personas expuestas a una amenaza o peligro puedan sufrir daños humanos y materiales según el grado de fragilidad de alguno de sus elementos como es el caso de la infraestructura, la vivienda, las actividades productivas y la organización para la prevención de desastres, entre otros. Dichos autores (Landa *et al.*, 2010), enfatizan el hecho de que la vulnerabilidad se construye más bien socialmente que ser un proceso natural, razón por la cual las decisiones y acciones humanas pueden cambiar las condiciones y los factores que vuelven a una sociedad vulnerable a determinadas amenazas o peligros. En este sentido, la Comisión Económica para América Latina (CEPAL, 2002) señala que la falta de crecimiento económico, la desigualdad, la existencia de marcos legales deficientes y las presiones demográficas son factores que elevan la vulnerabilidad ante la variabilidad climática.

Debido a las diferencias en cuanto a la conceptualización de la vulnerabilidad, Liverman (1990) notó que el término ha sido relacionado e incluso equiparado con conceptos tales como resiliencia, marginalidad, susceptibilidad, fragilidad y riesgo. Con el propósito de evitar confusiones, el IPCC ha refinado y reestructurado la definición de vulnerabilidad especialmente para su uso en el área

de cambio climático, quedando definida como *el grado al cual un sistema es susceptible o incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático incluyendo la variabilidad y los eventos extremos* (IPCC, 2001). Así, la vulnerabilidad está en función de tres factores principales: la exposición, la susceptibilidad y la capacidad de adaptación, los cuales pueden equipararse respectivamente con el impacto, la fragilidad y la capacidad para hacer frente a los efectos adversos ante un riesgo, elementos primordiales de la vulnerabilidad en el área de manejo de riesgos (Füssel y Klein, 2006). Como se puede observar a partir de las definiciones anteriores la vulnerabilidad al cambio climático comprende una gran variedad de causas y por lo tanto puede producir múltiples efectos (Patt *et al.*, 2009).

El conocimiento del grado de vulnerabilidad en diferentes poblaciones, regiones o sectores permite a los científicos y a los tomadores de decisiones, plantear estrategias para la anticipación a los impactos del cambio climático, así como desarrollar las medidas de respuesta apropiadas (Hinkel, 2009; Füssel y Klein, 2006). Así, el objetivo asumido comúnmente en las evaluaciones sobre vulnerabilidad es el de plantear alternativas para la adaptación que puedan ser empleadas por los tomadores de decisiones. Aunque para lograr tal fin las evaluaciones sobre vulnerabilidad se han desarrollado desde cuatro perspectivas principales, entre las que tenemos: mejorar la capacidad de adaptación, mitigar el problema, mejorar las desigualdades sociales, y obtener teorías sólidas sobre el fenómeno (Patt *et al.*, 2009).

Una característica crítica de la vulnerabilidad es que ésta no puede ser observada o medida directamente, sino más bien deducida (Patt *et al.*, 2009). Cutter *et al.* (2000) confirman que no existe una medida estándar para evaluar la vulnerabilidad, lo que se complica un poco más debido a que cada comunidad, sistema o sector a evaluar presenta características únicas que requieren el diseño de una metodología *ad hoc*, provocando de esta manera que no exista o sea muy



difícil el diseño de un método general para la evaluación de la vulnerabilidad (Hinkel, 2009).

Para evaluar la vulnerabilidad es necesario reunir una gran cantidad de información sobre los factores que la fomentan, tales como la dirección y magnitud del cambio climático, los factores de estrés social, así como los indicadores económicos que pueden incrementar o disminuir la capacidad de adaptación. Aunque ninguno de estos factores es propiamente una medida de la vulnerabilidad, sino más bien un indicador de ella, que al ser combinado con otros indicadores dan un panorama general del problema (Patt *et al.*, 2009).

Por el otro lado, la vulnerabilidad también ha sido evaluada a partir de los impactos y los efectos potenciales de los diferentes escenarios de cambio climático en una determinada comunidad, sistema o sector, los cuales son comparados con un escenario base de clima constante. Las evaluaciones basadas en impactos son típicas de muchos modelos de cambio global que estiman proyecciones referenciadas espacialmente donde se combinan las perspectivas tanto de las ciencias naturales como de las ciencias sociales (Füssel y Klein, 2006). De esta manera, de acuerdo con Füssel y Klein (2006) el enfoque más apropiado para evaluar la vulnerabilidad de un sector, o región específica que es sensible a las variaciones del clima depende del objetivo planteado, la rapidez con la que está ocurriendo la amenaza, los alcances espaciales y temporales del análisis, la confiabilidad de las proyecciones sobre los futuros impactos del clima, así como la disponibilidad de información y recursos, entre otros factores.

Con el propósito de evaluar la vulnerabilidad en el sector hídrico, ya sea de forma directa o indirecta principalmente se han establecido una serie de índices basados en enfoques holísticos con el propósito de involucrar tanto a las variables de naturaleza física, social y económica. Entre estos índices podemos encontrar el índice de pobreza hídrica (WPI por sus siglas en inglés) propuesto por Sullivan (2001, 2002), el índice de necesidades básicas desarrollado por Gleick (1996), el

indicador de estrés hídrico de Falkenmark (1989), el índice de disponibilidad de agua establecido por Meigh *et al.* (2004), entre otros, mismos que de manera indirecta ofrecen una medida de vulnerabilidad. Por otro lado, los métodos diseñados específicamente para medir la vulnerabilidad de los recursos hídricos incluyen el índice de vulnerabilidad de los recursos hídricos propuesto por Raskin *et al.* (1997) para el análisis a escala global, el índice de indicadores de la cuenca (EPA, 1997), el indicador de vulnerabilidad regional de los recursos hídricos ante el cambio climático utilizado en los Estados Unidos de Norteamérica por Hurd *et al.* (1999), y el índice de sostenibilidad de la cuenca de Chaves y Alipaz (2007), entre otros.

## **2.6 Adaptación al Cambio Climático**

A lo largo de la historia, la humanidad ha tratado de hacer frente a la variabilidad climática. En la antigüedad, las civilizaciones enfrentaban los problemas derivados del clima simplemente ubicando sus asentamientos en regiones donde la variabilidad de éste causara pocos problemas, por ejemplo, lejos de zonas inundables y cerca de fuentes de agua confiables. Por otro lado, desarrollaban sus actividades productivas y económicas de acuerdo a las condiciones naturales prevalecientes, para ello, por ejemplo, buscaban cultivos adaptables a las condiciones climáticas de sus regiones. Sin embargo, la presión demográfica y algunas fuerzas externas propiciaron que las personas migraran a zonas más propensas a la variabilidad climática, aceptando el riesgo que ello suponía, y por tanto, la búsqueda de nuevas formas para mitigar los daños causados por la variabilidad climática (van Beek, 2009).

La adaptación tiene sus orígenes en las ciencias naturales, particularmente en la biología evolutiva. En este campo, la adaptación se refiere al desarrollo de características genéticas o de comportamiento que permite a los organismos y/o sistemas hacer frente a los cambios ambientales con el fin de sobrevivir y reproducirse (Audesirk y Audesirk, 1997). En el área de las ciencias sociales la

adaptación es definida como un proceso de cambio como respuesta a las alteraciones ocurridas en el entorno físico o en componentes sociales como la demografía, economía y la organización (Denevan, 1983). Finalmente, en los estudios sobre cambio climático la adaptación se refiere a los ajustes en los sistemas ecológicos, sociales o económicos que se dan como respuesta a los estímulos climáticos, y se enfoca en los procesos, prácticas y estructuras que permiten moderar los daños potenciales o bien, aprovechar las oportunidades que pudiera presentar como tal el cambio climático (IPCC, 2001). De esta definición se desprende que la capacidad de adaptación tiene que ver con la flexibilidad de un sistema o sector para realizar los ajustes necesarios para hacer frente al cambio climático, condicionando así que la respuesta a los impactos sea reactiva (en el momento que ocurren los impactos), principalmente en sistemas o sectores con baja capacidad de adaptación, o preventiva (respuesta planeada) en sectores donde existen las condiciones idóneas para modificar los procesos, lineamientos y políticas actuales. Aún cuando las estrategias de adaptación preventivas sean las que prometen mayores posibilidades para la disminución de efectos dañinos producto del cambio climático a largo plazo, es necesario tomar en cuenta ambos tipos de medidas en el diseño de un plan de adaptación.

De esta manera, para el planteamiento de estrategias de adaptación se requiere una profunda reflexión sobre los recursos disponibles, así como también de la capacidad para utilizarlos de forma efectiva (Lim y Spanger-Siegfried, 2005). Sin embargo, esto no significa que las estrategias de adaptación por si solas sean capaces de solucionar todos los efectos del cambio climático, por lo tanto las medidas de mitigación son también necesarias (Parry *et al.*, 2007).

De acuerdo con el Marco de Políticas para la Adaptación al Cambio Climático: Desarrollo de Estrategias, Políticas y Medidas, publicado por el Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas (UNDP, por sus siglas en inglés) (Lim y Spanger-Siegfried, 2004), las fases a seguir para la elaboración de un programa de adaptación al cambio climático en cualquier sector son las siguientes:

1. Recopilación de información existente y generación de información faltante.
2. Evaluación del riesgo y/o vulnerabilidad actual.
3. Evaluación del riesgo y/o vulnerabilidad futura.
4. Formulación de estrategias y del plan de adaptación.
5. Consolidación de procesos de adaptación.

De la misma manera, la UNDP (Lim y Spanger-Siegfried, 2004) establece que para la evaluación de la vulnerabilidad tanto actual como futura es necesario definir indicadores cuantitativos y/o cualitativos en función de los factores clave que determinan la vulnerabilidad del sistema bajo análisis.

## **2.7 Adaptación al Cambio Climático en el sector hídrico**

El cambio climático amenaza con aumentar la presión sobre los recursos hídricos debido a un posible incremento en la variabilidad de las precipitaciones y los escurrimientos, así como en la distribución geográfica de los mismos (Kundzewicz *et al.*, 2007). De esta manera, los usuarios de los recursos hídricos así como las instituciones encargadas de administrarlos, deben establecer medidas de adaptación ante la variabilidad de los procesos del ciclo hidrológico, los cambios en la demanda y los efectos producidos por el cambio climático (Goulden *et al.*, 2009) con el propósito de satisfacer las necesidades humanas futuras.

Para evaluar la vulnerabilidad del sector hídrico es necesario tomar en cuenta tanto la disponibilidad de agua, así como la demanda debida a factores no climáticos tales como el crecimiento de la población, y los cambios en la demanda por sector usuario (Alcamo *et al.*, 2003; 2007; Arnell, 2004). Ya que por ejemplo, la demanda impulsada por el crecimiento económico y demográfico puede conducir a grandes cambios en la disponibilidad *per cápita* y a menudo puede llegar a tener

un mayor peso que los efectos de los cambios inducidos por el clima (Goulden *et al.*, 2009).

Dessai y Hulme (2007) concluyen en su trabajo que de acuerdo a las incertidumbres existentes en la predicción del clima y al hecho de que el clima es sólo uno de los factores que tienen influencia en las decisiones para la adaptación, es preferible que la toma de decisiones para la adaptación se base en un enfoque que evite una fuerte dependencia en las predicciones del clima, y en su lugar se evalúe la fortaleza de las decisiones de adaptación para un rango de posibles escenarios climáticos futuros.

En México, a partir de la realización de los talleres para la conformación de los planes estatales de acción ante el cambio climático se llegó a la conclusión de que es necesaria la implementación de las siguientes acciones para favorecer la adaptación en el sector hídrico ante el cambio climático:

- Generar información científica para profundizar en el conocimiento del fenómeno (SEMAHN, 2011).
- Invertir en estudios para el pronóstico temprano de eventos que conllevan riesgos (GEV, 2009).
- Establecer un marco institucional y legal adecuado para hacer frente al cambio climático (GEV, 2009).
- Administrar integralmente los recursos hídricos considerando los efectos del cambio climático (SDS, 2010).
- Mejorar la eficiencia de los organismos operadores (GEV, 2009).
- Fortalecer la infraestructura hidráulica y controlar los usos del agua (IEEG, 2011).
- Establecer mecanismos de comunicación permanente entre los sectores social, productivo y de gobierno (SEMAHN, 2011).
- Promover la conformación de comités permanentes para la prevención y recuperación de desastres (SEMAHN, 2011).

### 2.7.1 Experiencias en la adaptación al Cambio Climático en el sector hídrico

En el sector hídrico se han usado varias formas para distinguir entre los diferentes tipos de adaptación (Goulden *et al.*, 2009). Tompkins *et al.* (2009) distingue entre respuestas que generan capacidad de adaptación y acciones que establecen las medidas de adaptación. De Loë *et al.* (2001) se basan en la literatura de manejo de riesgo para categorizar los tres principales tipos de adaptación disponible en el sector hídrico de Canadá: 1) aceptar pérdidas, 2) prevenir efectos, o 3) cambiar usos y ubicaciones.

En su metodología para la elaboración de planes de adaptación en cuencas Aerts y Droogers (2004) utilizan un enfoque en el cual incluyen la participación de los tomadores de decisiones con el propósito de definir los principales factores que tienen influencia en los recursos hídricos así como en las decisiones administrativas y en la identificación de opciones de adaptación, para finalmente decidir los criterios de evaluación.

La adaptación al cambio climático en el sector hídrico puede involucrar el intercambio del recurso entre los diferentes usuarios, por ejemplo, para mantener la producción de energía o los caudales ecológicos (Kundzewicz *et al.*, 2007). Por otro lado, Tanaka *et al.* (2006) encontraron que la adaptación en el sistema de suministro de agua de California involucrará transferencias significativas entre los diferentes usuarios del agua, así como cambios en la extracción de agua de los acuíferos y la adopción de nuevas tecnologías.

Ragab y Prudhomme (2002) sugieren opciones de adaptación para regiones áridas y semiáridas que incluyen soluciones convencionales tales como la construcción de presas de almacenamiento y planes de riego, transferencias entre cuencas a través de redes de tubos y canales y la explotación de los acuíferos.

En el caso particular de México, se han desarrollado algunos esfuerzos para establecer planes de adaptación al cambio climático en el sector hídrico, los cuales comenzaron con el desarrollo del estudio para el establecimiento del plan de adaptación de la ciudad de Hermosillo, Sonora (Landa *et al.*, 2008). En dicho estudio se propusieron medidas para la adaptación por parte de los actores clave, entre las cuales se manejó la promoción de la cultura del agua, mejorar la eficiencia en el consumo del agua y establecer una mejor manera para manejar los eventos extremos de lluvia. De la misma manera, en el Estado de Tlaxcala se participó en un proyecto de acercamiento para la generación de capacidades para la adaptación en diversas regiones y sectores socio-económicos de países Mesoamericanos y de Cuba (Landa *et al.*, 2008). En dicho proyecto se observó la voluntad del Gobierno de México para facilitar la adaptación al cambio climático y hacer frente a los impactos que se podrían generar en sectores clave del país, como son el hídrico, el agrícola y el forestal. En el mismo sentido, a nivel nacional se está impulsando una estrategia para la creación de programas estatales de acción ante el cambio climático donde se analice la vulnerabilidad a nivel local y regional para de esta manera establecer las medidas de mitigación y adaptación necesarias. Como resultado de la estrategia mencionada se han observado avances importantes, los cuales han resultado en la creación de los planes de acción ante el cambio climático del Estado de Chiapas (SEMAHN, 2011), de la Ciudad de México (SMADF, 2008), del Estado de Guanajuato (IEEG, 2011), del Estado de Nuevo León (SDS, 2010), y del Estado de Veracruz (GEV, 2009), entre otros, mientras que los restantes se encuentran en proceso de su elaboración.

### *2.7.2 Factores determinantes de la capacidad de adaptación*

De acuerdo con los estudios sobre la capacidad de adaptación, en diferentes sistemas se han identificado varios factores que son determinantes de este proceso, pero que a su vez son específicos de cada sistema, sector y ubicación geográfica (Smit y Wandel, 2006). Ejemplos de estos factores incluyen: la tecnología disponible para la adaptación, la disponibilidad de recursos

económicos y su distribución, las estructuras institucionales y los criterios para la toma de decisiones en las mismas, el capital humano disponible y el manejo de la información, entre otros (Yohe y Tol, 2002).

Asimismo, han sido identificados cuatro tipos de límites o barreras para la adaptación en el sector hídrico (Kundzewicz *et al.*, 2007):

1. Existen muchas barreras físicas que limitan el desarrollo de algunas estrategias de adaptación.
2. Existen restricciones económicas cuando algunas opciones para la adaptación son consideradas muy costosas.
3. Existen barreras socio-políticas para la adaptación que tienen que ver con las actitudes de los tomadores de decisiones para proponer las opciones de adaptación, y finalmente
4. La capacidad de las instituciones que administran los recursos hídricos para promover o implementar las opciones de adaptación.

El manejo integrado de los recursos hídricos así como el manejo adaptativo del agua son vistos como enfoques disponibles para mejorar la capacidad de adaptación en el sector hídrico (Kundzewicz *et al.*, 2007), aunque en los países en vías de desarrollo existen barreras considerables para su implementación ya que dependen en gran medida de la capacidad que tienen las instituciones nacionales para adaptarse.

A nivel nacional, entre los factores determinantes de la capacidad de adaptación se han identificado los que tienen que ver principalmente con la organización social, con los múltiples cambios de autoridad en los diferentes niveles de Gobierno y con la dificultad que representa el diseño de estrategias de adaptación para realidades concretas debido principalmente a la incertidumbre observada en los escenarios de cambio climático (Landa *et al.*, 2008).



# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1 Descripción del área de estudio

La Cuenca Lerma-Chapala se ubica en la parte centro occidente de México (Figura 1), comprendiendo un área de 51,887 km<sup>2</sup> que representa aproximadamente el 3% de la extensión total del territorio nacional. Alberga al 11% de la población del país, y abarca parcialmente el territorio de cinco estados en las proporciones mostradas en la Figura 2 (DOF, 2006).

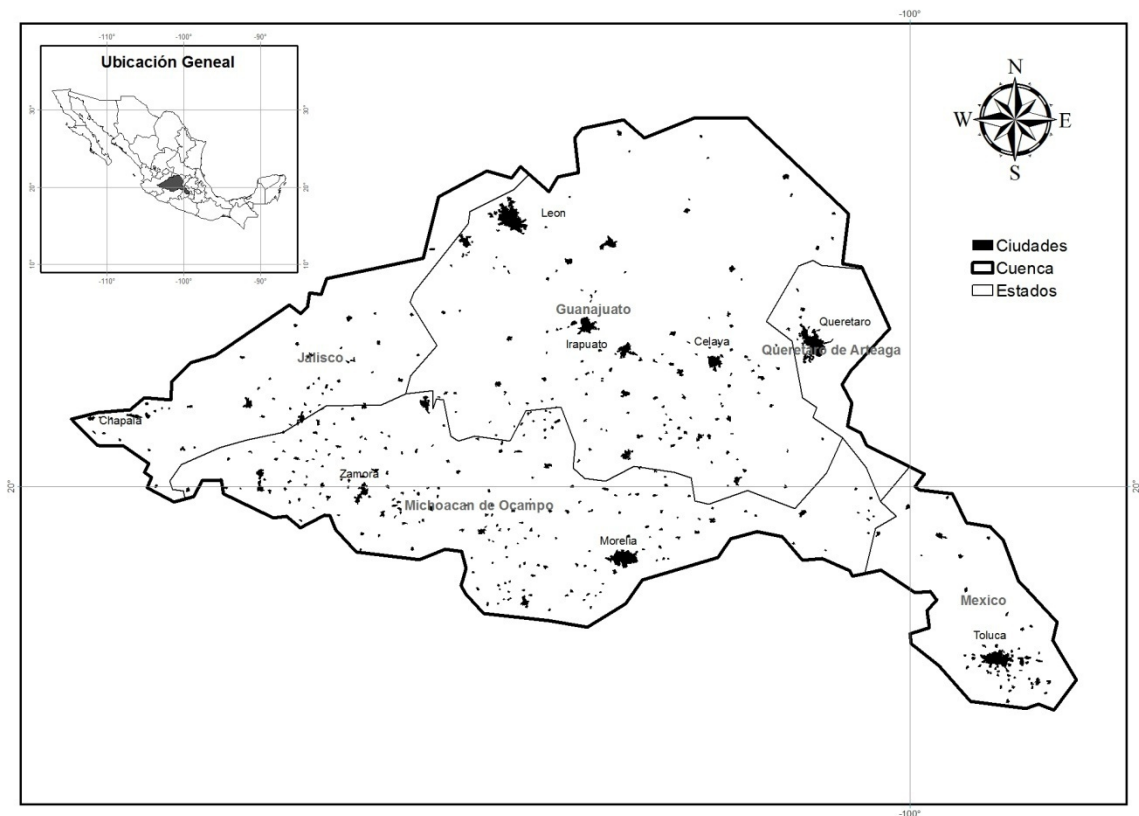
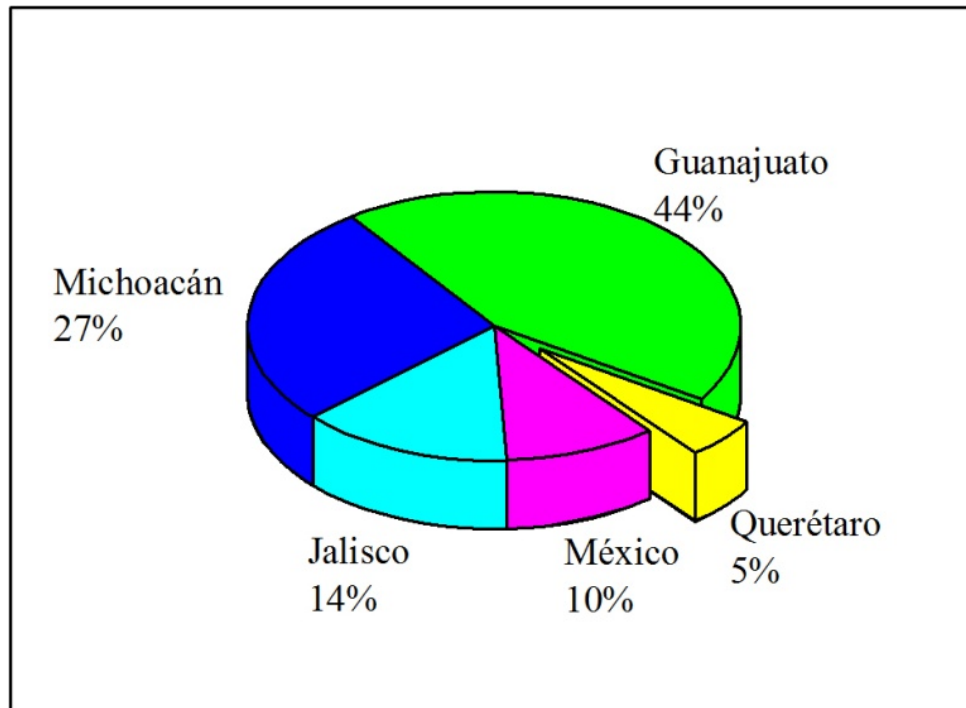


Figura 1 Localización de la cuenca Lerma-Chapala

Políticamente se identifican 205 municipios que tienen alguna porción de superficie dentro de la cuenca Lerma-Chapala, sin embargo son sólo 173 los municipios que tienen la mayor parte de su territorio dentro del límite natural de la misma (Sotelo *et al.*, 2005).



**Figura 2** Proporción de pertenencia de la cuenca a cada uno de los Estados que la conforman

La cuenca Lerma-Chapala pertenece a la Región Hidrológica número 12. La corriente hidrográfica principal de la cuenca es el río Lerma, el cual nace en las laderas del Nevado de Toluca, a 4,690 metros sobre el nivel del mar; tiene una longitud aproximada de 705 km y corre a lo largo de la cuenca hasta desembocar en el Lago de Chapala, a una altitud de 1,600 msnm. Sus principales afluentes son el río Laja, el río Turbio y el río Angulo. El río Laja se origina en el municipio de San Felipe, colectando todos los tributarios en la región centro-norte, para confluir con el río Querétaro al noreste de Celaya, formando una sola corriente que se une

al Lerma al sureste de la ciudad de Salamanca, Guanajuato. El río Turbio nace en el municipio de Purísima del Rincón y se conecta al Lerma pasando la ciudad de Irapuato, en los límites políticos de los municipios de Pénjamo y San José Sixto Verduzco. Finalmente, el río Angulo corre de sur a norte, incorporándose a la corriente del Lerma a la altura del municipio de Angamacutiro en el estado de Michoacán. Los principales cuerpos de agua naturales son los lagos de Chapala en el estado de Jalisco, Cuitzeo y Pátzcuaro en Michoacán, y Yuriria en Guanajuato.

Al interior de la cuenca Lerma-Chapala se han delimitado diecinueve subcuencas (Cuadro 1) incluyendo las cuencas cerradas de Cuitzeo y Pátzcuaro. Estas 19 subcuencas se agrupan en tres zonas: Alto, Medio y Bajo Lerma (DOF, 2006).

Históricamente esta cuenca ha mantenido a numerosas culturas, las cuales adaptaron sus sistemas de producción a la disponibilidad natural del agua. Sin embargo, el desarrollo iniciado desde mediados del siglo pasado promovió la proliferación de perforaciones y la construcción de importantes obras hidráulicas, mismas que apoyaron la instalación del corredor industrial Lerma-Toluca y el desarrollo de importantes asentamientos urbanos. Este acelerado crecimiento desató otro fenómeno, que acrecienta de manera alarmante el problema de escasez del agua: el de su contaminación (Sotelo *et al.*, 2005).

Actualmente, las actividades productivas más importantes de la cuenca residen en el sector terciario (servicios y comercio), seguido del secundario (industrial) y posteriormente del primario (agricultura). Sin embargo, este último sector ocupa el 52% de la superficie de la cuenca, del cual 39.5% consume agua para riego (Sotelo *et al.*, 2005).

**Cuadro 1 Subcuencas que forman parte de la cuenca Lerma-Chapala**

<i>Subcuenca</i>	<i>Superficie (km<sup>2</sup>)</i>	<i>% de la Cuenca</i>	<b>Población</b>
<b><i>Alto Lerma</i></b>			
Río Lerma 1 (Alzate)	2,137	4.12	<b>1,679,007</b>
Río La Gavia (Ramírez)	505	0.97	<b>177,287</b>
Río Jaltepec (Tepetitlán)	378	0.73	<b>110,591</b>
Río Lerma 2 (Tepuxtepec)	2,623	5.06	<b>332,138</b>
Río Lerma 3 (Solís)	2,895	5.58	<b>252,627</b>
Lago de Patzcuaro	1,096	2.11	<b>195,562</b>
Lago de Cuitzeo	3,675	7.08	<b>856,864</b>
<b><i>Medio Lerma</i></b>			
Río La Laja 1 (Begoña)	4,981	9.60	<b>564,654</b>
Río Querétaro (Ameche)	2,255	4.35	<b>942,036</b>
Río La Laja 2 (Pericos)	2,415	4.65	<b>742,733</b>
Laguna de Yurírira	1,093	2.11	<b>343,658</b>
Río Lerma 4 (Salamanca)	2,751	5.30	<b>369,994</b>
Río Turbio (Adjuntas)	2,913	5.61	<b>1,224,313</b>
Río Angulo	2,064	3.98	<b>199,665</b>
Río Lerma 5 (Corrales)	7,143	13.77	<b>1,029,025</b>
Río Lerma 6 (Yurecuaro)	2,023	3.90	<b>310,991</b>
<b><i>Bajo Lerma</i></b>			
Río Duero	2,198	4.24	<b>393,917</b>
Río Zula	2,098	4.04	<b>111,805</b>
Río Lerma 7 (Chapala)	6,644	12.80	<b>644,130</b>
<b>Totales</b>	<b>51,887</b>	<b>100.00</b>	<b>10,480,997</b>

Fuente: DOF (2006)

### **3.2 Caracterización del sector hídrico de la cuenca Lerma-Chapala**

Para llevar a cabo la caracterización del sector hídrico de la cuenca Lerma-Chapala, el cual dentro de este trabajo se considera que está compuesto por el conjunto tanto de recursos hídricos como de los usuarios de los mismos, se recurrirá a las investigaciones realizadas con anterioridad así como a las publicaciones y comunicados oficiales de la Comisión Nacional del Agua. Con la información obtenida de las fuentes mencionadas será posible establecer en términos generales la situación actual de los recursos hídricos y de los usos del agua en la cuenca. Los estudios que se utilizarán como base para esta etapa se mencionan con detalle a continuación.

A través del tiempo la cuenca Lerma-Chapala ha sido objeto de muchos estudios tanto por parte de los organismos e instituciones encargadas de la administración del agua como por el sector académico. Como producto de ello, existe una cantidad considerable de información referente a los usos, disponibilidad, y calidad del agua, principalmente. Entre la información más importante sobre el agua en la cuenca, se encuentra la serie de boletines anuales emitidos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) donde se dan a conocer los volúmenes máximos de extracción de agua superficial para los sistemas de usuarios de la cuenca Lerma-Chapala, mismos que comenzaron a publicarse en el año de 1992 (CNA, 2010).

Además de estos boletines, la CONAGUA ha realizado una serie de publicaciones en el Diario Oficial de la Federación donde se dan a conocer los resultados de estudios técnicos relativos a la disponibilidad del agua y a la delimitación oficial tanto de la cuenca principal como de sus subcuencas, entre los estudios mencionados tenemos los siguientes:

- Acuerdo por el que se dan a conocer las denominaciones y la ubicación geográfica de las diecinueve cuencas localizadas en la zona hidrológica denominada Lerma-Chapala, así como la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas que comprende dicha zona hidrológica (DOF, 2003).
- Convenio de coordinación y concertación entre el Gobierno y los Sectores Usuarios para llevar a cabo el programa sobre la disponibilidad, distribución y usos de las aguas superficiales de la cuenca Lerma-Chapala (CNA, 2005a).
- Acuerdo por el que se da a conocer el estudio técnico de los recursos hídricos del área geográfica Lerma-Chapala (DOF, 2006).

- Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales de la subregión hidrológica denominada Lerma-Chapala, y su ubicación geográfica (DOF, 2010).

Otra de las instituciones que ha realizado una labor de investigación importante en la cuenca Lerma-Chapala es el Instituto Nacional de Ecología, quien a partir del diagnóstico de los sistemas bio-físicos y socio-culturales ha realizado una serie de recomendaciones que son presentadas en la publicación “Acciones estratégicas para la recuperación de la cuenca Lerma-Chapala: recomendaciones técnicas para las diecinueve subcuencas” (Sotelo *et al.*, 2005).

Por parte del sector académico también se han realizado algunas investigaciones, entre las cuales destaca el estudio denominado “Disponibilidad del agua superficial y vulnerabilidad de las cuencas hidrológicas Lerma-Santiago-Pacífico y Balsas ante el cambio climático”, realizado por investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM con el apoyo económico del Fondo Sectorial SEMARNAT-CONACYT (Mendoza *et al.*, 2005).

Además de la información mencionada anteriormente, se tienen los Censos y Conteos de Población y Vivienda realizados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, donde se puede encontrar información importante sobre la dinámica poblacional y económica dentro de la cuenca.

### **3.3 Análisis de la disponibilidad de agua ante el cambio climático**

La disponibilidad natural de agua en una cuenca puede determinarse a partir del volumen de agua renovable, el cual de acuerdo con la CONAGUA (2011) representa la cantidad máxima de agua que es factible de explotar anualmente en una región, es decir, la cantidad de agua que es renovada por la lluvia y por el agua proveniente de otras regiones (importaciones). Así el agua renovable se

calcula como la suma del escurrimiento natural medio superficial interno anual, la recarga total anual de los acuíferos, las importaciones de agua de otras regiones, menos las exportaciones de agua a otras cuencas, es decir:

$$A_{ren} = Esc + R_{Acuif} + Im p - Exp \quad (1)$$

donde  $A_{ren}$  representa el agua renovable,  $Esc$  el escurrimiento natural medio anual,  $R_{Acuif}$  la recarga total anual de los acuíferos,  $Imp$  las importaciones de agua, y  $Exp$  las exportaciones de agua.

Debido a que actualmente no se cuenta con la información necesaria para calcular la recarga anual de los acuíferos de la cuenca, ya que hasta el momento sólo se cuenta con estudios en 19 de los 37 acuíferos localizados dentro de ella mientras que en los restantes se encuentran aún en proceso como se menciona en el Acuerdo por el que se da a conocer el estudio técnico de los recursos hídricos del área geográfica Lerma-Chapala (DOF, 2006), en este trabajo se utilizará el dato proporcionado en el documento anteriormente mencionado sobre la recarga media anual de los acuíferos de la cuenca como representativo de todo el periodo analizado haciendo la hipótesis de que las variaciones en la recarga debidas al cambio climático son difíciles de detectar por la escala de tiempo en la que ocurre el proceso.

De esta manera, el análisis de la disponibilidad bajo las condiciones del cambio climático dependerá del comportamiento tanto de la evapotranspiración como del escurrimiento superficial en la cuenca, por lo cual se decidió realizar un análisis de sensibilidad del comportamiento de estas variables ante un cambio en la temperatura y en la precipitación, respectivamente. Sin embargo, como el cambio climático puede afectar no sólo a la temperatura, se decidió evaluar también los cambios producidos en la evapotranspiración debidos a cambios en otras variables como pueden ser la radiación, velocidad del viento y humedad relativa. El análisis de sensibilidad desarrollado en este trabajo es de tipo lineal y

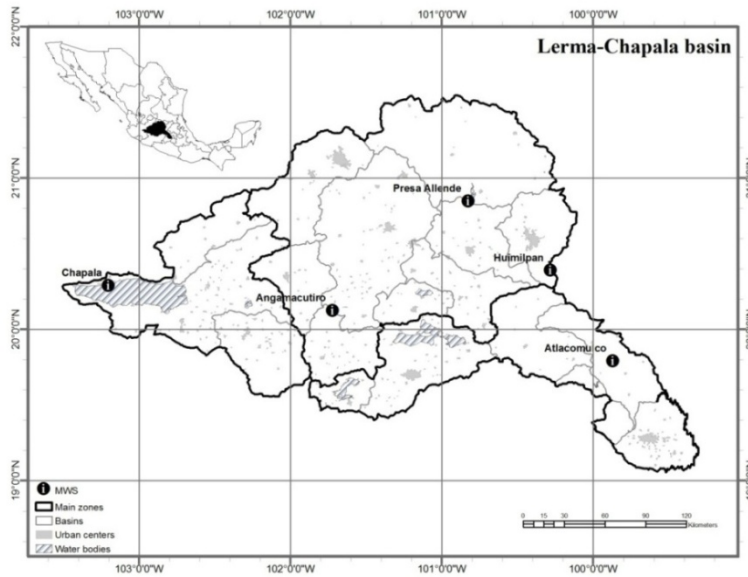
relativo debido a que se basó únicamente en los términos lineales de la serie de Taylor y porque las ecuaciones fueron adimensionalizadas con el propósito de realizar comparaciones válidas de los resultados (McCuen, 2003).

Para analizar la sensibilidad de la evapotranspiración se estableció un escenario base consistente en el promedio de los valores mensuales de las variables climáticas, esto debido a que los escenarios de temperatura y precipitación están definidos como el promedio mensual de la variable de interés. Así una vez que se calculó la evapotranspiración para el escenario base se utilizaron los valores que toman en cuenta las proyecciones de los escenarios de cambio climático. Los cálculos se desarrollaron primero para analizar el cambio en una sola variable y después tomando en cuenta la ocurrencia simultánea de cambios en dos o más variables. Para la realización de los cálculos se utilizaron los datos obtenidos a través del Servicio Meteorológico Nacional en cinco estaciones meteorológicas automatizadas (EMA's) instaladas dentro de la cuenca Lerma-Chapala para el periodo 2000-2010, las cuales fueron seleccionadas de acuerdo con la completitud de sus bases de datos y a la representatividad de las diferentes regiones encontradas en la cuenca, los datos generales de las estaciones y su ubicación son presentados en el Cuadro 2 y en la Figura 3.

**Cuadro 2 Estaciones utilizadas para el análisis de sensibilidad de la evapotranspiración**

Estación	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Altitud (m.s.n.m.)
Angamacutiro	20°07'31"	101°43'21"	1730
Atlacomulco	19°47'30"	99°52'11"	2600
Chapala	20°17'25"	103°12'06"	1493
Huimilpan	20°23'24"	100°17'00"	2280
Presa Allende	20°50'54"	100°49'33"	1915





**Figura 3 Localización de las estaciones utilizadas en el análisis de sensibilidad de la evapotranspiración**

Para el cálculo de la evapotranspiración se utilizó el método de Penman-Monteith modificado por la FAO, el cual determina la evapotranspiración de referencia, la cual al ser multiplicada por el coeficiente del cultivo permite conocer la evapotranspiración real (Allen et al., 1998). La elección de dicho método se basó en que éste es considerado como un estándar a nivel mundial, dicho método puede ser expresado como (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

donde  $ET_o$  es la evapotranspiración de referencia (mm/day),  $R_n$  la radiación neta ( $MJ/m^2/day$ ),  $G$  el flujo de calor del suelo ( $MJ/m^2/day$ ),  $T$  la temperatura media diaria del aire ( $^{\circ}C$ ),  $u_2$  la velocidad del viento (m/s),  $e_s$  la presión de saturación de vapor (kPa),  $e_a$  la presión de vapor (kPa),  $\Delta$  la pendiente de la curva de presión de vapor ( $kPa/^{\circ}C$ ) y  $\gamma$  la constante psicrométrica ( $kPa/^{\circ}C$ ).

En el caso del escurrimiento se tomó como base para el análisis de sensibilidad el método indirecto para la determinación del escurrimiento propuesto en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 referente a la conservación del recurso agua y que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales (DOF, 2002). Dicho método es presentado en el anexo A sección 1.2 de la citada norma y establece que:

$$VAEsc = Prec \cdot A \cdot Ce \quad (3)$$

donde  $VAEsc$  es el volumen anual de escurrimiento natural de la cuenca,  $Prec$  la precipitación anual en la cuenca,  $A$  el área de la cuenca y  $Ce$  un coeficiente de escurrimiento, el cual depende de la precipitación y del tipo y uso del suelo de la cuenca, y puede ser determinado como:

$$Ce = \frac{K \cdot (P - 250)}{2000} \quad \text{si } K \leq 0.15 \quad (4)$$

$$Ce = \frac{K \cdot (P - 250)}{2000} - \frac{K - 0.15}{1.5} \quad \text{si } K > 0.15 \quad (5)$$

donde  $P$  representa la precipitación anual o mensual en mm, y  $K$  es un parámetro que depende del tipo y uso de suelo. De acuerdo con lo anterior se puede apreciar que un cambio en la precipitación afecta al escurrimiento tanto por el lado propio de la precipitación como por el lado del coeficiente de escurrimiento, por lo cual en el análisis de sensibilidad se partió de la siguiente ecuación tomando en cuenta que el parámetro  $K$  tiene un valor ponderado de 0.2588:

$$VAEsc = Prec \cdot A \cdot \left( \frac{K \cdot (P - 250)}{2000} - \frac{K - 0.15}{1.5} \right) \quad (6)$$

Por otro lado, para tomar en cuenta las variaciones en la temperatura y la precipitación debidas al cambio climático se utilizaron los datos de los escenarios regionalizados para México, los cuales fueron obtenidos a través del Sistema de Información de Escenarios de Cambio Climático Regionalizados, dichos escenarios fueron generados por la Coordinación del Programa de Cambio Climático del Instituto Nacional de Ecología (Magaña y Caetano, 2007). Los escenarios de cambio climático pueden definirse como una representación del clima futuro que es internamente consistente, que ha sido construida empleando métodos basados en principios científicos y que puede ser utilizada para comprender las respuestas de los sistemas medio ambientales y sociales ante el futuro cambio climático (Magaña y Caetano, 2007), más no como un pronóstico o una predicción (Magaña, 2010). La estimación del impacto del cambio de clima con base en escenarios generados por Modelos de Circulación Global (GCM's por sus siglas en inglés) incluye un grado de incertidumbre debida al conocimiento incompleto sobre los procesos geofísicos subyacentes del cambio global, la naturaleza caótica del sistema y por los escenarios futuros de emisiones de gases de efecto invernadero. El desacuerdo entre diversos GCM's indican que al trabajar con uno o dos modelos podría llevar a respuestas inadecuadas para el planteamiento de opciones de adaptación, por lo que se recomienda usar técnicas de ensamble multimodelo las cuales permiten estimar la condición más probable (Magaña, 2010). De esta manera se decidió utilizar los escenarios generados a través del ensamble de los escenarios producidos por los modelos que se enlistan en el Cuadro 3. La pendiente de las tendencias observadas de acuerdo con los escenarios COM, A1B, A2 y B1 para la temperatura y la precipitación en cada una de las subcuencas se presenta en el Cuadro 4. En este cuadro se puede apreciar una tendencia creciente estadísticamente significativa en el caso de la temperatura, la cual en el caso más extremo establece un aumento de hasta 3.5°C para finales del presente siglo. En el caso de la precipitación se observan ligeras tendencias tanto al incremento (escenario B1, principalmente) como a la disminución (escenarios COM, A1B y A2), las cuales no en todos los casos son estadísticamente significativas y van desde un 0.51 a 5.5%. Sin embargo, en el

caso de la precipitación el problema más allá de la disminución en la cantidad de lluvia, es la alta variabilidad que pudiera presentarse de un año a otro. La tendencia promedio anual a nivel global se presenta en las Figuras 4 y 5, y a nivel subcuenca en los anexos a.1 y a.2.

### **3.4 Análisis de los factores que favorecen la vulnerabilidad del sector hídrico**

Tomando en cuenta que actualmente no existe una metodología única para el análisis de la vulnerabilidad al cambio climático, como se mencionó en la revisión de literatura, y de que la vulnerabilidad presenta componentes físicas, sociales, económicas y políticas, en este trabajo se realizará una evaluación de la vulnerabilidad orientada principalmente a los aspectos físico y social para lo cual se hace el supuesto de que dicha vulnerabilidad puede ser analizada a partir de la relación existente entre la oferta y la demanda de agua al interior de la cuenca. Para ello se parte de los siguientes razonamientos:

En este trabajo se considera que el sector hídrico de la cuenca Lerma-Chapala está comprendido tanto por el conjunto de recursos hídricos como por el conjunto de usuarios de los mismos. Los recursos hídricos existentes en la cuenca corresponden a los recursos superficiales que provienen principalmente de los escurrimientos, y los recursos subterráneos, los cuales están conformados por los recursos almacenados en los acuíferos. Los recursos mencionados definen la disponibilidad natural de agua existente para la satisfacción de la demanda de los usuarios de la cuenca, de esta manera tenemos que:

$$D_{i_a} = f(B_{sup}, B_{sub}) \quad (7)$$

donde  $D_{i_a}$  representa la disponibilidad de agua en la cuenca,  $B_{sup}$  el balance hídrico superficial, y  $B_{sub}$  el balance hídrico subterráneo.

**Cuadro 3 Modelos utilizados para la construcción de escenarios**

<b>Modelo (GCM)</b>	<b>Agencia de desarrollo del GCM</b>
bccr_bcm2_0	Bjerknes Centre for Climate Research. <b>Norway</b> ( <a href="http://www.bjerknes.uib.no/">http://www.bjerknes.uib.no/</a> )
cccma_cgcm3_1	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis <b>Canada</b> ( <a href="http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/">http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/</a> )
cccma_cgcm3_1_t63	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis <b>Canada</b> ( <a href="http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/">http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/</a> )
cnrm_cm3	Centre National de Recherches Meteorologiques <b>France</b> ( <a href="http://www.cnrm.meteo.fr/">http://www.cnrm.meteo.fr/</a> )
csiro_mk3_0	Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation <b>Australia</b> ( <a href="http://www.csiro.au/">http://www.csiro.au/</a> )
csiro_mk3_5	Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation <b>Australia</b> ( <a href="http://www.csiro.au/">http://www.csiro.au/</a> )
gfdl_cm2_0	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory <b>USA</b> ( <a href="http://gfdl.noaa.gov/">http://gfdl.noaa.gov/</a> )
gfdl_cm2_1	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory <b>USA</b> ( <a href="http://gfdl.noaa.gov/">http://gfdl.noaa.gov/</a> )
giss_model_e_h	Goddard Institute for Space Studies <b>USA</b> ( <a href="http://aom.giss.nasa.gov/">http://aom.giss.nasa.gov/</a> )
giss_model_e_r	Goddard Institute for Space Studies <b>USA</b> ( <a href="http://aom.giss.nasa.gov/">http://aom.giss.nasa.gov/</a> )
giss_aom	Goddard Institute for Space Studies <b>USA</b> ( <a href="http://aom.giss.nasa.gov/">http://aom.giss.nasa.gov/</a> )
iap_fgoals1_0_g	Institute of Atmospheric Physics <b>China</b> ( <a href="http://www.lasg.ac.cn/english/">http://www.lasg.ac.cn/english/</a> )
ingv_echam4	National Institute of Geophysics and Volcanology <b>Italy</b> ( <a href="http://www.ecmwf.int/research/demeter/general/docmodel/ingv.html">http://www.ecmwf.int/research/demeter/general/docmodel/ingv.html</a> )
inmcm3_0	Institute for Numerical Mathematics <b>Russia</b> ( <a href="http://www.inm.ras.ru/">http://www.inm.ras.ru/</a> )
ipsl_cm4	Institut Pierre Simon Laplace <b>France</b> ( <a href="http://www.ipsl.fr/en/content/view/full/886">http://www.ipsl.fr/en/content/view/full/886</a> )
miroc3_2_hires	National Institute for Environmental Studies <b>Japan</b> ( <a href="http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/ehhtml/etopindex.shtml">http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/ehhtml/etopindex.shtml</a> )
miroc3_2_medres	National Institute for Environmental Studies <b>Japan</b> ( <a href="http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/ehhtml/etopindex.shtml">http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/ehhtml/etopindex.shtml</a> )
miub_echo_g	Meteorological Institute, University of Bonn <b>Germany</b> ( <a href="http://www.meteo.uni-bonn.de/">http://www.meteo.uni-bonn.de/</a> )
mpi_echam5	Max-Planck-Institut for Meteorology <b>Germany</b> ( <a href="http://www.mpimet.mpg.de/">http://www.mpimet.mpg.de/</a> )
mri_cgcm2_3_2a	International Research Institute for Climate and Society <b>USA</b> ( <a href="http://iridl.ldeo.columbia.edu/">http://iridl.ldeo.columbia.edu/</a> )
ncar_ccsm3_0	National Centre for Atmospheric Research <b>USA</b> ( <a href="http://www.cgd.ucar.edu/">http://www.cgd.ucar.edu/</a> )
ncar_pcm1	National Centre for Atmospheric Research <b>USA</b> ( <a href="http://www.cgd.ucar.edu/">http://www.cgd.ucar.edu/</a> )
ukmo_hadcm3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, <b>UK</b> ( <a href="http://www.metoffice.gov.uk/climatechange/">http://www.metoffice.gov.uk/climatechange/</a> )
ukmo_hadgem1	Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, <b>UK</b> ( <a href="http://www.metoffice.gov.uk/climatechange/">http://www.metoffice.gov.uk/climatechange/</a> )

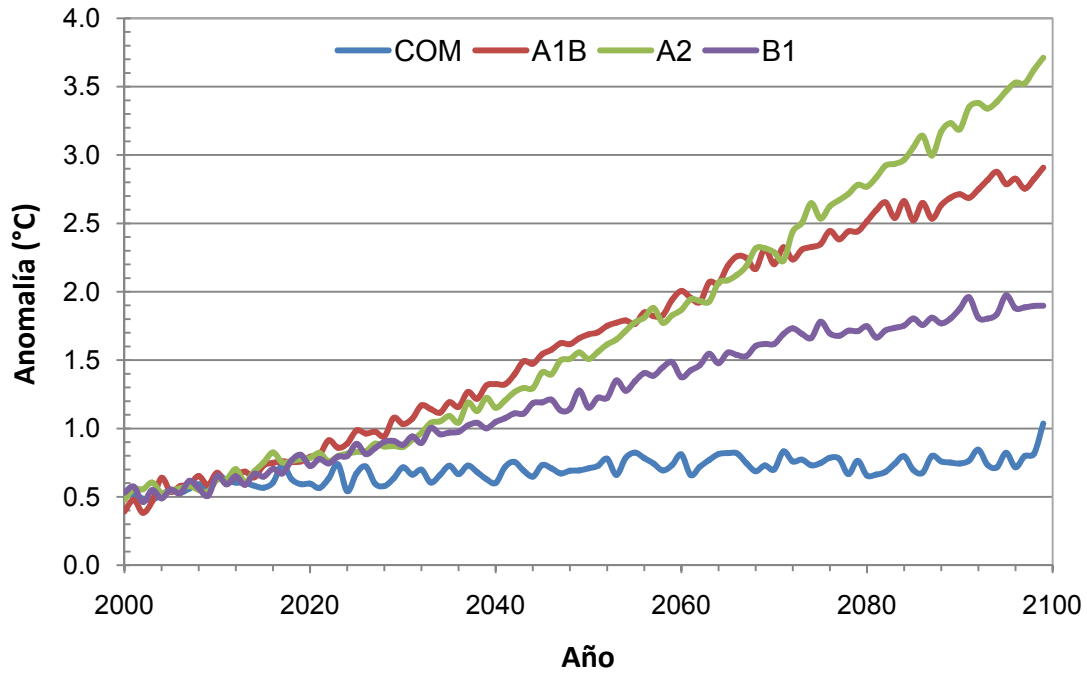


Figura 4 Anomalías de temperatura promedio para la cuenca de acuerdo con el ensamble para los escenarios COM, A1B, A2 y B1

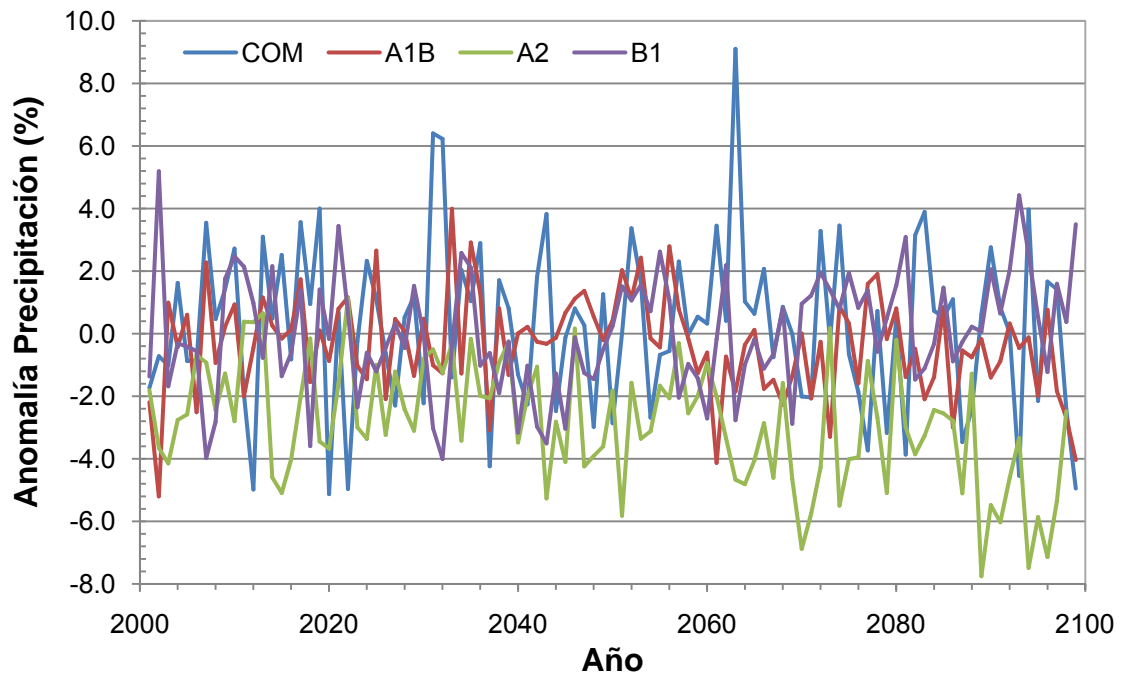


Figura 5 Anomalías de precipitación para la cuenca de acuerdo al ensamble para los escenarios COM, A1B, A2 y B1

Cuadro 4 Pendiente de la tendencia lineal observada en los escenarios de cambio climático a nivel subcuenca

Subcuenca	Temperatura				Precipitación			
	COM	A1B	A2	B1	COM	A1B	A2	B1
Angulo	0.0026**	0.0278**	0.0346**	0.0164**	-0.0092	-0.0104	-0.0425**	0.0136
Cuitzeo	0.0025**	0.0267**	0.0331**	0.0158**	-0.0177	-0.0157*	-0.0553**	0.0187*
Duero	0.0027**	0.0281**	0.0347**	0.0164**	0.0009	-0.0147*	-0.0425**	0.0018
Jaltepec	0.0025**	0.0253**	0.0317**	0.0149**	-0.0062	-0.0080	-0.0396**	0.0237*
La Gavia	0.0023**	0.0258**	0.0328**	0.0155**	-0.0049	-0.0064	-0.0383**	0.0318**
Laja1	0.0022**	0.0253**	0.0316**	0.0150**	-0.0059	-0.0053	-0.0109 <sup>+</sup>	0.0190**
Laja2	0.0024**	0.0257**	0.0323**	0.0153**	0.0002	-0.0078	-0.0144*	0.0243**
Lerma1	0.0024**	0.0259**	0.0329**	0.0156**	-0.0075	-0.0101	-0.0380**	0.0325**
Lerma2	0.0024**	0.0251**	0.0315**	0.0149**	0.0046	-0.0108	-0.0232**	0.0283**
Lerma3	0.0024**	0.0252**	0.0315**	0.0149**	-0.0076	-0.0087	-0.0363**	0.0251**
Lerma4	0.0024**	0.0261**	0.0327**	0.0155**	-0.0078	-0.0107 <sup>+</sup>	-0.0302**	0.0226**
Lerma5	0.0025**	0.0272**	0.0342**	0.0162**	-0.0125	-0.0077	-0.0253**	0.0170*
Lerma6	0.0027**	0.0282**	0.0351**	0.0167**	-0.0050	-0.0095	-0.0330**	0.0121
Lerma7	0.0027**	0.0282**	0.0350**	0.0163**	0.0061	-0.0172**	-0.0399**	0.0001
Patzcuaro	0.0027**	0.0278**	0.0345**	0.0164**	-0.0096	-0.0119	-0.0462**	0.0143
Río Querétaro	0.0022**	0.0244**	0.0305**	0.0141**	0.0092	-0.0087	-0.0051	0.0208*
Río Turbio	0.0025**	0.0273**	0.0343**	0.0161**	-0.0097	-0.0111*	-0.0243**	0.0094
Yuriria	0.0025**	0.0269**	0.0336**	0.0160**	-0.0136	-0.0064	-0.0339**	0.0236**
Zula	0.0027**	0.0278**	0.0347**	0.0162**	-0.0015	-0.0143*	-0.0360**	0.0054
Lerma-Chapala	0.0025**	0.0267**	0.0334**	0.0157**	-0.0026	-0.0090 <sup>+</sup>	-0.0298**	0.0137*
<b>Mínimo</b>	0.0022	0.0244	0.0305	0.0141	-0.0177	-0.0172	-0.0553	0.0001
<b>Máximo</b>	0.0027	0.0282	0.0351	0.0167	0.0092	-0.0053	-0.0051	0.0325
<b>Desviación Estándar</b>	0.00017	0.00123	0.00143	0.00069	0.00693	0.00330	0.01261	0.00936

\*\* Estadísticamente significativo, nivel  $\alpha = 0.01$ ; \* Estadísticamente significativo, nivel  $\alpha = 0.05$ ; <sup>+</sup> Estadísticamente significativo, nivel  $\alpha = 0.10$ .

Por otro lado, en el caso de los usuarios, dentro de la cuenca se pueden identificar los siguientes usos: agrícola, público urbano, industrial, pecuario y ecológico, los cuales en su conjunto determinan la demanda total de agua, de tal manera que:

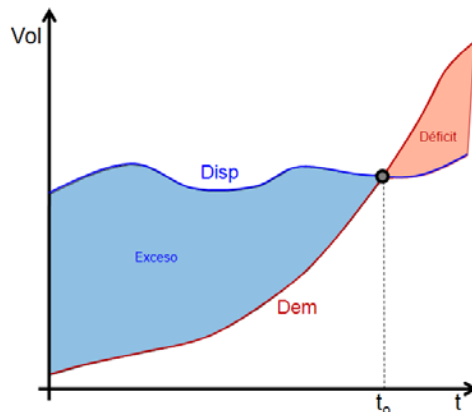
$$de_a = f(D_{Uagrícola}, D_{Upúblico}, D_{Uindustrial}, D_{Upecuario}, D_{Uecológico}) \quad (8)$$

donde  $de_a$  representa la demanda total de agua en la cuenca y  $D_{Ux}$  la demanda de cada uno de los sectores usuarios.

Con base tanto en la disponibilidad como en la demanda podemos definir el grado de satisfacción de las necesidades de agua ( $S_{na}$ ) a nivel de cuenca a partir de la diferencia existente entre las variables anteriormente mencionadas como:

$$S_{na} = Di_a - de_a \quad (9)$$

De acuerdo con esta ecuación tenemos que cuando  $S_{na} \geq 0$  la demanda de agua puede ser satisfecha, mientras que cuando  $S_{na} < 0$  se tiene un déficit en los recursos hídricos disponibles en la cuenca para la satisfacción de las necesidades de los usuarios, lo cual genera vulnerabilidad debido al problema de la escasez. El comportamiento señalado puede ser observado en la Figura 6.



**Figura 6 Relación hipotética entre la disponibilidad y la demanda de agua en una cuenca**



De acuerdo con la Figura 6, se puede observar que tanto la disponibilidad como la demanda son dinámicas, presentando variaciones importantes a través del tiempo. Bajo una condición ideal podríamos asumir que la disponibilidad presenta un comportamiento cuasi-constante, mientras que en el caso de la demanda se espera que sea una función creciente en el tiempo. Partiendo de lo anterior es notable la existencia de un punto en el tiempo ( $t_0$ ) para el cual la demanda se iguala con la disponibilidad, al cual se le puede denominar como tiempo de equilibrio. El tiempo de equilibrio es un punto de referencia importante porque define la transición entre un estado en el cual se cuenta con un exceso de recursos para satisfacer la demanda, es decir no hay vulnerabilidad, y un estado en el cual los recursos no son suficientes para satisfacer la demanda y por lo tanto el sector hídrico de la cuenca se vuelve vulnerable. Lo anterior es resultado del hecho de que la disponibilidad de agua es finita. A partir de esta situación, se puede esperar que para lograr un equilibrio dinámico entre la disponibilidad y la demanda existan básicamente dos soluciones, de las cuales, la primera tiene que ver con la necesidad de aumentar la disponibilidad de agua, o bien, por el otro lado, con la regulación de la demanda para lograr que ésta disminuya a un valor igual o menor al de la disponibilidad. La primera de estas soluciones suena prometedora en el corto plazo a través de la obtención de recursos hídricos provenientes de fuentes de abasto externas a la cuenca, sin embargo, en el largo plazo la solución sería totalmente dependiente de la existencia de un exceso de recursos en las cuencas vecinas, lo cual de acuerdo con las proyecciones a futuro no suena tan prometedor (Mendoza *et al.*, 1997). La segunda solución por su lado, para ser factible debería de basarse en el establecimiento de estrategias de adaptación.

En este trabajo se propone que la relación entre la disponibilidad de recursos hídricos y la demanda de los mismos sea estudiada a través de una analogía con un modelo de crecimiento de la población sujeta a recursos limitados, como puede ser el caso del modelo de crecimiento logístico, el cual adaptado a las variables que nos ocupan, podría ser expresado como:

$$\frac{dde_a}{dt} = k \cdot \left( 1 - \frac{de_a}{Di_a} \right) \cdot de_a \quad (10)$$

donde  $k$  representa el coeficiente de la razón de crecimiento cuando la demanda es pequeña (Blanchard *et al.*, 1999) y la  $Di_a$  en nuestro caso representa la capacidad de carga o de soporte de la cuenca. De esta manera, el modelo adaptado describe el comportamiento de la demanda a través del tiempo cuando ésta se encuentra sujeta a un límite que en el presente caso está definido por la disponibilidad de agua. La decisión para la utilización de este modelo estuvo basada en el hecho de que las hipótesis principales que definen su forma concuerdan de buena manera con lo que podría ser el desempeño esperado del sector hídrico, dichas hipótesis adaptadas a este trabajo establecen que:

1. Cuando la demanda es pequeña, la razón de su crecimiento es de tipo exponencial debido a la abundancia de recursos hídricos. Dicha hipótesis se apoya en la demanda global anual por sector para el periodo 1900-2000 publicada por Abramovitz (1996) y re-publicada por Hinrichsen *et al.* (1998) y Moe y Rheingans (2006), misma que es presentada en la Figura 7.
2. Cuando la demanda es demasiado grande para ser satisfecha con los recursos disponibles, ésta disminuye debido a que los recursos con que se cuenta son finitos. Esta hipótesis resulta adecuada debido a que obligará a que la demanda se equilibre con la disponibilidad y así permitirá conocer en qué grado se tiene que modificar la demanda para lograr dicho equilibrio.

Una limitación presente en el modelo descrito es que en su forma convencional toma en cuenta que la capacidad de carga es constante a través del tiempo, lo cual no es representativo en muchos fenómenos (Meyer y Ausubel, 1999; Hopfenberg, 2003). La limitación anterior puede solucionarse al tomar en cuenta una capacidad de carga variable, con lo que el modelo se transforma en:

$$\frac{dde_a(t)}{dt} = k \cdot \left( 1 - \frac{de_a(t)}{Di_a(t)} \right) \cdot de_a(t) \quad (11)$$

La modificación anterior permite analizar el comportamiento de la demanda tomando en cuenta los cambios que pudieran ocurrir a través del tiempo en la disponibilidad debido a diferentes situaciones entre las que podemos incluir los efectos del cambio climático. Sin embargo, el hacer que la capacidad de carga sea variable ocasionará que la complejidad del modelo aumente y por lo tanto su solución (Meyer y Ausubel, 1999). Algunas soluciones obtenidas para una capacidad de carga variable son presentadas en Banks (1994). Debido a lo anterior y a que el objetivo del presente trabajo no se centra en la solución analítica de la capacidad de carga variable, se decidió analizar el comportamiento de la demanda ante una capacidad de carga variable utilizando las técnicas de la dinámica de sistemas (Aracil y Gordillo, 1997).

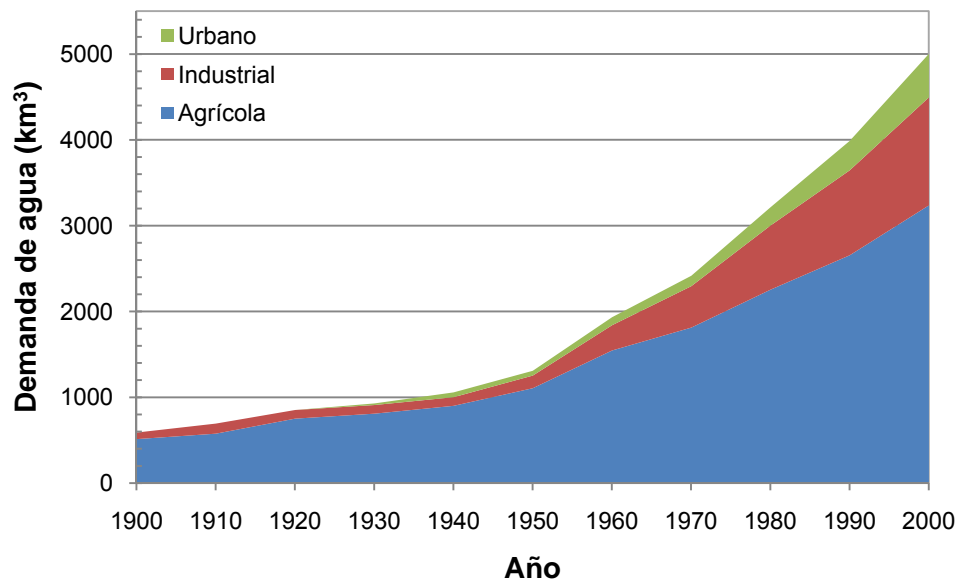


Figura 7 Demanda global anual de agua por sector, periodo 1900-2000

Por otro lado, con el propósito de conocer la vulnerabilidad social se decidió calcular un índice de vulnerabilidad basado en indicadores obtenidos en los censos y conteos de población y vivienda. La elección de los indicadores utilizados en este trabajo obedeció al criterio de que la información para su conformación se encontrara disponible, que fuera entendible, relevante y que permitiera su integración. De la misma manera, con el propósito de realizar comparaciones validas entre las subcuencas se decidió calcular un índice de vulnerabilidad relativa, en lugar de establecer umbrales para la definición de la vulnerabilidad, esto debido principalmente a que es muy difícil en algunos casos la definición formal de los umbrales y por lo regular se recurre a criterios más bien subjetivos para su definición. Así, la vulnerabilidad mencionada anteriormente fue calculada a partir de la siguiente expresión:

$$V_{soc} = \frac{DenPob + PPob1000 + PPobAnalf + PVSSAgua + PVSSDren}{5} \quad (12)$$

donde  $V_{soc}$  representa la vulnerabilidad social y cada uno de los indicadores utilizados en su formulación se encuentran definidos en el Cuadro 5.

**Cuadro 5 Indicadores utilizados para determinar el índice de vulnerabilidad social**

<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>	<b>Causa de vulnerabilidad</b>
Social	Densidad poblacional ( <i>DenPob</i> )	A mayor densidad poblacional mayor lucha por los recursos.
	Proporción de poblaciones menores a 1000 habitantes ( <i>PPob1000</i> )	A mayor número de poblaciones pequeñas es más difícil atender las necesidades de la población.
	Proporción de población analfabeta de 15 años en adelante ( <i>PPobAnalf</i> )	La falta de educación ha sido reconocida como un factor limitante para tomar en serio situaciones de riesgo y/o peligro.
	Proporción de viviendas sin servicio de agua potable ( <i>PVSSAgua</i> )	A mayor número de viviendas sin el servicio, mayor es el número de conflictos por acceso al agua.
	Proporción de viviendas sin servicio de drenaje sanitario ( <i>PVSSDren</i> )	A mayor número de viviendas sin el servicio, el número de enfermedades infecciosas puede aumentar.

En la ecuación número 12 se puede observar que todas las variables implicadas tienen el mismo peso, lo cual es debido a que en la práctica es muy difícil definir cuál de los indicadores utilizados tiene mayor relevancia (Alessa *et al.*, 2008). Con el propósito de poder comparar los indicadores, estos fueron adimensionalizados y estandarizados (0-1) de acuerdo con las siguientes formulas:

$$I_i = \frac{\max_{ji} - x}{\max_{ji} - \min_{ji}} \quad (13)$$

$$I_i = 1 - \left[ \frac{\max_{ji} - x}{\max_{ji} - \min_{ji}} \right] \quad (14)$$

donde:  $I_i$  representa el  $i$ -ésimo indicador estandarizado,  $\max_{ji}$  el valor máximo del indicador,  $\min_{ji}$  el valor mínimo del indicador, y  $x$  un valor dado del mismo.

### 3.5 Identificación de medidas para la adaptación al cambio climático

Con base tanto en los resultados de la disponibilidad ante el cambio climático y de la demanda de agua del sector hídrico de la cuenca Lerma-Chapala se identificarán las medidas de adaptación acordes a la problemática esperada en la cuenca, las cuales se centraran en las cinco categorías de medidas de adaptación señaladas por Henry y Heinke (1999), a saber:

1. Compartir y sobrellevar las pérdidas, o aceptación
2. Control de los peligros
3. Adaptaciones sociales, o reglamentación
4. Cambios al uso radical o reubicación, y
5. Planeación de emergencias

Cabe señalar que dentro de esta etapa se analizarán las ventajas y desventajas de cada una de las medidas de adaptación que podrían utilizarse y con base en ello se definirán aquellas que sean las más adecuadas para su aplicación en la zona de estudio.

El análisis de las oportunidades para la adaptación estará basado en las siguientes ecuaciones, las cuales definen por un lado el factor de crecimiento de la curva logística (15), y por el otro lado, la demanda de los dos usuarios más importantes dentro de la cuenca (16). La ecuación 15 permite cuantificar la razón de crecimiento de la demanda bajo una condición de equilibrio entre ella y la disponibilidad de agua en la cuenca. Por su parte, la ecuación 16 es útil para determinar en qué medida es afectada la demanda de agua en la cuenca por cada uno de los factores que la componen.

$$1 - de_a(t) / Di_a(t) \tag{15}$$

$$de_a = dot_{Ci} \cdot Ha_{Ci} \cdot \frac{1}{ef_A} + dot_{PU} \cdot Pob \tag{16}$$

donde  $de_a$  representa la demanda de agua de los sectores agrícola y público urbano,  $dot_{Ci}$  la dotación de agua para el cultivo  $i$ -ésimo,  $Ha_{Ci}$  el número de hectáreas sembradas con el cultivo  $i$ -ésimo,  $ef_A$  la eficiencia en el riego,  $dot_{PU}$  la dotación asociada al uso público urbano, y  $Pob$  la población demandante de agua.

# Capítulo 4

## Resultados y discusión

### 4.1 Caracterización del sector hídrico de la cuenca Lerma-Chapala

#### 4.1.1 Disponibilidad de agua en la cuenca

La disponibilidad natural media total del agua en la cuenca Lerma-Chapala depende principalmente de dos fuentes:

1. Esguerrimiento superficial
2. Agua subterránea

Teniendo en el primer caso una renovación anual prácticamente total, mientras que en el segundo caso sólo se presenta una recarga parcial al sistema. El proceso de renovación del agua en la cuenca depende principalmente de la precipitación,<sup>‡</sup> la cual en promedio asciende a 771 mm (de acuerdo al promedio histórico 1940-2001), mismos que pueden generar alrededor de 40,000 hm<sup>3</sup> anuales de agua, de los cuales aproximadamente el 76% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 14% escurre por ríos y arroyos y el 10% restante se infiltra y recarga los acuíferos (DOF, 2006).

Los valores medios anuales de las componentes del ciclo hidrológico y de la disponibilidad natural media en la cuenca pueden ser observados en la Figura 8. Con los datos de esta Figura se puede determinar una disponibilidad media per cápita de alrededor de 885 m<sup>3</sup>/hab/año, misma que de acuerdo con el Instituto Internacional sobre Manejo del Agua (IWMI por sus siglas en inglés) representa un

---

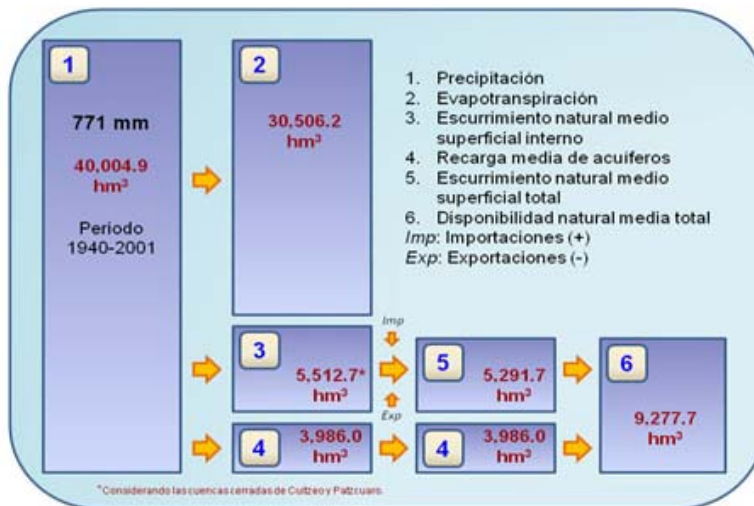
<sup>‡</sup> Aunque se considera que existe una pequeña aportación del deshielo del Nevado de Toluca, en este trabajo no es tomada en cuenta debido a que no se contó con la información suficiente para su cuantificación.

estado de escasez hídrica. Como se puede observar, el resultado anterior difiere significativamente de la disponibilidad *per cápita* publicada en las Estadísticas del Agua en México (EAM) para la región Lerma-Santiago-Pacífico. Entre las principales causas que originan esta diferencia se encuentran las siguientes:

- Los resultados presentados en las EAM están calculados para la región Hidrológico-Administrativa número VIII Lerma-Santiago-Pacífico, la cual comprende en su conjunto una superficie de 190,366 km<sup>2</sup> mientras que los resultados de la Figura 8 toman en cuenta solamente a la cuenca hidrológica denominada Lerma-Chapala, la cual tiene una superficie de 51,887 km<sup>2</sup>, apenas un poco más de una cuarta parte de la primera.
- De acuerdo con el II Censo de Población y Vivienda, la población de la Región Hidrológico-Administrativa número VIII fue de 20.65 millones de personas (CNA, 2005b), mientras que la población de la cuenca Lerma-Chapala de acuerdo con el estudio técnico de los recursos hídricos del área geográfica Lerma-Chapala (DOF, 2006) se estima cerca de 10.5 millones de personas para el mismo periodo, lo que representa prácticamente la mitad respecto de la primera.

Con base en lo anterior, es fácil apreciar que la baja disponibilidad *per cápita* determinada a partir de la disponibilidad natural es debida a que prácticamente la mitad de la población de la región Hidrológico-Administrativa No. VIII se encuentra concentrada en sólo una cuarta parte de su superficie. Lo anterior pone en evidencia algunos de los problemas que enfrenta el sector hídrico de la cuenca, los cuales se agravan aún más si se toma en cuenta por ejemplo, que la precipitación no se distribuye uniformemente sobre la cuenca ni su volumen se mantiene constante a través del tiempo, lo que propicia la escasez de agua en algunas zonas así como el desequilibrio en el balance hidrológico tanto a nivel superficial como subterráneo.





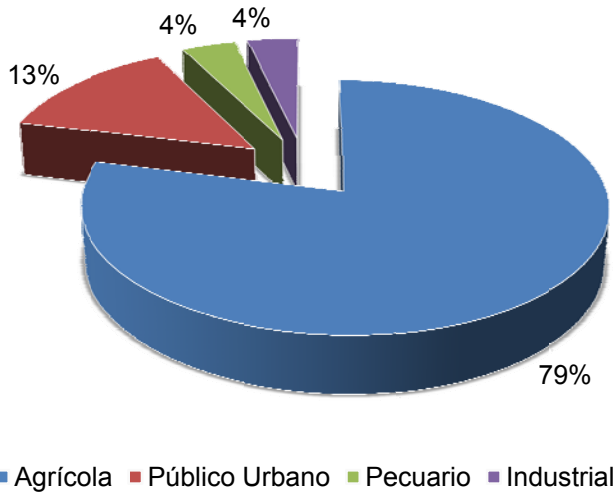
**Figura 8 Disponibilidad natural media en la cuenca Lerma-Chapala**

#### 4.1.2 Situación de los usos del agua en la cuenca

En La cuenca Lerma-Chapala se tienen identificados principalmente cinco usos del agua, de los cuales los dos primeros son los que presentan la mayor demanda, dichos usos corresponden a los sectores: Agrícola, Público Urbano, Pecuario, Industrial y Ecológico.

En cuanto a la demanda de cada uno de los usos señalados, se tiene que el uso agrícola es el mayor demandante con un volumen aproximado de 6,375 hm<sup>3</sup>/año, seguido del uso público urbano con 1,101 hm<sup>3</sup>/año, mientras que los usos Pecuario e Industrial demandan aproximadamente 310.8 y 295.1 hm<sup>3</sup>/año, cada uno (DOF, 2006). La proporción porcentual de la demanda por cada uso puede ser observada en la Figura 9. En esta Figura se puede apreciar que el uso agrícola es por mucho el mayor demandante de agua en la cuenca, donde el agua es utilizada para el riego de aproximadamente 830,000 hectáreas pertenecientes tanto a los Distritos de Riego (DR) como a la Pequeña Irrigación (PI). El abastecimiento en el sector agrícola se realiza en un 58.6% con aguas

superficiales y en un 41.4% con aguas subterráneas, presentándose las mayores extracciones en los estados de Guanajuato y Michoacán, los cuales en su conjunto utilizan el 90% del agua superficial y el 83% del agua subterránea demandada por este sector. Uno de los principales problemas detectados en el sector agrícola es que la eficiencia promedio global en el uso del agua es del orden del 35% en los Distritos de Riego y un poco mayor en la Pequeña Irrigación pero sin llegar al 50%.



**Figura 9 Demanda de agua por sector usuario en la cuenca Lerma-Chapala, Fuente: DOF (2006)**

Por otro lado, en el caso del uso público urbano el volumen demandado se utiliza para atender a cerca de 16 millones de habitantes, de los cuales 10.5 se encuentran dentro de la cuenca mientras que los restantes 5.5 millones habitan fuera de ella en zonas aledañas. En el caso del uso público urbano la mayor parte del agua es obtenida de los acuíferos (73%) y solamente el 27% es abastecido con aguas superficiales (Figura 10). En este sector la mayor parte de las extracciones son realizadas en la zona del Alto Lerma, donde en promedio se concentra cerca del 60% de la población de toda la cuenca, lo que ocasiona

algunos problemas en cuanto a la cobertura en los servicios de agua potable y alcantarillado de sus poblaciones.

En lo relativo al uso pecuario, se considera que este sector se abastece principalmente de los escurrimientos superficiales, en promedio en un 60%, mientras que el restante 40% es obtenido de los acuíferos. En cuanto al uso Industrial, éste se basa prácticamente en su totalidad en el aprovechamiento de las aguas subterráneas de la zona (90%). Finalmente, en lo que se refiere al uso ecológico no se tiene un volumen determinado de demanda, sin embargo, en esta área el agua es utilizada principalmente para mantener a los lagos de Chapala, Patzcuaro y Cuitzeo en niveles óptimos.

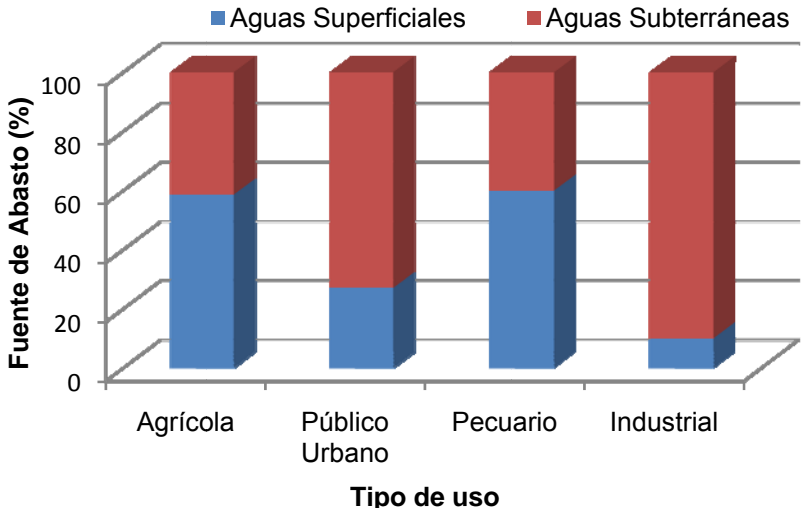


Figura 10 Aportación por fuente de abasto para la satisfacción de la demanda

Fuente: DOF (2006)

## 4.2 Análisis de la disponibilidad de agua ante el cambio climático

### 4.2.1 Análisis de sensibilidad de la evapotranspiración

En las Figuras 11 y 12 se presentan los resultados a nivel mensual del análisis de sensibilidad de la evapotranspiración respecto de la temperatura,

humedad relativa, radiación y velocidad del viento. En estas figuras se puede observar que la evapotranspiración, en general, es más sensible a un cambio en la cantidad de radiación disponible para la evapotraspiración, seguida de la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento. De la misma manera, en dichas Figuras se puede observar en el caso de la temperatura, el porcentaje de cambio de la evapotranspiración para finales del presente siglo de acuerdo con los escenarios de cambio climático denominados como COM, A1B, A2 y B1. Además, en las figuras mencionadas se puede apreciar que la peor condición es debida al escenario conocido como A2.

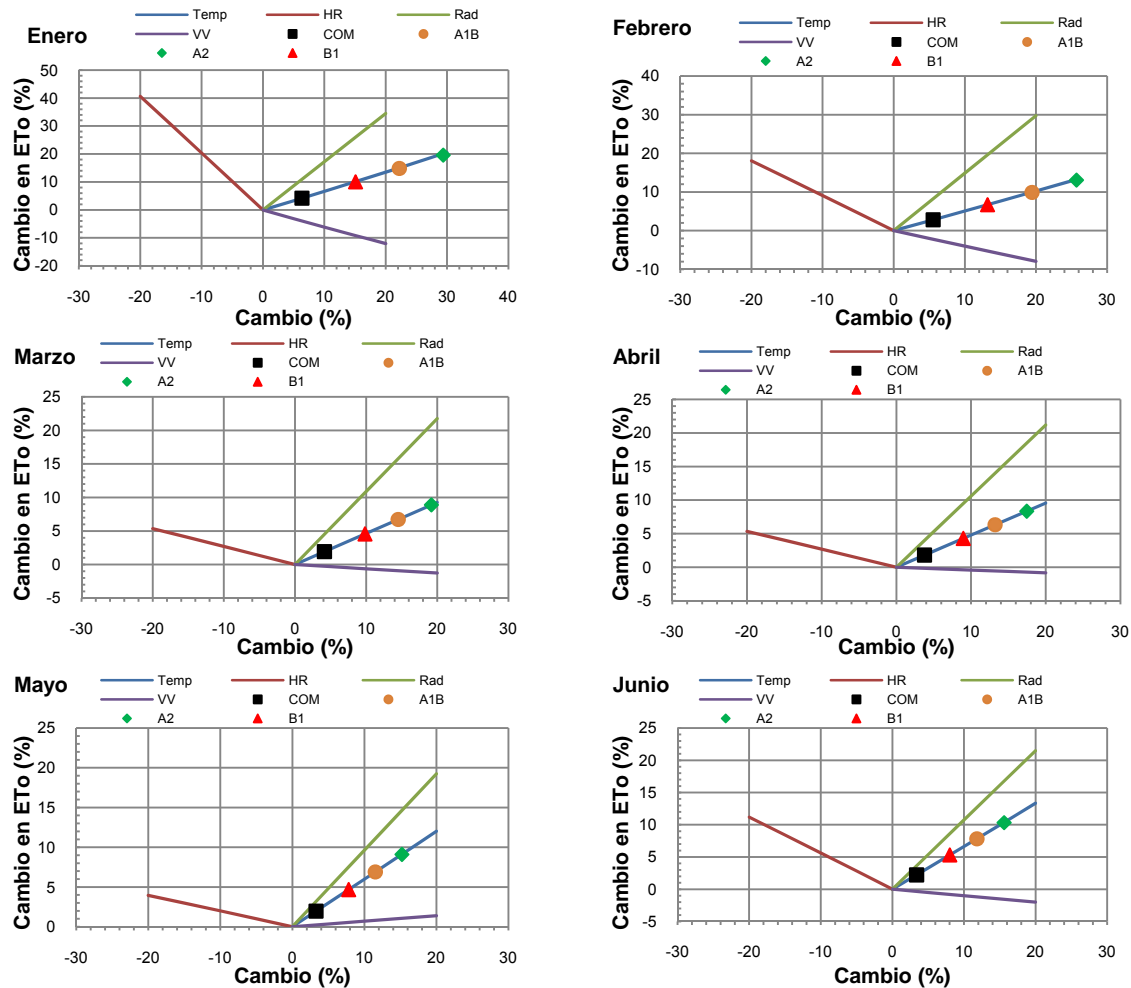


Figura 11 Sensibilidad de la evapotranspiración respecto a un cambio en la temperatura, humedad relativa, radiación y velocidad del viento (Enero-Junio)

Lo anterior es debido a que en este escenario se considera un mundo muy heterogéneo donde el tema subyacente es la autosuficiencia y la preservación de las identidades locales, con patrones de fertilidad entre regiones que convergen lentamente, lo que se traduce en el aumento constante de la población mundial, donde el desarrollo económico está orientado principalmente a nivel regional y el crecimiento tecnológico así como el crecimiento económico per cápita son más fragmentados y lentos que en otros escenarios (IPCC, 2000). Los escenarios A1B y B1 muestran cambios menos dramáticos que los producidos por el escenario A2, sin embargo, se mantienen aún más altos de lo que se podría esperar de acuerdo con el escenario de compromisos para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero COM.

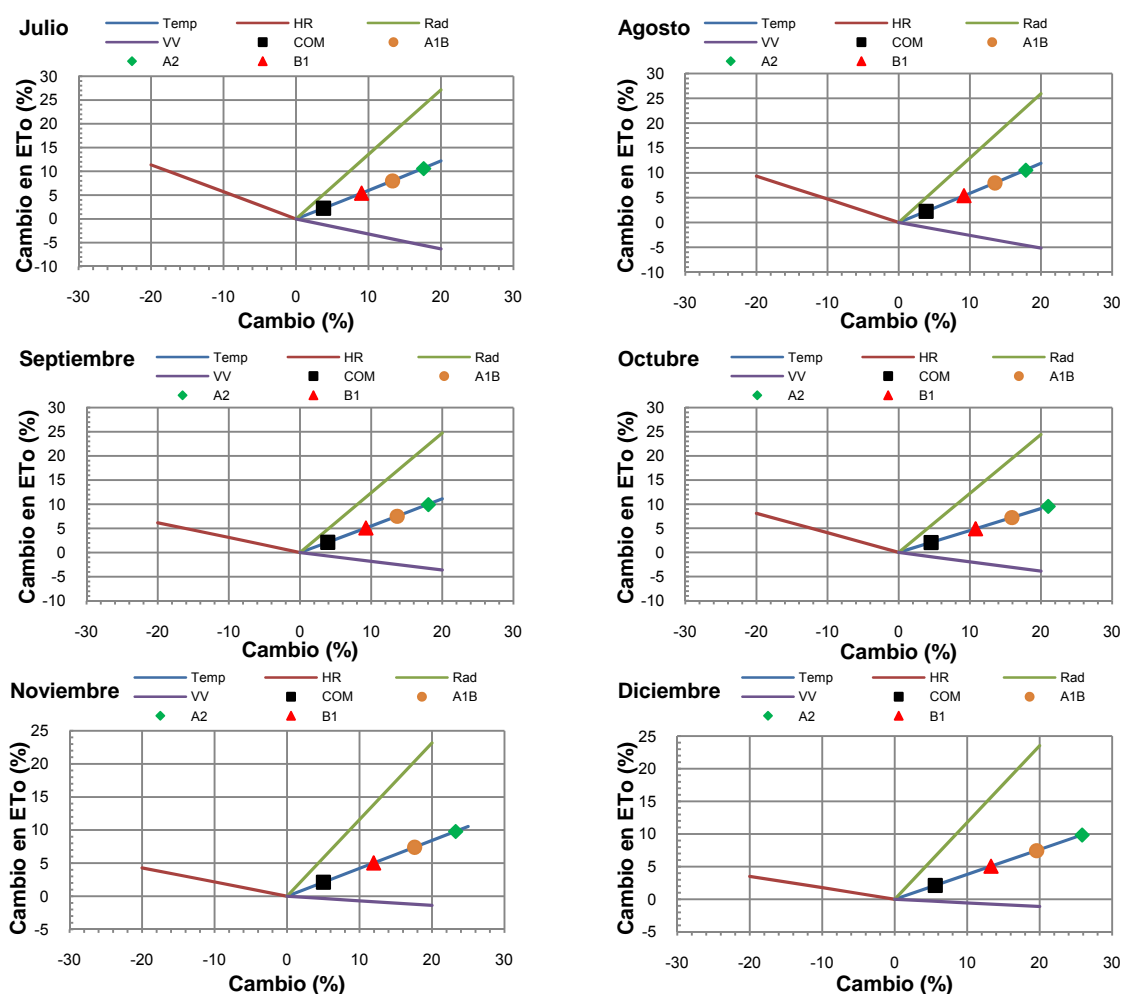


Figura 12 Sensibilidad de la evapotranspiración respecto a un cambio en la temperatura, humedad relativa, radiación y velocidad del viento (Julio-Diciembre)

De la misma manera, en las Figuras 11 y 12 se puede apreciar que de acuerdo con los escenarios analizados, el futuro que se espera no es nada prometedor, ya que los meses de estiaje se volverían más secos y durante la estación lluviosa se esperaría una disminución importante en la disponibilidad de los recursos hídricos a nivel de cuenca. Un factor importante es que de esperarse un aumento en la temperatura, éste podría venir acompañado de posibles aumentos tanto en la radiación como en la velocidad del viento así como de una disminución de la humedad relativa, lo cual llevaría a una situación más compleja ya que al darse cambios simultáneos en las variables mencionadas los efectos esperados en la evapotranspiración serían mayores a los observados ante un cambio solamente en la temperatura como puede observarse en el Cuadro 6.

**Cuadro 6 Porcentaje de cambio en ETo debido a un incremento en múltiples parámetros**

Comparación	Cambio en				Cambio en evapotranspiración		
	Temperatura (%)	Radiación (%)	Humedad Relativa (%)	Vel. Viento (%)	Mayo (%)	Julio (%)	Septiembre (%)
1	5	5	0	0	8.2	12.2	13.7
1	10	10	0	0	16.7	25.2	26.8
1	15	15	0	0	25.3	38.7	40.4
1	20	20	0	0	34.1	52.4	54.3
2	5	0	-5	0	4.5	7.7	12.2
2	10	0	-10	0	9.1	23.7	25.1
2	15	0	-15	0	13.6	36.3	38.3
2	20	0	-20	0	18.2	49.2	52.2
3	5	0	0	5	3.6	-0.4	1.7
3	10	0	0	10	7.3	-0.4	2.3
3	15	0	0	15	11.2	-0.3	2.9
3	20	0	0	20	15.2	-0.2	4.0
4	5	5	-5	0	9.8	20.7	22.9
4	10	10	-10	0	19.4	41.8	45.5
4	15	15	-15	0	29.2	64.5	67.6
4	20	20	-20	0	39.5	86.9	91.8

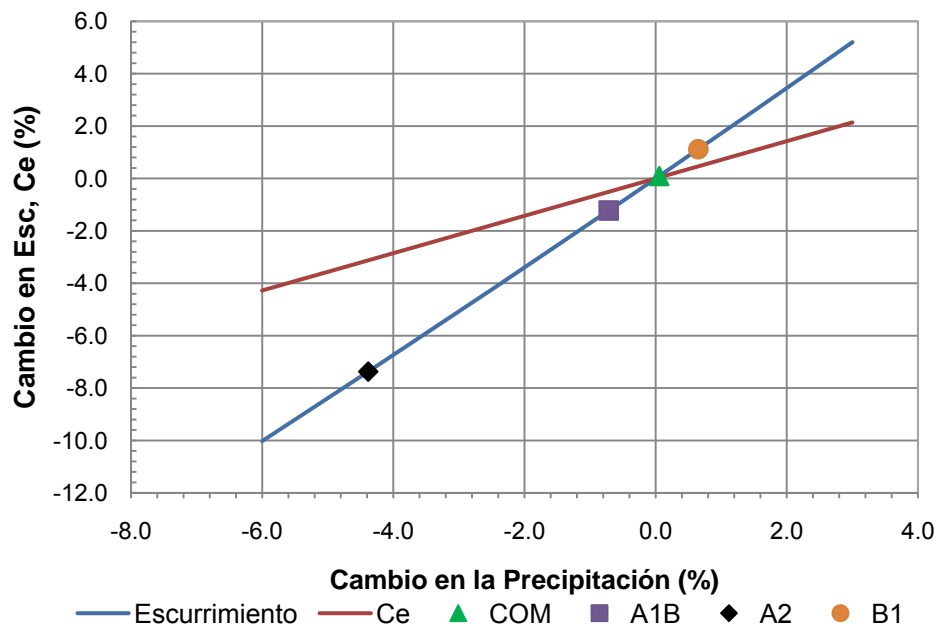
En este cuadro se presentan como ejemplo los resultados para los meses de mayo, julio y septiembre de cuatro combinaciones de parámetros que contemplan: 1) un incremento en la temperatura y en la radiación, 2) un incremento en la temperatura y una disminución en la humedad relativa, 3) un incremento en la temperatura y la velocidad del viento, y 4) un incremento simultáneo en la temperatura y radiación, y una disminución en la humedad relativa. Haciendo una comparativa entre estas combinaciones puede apreciarse del cuadro anterior que los impactos en la evapotranspiración son mayores que los observados cuando se presenta un cambio solamente en la temperatura, siendo estos impactos dos, tres e incluso cinco veces mayores, dependiendo de la combinación de parámetros analizados. Este comportamiento puede ser explicado por el hecho de que en las combinaciones de parámetros presentadas se favoreció una mayor disponibilidad de energía así como un déficit en la humedad del aire lo cual genera una evapotranspiración mayor bajo el supuesto de que existe agua disponible para este propósito. De esta manera, con base en los resultados obtenidos es claro que ante las condiciones de cambio climático se puede esperar una disminución importante en la disponibilidad natural de agua en la cuenca Lerma-Chapala, lo cual pone de manifiesto la necesidad de acciones para enfrentar el problema descrito a través tanto de la mitigación como de la adaptación con el propósito de garantizar el acceso futuro al agua.

Una limitación del análisis presentado es debida al hecho que éste se basó únicamente en los efectos de las variables climáticas sin tomar en cuenta los parámetros relativos a la vegetación, la cual puede mostrar un comportamiento diferente al actual debido al incremento en la emisión de CO<sub>2</sub>, causando cambios en el tamaño de las plantas, en su distribución sobre el terreno y en la profundidad de sus raíces, todo lo cual tiene efectos directos en la evapotranspiración. A pesar de lo anterior, los resultados obtenidos muestran buena concordancia, especialmente en los cambios observados para una sola variable, con los resultados obtenidos por Martin *et al.* (1989) en un estudio donde se analizó la sensibilidad de la evapotranspiración en un campo de trigo, un bosque y un

pastizal debida al cambio climático a través de la ecuación de Penman-Monteith basada en el flujo de calor latente.

#### 4.2.2 Análisis de sensibilidad del escurrimiento

En el caso del escurrimiento, los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad a nivel anual se presentan en la Figura 13, y a nivel mensual en las Figuras 14 y 15. En estas figuras se pueden observar los impactos de los cambios en la precipitación tanto en el coeficiente de escurrimiento como en la generación propia del mismo. Al igual que en el caso de la evapotranspiración, la condición más desfavorable se da con el escenario A2, sin embargo, en el caso del escenario B1, de acuerdo con la tendencia de la precipitación se puede esperar un aumento en el escurrimiento.



**Figura 13 Sensibilidad del escurrimiento y del coeficiente de escurrimiento respecto a un cambio en la precipitación anual**

En términos generales, de acuerdo con los escenarios de cambio climático, en promedio a nivel global, se pueden esperar un aumento de 1.1% en el escurrimiento para el escenario B1, una disminución en el mismo de 1.2% de



acuerdo con el escenario A1B, así como una disminución de hasta 7.4% para el escenario A2, todos ellos referidos a finales de este siglo. De acuerdo con estos resultados, se puede observar que el mayor impacto podría darse en los meses que comprenden la estación lluviosa, ya que es la época del año donde se da la mayor concentración de escurrimiento, por lo cual una disminución en la cantidad de lluvia recibida en la cuenca puede afectar seriamente la cantidad de escurrimiento generado en la misma.

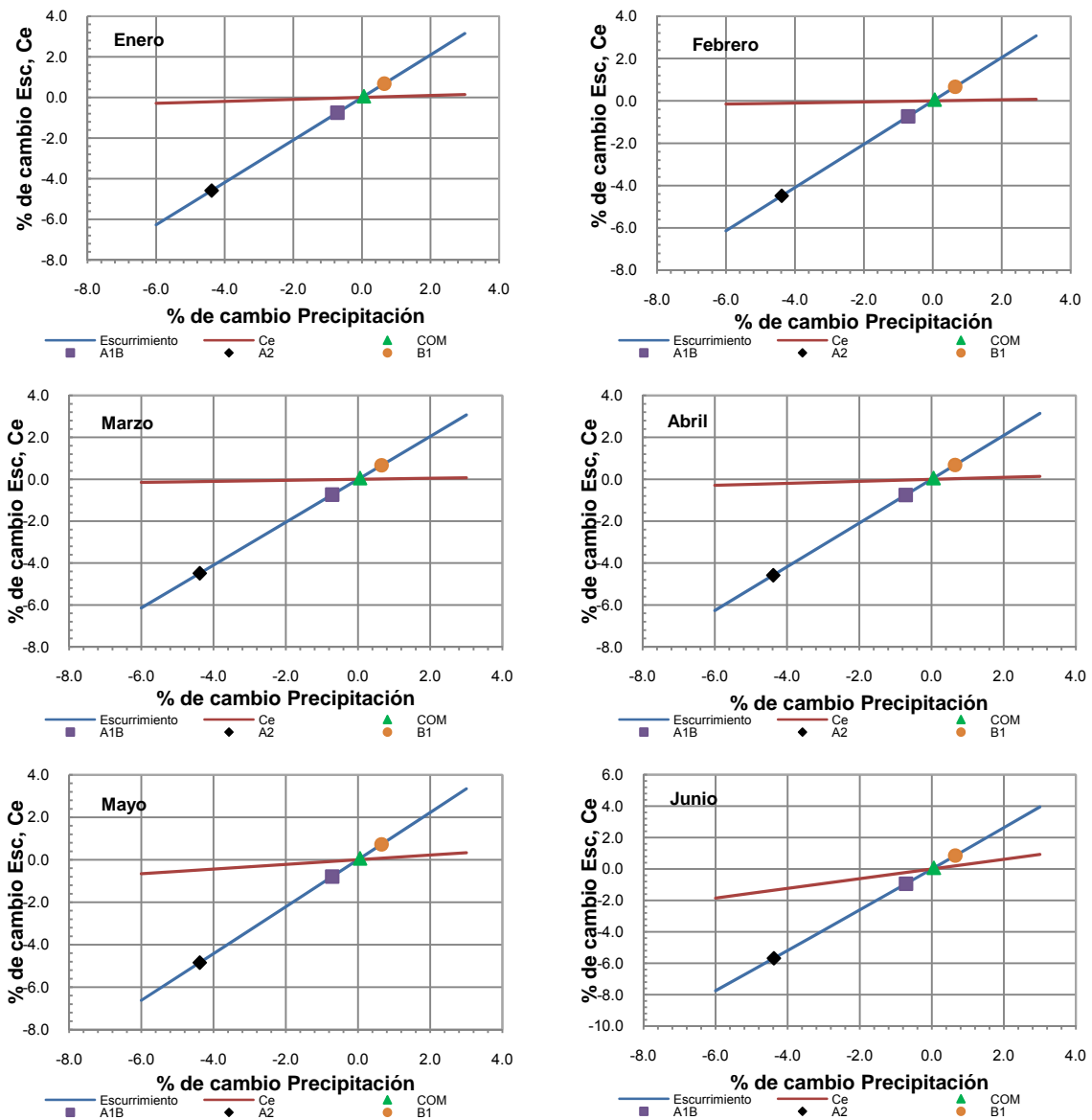


Figura 14 Sensibilidad del escurrimiento y del coeficiente de escurrimiento respecto a un cambio en la precipitación mensual (Enero-Junio)

Bajo estas condiciones es claro que una disminución de la precipitación se convierte en un factor que contribuye a la vulnerabilidad del sector hídrico de la cuenca ya que de acuerdo con lo observado se pone en peligro la satisfacción de la demanda debido a una disminución en la disponibilidad. Así, de acuerdo con los escenarios de cambio climático en el caso del escenario A2 se generaría un fuerte problema ya que la disminución provocada en la disponibilidad sería mayor al volumen demandado por el sector pecuario o el industrial.

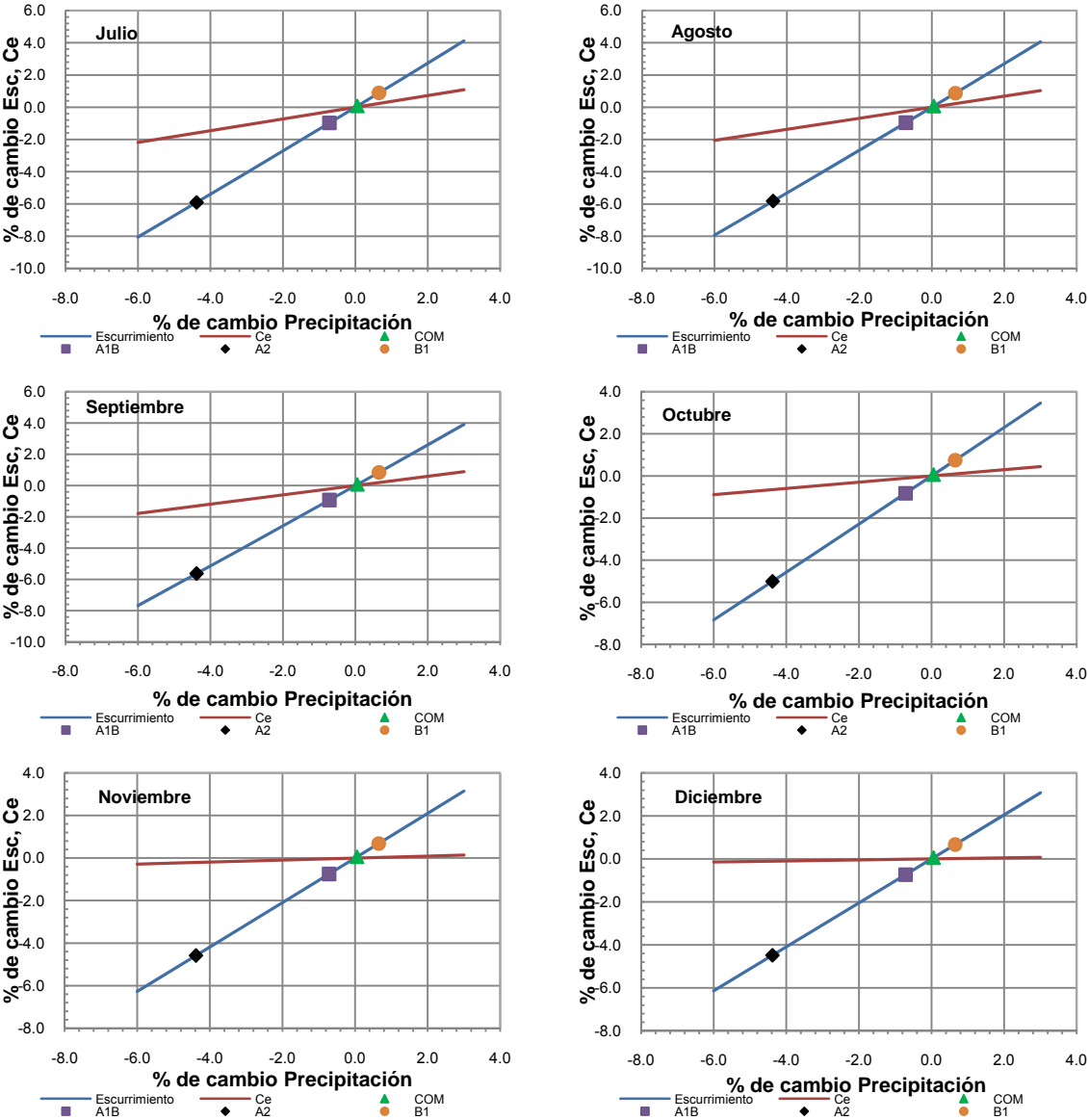


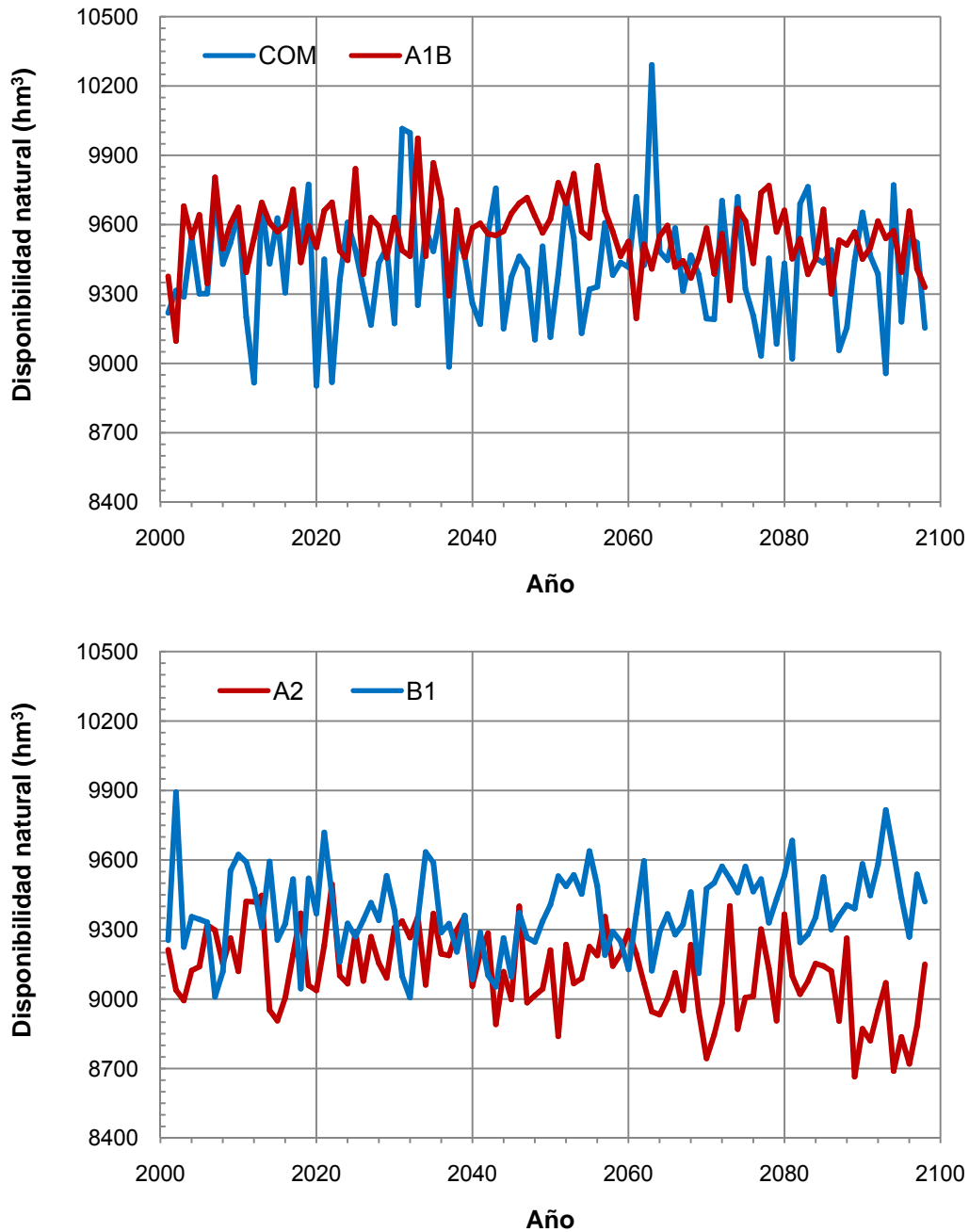
Figura 15 Sensibilidad del escurrimiento y del coeficiente de escurrimiento respecto a un cambio en la precipitación mensual (Julio-Diciembre)

#### 4.2.3 *Análisis de la disponibilidad natural ante el cambio climático*

A partir del promedio histórico de la precipitación para el periodo 1940-2001 y haciendo la hipótesis de que la recarga de los acuíferos se mantiene constante para el periodo de análisis (2000-2098) se obtuvo la disponibilidad natural para cada uno de los escenarios de cambio climático, misma que se presenta a nivel global (cuenca Lerma-Chapala) en las Figuras 16a y 16b. En dichas figuras se puede observar que si bien, la disponibilidad natural en su promedio se mantiene casi constante para los escenarios COM y A1B, y presenta una tendencia ligera en el caso de los escenarios A2 y B1, a nivel interanual presenta variaciones importantes que van de los 100 a los 600 hm<sup>3</sup> dependiendo del escenario analizado. La magnitud mencionada en las variaciones interanuales de la disponibilidad es muy importante tomando en cuenta que por ejemplo, la demanda anual de los sectores pecuario e industrial en el año 2000 era de 300 hm<sup>3</sup> en promedio en cada uno de ellos (DOF, 2006). El comportamiento señalado no es nuevo en la cuenca en estudio, ya que como se observa en la Figura 17, esta cuenca ya ha experimentado en el pasado disminuciones importantes en la precipitación anual que incluso llegan a ser mayores a las disminuciones que establecen los escenarios de cambio climático, lo que obligó en el pasado a tomar medidas encaminadas a la disminución de los volúmenes concesionados para la satisfacción de la demanda de los usuarios de agua en la cuenca, creando con ello una mayor presión sobre el recurso.

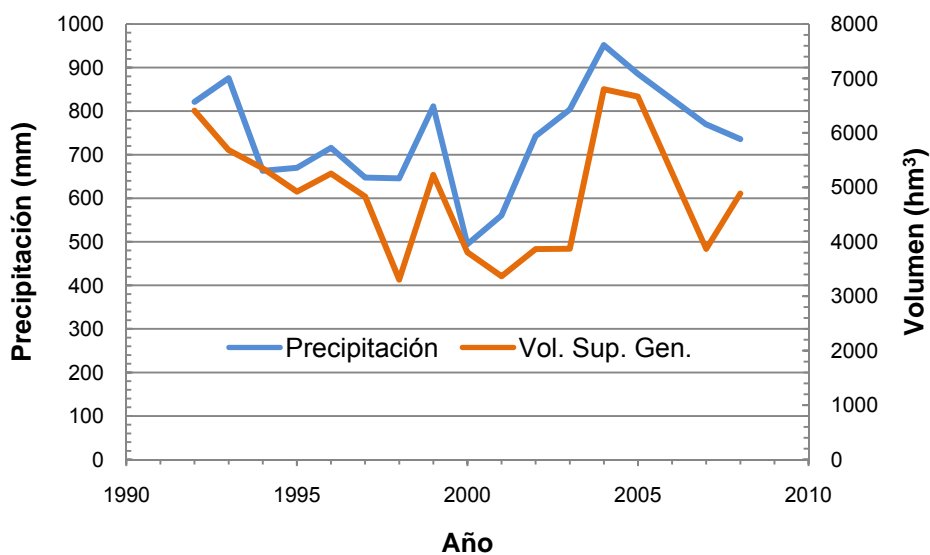
En los resultados presentados en las Figuras 16a y 16b hay que tomar en cuenta que se está haciendo el supuesto de que la recarga de los acuíferos se mantiene constante a través de todo el periodo bajo análisis, lo cual genera que el impacto observado en la disponibilidad promedio a largo plazo no sea tan drástico. Esto podría ser considerado como una limitación del estudio, no obstante, hay que tomar en cuenta que estos son sólo escenarios y no pronósticos, lo cual permite que los escenarios de disponibilidad obtenidos puedan ser utilizados como base

para la determinación de los impactos que podría ocasionar el cambio climático en la cuenca en estudio.



**Figura 16 Disponibilidad natural de agua en la cuenca Lerma-Chapala de acuerdo con los escenarios de cambio climático**

El comportamiento del escurrimiento natural bajo las condiciones de cambio climático para cada una de las subcuencas puede ser consultado de manera gráfica en el anexo a.3. En las figuras presentadas en el citado anexo se puede apreciar un comportamiento temporal del escurrimiento muy heterogéneo, caracterizado por una alta variabilidad interanual para todos los escenarios de cambio climático analizados así como una ligera tendencia al incremento del escurrimiento bajo las condiciones del escenario B1 y una tendencia a la disminución del mismo de acuerdo con las condiciones del escenario A2. La magnitud de la pendiente de las tendencias lineales observadas durante el periodo de análisis para los cuatro escenarios de cambio climático es presentada en el Cuadro 7. En dicho cuadro se puede apreciar que las tendencias estadísticamente significativas fueron encontradas para los escenarios A2 y B1 en prácticamente la totalidad de las subcuencas, con niveles de significancia inferiores o iguales al 5%. Sin embargo un aspecto importante es que las tendencias encontradas para el escenario A2 en su totalidad son negativas, es decir muestran tendencias decrecientes, mientras que en el caso del escenario B1 las tendencias estadísticamente significativas resultaron positivas lo que indica una tendencia al incremento del escurrimiento en años futuros.



**Figura 17 Comportamiento de la precipitación y el escurrimiento superficial generado en la cuenca Lerma-Chapala durante el periodo 1992-2007 (basado en boletines anuales CNA)**

Las tendencias más críticas para el escenario A2 muestran que las mayores disminuciones en el escurrimiento natural se darían en las subcuencas Lerma7 y Cuitzeo, mientras que los aumentos significativos de acuerdo con el escenario B1 se darían en las cuencas Lerma2 y Lerma3. Los resultados anteriormente mencionados muestran el comportamiento global del escurrimiento, sin embargo como se había mencionado, la variabilidad interanual del mismo es muy fuerte por lo que es necesario también su análisis.

**Cuadro 7 Pendiente de la tendencia lineal observada en el escurrimiento natural con base en los escenarios de cambio climático a nivel subcuenca**

Subcuenca	Eskurrimiento natural			
	COM	A1B	A2	B1
Angulo	-0.0327	-0.0400	-0.1970**	0.0544
Cuitzeo	-0.1117	-0.1081*	-0.4313**	0.1350*
Duero	0.0094	-0.0898 <sup>+</sup>	-0.3016**	-0.0080
Jaltepec	-0.0046	-0.0054	-0.0433**	0.0250*
La Gavia	-0.0031	-0.0056	-0.0598**	0.0491**
Laja1	-0.0144	-0.0181	-0.0474 <sup>+</sup>	0.0782*
Laja2	0.0002	-0.0075	-0.0175*	0.0276**
Lerma1	-0.0198	-0.0309	-0.1505**	0.1277**
Lerma2	0.0500	-0.0627	-0.1713**	0.1993**
Lerma3	-0.0241	-0.0407	-0.2190**	0.1438*
Lerma4	-0.0244	-0.0478	-0.1507**	0.1122**
Lerma5	-0.0983	-0.0529	-0.2221**	0.1342*
Lerma6	-0.0257	-0.0317	-0.1277**	0.0398
Lerma7	0.1512	-0.2854**	-0.6693**	-0.0277
Patzcuaro	-0.0193	-0.0268	-0.1238**	0.0326
Río Querétaro	0.0229	-0.0168	-0.0125	0.0439*
Río Turbio	-0.0257	-0.0324*	-0.0733**	0.0236
Yuriria	-0.0206	-0.0088	-0.0634**	0.0424**
Zula	0.0046	-0.0461 <sup>+</sup>	-0.1140**	0.0101
Lerma-Chapala	-0.2527	-0.8640 <sup>+</sup>	-2.7835**	1.3217*
<b>Mínimo</b>	-0.2527	-0.8640	-2.7835	-0.0277
<b>Máximo</b>	0.1512	-0.0054	-0.0125	1.3217
<b>Desv. Est.</b>	0.07517	0.19205	0.60516	0.28693

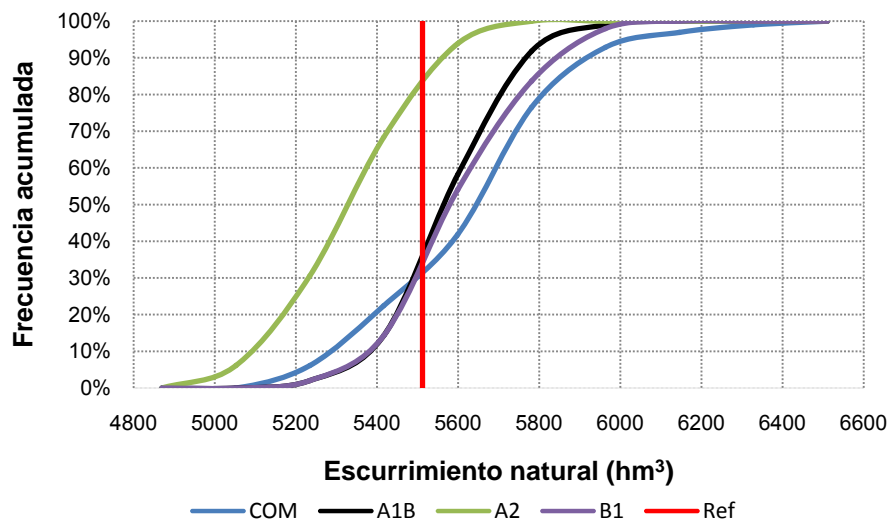
\*\* Estadísticamente significativo, nivel  $\alpha = 0.01$ ; \* Estadísticamente significativo, nivel  $\alpha = 0.05$ ; <sup>+</sup> Estadísticamente significativo, nivel  $\alpha = 0.10$ .

En este sentido, con el propósito de estudiar dichas variaciones, se calculó a nivel anual el porcentaje de variación del escurrimiento natural bajo los escenarios de cambio climático comparándolos con el escurrimiento natural histórico observado en la cuenca, los resultados obtenidos se muestran en el cuadro número 8 donde se presentan únicamente los estadísticos descriptivos a nivel subcuenca. A partir de este cuadro se puede observar que los escenarios de cambio climático plantean disminuciones del escurrimiento natural a nivel anual que representan hasta el 21.5% del escurrimiento histórico, como se observa en el caso de la subcuenca Cuitzeo, la cual presenta los valores más críticos en cuanto a la disminución del escurrimiento bajo los cuatro escenarios de cambio climático. Por otro lado, en el caso del aumento de escurrimiento, a partir del Cuadro 8 se puede apreciar que con base en el escenario B1 se podrían dar incrementos de hasta un 14.7% respecto del escurrimiento histórico, siendo las más beneficiadas las subcuencas Lerma1, Lerma2, Jaltepec, Río Querétaro y Lerma3. De la misma manera, con el objetivo de profundizar sobre los impactos que podría ocasionar el cambio climático en el escurrimiento, se realizó un análisis para determinar la probabilidad de no excedencia del valor histórico del escurrimiento natural, como resultado se obtuvieron las distribuciones de frecuencia acumulada del escurrimiento para cada uno de los escenarios de cambio climático, dichas distribuciones se presentan a nivel global en la Figura 18, mientras que las distribuciones a nivel subcuenca son presentadas en el anexo a.4. En las figuras mencionadas se representa además el escurrimiento histórico para cada una de las subcuencas con el propósito de visualizar la magnitud de los impactos que plantean los escenarios de cambio climático. De forma complementaria, en el Cuadro 9 se presentan de forma numérica las probabilidades de no excedencia del escurrimiento histórico en cada una de las subcuencas de acuerdo con los escenarios de cambio climático. En dicho cuadro se puede apreciar que la condición más desfavorable para la ocurrencia de escurrimiento se presentaría de acuerdo con el escenario A2, donde la probabilidad de no exceder el valor histórico va del 73 al 100% mientras que en los otros escenarios se encuentra en promedio entre un 30 y un 90%.

**Cuadro 8 Estadísticos descriptivos del porcentaje de variación anual del escurrimiento natural bajo las condiciones de cambio climático respecto del escurrimiento natural histórico observado en la cuenca**

Cuenca	Escenario de cambio climático															
	COM				A1B				A2				B1			
	Mín	Máx	Med	DE	Mín	Máx	Med	DE	Mín	Máx	Med	DE	Mín	Máx	Med	DE
Angulo	-11.3	16.2	-0.3	5.2	-9.1	7.1	-1.5	3.0	-14.6	3.5	-5.9	3.9	-10.6	9.6	-1.5	3.8
Cuitzeo	-21.5	10.2	-5.6	6.3	-16.8	1.6	-6.0	3.6	-21.5	-3.1	-11.8	4.4	-15.6	7.1	-5.7	4.2
Duero	-9.7	18.1	0.7	4.9	-8.6	5.6	-1.3	2.9	-16.7	3.9	-5.7	4.1	-9.9	10.5	-1.4	3.9
Jaltepec	-14.5	18.1	-0.1	6.3	-9.8	7.7	-0.1	3.6	-17.5	2.1	-5.8	4.3	-10.0	12.2	0.4	4.2
La Gavia	-17.6	18.9	0.0	6.6	-13.1	8.4	0.3	3.8	-17.8	3.4	-6.3	4.3	-9.6	13.3	0.7	4.6
Laja1	-7.2	14.5	1.9	3.8	-6.0	6.9	0.6	2.4	-7.0	4.4	-2.2	2.6	-4.6	8.7	1.5	2.9
Laja2	-9.5	13.7	1.1	4.1	-8.4	6.9	0.2	2.6	-8.5	4.2	-2.9	2.9	-6.3	9.4	1.0	3.2
Lerma1	-17.6	21.0	-0.3	7.1	-14.2	9.6	0.1	4.1	-19.6	4.0	-7.0	4.6	-9.1	14.7	0.6	4.9
Lerma2	-14.6	19.2	0.6	5.9	-9.4	9.6	0.6	3.6	-13.9	4.0	-4.7	3.8	-7.8	12.7	1.2	4.4
Lerma3	-14.0	18.1	-0.2	6.1	-11.3	7.4	-0.5	3.5	-15.9	1.5	-5.9	4.1	-9.8	11.7	0.1	4.2
Lerma4	-13.1	12.8	-0.2	4.9	-9.9	7.3	-0.6	2.8	-12.4	1.6	-4.7	3.3	-7.6	7.6	0.0	3.3
Lerma5	-11.0	17.7	0.8	4.9	-7.9	6.7	-0.4	2.8	-12.5	4.1	-4.5	3.5	-7.1	8.5	0.0	3.4
Lerma6	-9.7	19.2	1.1	4.8	-6.4	6.8	-0.5	2.7	-11.7	4.0	-4.1	3.6	-8.0	8.8	-0.2	3.5
Lerma7	-9.1	16.0	0.8	4.7	-8.9	7.6	-1.4	3.2	-17.9	3.0	-5.9	4.2	-8.4	9.3	-1.1	3.6
Patzcuaro	-13.5	17.6	-0.8	6.1	-11.3	8.0	-2.0	3.5	-17.4	3.7	-7.3	4.6	-12.2	10.7	-2.3	4.4
Río Querétaro	-11.1	17.2	2.0	5.4	-9.5	8.2	0.6	3.5	-9.5	6.0	-3.0	3.6	-8.0	12.7	2.2	4.4
Río Turbio	-10.6	17.5	0.6	4.9	-8.0	5.9	-0.9	2.9	-13.6	2.9	-5.1	3.6	-9.2	7.4	-0.6	3.4
Yuriria	-13.6	12.0	-0.6	4.6	-9.0	7.0	-0.8	2.7	-13.9	1.6	-4.8	3.5	-8.2	7.4	-0.2	3.2
Zula	-10.7	17.8	0.9	5.1	-10.1	7.3	-1.2	3.4	-18.0	4.6	-5.7	4.4	-9.1	8.6	-0.8	3.9
Lerma-Chapala	-7.2	18.0	2.1	4.5	-7.3	8.6	1.0	2.7	-11.5	3.6	-3.3	3.3	-5.3	10.8	1.5	3.2





**Figura 18 Distribución de frecuencia acumulada del escurrimiento bajo las condiciones de cambio climático**

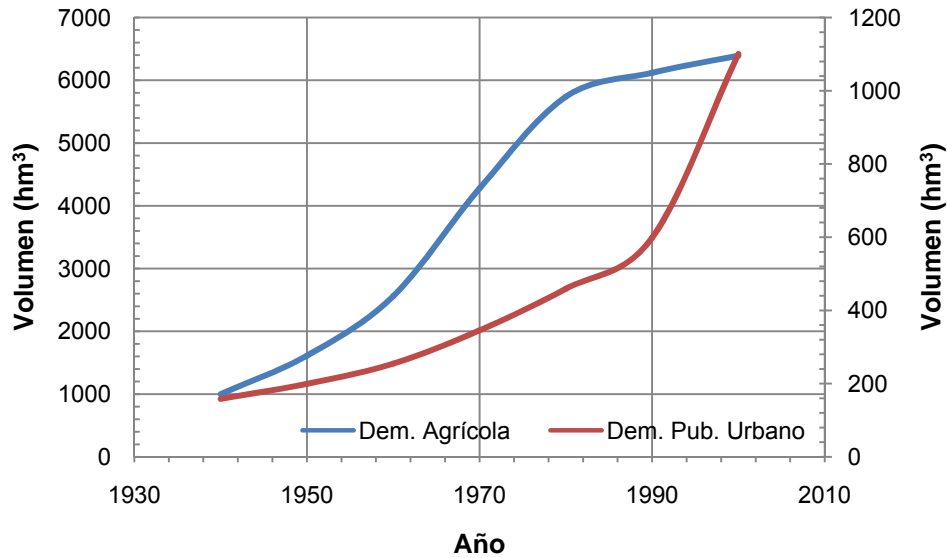
**Cuadro 9 Probabilidad de no exceder el escurrimiento histórico de acuerdo con los escenarios de cambio climático**

Cuenca	COM	A1B	A2	B1
	%	%	%	%
Angulo	51.6	66.5	91.2	65.7
Cuitzeo	84.2	94.8	100.0	92.6
Duero	44.3	67.0	89.5	63.6
Jaltepec	50.8	50.2	86.9	50.8
La Gavia	50.0	45.7	90.3	44.0
Laja1	30.4	41.0	77.3	29.6
Laja2	38.5	46.9	81.6	37.2
Lerma1	48.8	46.6	93.7	43.6
Lerma2	42.9	45.3	87.0	40.4
Lerma3	50.5	55.1	90.7	48.6
Lerma4	48.9	60.0	90.9	48.9
Lerma5	46.7	58.0	88.6	49.1
Lerma6	41.6	55.6	87.5	53.7
Lerma7	41.4	66.8	90.4	62.7
Patzcuaro	55.4	67.8	93.9	70.3
Río Querétaro	34.8	43.8	73.3	32.5
Río Turbio	49.8	57.7	89.0	56.6
Yuriria	53.0	62.0	86.7	53.2
Zula	43.7	64.5	86.7	58.2
Lerma-Chapala	32.7	37.4	81.8	35.3

### **4.3 Análisis de los factores que favorecen la vulnerabilidad del sector hídrico**

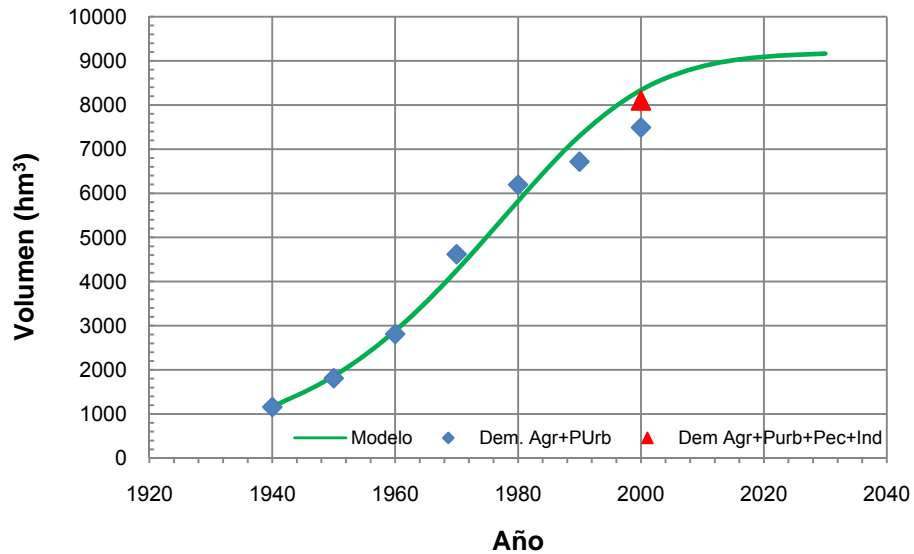
A partir de los resultados de la sección anterior se puede establecer el comportamiento global de la disponibilidad en la cuenca para cada uno de los escenarios de cambio climático, sin embargo para analizar de forma conjunta los factores que favorecen la vulnerabilidad del sector hídrico, es necesario conocer también el comportamiento de la demanda. De esta manera, a partir del Acuerdo por el que se da a conocer el estudio técnico de los recursos hídricos del área geográfica Lerma-Chapala (DOF, 2006) y de los censos de población y vivienda fue posible definir el comportamiento de la demanda de los sectores agrícola y público urbano, los cuales representan la mayor parte de la misma, siendo esta en términos generales del 92%. Los resultados obtenidos pueden apreciarse en la Figura 19. Las curvas características de la demanda de los dos sectores mencionados anteriormente fueron determinadas a partir de una dotación promedio por hectárea y por persona, respectivamente. Las curvas de demanda de los sectores pecuario e industrial no fueron construidas debido a la carencia de información histórica para su definición y al hecho de que estos sectores usuarios representan en su conjunto apenas un 8% de la demanda total, por lo que se considera que la ausencia de estos datos no altera de forma significativa los resultados del análisis de la relación disponibilidad - demanda. De la misma manera, en la Figura 19 puede apreciarse que a través de la historia, la demanda de los sectores agrícola y público urbano ha presentado un comportamiento creciente que en términos generales podría considerarse de tipo exponencial, sin embargo, en el caso de la curva de la demanda del sector agrícola se puede apreciar que su crecimiento en los últimos años ha disminuido de forma significativa como si estuviera convergiendo hacia un límite. La conclusión anterior se apoya en los resultados presentados en la Figura 20, los cuales fueron obtenidos a partir de la parametrización del modelo de crecimiento logístico adaptado para analizar el comportamiento de la demanda ante la existencia de

recursos limitados, los cuales en este caso fueron representados por la disponibilidad de agua en la cuenca.



**Figura 19 Comportamiento de la demanda de los usos agrícola y público urbano para el periodo 1940-2000**

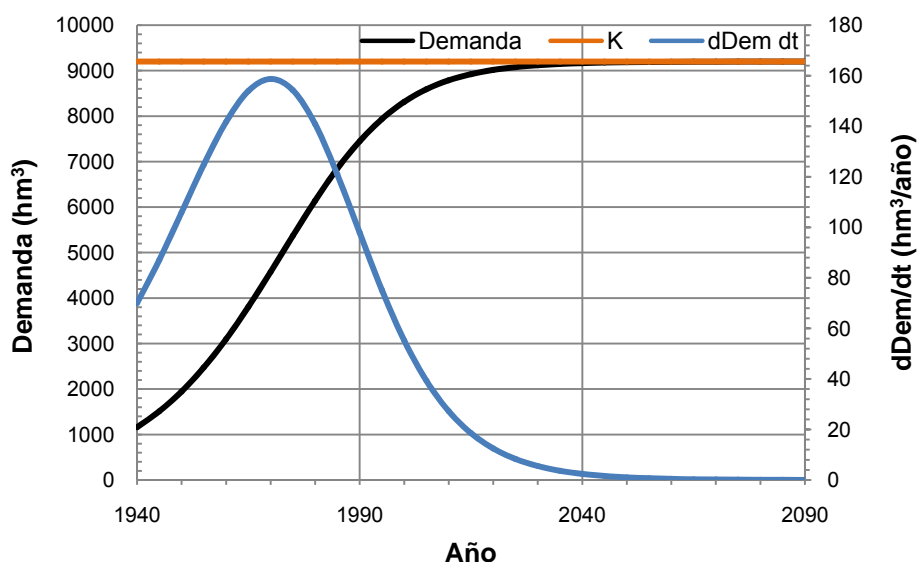
En esta figura puede apreciarse que en términos generales el modelo de crecimiento logístico adaptado al caso de estudio es capaz de simular el comportamiento dinámico existente entre la disponibilidad de agua en la cuenca y su demanda por parte de los dos principales usuarios, lo cual es debido a que el comportamiento de la demanda muestra las características de un proceso denso-dependiente sujeto a recursos limitados, es decir, a mayor cantidad de usuarios se da una mayor demanda, pero como los recursos son limitados, el crecimiento de la demanda trae como consecuencia que para poder satisfacer las necesidades de los nuevos usuarios se tenga que dar una disminución en la dotación del recurso asignado por usuario.



**Figura 20 Análisis de la relación disponibilidad - demanda en la cuenca Lerma-Chapala bajo la hipótesis de crecimiento limitado**

De esta manera, a partir de la figura anterior se puede apreciar que la problemática actual de la cuenca se basa en el hecho de que la demanda se encuentra muy próxima a la capacidad de carga de la cuenca, es decir, a que el volumen de agua demandado está alcanzando el volumen de agua disponible en la misma. Lo anterior pone de manifiesto que la demanda futura en la cuenca no puede crecer indefinidamente sino que para lograr establecer el equilibrio entre la disponibilidad y la demanda se deben buscar estrategias que permitan disminuir esta última. Toda esta situación puede apreciarse de forma más clara con el apoyo de la Figura número 21 donde se presenta el comportamiento de la demanda así como de su variación por unidad de tiempo, en ella se puede apreciar que si la demanda estuviera perfectamente regulada se podría llegar al equilibrio, manteniéndose así a través del tiempo, sin embargo, debido a la variabilidad ambiental y a fenómenos relacionados con los sectores usuarios esto es muy poco probable. De la Figura 21 se puede apreciar que la máxima tasa de crecimiento de la demanda de agua en una cuenca se da cuando los recursos no han sido explotados y después va disminuyendo en un factor igual a  $1 - de_a(t) / Di_a(t)$ . Una aclaración importante hasta este punto es que para la realización de esta simulación se tomó en cuenta una capacidad de carga

constante correspondiente a la disponibilidad del año 2000, la decisión de elegir este parámetro como constante en esta primera simulación se hizo tomando como base que en la cuenca aún no se llega al límite de saturación del sistema. Sin embargo, en la realidad se espera que dicha capacidad de carga no sea constante y por lo tanto genere oscilaciones en la curva que define el comportamiento de la demanda, como se mostrará más adelante, pero en términos generales sigue la tendencia del crecimiento logístico.



**Figura 21 Comportamiento de la demanda y de su cambio por unidad de tiempo bajo la hipótesis de crecimiento limitado**

En el caso de las simulaciones que toman en cuenta el cambio climático se decidió que a partir del año 2000 la capacidad de carga fuera variable con el propósito de analizar de qué manera afectan las variaciones al comportamiento de la demanda. Los resultados de las simulaciones tomando en cuenta los escenarios de cambio climático son mostrados en las Figuras 22 y 23, en ellas se observa que en términos generales la demanda se mantiene oscilando de acuerdo con los cambios observados en la disponibilidad. El mayor problema de acuerdo con estas simulaciones se presenta con base en el escenario A2, el cual aparte de las oscilaciones anuales de la demanda muestra una ligera tendencia a la disminución para finales de este siglo. En estas figuras se observa que las variaciones en la

demanda por unidad de tiempo son positivas hasta un máximo donde ya no se puede dar el crecimiento de las mismas y por lo tanto el cambio en la demanda a través del tiempo se vuelve negativo hasta hacerse cero cuando la demanda iguala a la disponibilidad, es decir, cuando el sistema entra en un estado de equilibrio. Por otro lado, en estas figuras es muy notoria la alta variabilidad ocurrida de un año a otro en la disponibilidad, lo cual trae como consecuencia que al encontrarnos en la vecindad de la capacidad de carga del sector hídrico, la demanda sufra grandes cambios de un año a otro para poder mantener el equilibrio. La variabilidad anual observada en el comportamiento de la demanda así como de su derivada son mostrados en las Figuras 24 y 25, en ellas se puede apreciar que el comportamiento de la demanda es muy errático y depende directamente de los cambios ocurridos en la disponibilidad. Asimismo se puede apreciar que de acuerdo con los escenarios utilizados, el problema de la variabilidad anual toma importancia toda vez que para mantener el equilibrio, en el caso del escenario COM sería necesario reducir la demanda hasta en 20 y 40  $\text{hm}^3/\text{año}$  en los casos más extremos, mientras que en el caso del escenario A1B se requerirían disminuciones en la demanda de entre 20 y 30  $\text{hm}^3/\text{año}$  los cuales son mínimos comparados con los descensos requeridos en la demanda de acuerdo con el escenario A2 donde las disminuciones son más importantes, tomando en cuenta que conforme pasa el tiempo las disminuciones requeridas van incrementando desde los 20 a los 40  $\text{hm}^3/\text{año}$ , mientras que en el caso del escenario B1 las disminuciones irían de los 10 a los 20  $\text{hm}^3/\text{año}$ . En el contexto de los usuarios, las disminuciones mencionadas anteriormente representarían por ejemplo en el caso de una disminución de 10  $\text{hm}^3/\text{año}$  una reducción del abasto de agua a 136,986 personas al año, tomando como ejemplo el caso del uso público urbano, o bien, de dejar de suministrar el recurso a 1300 Ha en el caso del uso agrícola, en ambos casos tomando como base la dotación promedio unitaria observada en el año 2000. La situación anterior se agrava aún más si tomamos en cuenta que la población sigue creciendo constantemente y al haber una mayor cantidad de habitantes en la cuenca se requerirá de una mayor producción de alimentos. De esta manera puede observarse que un factor determinante de la

vulnerabilidad del sector hídrico de la cuenca tiene que ver con el incremento de los usuarios de agua al interior de la misma, así como con del estilo de consumo actual de agua por cada uno de los sectores usuarios de ella. De esta manera, es de esperar que para solucionar el problema, una de las soluciones tenga que ver con la disminución de la demanda, para lo cual, si tomamos en cuenta que la demanda de agua de los dos principales usuarios está definida por la ecuación 16, tendremos que la disminución de la misma dependerá directamente de la cantidad de tierra dedicada a las actividades agrícolas, de las dotaciones asignadas a los cultivos, de la dotación asignada al uso público urbano, de la cantidad de población demandante de agua y de la eficiencia en el riego.

Por otro lado, los resultados del análisis de la vulnerabilidad social se presentan de forma global en las Figuras 26 y 27 y a nivel subcuenca en el anexo a.5, en ellas se puede apreciar la evolución de la vulnerabilidad social durante el periodo de 1995 a 2005. En dichas figuras se puede observar que el mayor número de subcuencas con vulnerabilidad alta, de acuerdo a los indicadores utilizados para la determinación del índice, se encuentran en la zona del Alto Lerma. La vulnerabilidad de dichas cuencas está basada principalmente en los altos niveles de analfabetismo de la población y a la falta de los servicios de agua potable y drenaje. Por su parte, la zona del Medio Lerma presenta un nivel de vulnerabilidad medio que se encuentra caracterizado por una alta concentración de habitantes en cada una de las subcuencas, lo que genera que el número de usuarios de agua al interior de cada una de ellas sea alto, trayendo como resultado una fuerte presión sobre el recurso. Finalmente, la zona del Bajo Lerma resulto ser la de menor vulnerabilidad de acuerdo con los indicadores utilizados para la integración del índice. Los factores de mayor incidencia en la vulnerabilidad de cada una de las subcuencas pueden ser consultados en las figuras del anexo a.5. En dichas figuras hay que tomar en cuenta que la vulnerabilidad es relativa, es decir esta estandarizada de acuerdo con los valores mínimo y máximo observados para cada una de las subcuencas.

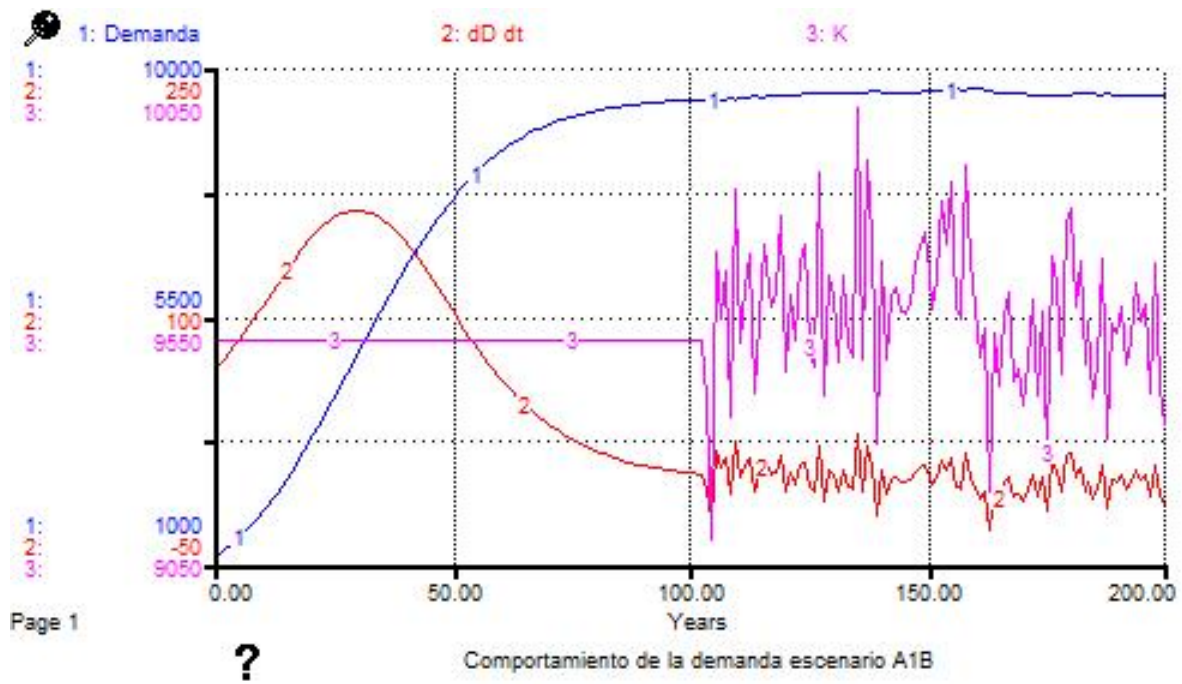
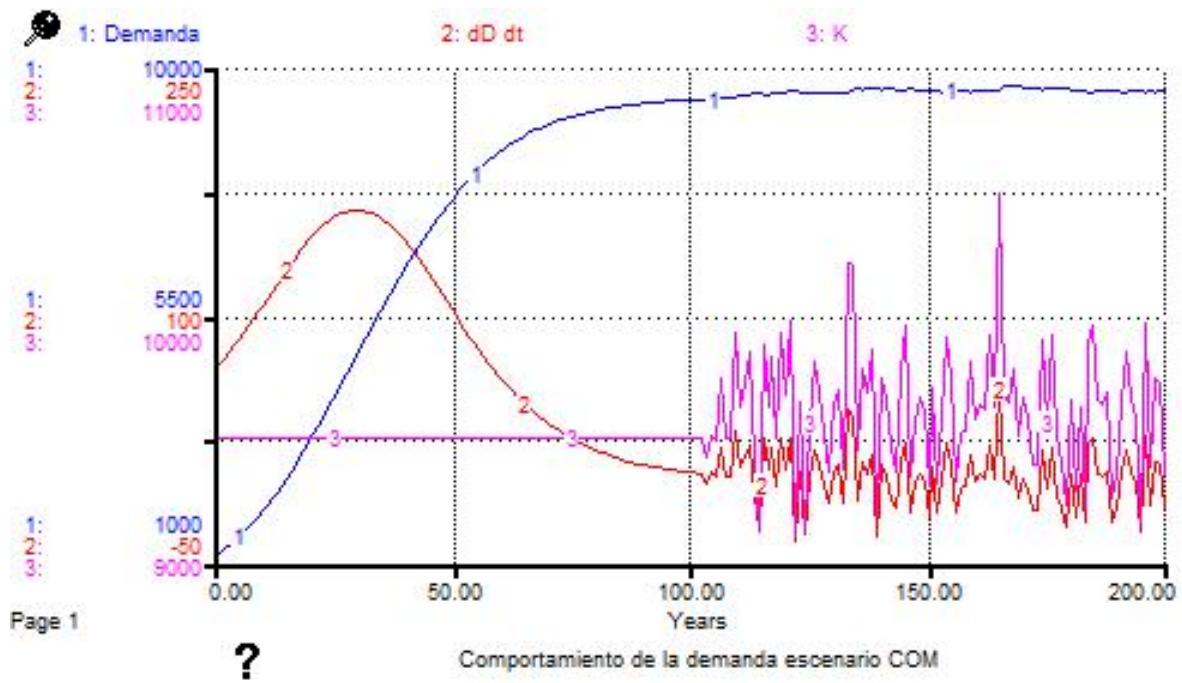


Figura 22 Comportamiento de la demanda bajo las condiciones de cambio climático para los escenarios COM y A1B



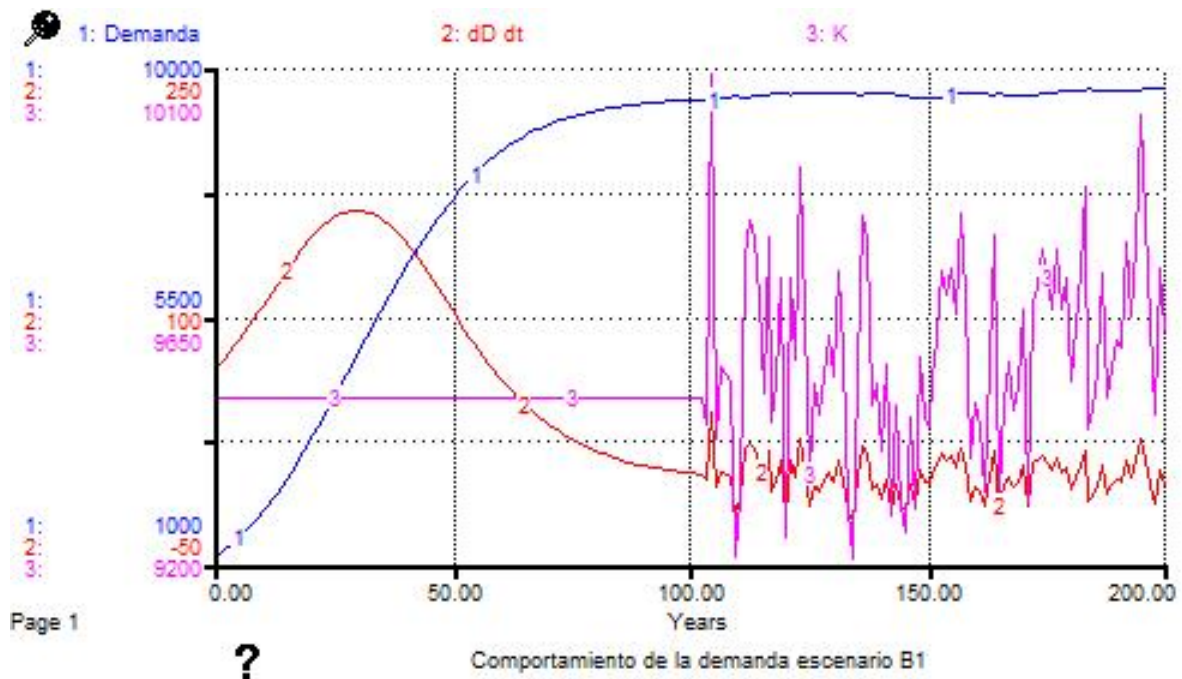
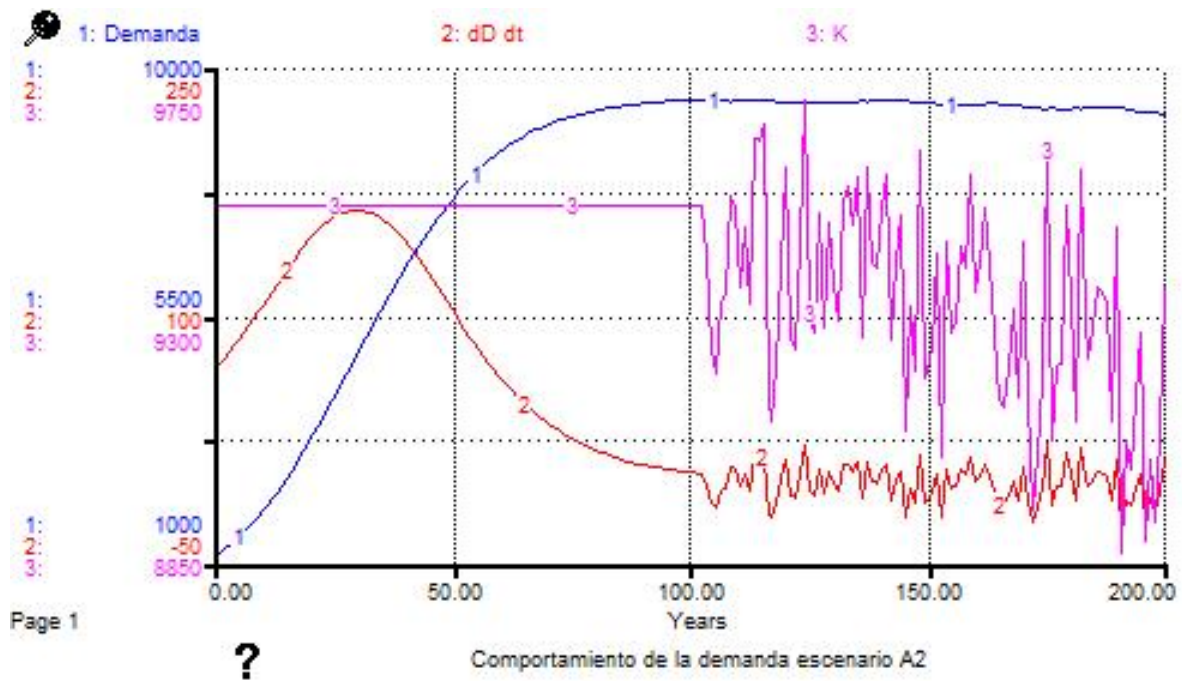
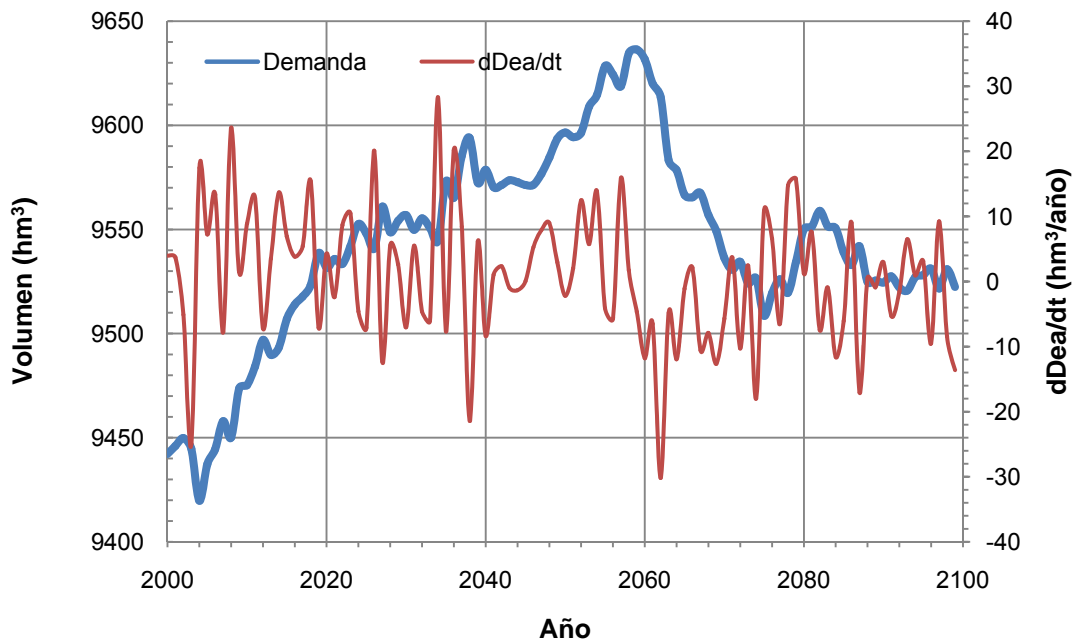
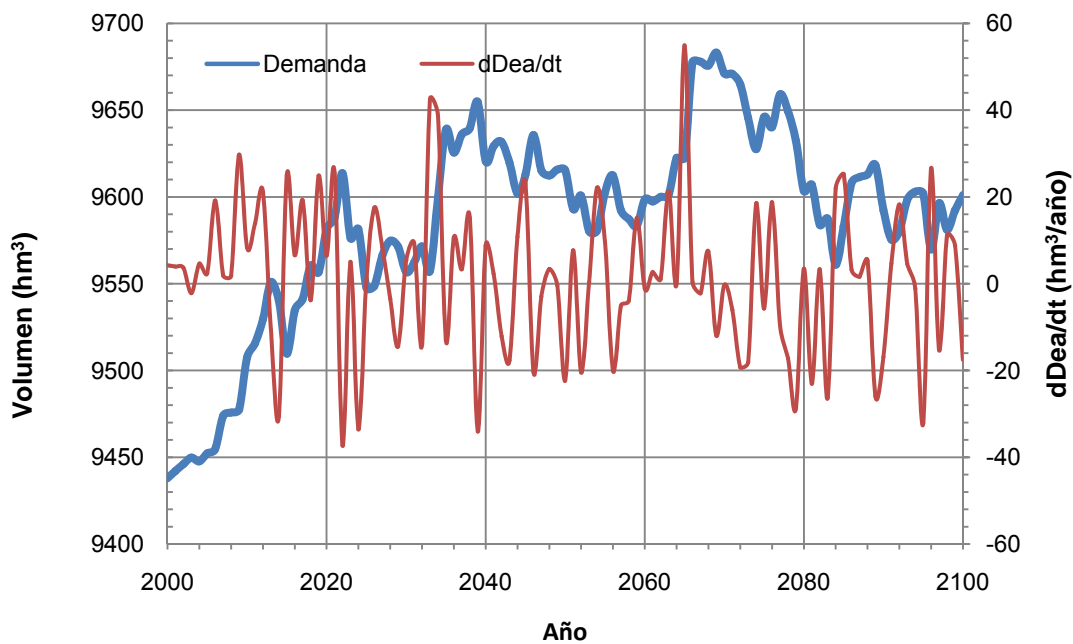
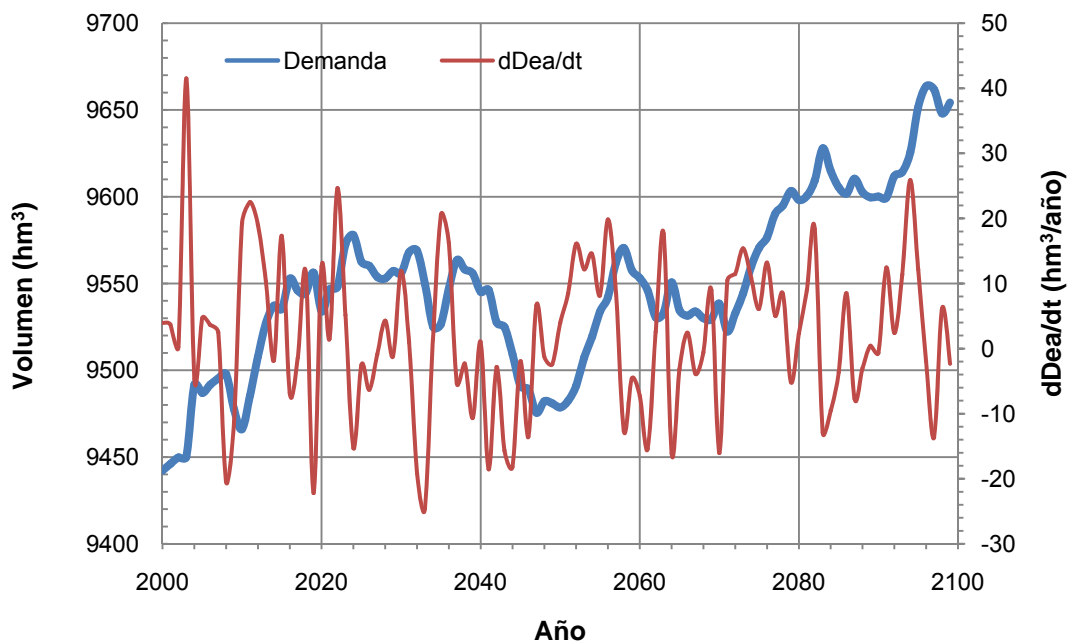
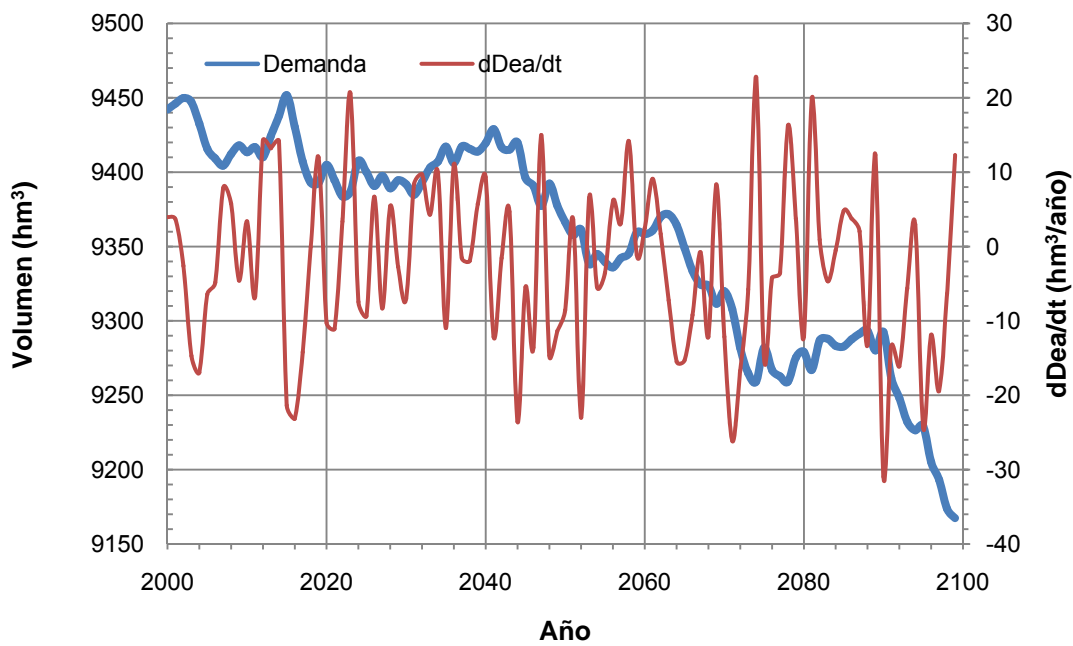


Figura 23 Comportamiento de la demanda bajo las condiciones de cambio climático para los escenarios A2 y B1



**Figura 24 Comportamiento de la demanda y su derivada bajo las condiciones de cambio climático para los escenarios COM y A1B**



**Figura 25 Comportamiento de la demanda y su derivada bajo las condiciones de cambio climático para los escenarios A2 y B1**

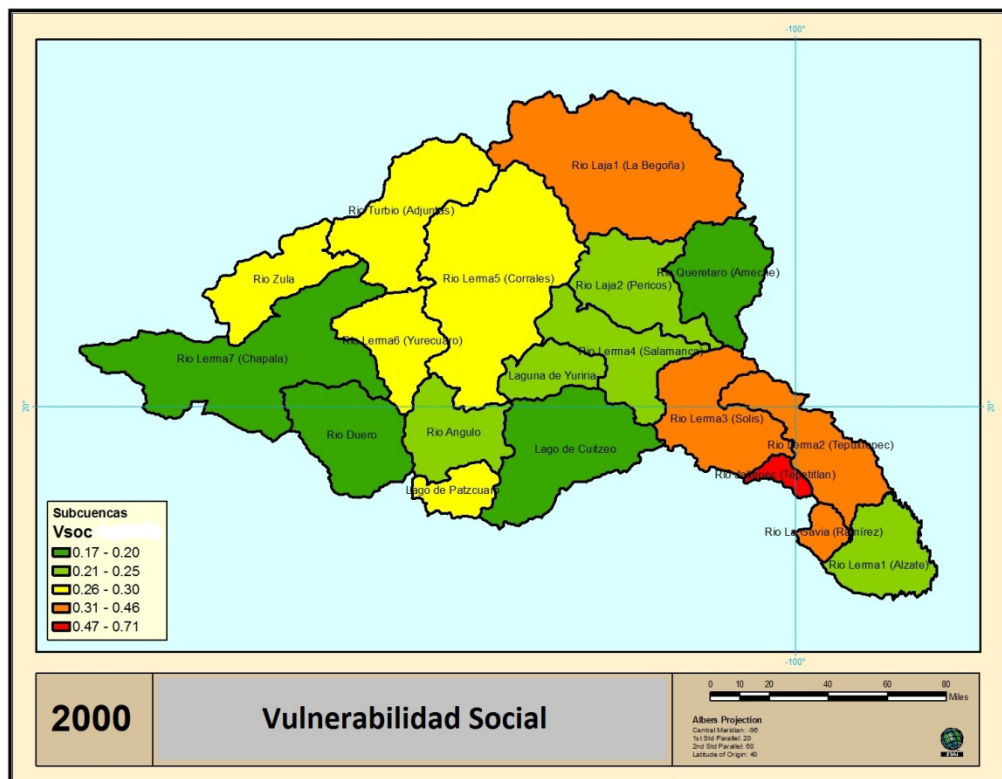
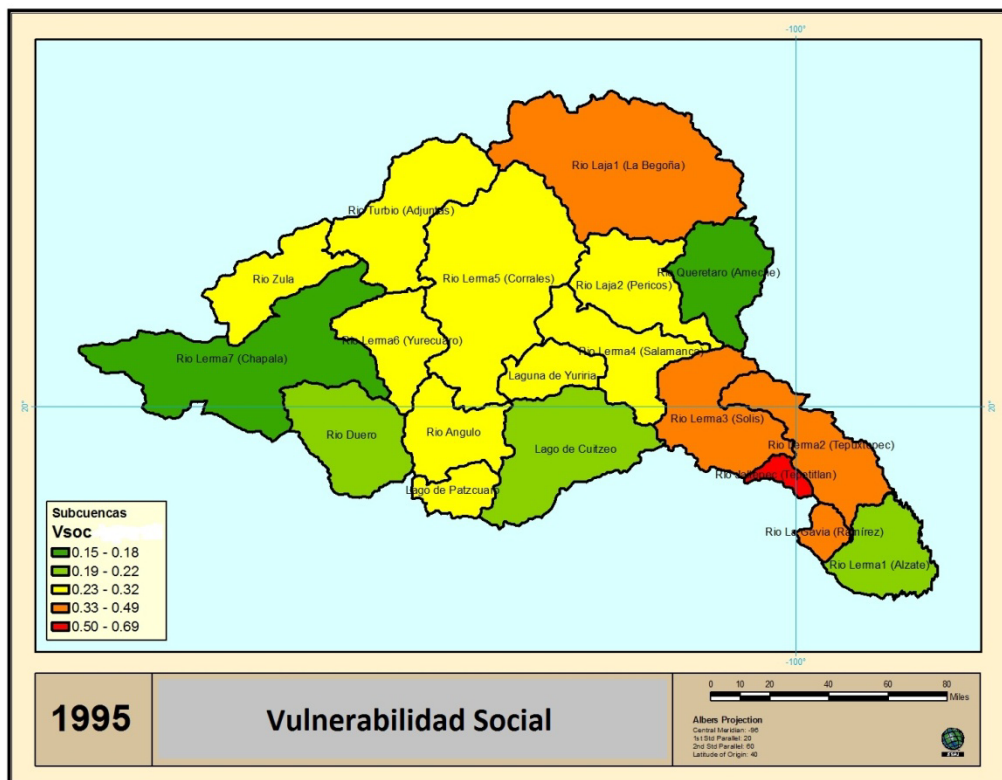


Figura 26 Índice de vulnerabilidad social en la cuenca Lerma-Chapala años 1995 y 2000

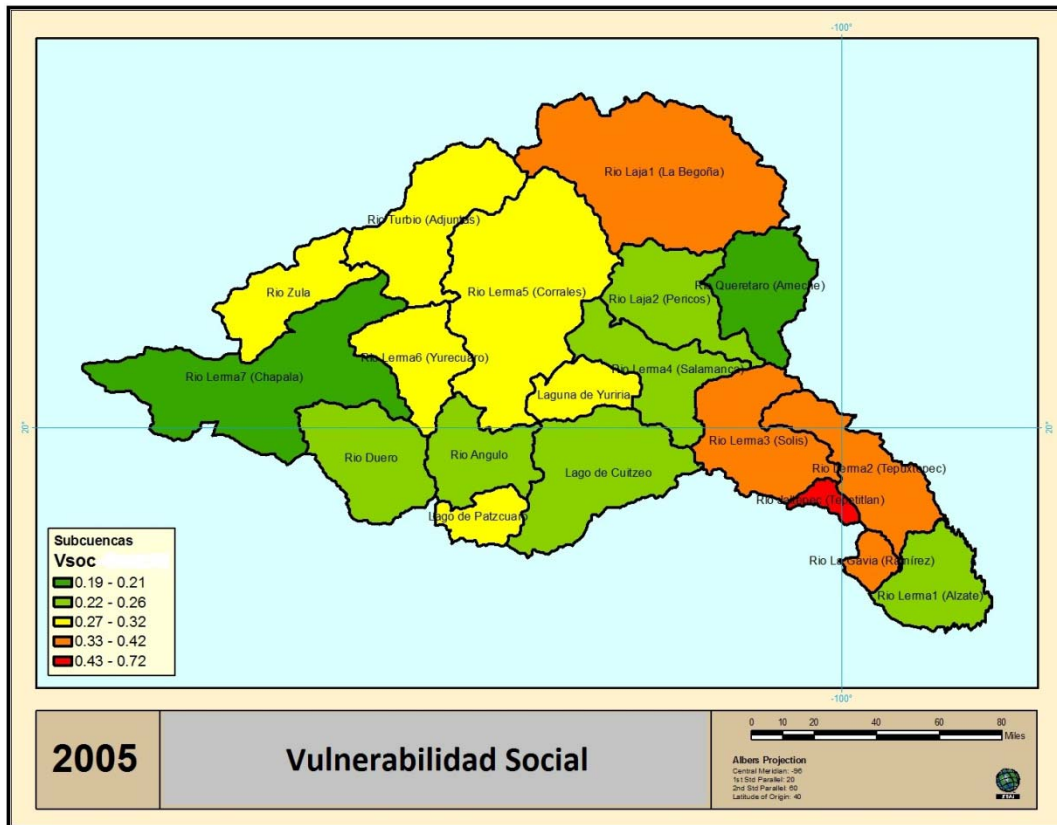
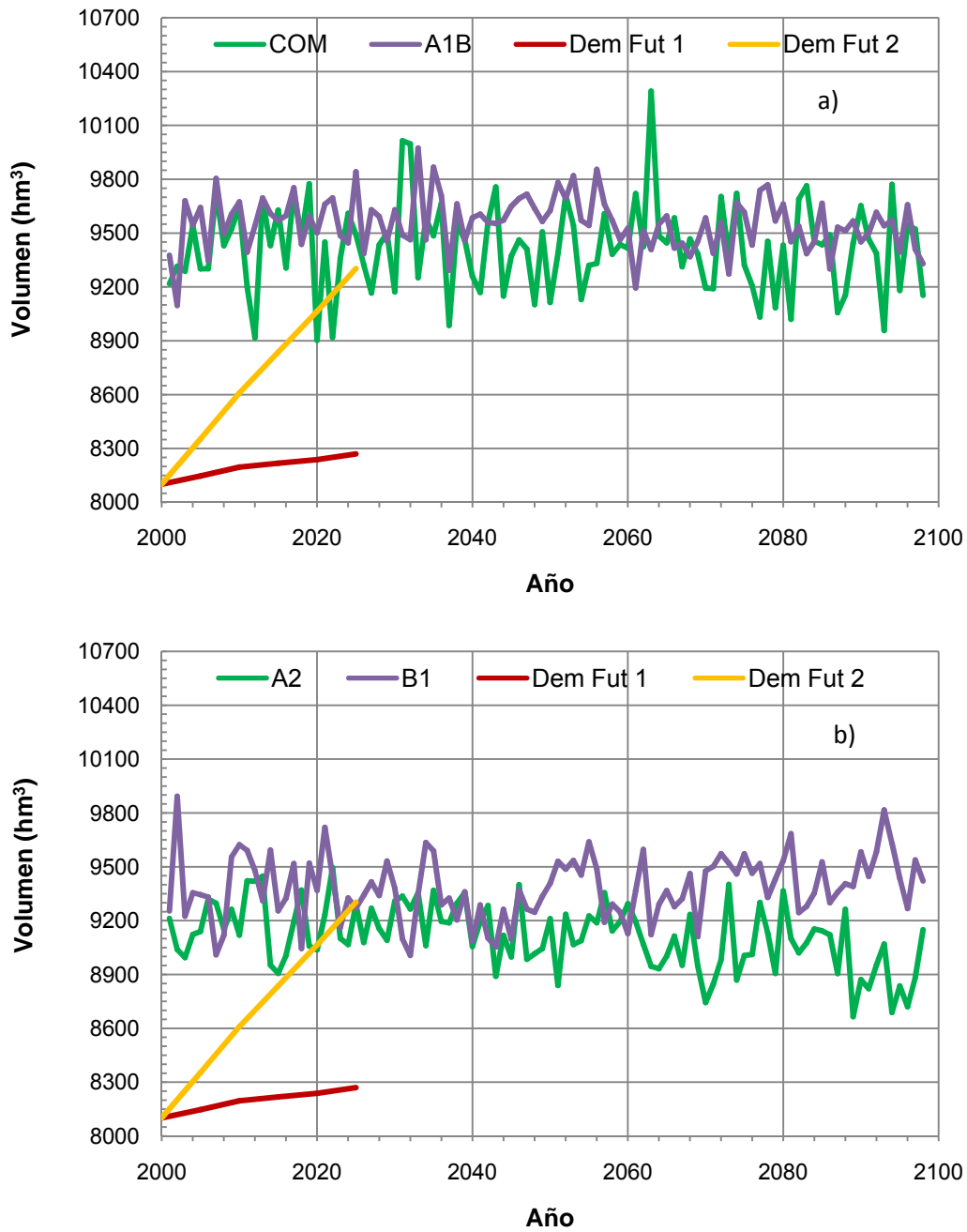


Figura 27 Índice de vulnerabilidad social en la cuenca Lerma-Chapala año 2005

#### 4.4 Identificación de medidas para la adaptación al cambio climático

Con base en la ecuación número 15 se puede observar que cuando la demanda es menor a la disponibilidad, la primera puede seguir creciendo, mientras que en el caso contrario es necesaria una disminución de la demanda para lograr un estado de equilibrio con la disponibilidad. Partiendo de esta situación y tomando como referencia la Figura 20, en este caso de estudio se puede observar que al ser menor la demanda que la disponibilidad, en la cuenca existe la posibilidad de que la demanda siga creciendo. Sin embargo, en esta figura se presenta únicamente la situación actual. Los escenarios del comportamiento futuro de la demanda son presentados en las Figuras 28 y 29. En la Figura 28, a partir de las proyecciones de población realizadas por el Consejo

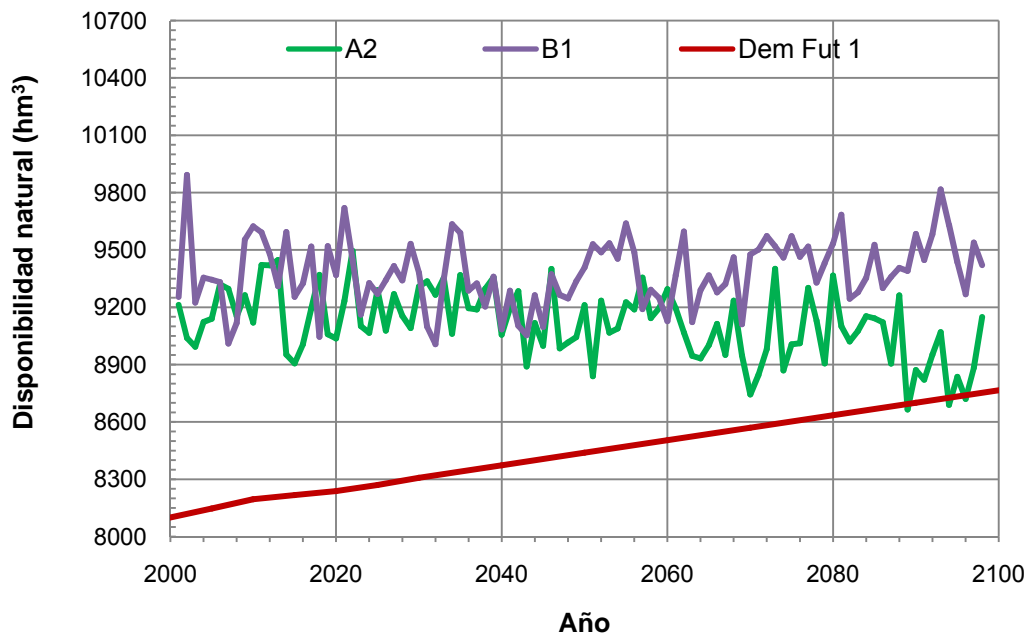
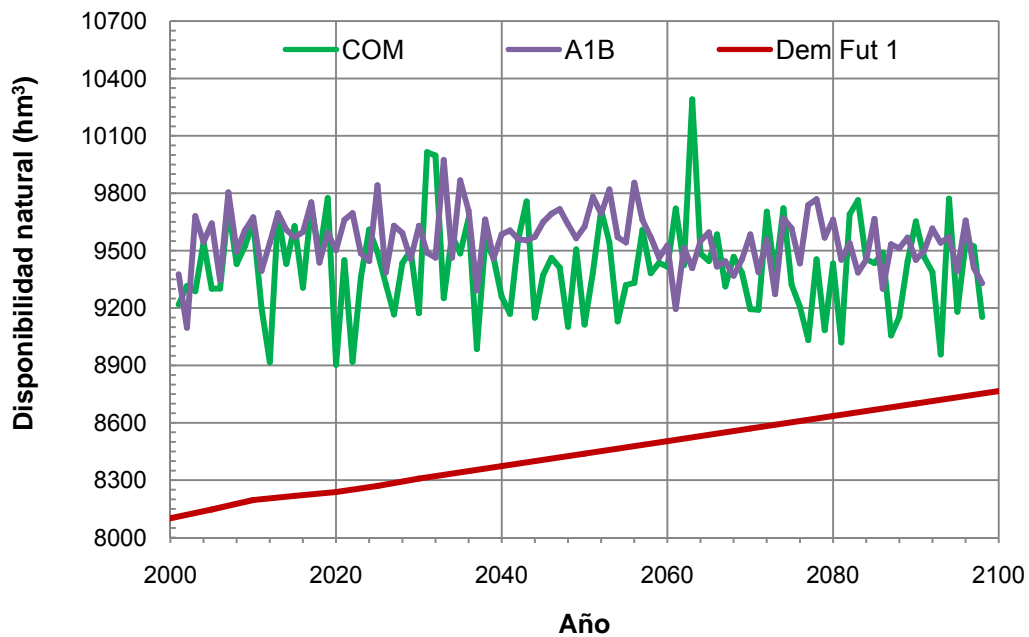
Nacional de Población (CONAPO) para las localidades que forman parte de la cuenca, y de la tendencia actual de crecimiento de la demanda del sector agrícola se determinó el nivel de demanda que se podría generar en el corto plazo, para el año 2025.



**Figura 28** Tendencia de la demanda de agua en la cuenca para el año 2025 para los escenarios a) COM y A1B, y b) A2 y B1

En esta figura, el escenario Dem Fut 1 representa la tendencia de crecimiento de la demanda tomando en cuenta que la parte correspondiente al sector agrícola se mantiene constante a partir del año 2000 y la demanda del sector público urbano sigue creciendo de acuerdo con la tendencia poblacional, mientras que el escenario denominado Dem Fut 2 toma en cuenta que la demanda del sector agrícola crece con una tendencia igual a la observada en la década 1990 – 2000 y la demanda del sector público urbano sigue creciendo de acuerdo con la tendencia poblacional, al igual que en el escenario anterior. En esta figura, es notorio el efecto que produce cada uno de los sectores demandantes de agua en la cuenca, donde el mayor peso es debido al sector agrícola, el cual en promedio crece 5.7 veces más rápido que el uso público urbano. De esta manera, al seguir con su ritmo de crecimiento actual, el uso agrícola ocasionaría que la demanda se iguale con la disponibilidad para el año 2025 de acuerdo con las condiciones esperadas en prácticamente todos los escenarios de cambio climático, generando con ello una fuerte presión sobre el recurso.

En el mismo sentido, en la Figura 29 se presenta el escenario de demanda del uso público urbano al realizar una extrapolación de las proyecciones de población de la CONAPO para finales de este siglo. En este nuevo escenario se sigue tomando en cuenta que la demanda del sector agrícola se mantiene constante a partir del año 2000. A partir de esta figura se puede apreciar que el nivel de demanda en la cuenca, bajo las condiciones actuales de operación, podría igualar a la disponibilidad de acuerdo con las condiciones que establece el escenario A2. Lo anterior pone de manifiesto la necesidad de establecer estrategias para la adaptación que permitan disminuir los efectos negativos que pudiera traer el cambio climático, ya que a partir de los resultados mostrados anteriormente es notorio que de seguir con las condiciones actuales en la demanda, se podría alcanzar el nivel de disponibilidad para finales de este siglo únicamente a partir del crecimiento de la demanda del sector público urbano.

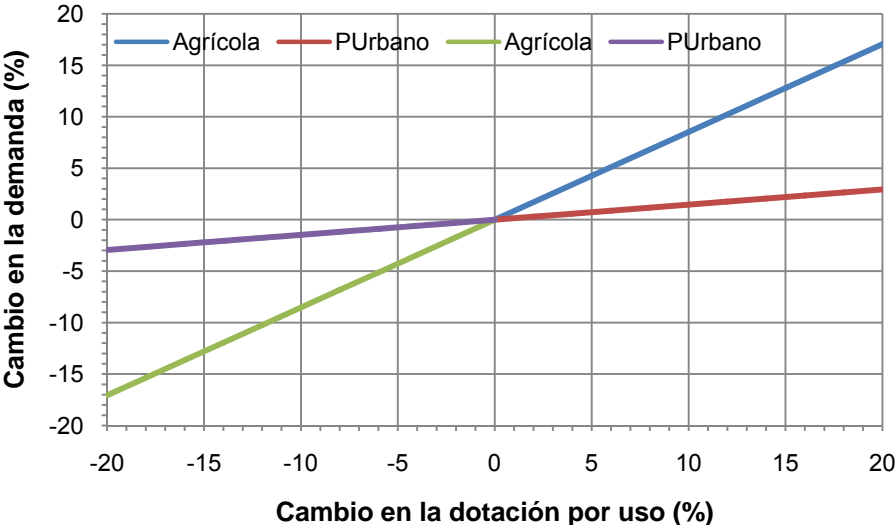


**Figura 29** Tendencia de la demanda de agua del uso público urbano en la cuenca para el año 2100 para los escenarios a) COM y A1B, y b) A2 y B1

De acuerdo con los resultados mostrados en las secciones anteriores se puede notar que los principales problemas del sector hídrico de la cuenca Lerma-



Chapala se centran en el hecho de que la demanda está muy próxima de alcanzar la disponibilidad de los recursos hídricos, lo cual en términos de *adaptación* implicaría que los usuarios de dichos recursos deberían preocuparse por buscar soluciones a nivel global, donde los mayores beneficios podrían obtenerse al desarrollar estrategias orientadas a los sectores agrícola y público urbano, de los cuales el primero es el más prometedor ya que como puede observarse en la Figura número 30, una disminución de un 10% en la dotación de este sector usuario trae como consecuencia una disminución en la demanda total de un 8.5%, mientras que en el caso del uso público urbano se tiene que una disminución en la dotación del 10% apenas causa una disminución en la demanda total de un 1.5%. Además de lo anteriormente expuesto, se tiene el problema de los cambios frecuentes en la disponibilidad que plantean los diferentes escenarios de cambio climático, los cuales se caracterizan por ocurrir a gran velocidad, de un año a otro, y por ser de magnitud importante, lo que puede afectar la vulnerabilidad de la cuenca al tomar en cuenta que la velocidad a la que se pueden instrumentar las estrategias de adaptación puede ser más lenta sobre todo partiendo del hecho que los mecanismos para su implementación se encuentran en la etapa de diseño.



**Figura 30** Análisis de sensibilidad de la demanda de agua en la cuenca ante un cambio en la dotación de los usuarios: agrícola y público urbano

De los resultados anteriores es evidente que el problema que enfrentará la cuenca bajo las condiciones de cambio climático será debido a una situación de desequilibrio entre la disponibilidad de agua y la demanda de la misma, el cual es causado por forzamientos naturales, como es el caso del cambio climático, así como por forzamientos humanos debidos principalmente a los patrones de consumo de agua por parte de cada uno de los sectores usuarios. La situación descrita anteriormente traerá como consecuencia que para lograr la adaptación en un futuro sea necesario el establecimiento de estrategias para la adaptación de acuerdo a las cinco categorías señaladas por Henry y Heinke (1999), a saber:

1. Compartir y sobrellevar las pérdidas, o aceptación

Partiendo de la tendencia general de las simulaciones que toman en cuenta los efectos del cambio climático, las cuales de manera global indican que en un futuro se pueden dar disminuciones importantes en la disponibilidad de agua, sería necesario crear conciencia sobre la vulnerabilidad del sector hídrico en los diferentes sectores usuarios del agua, con ello se favorecería que dichos usuarios puedan aceptar disminuciones en las dotaciones del agua concesionada con el propósito de favorecer la satisfacción de las necesidades hídricas de todos los usuarios en la cuenca. Lo anterior implicaría principalmente una disminución gradual de los volúmenes concesionados al sector agrícola, lo cual podría lograrse al disminuir la superficie bajo riego, o bien, al aumentar la eficiencia en el uso del agua. Por su parte, en el uso público urbano implicaría una disminución en la dotación promedio diaria por persona, lo cual podría ser factible de realizar tomando en cuenta que la satisfacción de las necesidades básicas requiere de un volumen menor al que actualmente se utiliza en promedio por persona en la cuenca (Gleick, 1996). De acuerdo con la magnitud de los resultados observados, la solución al problema podría darse con estrategias orientadas principalmente al sector agrícola, sin embargo en este punto es muy importante que las pérdidas

sean compartidas entre todos los sectores en la medida de lo posible, con el propósito de generar el menor número de daños indirectos, ya que por ejemplo, si se pensara en resolver el problema únicamente a partir del sector agrícola habría que valorar las implicaciones que tendría en los sectores productivo y laboral de la cuenca, sobre todo teniendo en cuenta que las actividades del sector primario son desarrolladas por comunidades de los estratos sociales medio y bajo.

## 2. Control de los peligros, o control tecnológico

Partiendo de las condiciones actuales en cuanto al uso del agua en la cuenca se pueden plantear estrategias para la adaptación encaminadas a controlar el peligro, las cuales pueden estar basadas en el control tecnológico. Así por ejemplo, en el caso de la agricultura se puede manejar la modernización del campo con nuevas tecnologías que ayuden a aumentar la eficiencia global en el riego, la cual actualmente se encuentra por debajo del 50% (DOF, 2006). Esta medida representaría una de las mejores opciones para mitigar los problemas derivados del cambio climático y del crecimiento poblacional partiendo del hecho de que este sector usuario es el mayor consumidor de agua al interior de la cuenca. En el caso del uso público urbano se pueden impulsar estrategias encaminadas al desarrollo de un mejor control de los recursos con que se cuenta, ya que por ejemplo, actualmente son pocos los municipios que tienen el equipo instalado para la medición del consumo a nivel vivienda, lo que trae como consecuencia que por un lado se desconozcan los volúmenes reales de consumo *per cápita*, a la vez que se favorece el consumo desmedido toda vez que los usuarios realizan el pago por un volumen ilimitado. Además, dentro del uso público urbano es necesaria la implementación de la tecnología tanto para establecer redes sectorizadas que faciliten el control del flujo al interior de los circuitos como para reducir las fugas en la conducción del agua por los mismos. Además de las estrategias anteriores, es necesario tomar en cuenta que las simulaciones que toman en cuenta los escenarios de cambio climático también sugieren la

ocurrencia de incrementos importantes en la disponibilidad de agua en la cuenca, lo cual podría estar asociado a tormentas intensas que podrían ocasionar daños si no se está preparado para ello, por lo que sería importante la implementación de medidas convencionales tales como la construcción de presas de almacenamiento y/o control de avenidas como es propuesto por Ragab y Prudhomme (2002). Sin embargo, hay que tomar en cuenta que la aplicación de medidas de este tipo requiere una fuerte inversión para poder lograr su propósito.

### 3. Adaptaciones sociales, o reglamentación

Dentro de la componente social, se cuenta con leyes, normas y reglamentos que en general podrían considerarse suficientes para favorecer el uso racional del agua, sin embargo muchas de estas normas aún no han entrado en vigor o no han generado los mecanismos adecuados para su implementación. A este problema se suma el hecho de que a pesar de la difusión de la problemática actual en torno al agua en la cuenca, la sociedad ha jugado un papel más bien de espectador que de involucrado, lo cual pone en evidencia la falta de compromiso para la solución de los problemas actuales. Bajo este contexto, sería importante revalorar el precio asignado al agua dentro de la cuenca para poder legislar precios adecuados que ayuden a la sociedad a valorar la importancia de los recursos que se le facilitan y de esta manera crear de forma indirecta la conciencia necesaria para el cuidado del agua. Por otro lado, sería necesario revisar las estructuras gubernamentales para identificar los factores que podrían retardar la capacidad de adaptación de la cuenca sobre todo analizando la forma en la que se toman las decisiones al interior de la misma, lo cual no sería muy complicado ya que se han dado pasos importantes en este sentido, como es la firma del Convenio de coordinación y concertación entre el Gobierno y los Sectores Usuarios para llevar a cabo el programa sobre la disponibilidad, distribución y usos de las aguas superficiales de la cuenca Lerma-Chapala (CNA, 2005a).

#### 4. Cambios al uso radical o reubicación

Como se ha mencionado anteriormente, al tomar en cuenta que estamos próximos de llegar a la capacidad de carga del sector hídrico de la cuenca y de que la población dentro de la misma sigue un patrón de crecimiento importante, generando con esto una mayor demanda de agua día con día para la satisfacción de sus necesidades básicas así como para la producción de alimentos y bienes que generen riqueza, una forma para mitigar y adaptarse al problema tendría que ver con la reubicación de las concesiones, es decir, con el intercambio de los recursos a través de transferencias entre los usuarios como lo han manejado por ejemplo en el sistema de suministro de agua de California en los Estados Unidos de Norteamérica (Tanaka *et al.*, 2006) y como es sugerido por Kundzewicz *et al.* (2007). En este sentido, se esperaría que las transferencias de agua entre los usuarios de la cuenca se diera del sector agrícola hacia los otros sectores, ya que como se mostró en la Figura 9 de acuerdo a los datos del año 2000, es este sector el que está ocupando la mayor cantidad de agua en la cuenca.

#### 5. Planeación de emergencias

Finalmente una de las estrategias más importantes para la mitigación y adaptación al cambio climático debería contemplar el establecimiento de planes de emergencia de acuerdo a los peligros previstos, los cuales en este caso de estudio tienen que ver con aumentos y disminuciones drásticas a nivel anual en la disponibilidad de agua en la cuenca. De esta manera, los planes de emergencia deben contemplar tanto la protección de la población y de los sistemas productivos ante las posibles avenidas extraordinarias que se pudieran dar en un futuro, así como para hacer frente a las sequías y disminuciones en los volúmenes de agua disponibles para la satisfacción de la demanda. En este punto es muy importante que los planes de emergencia pongan especial atención en las comunidades marginadas ya que son este tipo de comunidades las que se ven mayormente

afectadas por los desastres naturales y por la falta de agua. En este sentido resultará necesario que dentro de los planes de emergencia se contemplen tanto a los responsables de conducir estos programas como de las fuentes para su financiamiento, las cuales serán indispensables para su buen funcionamiento.

En términos generales, se tendrá que el éxito al enfrentar la variabilidad del clima y los cambios del mismo a través de estrategias para la adaptación, estará condicionado por las acciones realizadas de forma conjunta entre la sociedad y el gobierno, como es reconocido por Landa *et al.* (2008). Para ello es necesario continuar con las acciones que han sido emprendidas por los gobiernos de los cinco estados dentro de los cuales está localizada la cuenca, entre ellos podemos citar los Planes Estatales de Acción ante el Cambio Climático ya que actualmente el único estado que lo ha concluido es el estado de Guanajuato, los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero, el proyecto para el control conjunto de emisiones locales y globales en la zona metropolitana de Guadalajara, los proyectos para captura y almacenamiento de carbono en el estado de Michoacán, la repoblación forestal de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda en Querétaro, y el proyecto ILUMEX en el estado de México, entre otros.

# Capítulo 5

## Conclusiones

Con base en los resultados presentados y en los objetivos propuestos para la realización de este trabajo se llegó a las siguientes conclusiones y recomendaciones, las cuales son presentadas de acuerdo con los objetivos específicos de esta investigación. De esta manera las conclusiones obtenidas son las siguientes:

1. Analizar la sensibilidad de la disponibilidad de agua ante los escenarios de cambio climático en la cuenca

Los escenarios de cambio climático para la cuenca Lerma-Chapala suponen en el caso de la temperatura una tendencia al aumento de ésta con incrementos para finales de este siglo que van en promedio de los 1.9 a los 3.7°C, dependiendo del escenario utilizado como base, mientras que en el caso de la precipitación en términos generales se mantiene oscilando sobre el valor promedio histórico con la excepción del escenario A2 el cual muestra una ligera tendencia a la disminución para finales de este siglo. Sin embargo, en el caso de la precipitación los escenarios sugieren una alta variabilidad en la ocurrencia de la precipitación.

La evapotranspiración y el escurrimiento son muy sensibles a las condiciones propuestas por los escenarios de cambio climático. Por un lado, la evapotranspiración muestra que de acuerdo a un aumento de temperatura como el supuesto en los escenarios de cambio climático podría esperarse un aumento en la cantidad de agua evapotranspirada en la cuenca de entre un 5 y un 10% dependiendo del escenario utilizado como base para la comparación. Además, la

evapotranspiración mostró una mayor sensibilidad a la ocurrencia de cambios simultáneos en las variables que intervienen en el proceso, donde por ejemplo al aumentar la temperatura, la radiación y la velocidad del viento y al disminuir la humedad relativa, el aumento en la evapotranspiración puede llegar a ser de más del 50% del observado actualmente. Sin embargo es importante señalar que la magnitud del cambio depende directamente de la combinación de cambios en las variables que intervienen en el proceso. Por otro lado, en el caso del escurrimiento, la dirección de las variaciones muestra una concordancia total con las variaciones observadas en la precipitación, y su magnitud es directamente proporcional al cambio ocurrido en la precipitación. Los cambios observados en el escurrimiento de acuerdo a los escenarios de cambio climático indican que en el futuro podrían darse tres situaciones, a saber:

- i. Que el escurrimiento en términos generales mantenga una tendencia como la observada en el pasado en la cuenca, lo cual podría ser esperado de acuerdo con los escenarios COM y A1B,
- ii. Que el escurrimiento presente una tendencia a la disminución como lo expresan las condiciones del escenario A2, o bien
- iii. Que se presente un ligero aumento en la ocurrencia del escurrimiento de acuerdo con las condiciones esperadas con el escenario B1.

Lo anterior permite concluir que la disponibilidad natural de agua en la cuenca es muy sensible a los cambios de temperatura y precipitación que proponen los cuatro escenarios de cambio climático, siguiendo en general la tendencia observada en los escenarios de precipitación. Además se puede concluir que la disponibilidad futura es muy incierta de acuerdo a los cambios observados en el escurrimiento entre los diferentes escenarios, lo anterior pone de manifiesto la necesidad de continuar con los esfuerzos de investigación para que de esta manera se pueda reducir la incertidumbre observada actualmente y así fortalecer los procesos de toma de decisiones en cuanto a las acciones de adaptación necesarias para su aplicación.



## 2. Determinar los factores adicionales al cambio climático que favorecen la vulnerabilidad en la cuenca

En la revisión de literatura presentada en el capítulo número 2 se encontró que la vulnerabilidad al cambio climático presenta varias componentes entre las cuales las principales son la ambiental, la social, la económica y la política. De ellas, en este trabajo se analizaron principalmente las componentes ambiental y social. Las cuales fueron analizadas a partir de la relación existente entre la disponibilidad de agua en la cuenca y la demanda de la misma. Para ello, en este trabajo se hizo la hipótesis de que dicha relación presenta un comportamiento que puede ser descrito a partir de un modelo de crecimiento logístico donde la variable dependiente estaría representada por la demanda y la capacidad de carga del sistema por la disponibilidad, ello debido a que la demanda es un proceso denso-dependiente que no puede crecer de forma ilimitada al contar con recursos finitos definidos por la disponibilidad. Además se determinó un índice de vulnerabilidad social basado en los principales indicadores poblacionales concentrados en los Censos y Conteos de Población. Los resultados mostraron que si bien los escenarios de cambio climático proponen fuertes cambios en la disponibilidad de agua en la cuenca, los factores relacionados con la componente social son muy importantes ya que aunque su magnitud aparentemente no es tan perceptible de un año a otro, de manera gradual está contribuyendo a la vulnerabilidad de forma importante. Por lo tanto una conclusión importante en este punto tiene que ver con la necesidad de analizar y darle la importancia necesaria a los factores relativos a la componente social de la vulnerabilidad, ya que a partir del análisis puntual de estos factores pueden surgir estrategias para la adaptación que contribuyan de forma significativa a hacer frente al fenómeno del cambio climático. Entre dichos factores se encuentran las dinámicas de crecimiento poblacional, las tendencias en el consumo de agua, la dinámica de crecimiento del sector agrícola, la cultura relativa al agua y a los problemas ambientales actuales, entre otros.

### 3. Analizar la interacción de los factores que determinan la vulnerabilidad del sector hídrico de la cuenca

Tomando como base el modelo de crecimiento logístico de la demanda de agua en la cuenca se puede observar que entre los factores que definen la vulnerabilidad ambiental y social hay una fuerte interacción, la cual crea que la vulnerabilidad se vea afectada desde dos frentes, el ambiental y el social, donde la principal manifestación de su interacción puede ser apreciada al analizar la relación existente entre la disponibilidad, que se atribuye en la mayor parte a la componente ambiental, y a la demanda, la cual es gobernada principalmente por factores relativos a la componente social. Del análisis de esta relación se puede concluir que además de la problemática que se espera que genere el cambio climático, la vulnerabilidad del sector hídrico se debe en buena medida a que dicho sector está llegando a un estado de saturación, es decir, a que el volumen de agua demandado por los usuarios en la cuenca está alcanzando al volumen de agua disponible de forma natural en la misma. Bajo estas condiciones, el equilibrio entre la disponibilidad y la demanda en la cuenca depende principalmente de la interacción entre estos dos factores, ya sea a partir de un aumento en el primero, o bien, de una disminución en el segundo, lo cual en términos generales parece sencillo; sin embargo, analizando las condiciones presentes en la cuenca, la primera de estas soluciones no sería del todo factible desde el interior de la misma debido principalmente a las condiciones que proponen los escenarios de cambio climático. Para que esta solución fuera factible se tendría que optar por la importación de recursos hídricos de cuencas vecinas o en menor medida a través del tratamiento de las aguas residuales. Por el otro lado, la segunda solución requiere del control de la demanda, lo cual bajo las condiciones actuales podría ser una de las opciones más prometedoras tomando en cuenta las eficiencias observadas en el uso del agua en los distintos sectores usuarios, así como las dotaciones asignadas a dichos sectores, sin embargo estas soluciones requerirían de una fuerte labor a nivel social para generar su participación y compromiso.

#### 4. Identificar los tipos de estrategias y medidas de adaptación al cambio climático que pudieran aplicarse en la cuenca

Con base en los resultados presentados en este trabajo se puede concluir fácilmente que el sector hídrico de la cuenca Lerma-Chapala requiere para su buen funcionamiento de la implementación de estrategias y medidas encaminadas tanto a la mitigación como a la adaptación a las condiciones futuras de disponibilidad de agua. Dichas medidas y estrategias deben contemplar en la medida de lo posible la aceptación de una parte de los daños debido a la rapidez con la que pueden ocurrir los cambios en la disponibilidad, la protección de la población ante la ocurrencia de eventos hidrológicos extraordinarios a partir de la implementación de tecnología y obras de protección, una reglamentación precisa para el uso adecuado de los recursos hídricos la cual contemple la reubicación de los recursos entre usuarios y ante todo la existencia de planes de emergencia que permitan disminuir los daños ante eventos o situaciones no esperadas. En la implementación de las estrategias para la adaptación debe tomarse en cuenta que algunas de ellas requieren de su implementación en el corto plazo mientras que otras pueden ser destinadas al mediano y largo plazo. Lo anterior representa una ventaja toda vez que sería muy difícil generar los mecanismos para su implementación en una sola etapa, además de que en el proceso de aplicación será necesaria la modificación o readaptación de acuerdo a los resultados que se vayan observando en la práctica y a las condiciones particulares de cada cuenca.

#### 5.1 Limitaciones del estudio

Las principales limitaciones del estudio están centradas en la carencia de información para analizar los impactos que pudiera ocasionar el cambio climático en la recarga de los acuíferos de la cuenca Lerma-Chapala, lo cual resultaría de mucha utilidad en el análisis tomando en cuenta que de acuerdo con los estudios realizados por la Comisión Nacional del Agua (DOF, 2006) la gran mayoría de los acuíferos se encuentran sobreexplotados. Otra de las limitaciones que podrían encontrarse durante el proceso de la investigación es la falta de participación de

los tomadores de decisiones y de los usuarios del agua, sin embargo de acuerdo a los objetivos planteados, en esta etapa del proyecto no fueron considerados ya que la investigación estuvo centrada en el diagnóstico de las condiciones actuales y los impactos potenciales que podría ocasionar el cambio climático.

## 5.2 Nuevas líneas de investigación

Con la realización de esta investigación pudo darse respuesta a algunas de las preguntas de investigación relativas a los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos de la cuenca Lerma-Chapala, sin embargo, a partir de ella surgen nuevas preguntas así como la necesidad de ampliar los resultados encontrados hasta este momento, de esta manera algunas de las necesidades de investigación sugeridas son las siguientes:

- Investigación sobre los impactos que puede ocasionar el cambio climático en la recarga de los acuíferos de la cuenca Lerma-Chapala tomando en cuenta los procesos físicos involucrados en la recarga.
- Investigación sobre los factores que provocan la dinámica observada en cuanto al consumo de agua en la cuenca por los diferentes usuarios tomando en cuenta factores económicos como la productividad por metro cubico de agua así como las tarifas históricas asignadas a este recurso.
- Actualización y refinamiento del escalado de los escenarios de cambio climático con el propósito de disminuir las incertidumbres.
- Calibración de un modelo hidrológico de base física que permita realizar cuantificaciones más precisas sobre los efectos potenciales del cambio climático.
- Conformación de bases de datos que incluyan tanto a las variables hidrológicas como las sociales, económicas y políticas a nivel subcuenca de acuerdo a lo observado históricamente.

## ***Literatura citada***

- Abramovitz, J. 1996. Imperiled waters, impoverished future: the decline of freshwater ecosystems. Worldwatch Institute, Washington, 5-66 pp.
- Aerts, J., and Droogers, P. 2004. Adaptation for regional water management. En: Climate Change in contrasting river basins: adaptation strategies for water, food and environment. J.C.J.H. Aerts and P. Droogers (Eds.) 1-24. CABI, United Kingdom.
- Akhtar, M., Ahmad, N. y Booi, M.J. 2008. The impact of climate change on the water resources of Hindukush-Karakorum-Himalaya region under different glacier coverage scenarios. *Journal of Hydrology* 355:148-163.
- Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rosch, T., and Siebert, S. 2003. Global estimates of water withdrawals and availability under current and future business-as-usual conditions. *Hydrological Sciences Journal* 48(3): 339-348.
- Alcamo, J., Florke, M., and Marker, M. 2007. Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climate changes. *Hydrological Sciences Journal* 52(2): 247-275.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome Italy.
- Aparicio, J., Ocón, A., Ramírez, A.I., Aldama, A.A. y Mejia-Zermeño, R. 2006. Balance hídrico del lago de Chapala, México. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXI. num. 1. pp. 5-16. México.
- Aracil, J. y Gordillo, F. 1997. *Dinámica de Sistemas*. Alianza Editorial. Madrid, España.
- Arnell, N.W. 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change – Human and Policy Dimensions* 14(1): 31-52.
- Audesirk, T., y Audesirk, G. 1997. *Biología: la vida en la Tierra*. Prentice Hall Hispanoamericana, México, 947 pp.
- Banks, R.B. 1994. *Growth and diffusion phenomena: Mathematical frameworks and applications*. Springer-Verlang, Germany.
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof. 2008. *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Secretariat. Geneva. 210 pp.
- Blanchard, P., Devaney, R.L. y Hall, G.R. 1999. *Ecuaciones Diferenciales*. International Thomson Editores. México. 732 pp.

- Boehm-Schoendube, B. y Sandoval-Manzo, M. 1999. La sed saciada de la Ciudad de México y la nueva cuenca Lerma-Chapala-Santiago: un ensayo metodológico de lectura cartográfica. *Relaciones* 80: 15-68.
- Boehm-Schoendube, B., Durán-Juárez, J.M., Sánchez-Rodríguez, M., y Torres-Rodríguez, A. 2002. Los estudios del agua en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago. El Colegio de Michoacán-Universidad de Guadalajara. Zamora, Michoacán.
- Bonell, M. 1998. Possible impacts of climate change on tropical forest hydrology. *Climatic Change* 68:355-378.
- CEPAL. 2002. La sostenibilidad del desarrollo en América Latina y el Caribe: desafíos y oportunidades. PNUMA, Santiago de Chile, 251 pp.
- Chaves, L.H.M. and Alipaz, S. 2007. An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life and policy: the watershed sustainability index. *Water Resources Management* 21: 883-895.
- Christensen, N.S., Wood, A.W., Voisin, N.L.D.P. y Palmer, R.N. 2004. The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado river basin. *Climatic Change* 62:337-363.
- CICC, 2007. Estrategia Nacional de Cambio Climático. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 157 pp.
- CNA, 2005a. Convenio de coordinación y concertación entre el Gobierno y los Sectores Usuarios para llevar a cabo el programa sobre la disponibilidad, distribución y usos de las aguas superficiales de la cuenca Lerma-Chapala. Comisión Nacional del Agua. México. 51 pp.
- CNA, 2005b. Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua. México. 105 pp.
- CNA, 2010. Contabilidad hidrológica de la cuenca del Río Lerma, Lerma-Web [en línea]. México (consultada 12 de Agosto de 2009). Disponible en: <http://www.cna.gob.mx/LermaWeb/>.
- CONAGUA, 2011. Estadísticas del agua en México, edición 2011. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 181 pp.
- Conde, C., Ferrer, R. y Orozco, S. 2006. Climate change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and posible adaptation measures. A Mexican case study. *Atmósfera* 19(3):181-194.
- Conde, C. Estrada, F., Martínez, B., Sánchez, O., y Gay, C. 2011. Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera* 24: 125-140.
- Cutter, S.L., Mitchel, J.T., and Scott, M.S. 2000. Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown County, South Carolina. *Annals of the Association of American Geographers* 90: 713-737.

- De Loë, R., Kreutzwiser, R., and Moraru, L. 2001. Adaptation options for the near term: climate change and the Canadian water sector. *Global Environmental Change – Human and Policy Dimensions* 11(3): 231-245.
- Denevan, W.M. 1983. Adaptation, variation, and cultural geography. *The Professional Geographer* 35: 399-407.
- Dessai, S. and Hulme, M. 2007. Assessing the robustness of adaptation decisions on climate change uncertainties: a case study on water resource management in the East of England. *Global Environmental Change* 17(1): 59-72.
- DOF. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. *Diario Oficial de la Federación*. México, 17 pp.
- DOF, 2003. Acuerdo por el que se dan a conocer las denominaciones y la ubicación geográfica de las diecinueve cuencas localizadas en la zona hidrológica denominada Río Lerma-Chapala, así como la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas que comprende dicha zona hidrológica. *Diario Oficial de la Federación* (15 de Octubre de 2003). México. 10 pp.
- DOF, 2006. Acuerdo por el que se da a conocer el estudio técnico de los recursos hídricos del área geográfica Lerma-Chapala. *Diario Oficial de la Federación*. México. 43 pp.
- DOF, 2009. Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. *Diario Oficial de la Federación* (28 de Agosto de 2009). México. 98 pp.
- DOF, 2010. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas que forman parte de la subregión hidrológica denominada Lerma-Chapala y su ubicación geográfica. *Diario Oficial de la Federación* (19 de Abril de 2010). México. 82 pp.
- Elgaali, E., Garcia, L.A. y Ojima, D.S. 2007. High resolution modeling of the regional impacts of climate change on irrigation water demand. *Climatic Change* 84:441-461.
- Endfield, G.H. 2007. Archival explorations of climate variability and social vulnerability in colonial Mexico. *Climatic Change* 83: 9-38.
- EPA. 1997. Index of watershed indicators: an overview. U.S. Environmental Protection Agency Office of Wetlands Oceans and Watersheds. 56 pp.
- Falkenmark, M. 1989. The massive water scarcity now threatening Africa: why isn't it being addressed? *Ambio* 18: 112-118.
- Füssel, H.M. and Klein, R.J.T. 2006. Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking. *Climatic Change* 75: 301-329.

- Gay, C., Estrada, F., Conde, C. y Eakin, H. 2004. Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura: Escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz (México). En *El Clima entre el Mar y la Montaña*. García, J.C., Diego, C., Fernández, P. Garmenfia, C. y Rasilla, D. (editores). Asociación Española de Climatología. Serie A, No. 4:651-660.
- GEV. 2009. Programa Veracruzano ante el cambio climático. Gobierno del Estado de Veracruz. Veracruz, México. 194 pp.
- GIECC. 2000. Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad América Latina. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 45 pp.
- Gleick, P.H. 1996. Basic water requirements for human activities: meeting basic needs. *Water International* 21: 83-92.
- Golubev, V.S., Lawrimore, J.H., Groisman, P.Y., Speranskaya, N.A., Zhuravin, S.A., Menne, M.J., Peterson, T.C., y Malone, R.W. 2001. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment. *Geophysical Research Letters* 28:2665-2668.
- Goudie, A.S. 2006. Global warming and fluvial geomorphology. *Geomorphology* 79: 384-394.
- Goulden, M., Conway, D., & Persechino, A. 2009. Adaptation to climate change in international river basin in Africa: a review. *Hydrological Sciences Journal* 54(5): 805-828.
- Gutiérrez, G.G. y Ricker, M. 2011. Climate and climate change in the region of Los Tuxtlas (Veracruz, Mexico): A statistical analysis. *Atmósfera* 24:347-373.
- Held, I.M. y Soden, B.J. 2006. Robust responses of the Hydrological Cycle to Global Warming. *Journal of Climate* 10: 5686:5699.
- Henry, J.G. y Heinke, G.W. 1999. *Ingeniería Ambiental*. Prentice Hall, México, 800 pp.
- Hinkel, J. 2009. A framework for analysing methodologies of vulnerability assessments. En: *Assessing vulnerability to global environmental change*. A.G. Patt, D. Schröter, R.J.T. Klein and A.C. de la Vega-Leinert (Eds.). EarthScan, London. 231-247 pp.
- Hinrichsen, D., Robey, B. y Upadhyay, U. 1998. Solutions for a Water-Short World. *Population Reports*, series M, No. 14. Johns Hopkins, Baltimore.
- Hopfenberg, R. 2003. Human carrying capacity is determined by food availability. *Population and Environment* 25: 109-117.
- Houghton, J. 2005. Global Warming. *Reports on Progress Physics* 68: 1343-1403.
- Hurd, B., Leary, N., Jones, R., and Smith, J. 1999. Relative regional vulnerability of water resources to climate change. *Journal of the American Water Resources Association* 35:1399-1409.



- IEEG. 2011. Programa estatal de cambio climático Guanajuato. Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato. Guanajuato, México. 103 pp.
- IPCC. 2000. Emissions Scenarios: Summary for Policymakers. Special Report of IPCC Working Group III. Nakicenovic et al. (eds), Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability- Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jáuregui, E. 1995. Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la ciudad de México debidas a la urbanización. *Boletín de Investigaciones Geográficas* 9:39-64.
- Jáuregui, E. 1997. Climate changes in Mexico during the historical and instrumented periods. *Quaternary Int. Pergamon* 43:7-17.
- Kart, T.R. y Trenberth, K.E. 2003. Modern Global Climate Change. *Science* 302: 1719-1722.
- Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K. A., Oki, T., Sen, Z. & Shiklomanov, I. 2007 Freshwater resources and their management. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. by M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden & C. E. Hanson), 173–210. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Labat, D., Goddérís, Y., Probst, J.L. y Guyot, J.L. 2004. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources* 27: 631-642.
- Landa, R., Ávila, B., y Hernández, M. 2010. Cambio Climático y Desarrollo Sustentable para América Latina y el Caribe: Conocer para comunicar. British Council, PNUD México, Cátedra UNESCO-IMTA, FLACSO México, México D.F., 140 pp.
- Lange, M.A. 2008. Assessing climate change impacts in the European north. *Climatic Change* 87: 7-34.
- Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T. & Kaspar, F. 2006. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: A continental integrated analysis. *Climate Change* 75:273-299.
- Lim, B. and Spanger-Siegfried, E. 2004. *Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures*. United Nations Development Programme. Cambridge University Press, New York. 258 pp.
- Liverman, D.M. 1990. Vulnerability to global environmental change. En: *Understanding global environmental change: the contributions of risk analysis and management*. R.E. Kasperson, K. Dow, D. Golding, and J.X. Kasperson (Eds.). Clark University. 27-44 pp.

- Lozano, G.M.S. 2004. Evidencia de cambio climático: cambios en el paisaje. En Cambio climático: una visión desde México. Coordinadores: Julia Martínez y Adrián Fernández. Semarnat. 65-76.
- Magaña, R.V.O. 2004. El cambio climático global: comprender el problema. En Cambio climático: una visión desde México. Coordinadores: Julia Martínez y Adrián Fernández. Semarnat. 17-27.
- Magaña, R.V.O. 2010. Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones. Universidad Nacional Autónoma de México. México, 79 pp.
- Magaña, V., y Caetano, E. 2007. Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector. Universidad Nacional Autónoma de México, 40 pp.
- Magaña, R.V.O. Matías, M.J., Morales, R. y Millán, C. 2004. Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México. En Cambio climático: una visión desde México. Coordinadores: Julia Martínez y Adrián Fernández. Semarnat. 203-213 pp.
- Martin, P., Rosenberg, N.J., McKenney, M.S. 1989. Sensitivity of evapotranspiration in a wheat field, a forest, and a grassland to changes in climate and direct effects of carbon dioxide. *Climatic Change* 14: 117-151.
- Martínez, T. 2008. Agua, problema nuestro de cada día. *Vértigo: análisis y pensamiento de México*. No. 366. pp. 10-15. México.
- Martínez, A.A., Manzanilla, N.S., y Zavala, H.J. 2011. Vulnerability to climate change of marine and coastal fisheries in México. *Atmósfera* 24:103-123.
- Martínez, A.P., y Patiño, G.C. 2012. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua* III:5-19.
- Marshall, E. y Randhir, T. 2008. Effect of climate change on watershed system: a regional analysis. *Climatic Change* 89:263-280.
- May, W. 2008. Potential future changes in characteristics of daily precipitation in Europe simulated by the HIRHAM regional climate model. *Climate Dynamics* 30:581-603.
- McCuen, R.H. 2003. Modeling hydrologic change: statistical methods. Lewis Publishers, 333-365 pp.
- Meigh, J.R., McKenzie, A.A., and Sene, K.J. 2004. A grid based approach to water scarcity estimates for eastern and southern Africa. *Water Resources Management* 13: 85-115.

- Mellander, P-E., Ottosson, L.M. y Laudon, H. 2007. Climate change impact on snow and soil temperature in boreal Scots pine stands. *Climatic Change* 85:179-193.
- Mendoza, V.M., Villanueva, E.E. y Adem, J. 1997. Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change. *Climate Research* 9: 139-145.
- Mendoza, V.M., Garduño, R., Villanueva, E.E., Oda, N.B., Mendoza, C.A.S., Santiesteban, M.G., Nava, L.Y.G., Maderey, L.E., y Torres, C. 2005. Disponibilidad del agua superficial y vulnerabilidad de las cuencas hidrológicas Lerma-Santiago-Pacífico y Balsas ante el cambio climático. Anexo 1. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 93 pp.
- Mendoza, B., Maravilla, D. y Jauregui, E. 2006. Main periodicities of the minimum extreme temperatura of three stations near the Mexican Pacific coast. *Atmósfera* 19(1):9-22.
- Mendoza, B., García-Acosta, V., Velasco, V., Jáuregui, E. y Díaz-Sandoval, R. 2007. Frequency and duration of historical droughts from the 16<sup>th</sup> to the 19<sup>th</sup> centuries in the Mexican Maya lands, Yucatan Peninsula. *Climatic Change* 83:151-168.
- Meyer, P.S. y Ausubel, J.H. 1999. Carrying Capacity: a model with logistically varying limits. *Technological Forecasting and Social Change* 61: 209-214.
- Milly, P.C.D., Dunne, K.A. y Vecchia, A.V. 2005. Global pattern of trends in streamflow and wáter availability in changing climate. *Nature* 438: 347-350.
- Minville, M., Brissette, F. y Leconte, R. 2008. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *Journal of Hydrology* 358:70-83.
- Moe, C.L. y Rheingans, R.D. 2006. Global challenges in water, sanitation and health. *Journal of Water and Health* 4: 41-57.
- Monterroso, R.A.I., Conde, A.C., Rosales, D.G., Gómez, D.J.D., y Gay, G.C. 2011. Assessing current and potential rainfed maized suitability under climate change scenarios in México. *Atmósfera* 24: 53-67.
- Mundo, M.M.D., y Martínez, A. P. 1993. Cambio climático: posibles consecuencias y algunas sugerencias para disminuir su efecto en México. *Ingeniería Hidráulica en México VIII*: 14-28.
- Mundo, M.M.D., y Martínez, A. P. 1994. El cambio climático y sus efectos potenciales en los recursos hídricos y la agricultura del valle del Yaqui, Sonora (estudio preliminar). *Ingeniería Hidráulica en México IX*: 13-33.
- Muzik, I. 2001. Sensitivity of hydrologic systems to climate change. *Canadian Water Resources Journal* 26:233-253.
- Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. and C.E. Hanson. 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK, 7-22.

- Patt, A.G., Schröter, D., de la Vega-Leinert, A.C., and Klein, R.J.T. 2009. Vulnerability research and assessment to support adaptation and mitigation: common themes from the diversity of approaches. En: *Assessing vulnerability to global environmental change*. A.G. Patt, D. Schröter, R.J.T. Klein and A.C. de la Vega-Leinert (Eds.). EarthScan, London. 1-25 pp.
- Pine, J.C. 2009. *Natural Hazards Analysis: Reducing the impact of disasters*. CRC Press, 285 pp.
- Prieto, G.R., Cortés, H.V.E., y Montero, M.M.J. 2011. Variability of the standardized precipitation index over México under the A2 climate change scenario. *Atmósfera* 24: 243-250.
- Ragab, R., and Prudhomme, C. 2002. Climate change and water resources management in arid and semi-arid regions: prospective and challenges for the 21<sup>st</sup> Century. *Biosystems Engineering* 81: 3-34.
- Ramos-Osorio, R. y P., Wester. 2000. *El manejo del agua en la cuenca Lerma-Chapala, México*. IWMI Contract Research Report for the Research Program on Institutional Support Systems for Sustainable Local Management of Irrigation in Water-Short Basins. Irapuato, México.
- Raskin, P., Gleick, P., Kirshen, P., Pontius, G., and Strzepek, K. 1997. *Water futures: assessment of long-range patterns and problems*. Background document for Chapter 3 of the *Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World*. Stockholm Environment Institute.
- Renaud, F. and Perez, R. 2010. Climate change vulnerability and adaptation assessments. *Sustainability Science* 5:155-157.
- Robock, A., Mu, M., Vinnikov, K., Trofimova, I.V., and Adamenko, T.I. 2005. Forty-five years of observed soil moisture in the Ukraine: No summer desiccation (yet). *Geophysical Research Letters* 32: L03401.
- Romieu, E., Welle, T., Schneiderbauer, S., Pelling, M., and Vinchon, C. 2010. Vulnerability assessment within climate change and natural hazard contexts: revealing gaps and synergies through coastal applications. *Sustainability Science* 5: 159-170.
- Sánchez, C.I., Díaz, P.G., Ojeda, B.W., Chebhouni, G., Orona, C.I., Villanueva, D.J., González, B.J.L., y González, C.G. 2008. Variabilidad climatic en México: algunos impactos hidrológicos, sociales y económicos. *Ingeniería Hidráulica en México XXIII*:5-23.
- Sánchez, T.E.G., Ospina, N.J.E., Gay, G.C., y Conde, C. 2011. Vulnerability of water resources to climate change scenarios. Impacts on the irrigation districts in the Guayalejo-Tamesí river basin, Tamaulipas, México. *Atmósfera* 24: 141-155.
- Sato, T., Kimura, F. & Kitoh, A. 2006. Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *Journal of Hydrology* 333: 144-154.

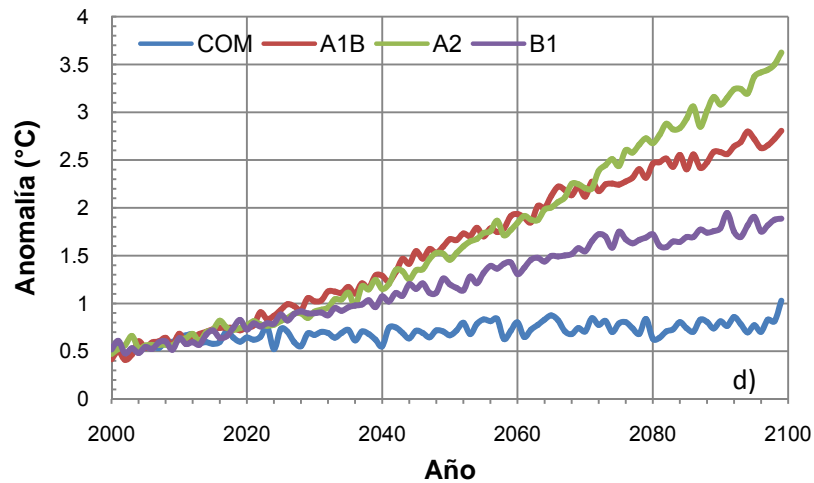
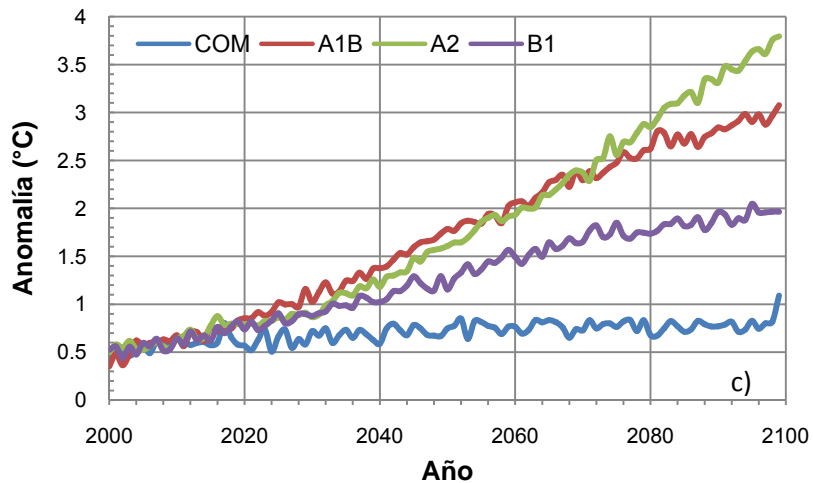
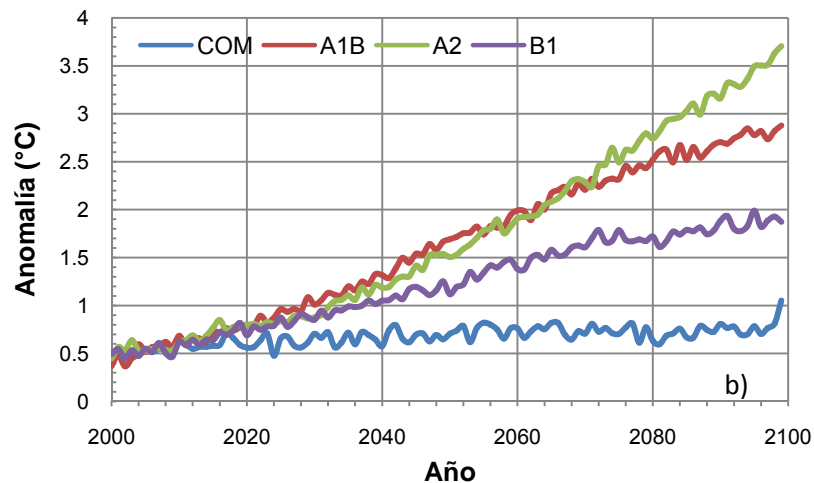
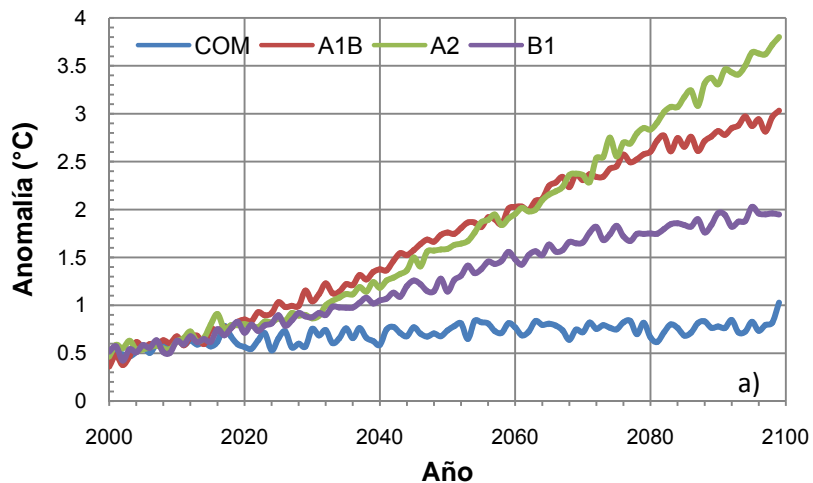
- Schröter, D., Cramer, W., Leemans, R., Prentice, I. C., Araújo, M. B., Arnell, N.W., Bondeau, A., Bugmann, H., Carter, T. R., Gracia, C. A., Vega-Leinert, A. C. de la, Erhard, M., Ewert, F., Glendining, M., House, J. I., Kankaanpää, S., Klein, R. J.T., Lavorel, S., Lindner, M., Metzger, M. J., Meyer, J., Mitchell, T. D., Reginster, I., Rounsevell, M., Sabaté, S., Sitch, S., Smith, B., Smith, J., Smith, P., Sykes, M.T., Thonicke, K., Thuiller, W., Tuck, G., Zaehle, S. and Zierl, B. 2005. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science* 310: 1333–1337.
- SDS, 2010. Programa de acción ante el cambio climático para el Estado de Nuevo León (2010-2015). Secretaría de Desarrollo Sustentable, Gobierno del Estado de Nuevo León. Nuevo León, México. 87 pp.
- SEMAHN, 2011. Programa de acción ante el cambio climático del Estado de Chiapas. Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural. Chiapas, México. 137 pp.
- Semarnap, 1997. México, Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México. 149 pp.
- Semarnat, 2001. México, Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 374 pp.
- Semarnat, 2006. México, Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 208 pp.
- Semarnat, 2009. México, Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 274 pp.
- Sheffield, J. y Wood, E.F. 2008. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate Dynamics* 31:79-105.
- SMADF. 2008. Programa de acción climática de la ciudad de México 2008-2012. Secretaría de Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. México. 172 pp.
- Smit, B., y Wandel, J. 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change* 16(3): 282-292.
- Sotelo, E., Cardona, N., Fragoso, A., Enriquez, C., Garrido, A., Caire, G. y Cotler, H. 2005. Acciones estratégicas para la recuperación de la cuenca Lerma-Chapala: recomendaciones técnicas para las diecinueve subcuencas. Instituto Nacional de Ecología. pp. 2-111. México.
- Sullivan, C.A. 2001. The potential for calculating a meaningful Water Poverty Index. *Water International* 26: 471-480.

- Sullivan, C.A. 2002. Calculating a Water Poverty Index. *World Development* 30: 1195-1210.
- Tanaka, S.K., Zhu, T.J., Lund, J.R., Howitt, R.E., Jenkins, M.W., Pulido, M.A., Tauber, M., Ritzema, R.S. and Ferreira, I.C. 2006. Climate warming and water management adaptation for California. *Climatic Change* 76: 361-387.
- Tompkins, E.L., Boyd, E., Nicholson-Cole, S.A., Weatherhead, K., Arnell, N.W., and Adger, W.N. 2009. An inventory of adaptation to climate change in UK: challenges and findings. Working Paper 135, Tyndall Centre for Climate Change Research. University of East Anglia, UK.
- van Beek, E. 2009. Managing water under current climate variability. In: *Climate Change adaptation in the water sector* (Fulco Ludwing, Pavel Kabat, Henk van Schaik and Michael van der Valk, eds). Earthscan, London, UK. pp. 51-77.
- Vargas-Velázquez, S. 2003. Política del agua y participación social: del modelo centralizado al modelo de gestión integral por cuenca. Agua, medio ambiente y desarrollo en el siglo XXI. El Colegio de Michoacán-Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente-Semarnat-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Zamora, Michoacán.
- Vicuna, S. y Dracup, J.A. 2007. The evolution of climate change impact studies on hydrology and water resources in California. *Climatic Change* 82:327-350.
- Villers, R.L. y Trejo, V.I. 1998. Impacto del cambio climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México. *Interciencia* 23:10-19.
- Wester, P., R., Melville y R., Ramos-Osorio. 2001. Institutional arrangements for Water Management in the Lerma-Chapala Basin. *The Lerma-Chapala Watershed*. Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers. Nueva York.
- Whitfield, P.H. y Cannon, A.J. 2000. Recent variation in climate and hydrology in Canada. *Canadian Water Resources Journal* 25:19-65.
- Xu, Ch. Y Singh, V.P. 2004. Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. *Water Resources Management* 18:591:612.
- Yohe, G., and Tol, R.S.J. 2002. Indicators for social and economic coping capacity-moving toward a working definition of adaptative capacity. *Global Environmental Change* 12(1): 25-40.
- Zhang, Q., Xu, C-Y., Zhang, Z., Ren, G. y Chen, Y.D. 2008. Climate change or variability? The case of Yellow river as indicated by extreme maximum and minimum air temperature during 1960-2004. *Theor. Appl. Climatol.* 93:35-43.

# ***Apéndice***

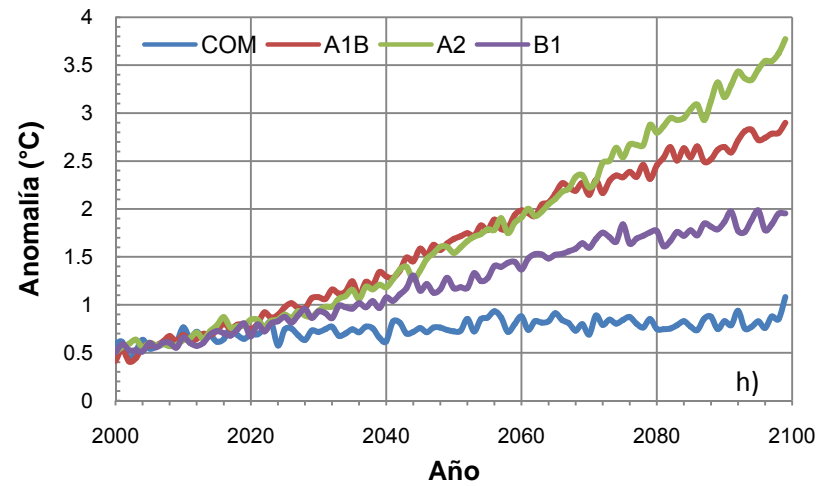
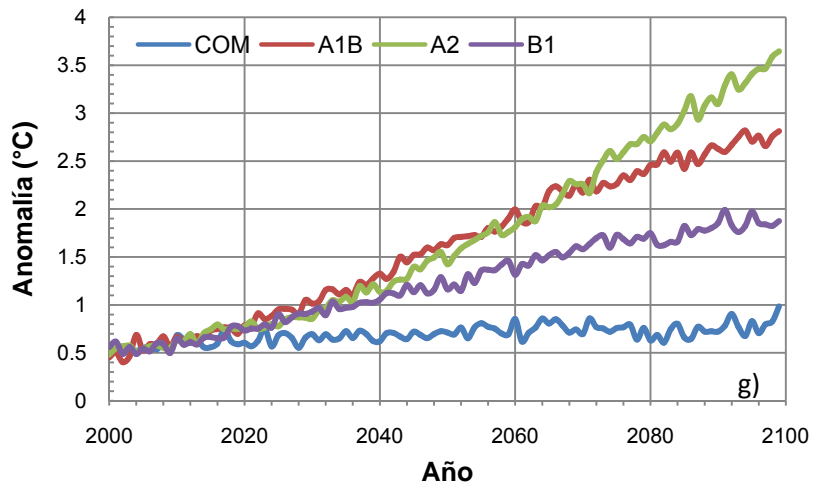
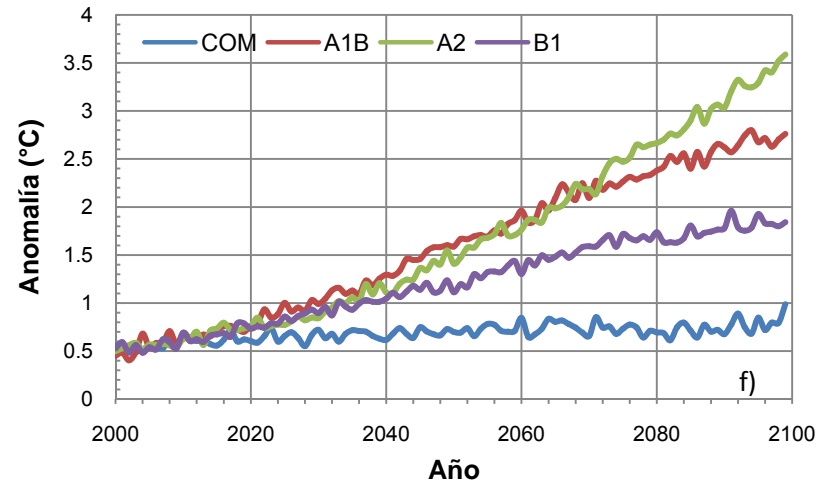
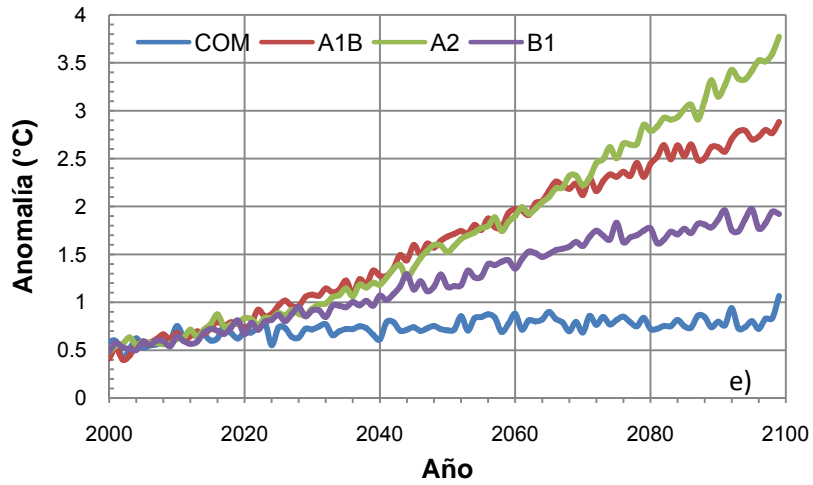
**A.**

### a.1 Escenarios de Temperatura por subcuenca

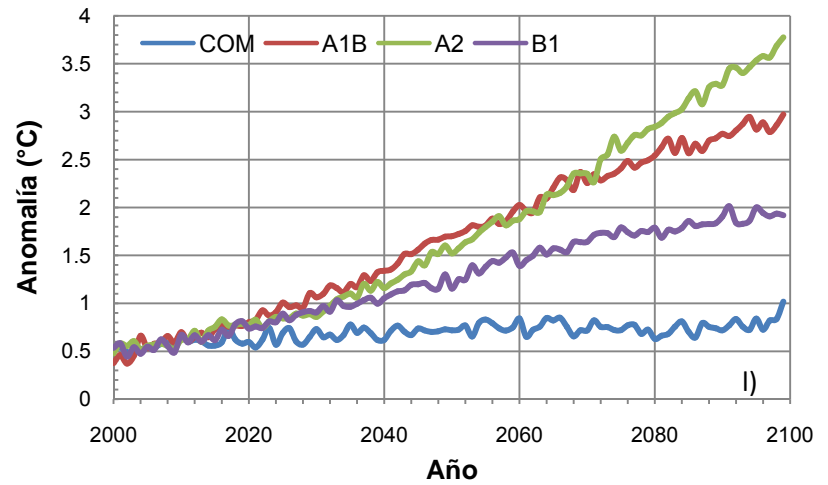
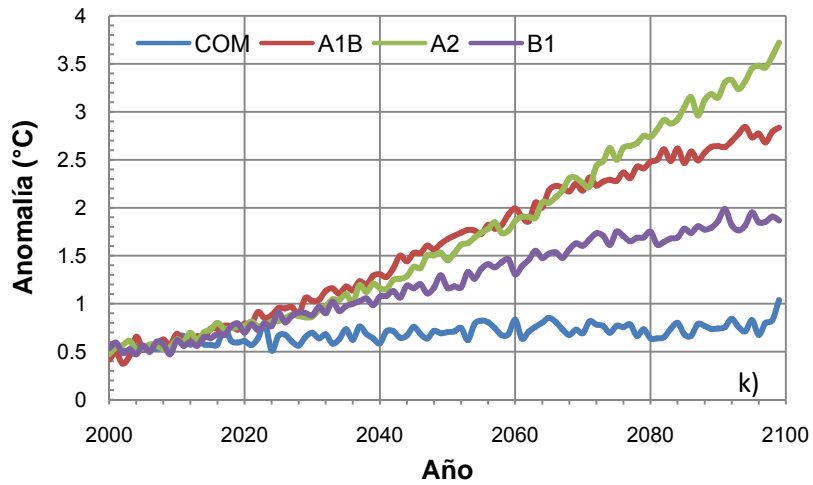
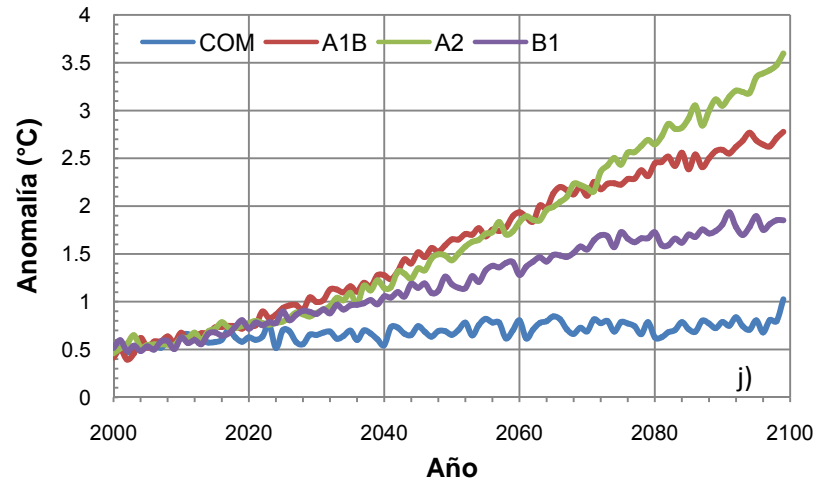
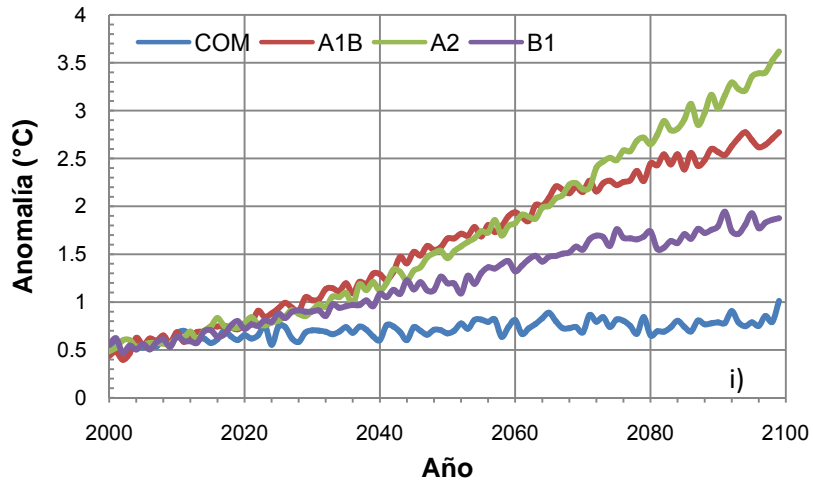


Escenarios de temperatura para las subcuencas: a) Angulo, b) Cuitzeo, c) Duero, y d) Jaltepec

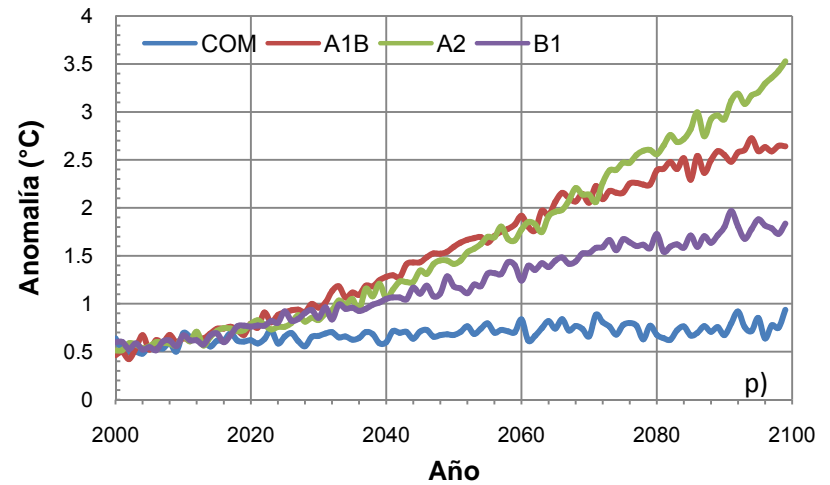
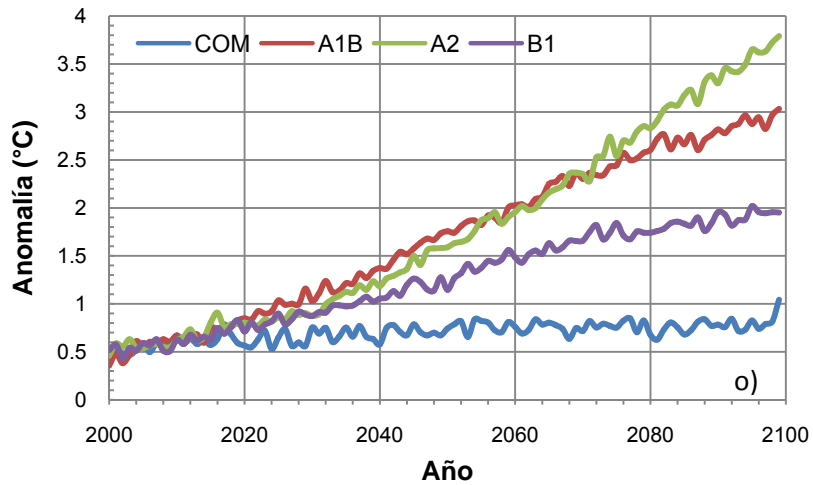
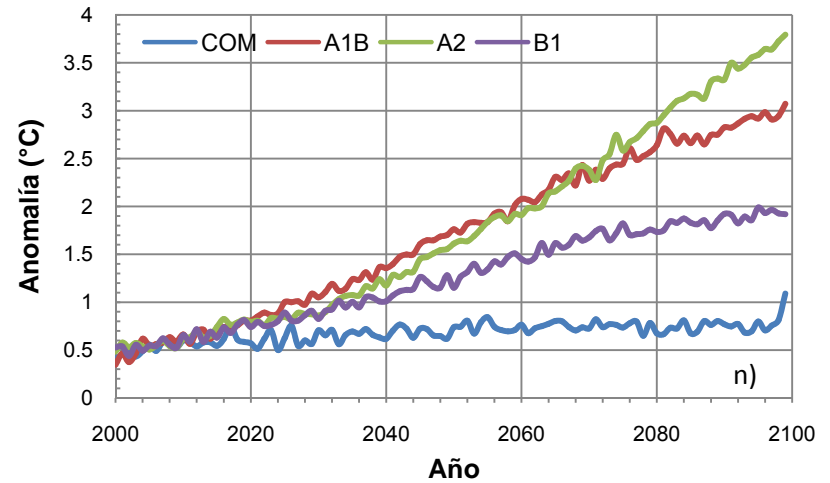
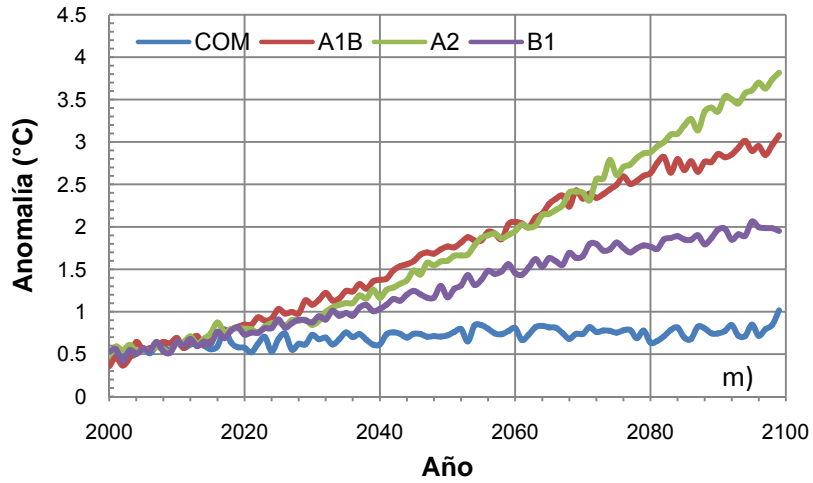




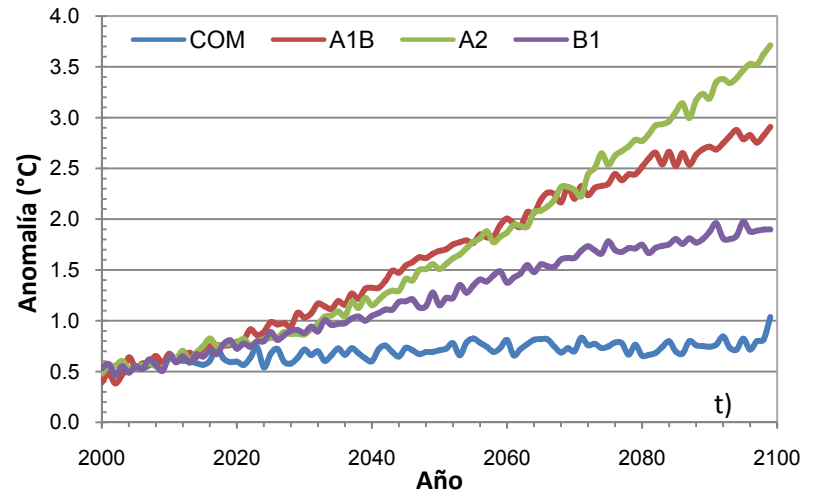
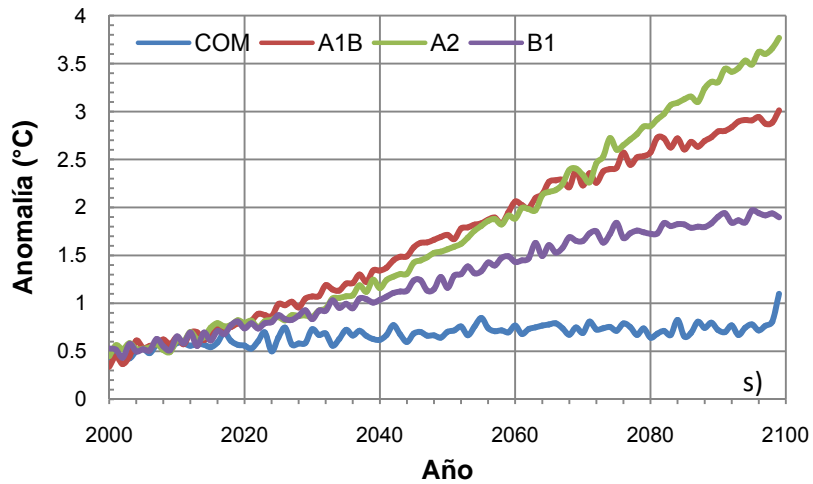
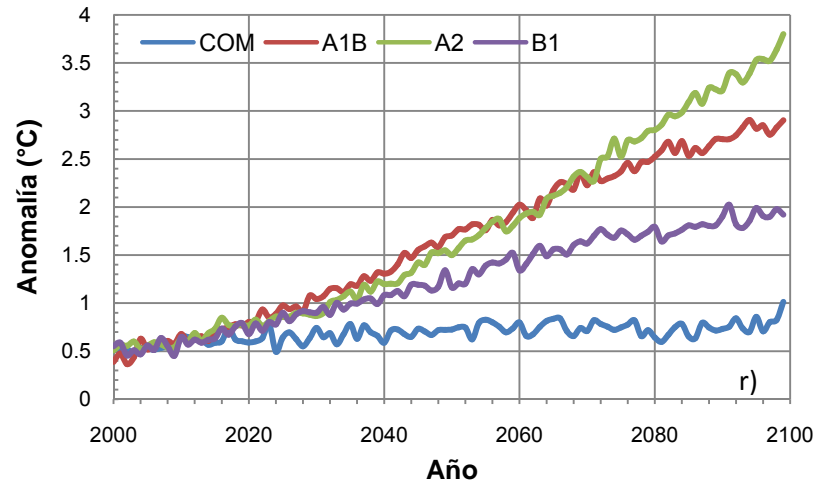
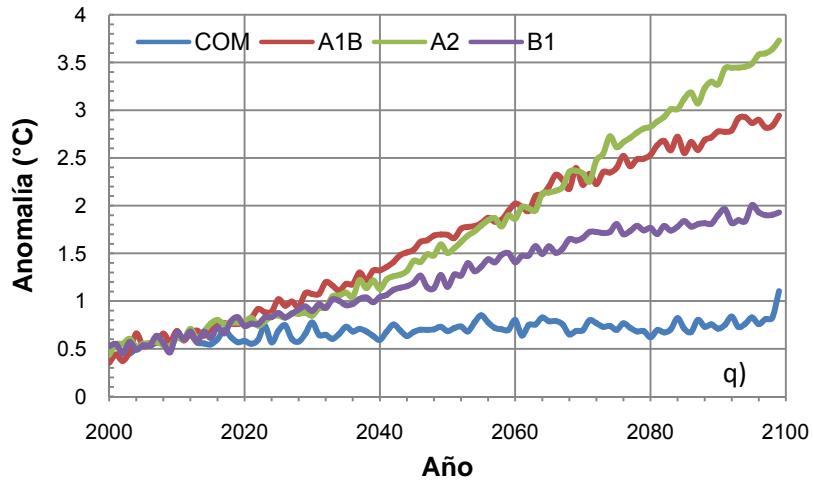
Escenarios de temperatura para las subcuencas: e) La Gavia, f) Laja1, g) Laja2, y h) Lerma1



Escenarios de temperatura para las subcuencas: i) Lerma2, j) Lerma3, k) Lerma4, y l) Lerma5

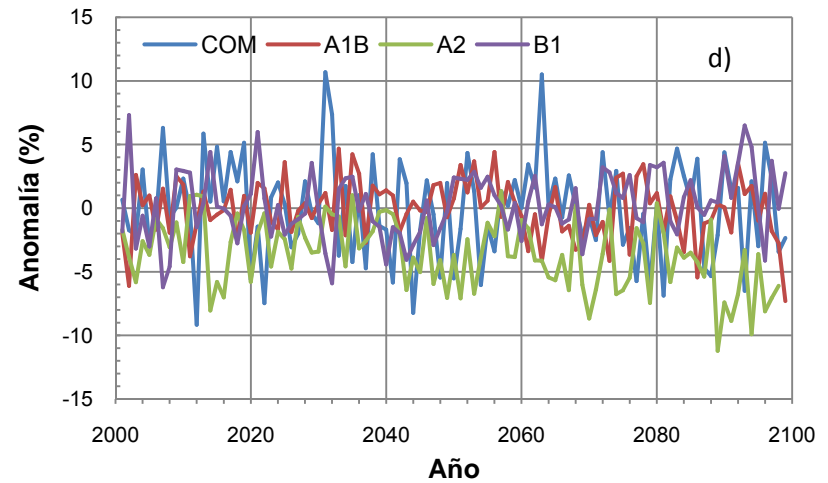
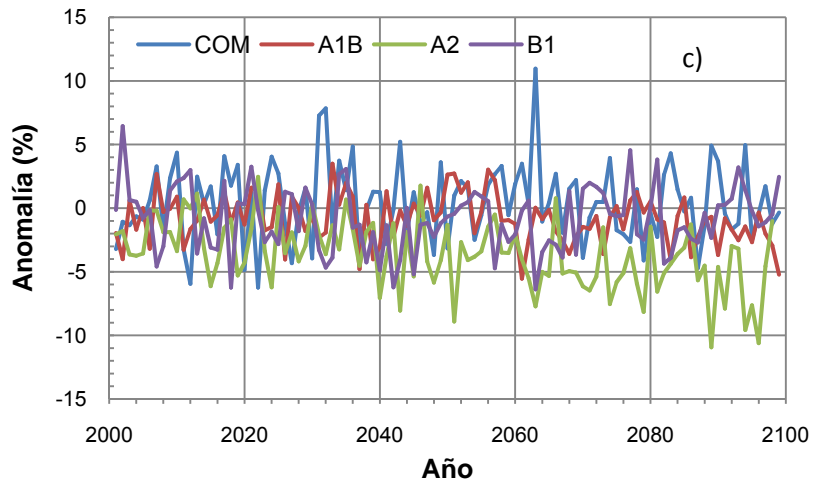
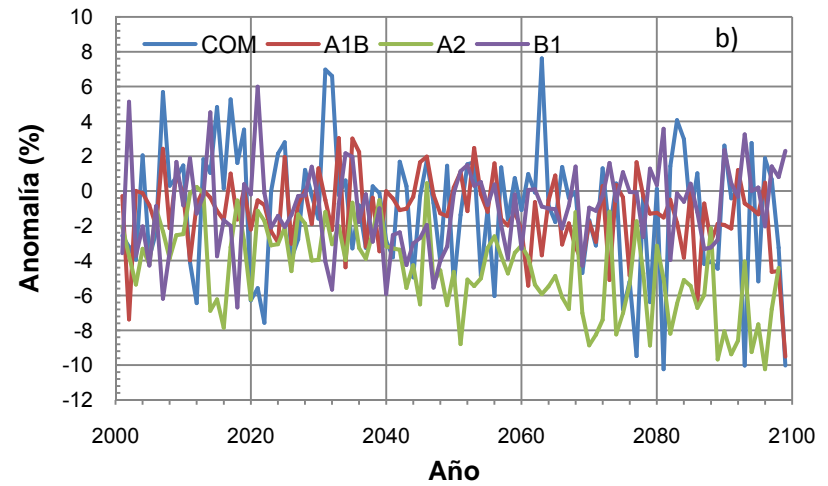
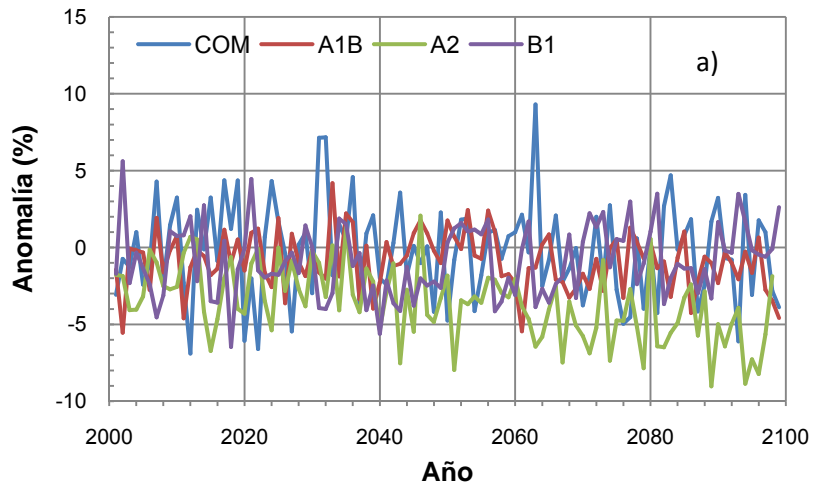


Escenarios de temperatura para las subcuencas: m) Lerma6, n) Lerma7, o) Patzcuaro, y p) Río Querétaro

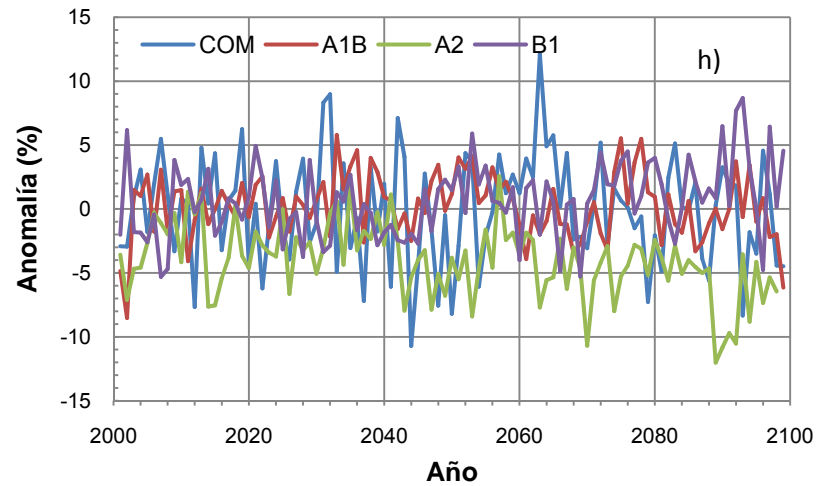
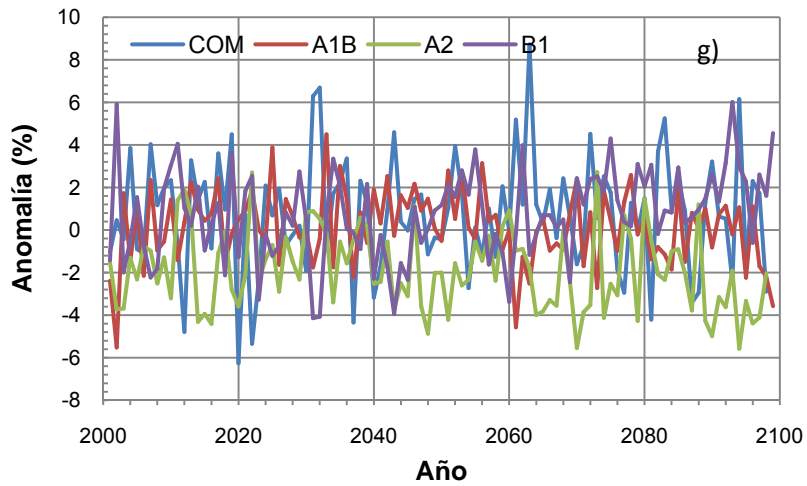
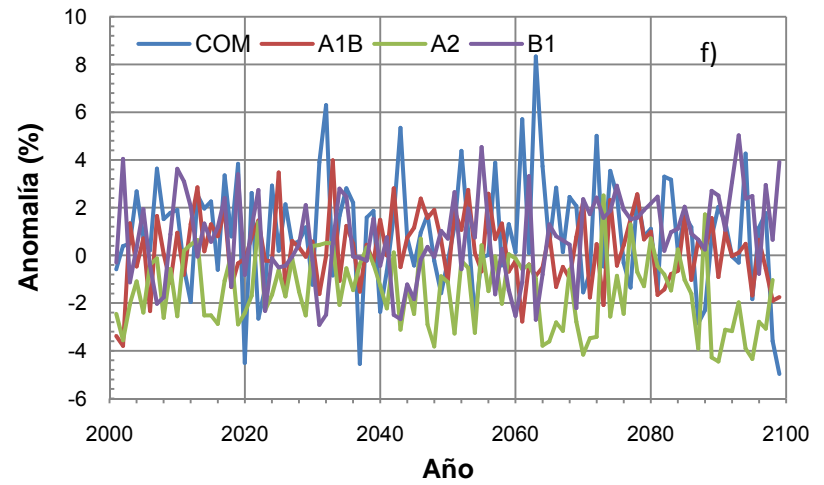
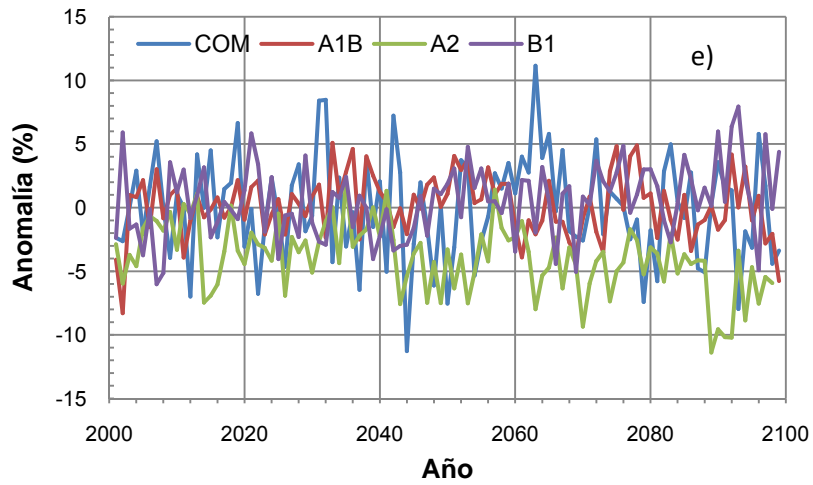


Escenarios de temperatura para las subcuencas: q) Río Turbio, r) Yuriria, s) Zula, y t) cuenca Lerma-Chapala

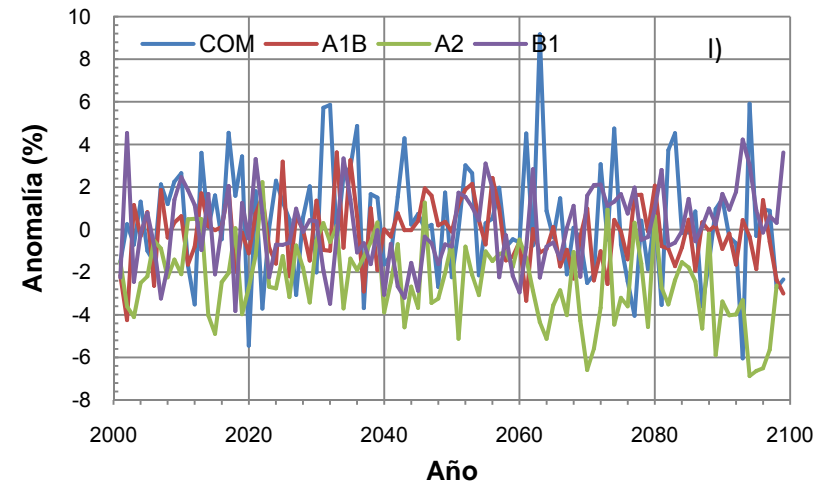
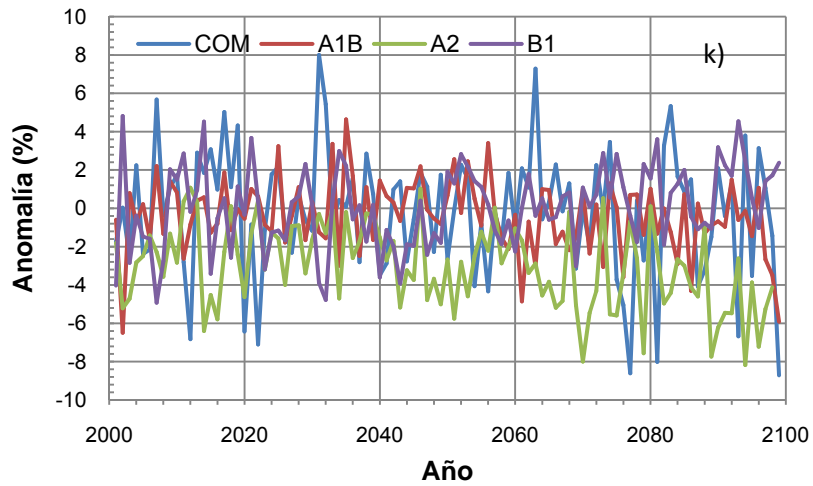
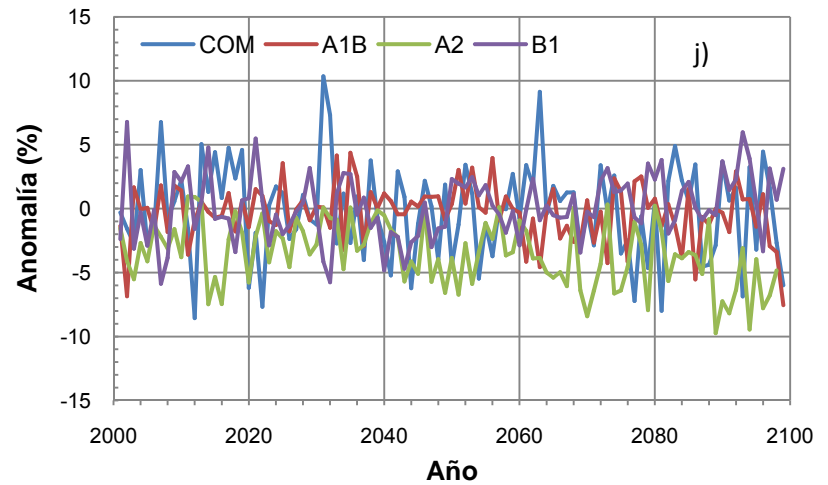
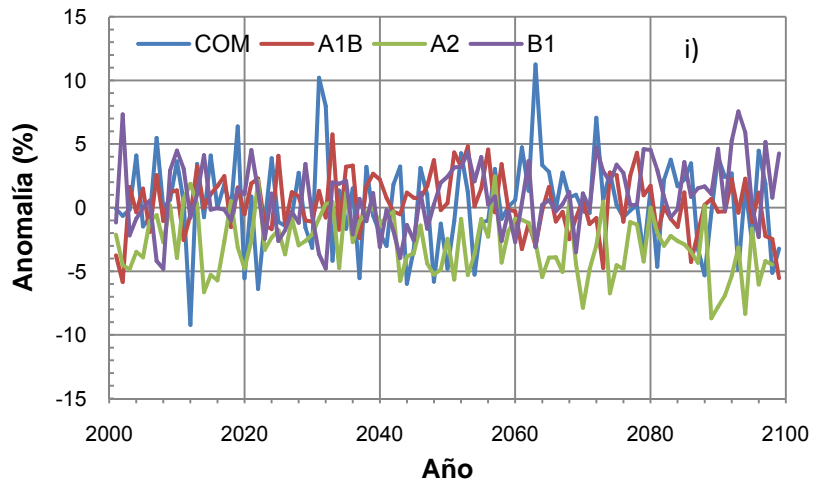
## a.2 Escenarios de Precipitación por Subcuenca



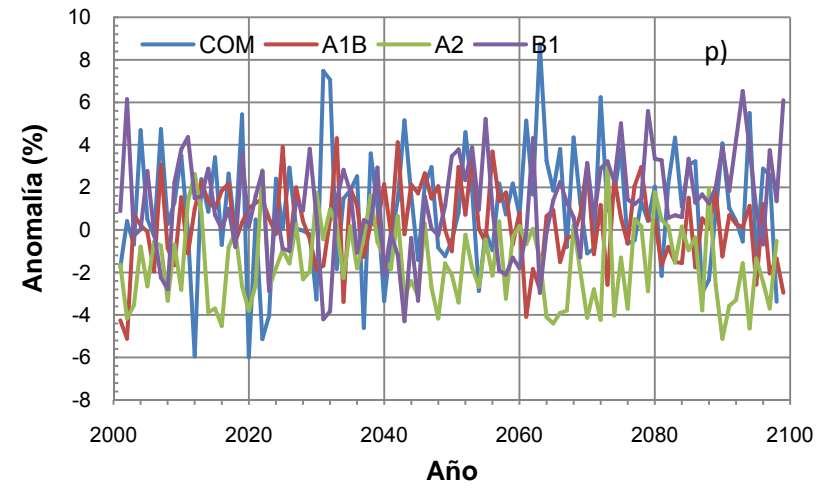
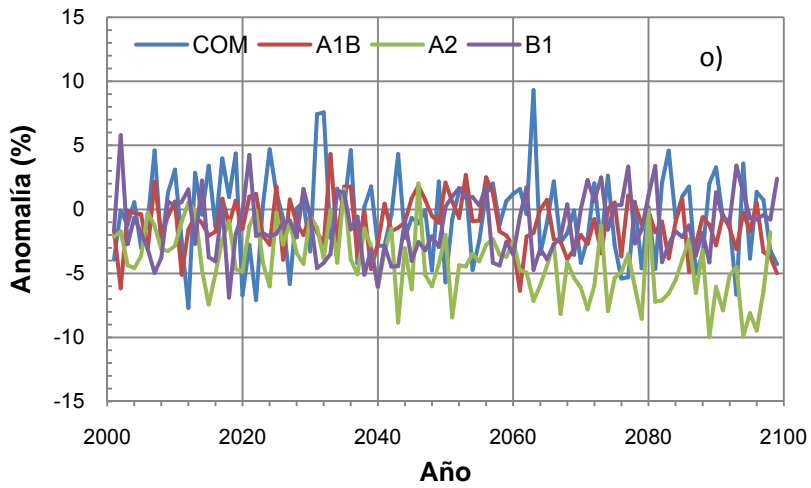
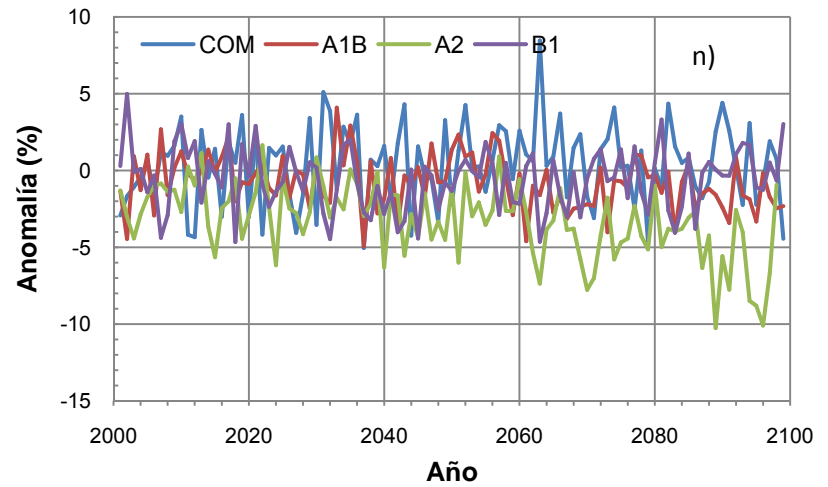
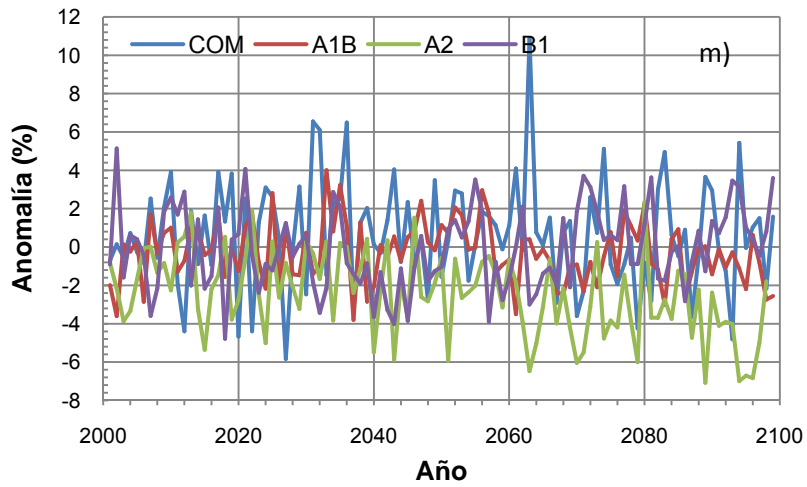
Escenarios de precipitación para las subcuencas: a) Angulo, b) Cuitzeo, c) Duero, y d) Jaltepec



Escenarios de precipitación para las subcuencas: e) La Gavia, f) Laja1, g) Laja2, y h) Lerma1

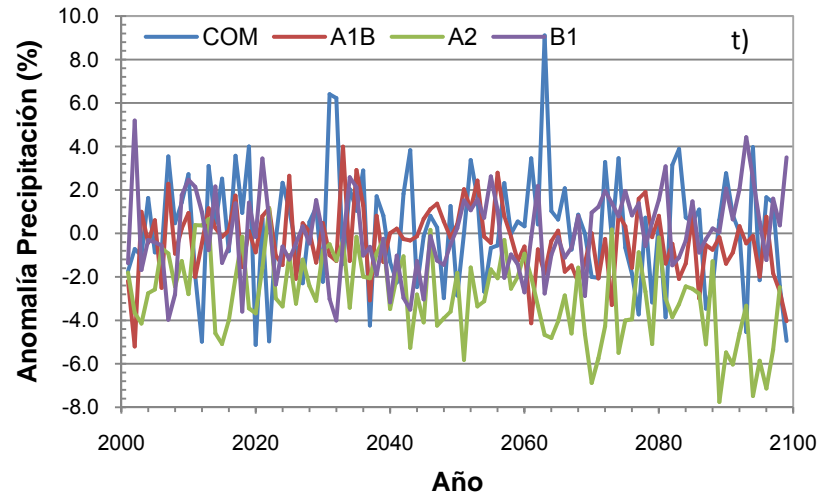
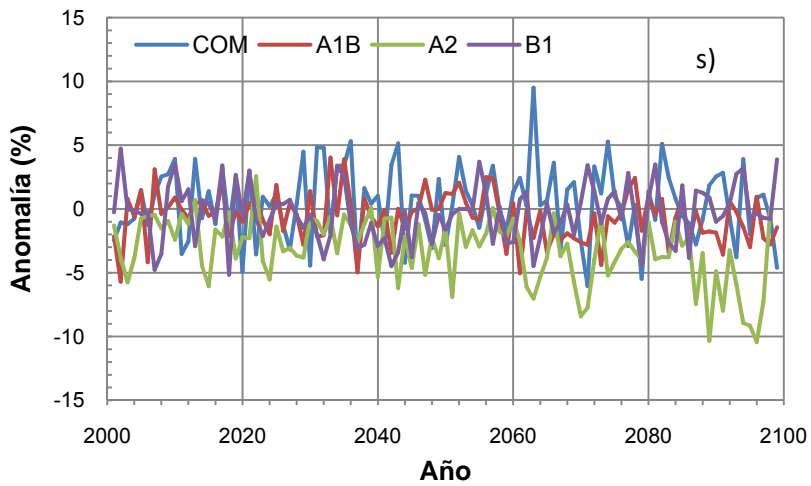
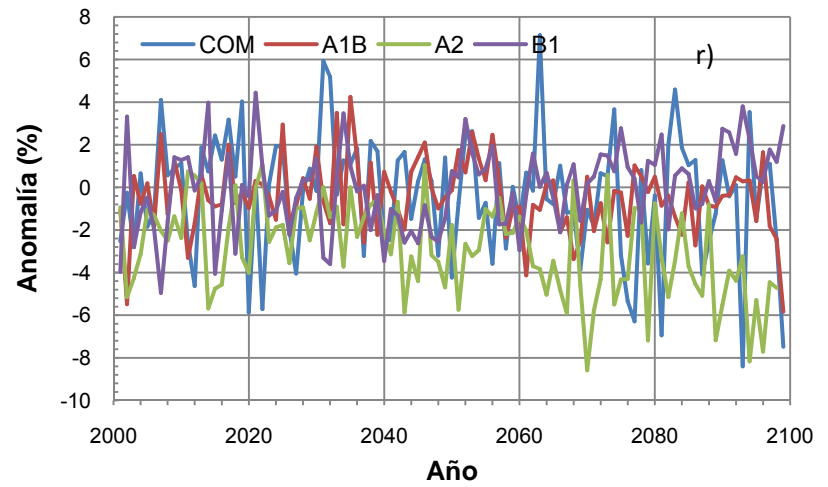
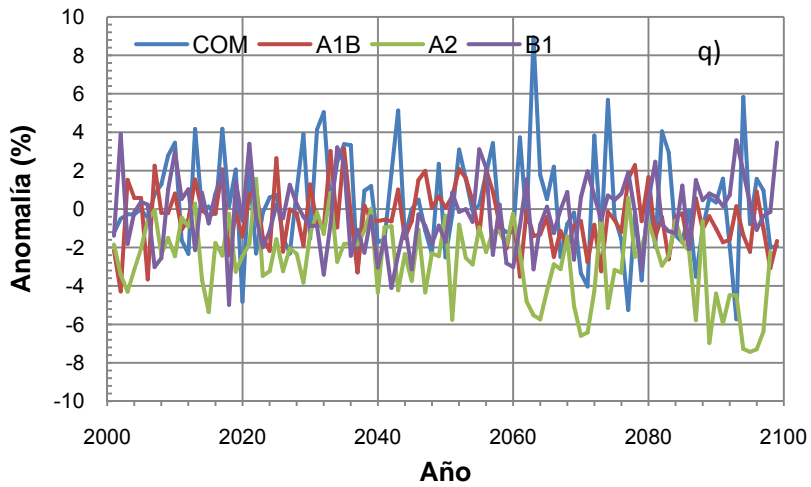


**Escenarios de precipitación para las subcuencas: i) Lerma2, j) Lerma3, k) Lerma4, y l) Lerma5**



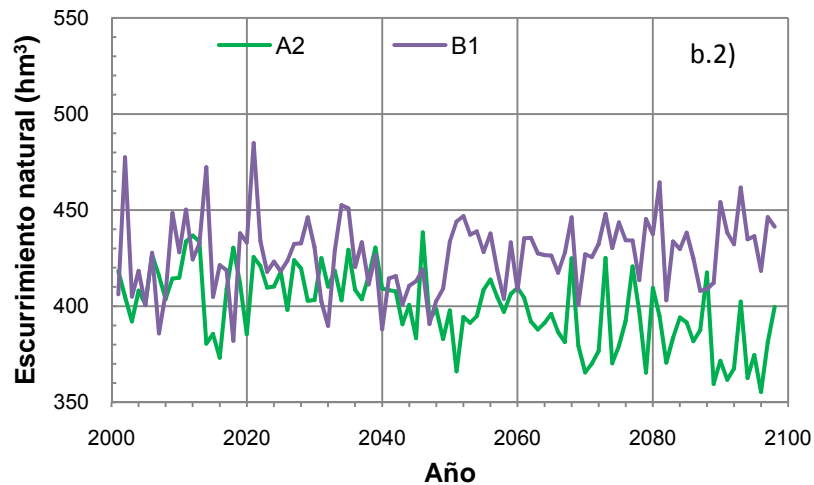
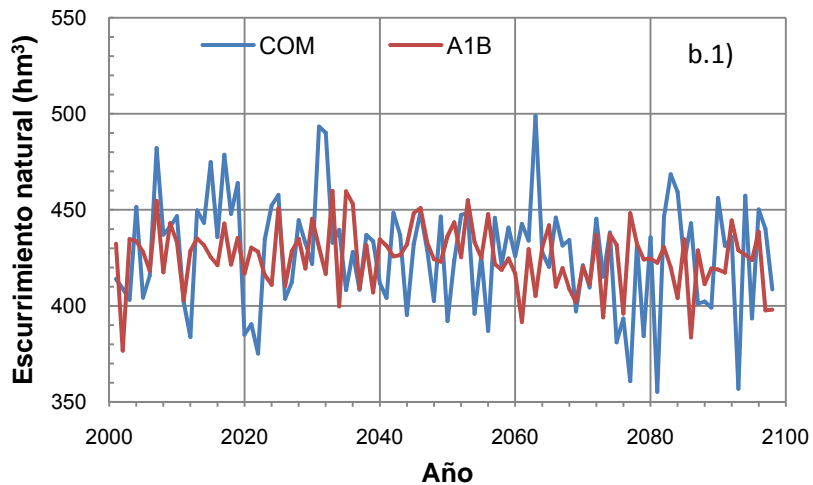
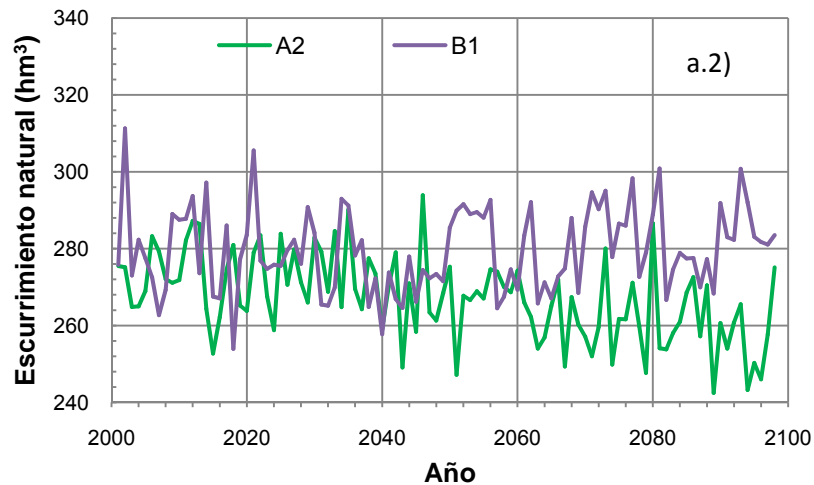
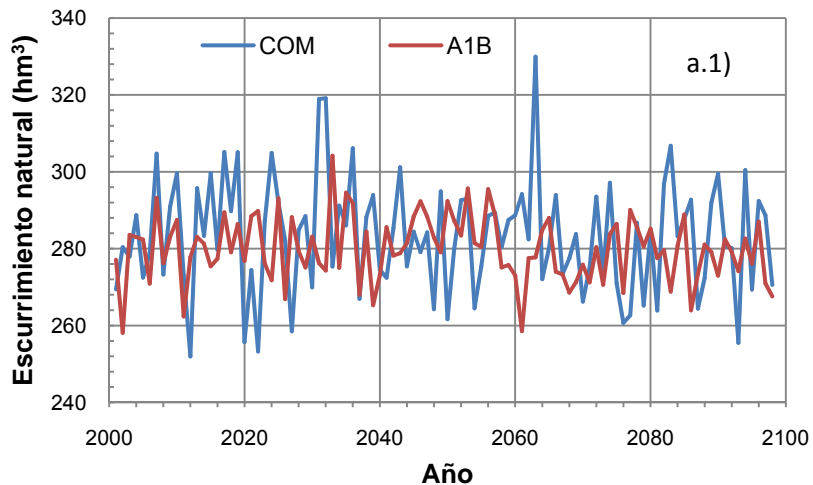
**Escenarios de precipitación para las subcuencas: m) Lerma6, n) Lerma7, o) Patzcuaro, y p) Río Querétaro**



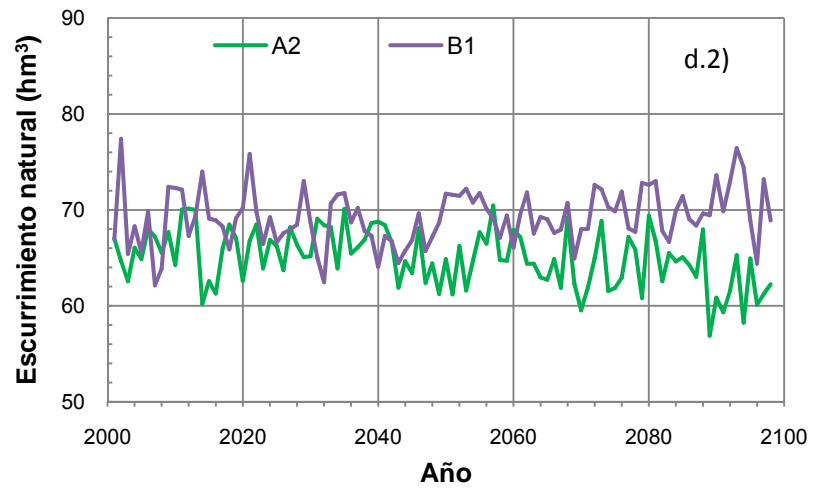
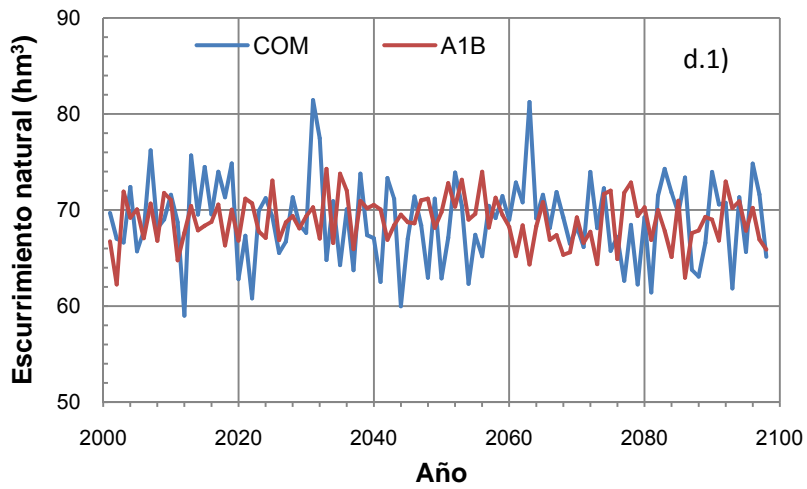
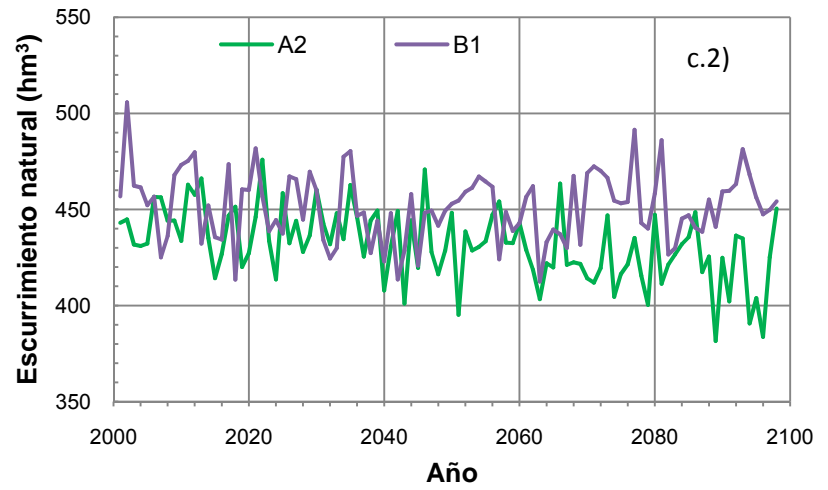
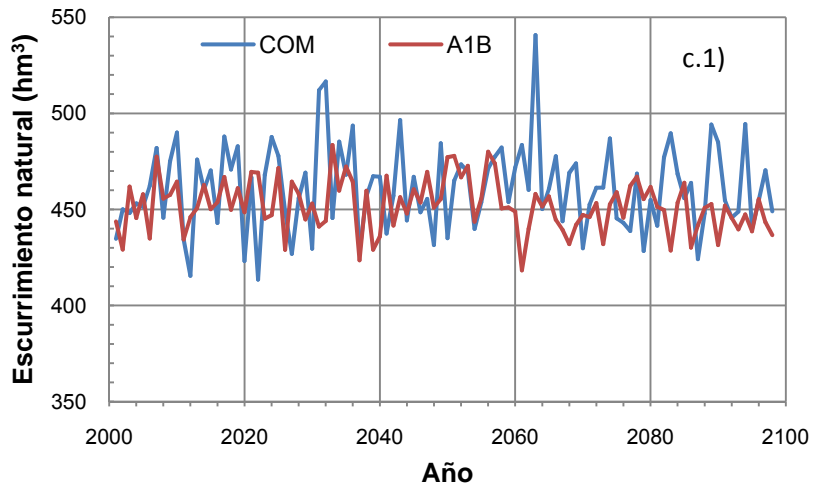


Escenarios de precipitación para las subcuencas: q) Río Turbio, r) Yuriria, s) Zula, y t) cuenca Lerma-Chapala

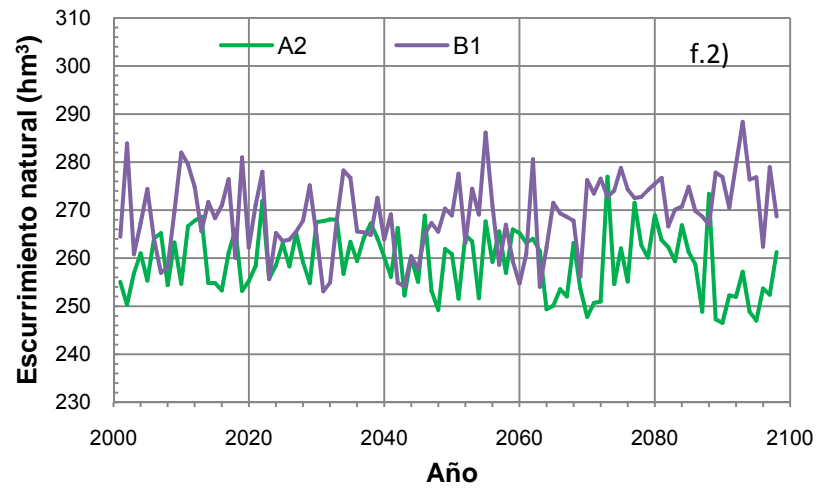
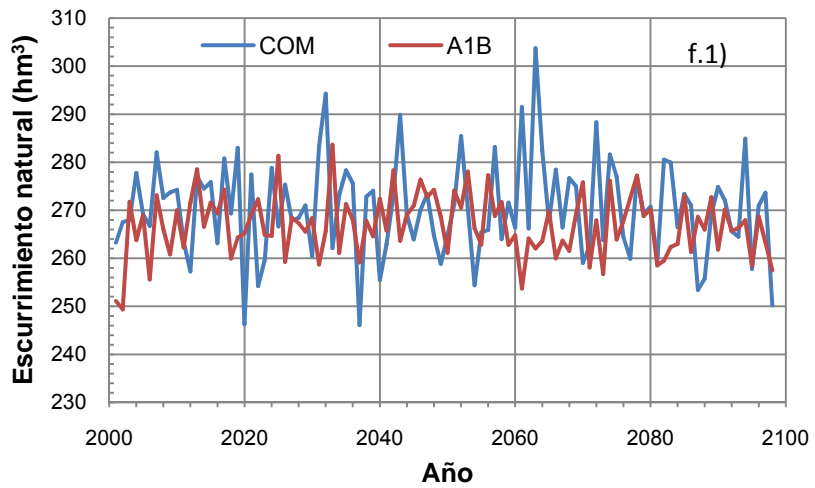
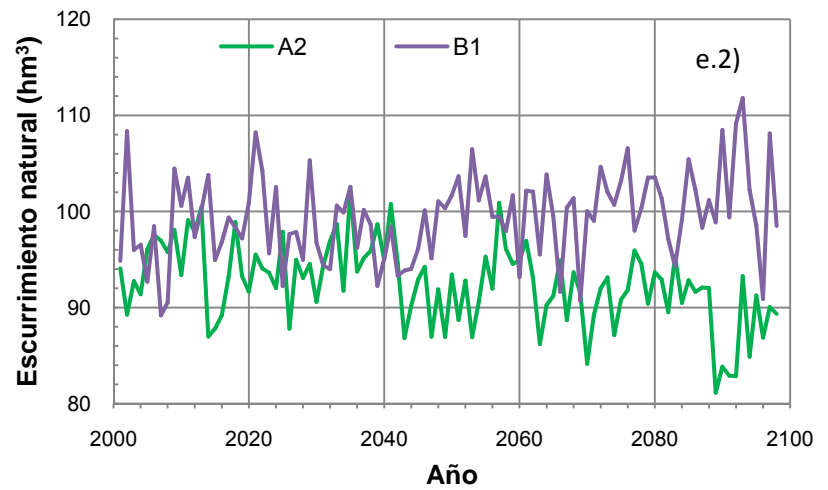
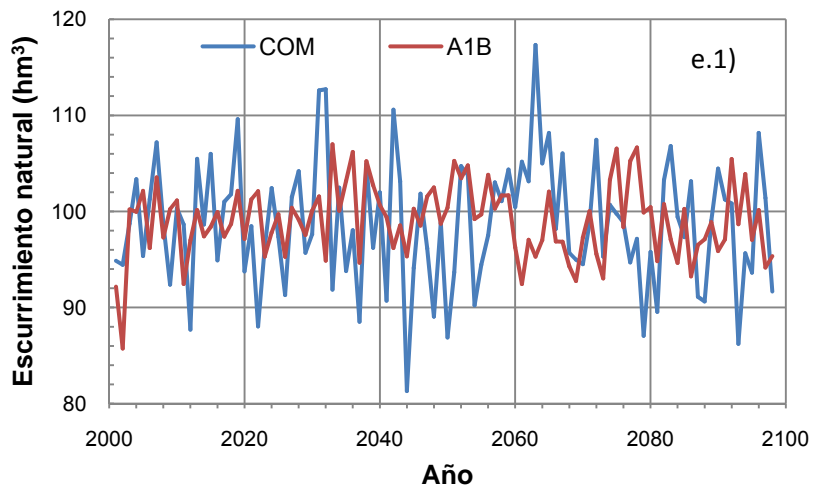
### a.3 Escenarios de Esgurrimento por Subcuenca



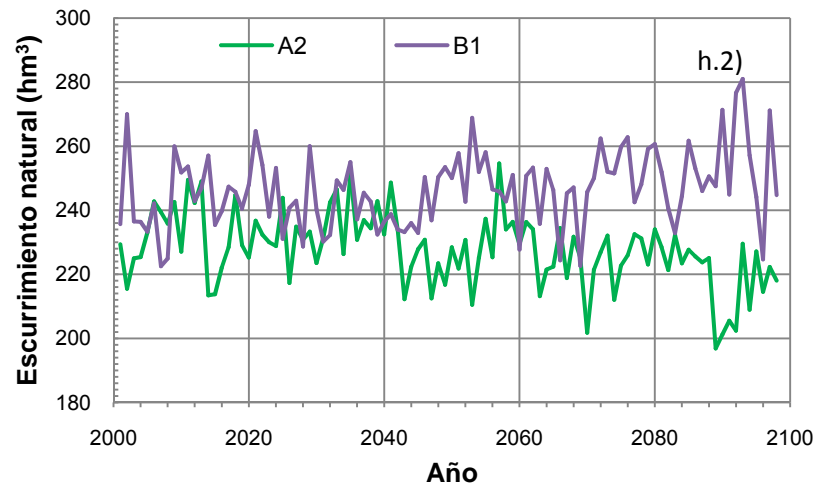
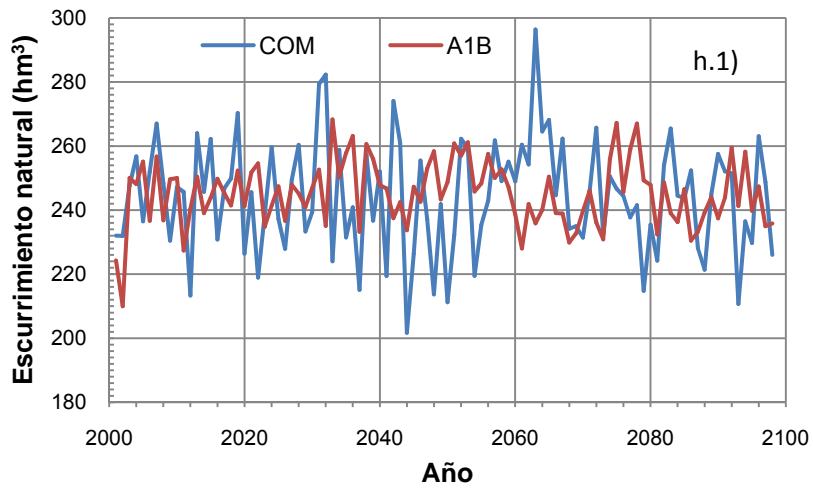
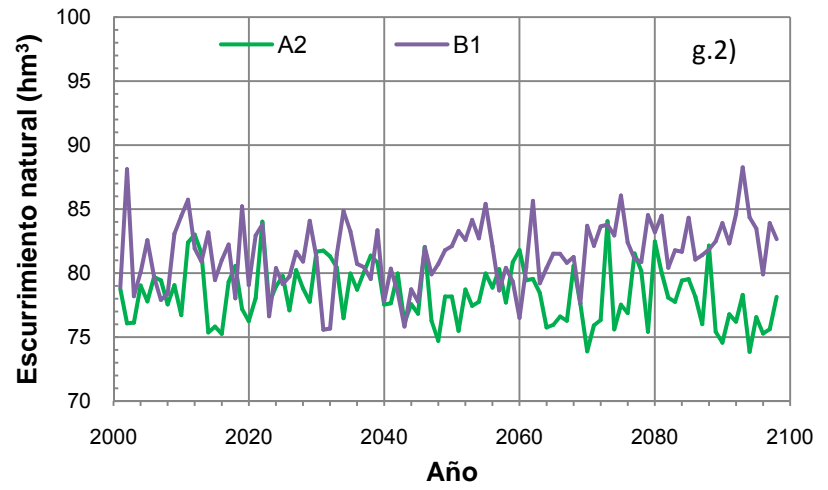
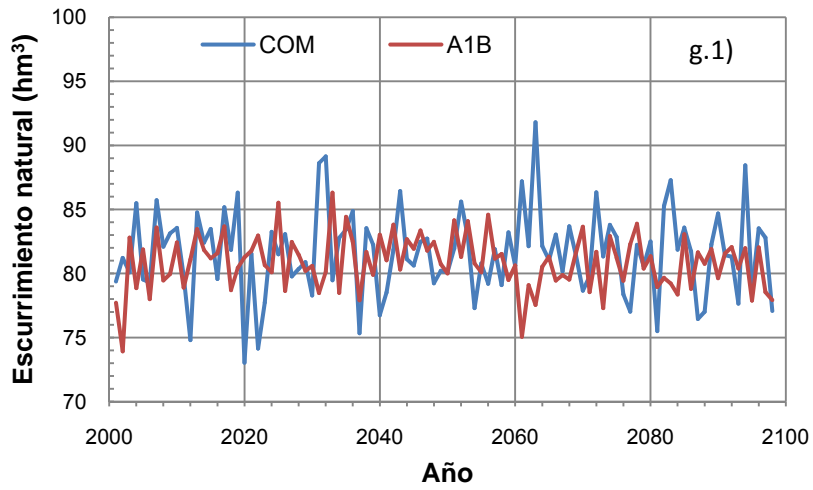
Escenarios de esgurrimento para las subcuencas: a) Angulo, b) Cuitzeo



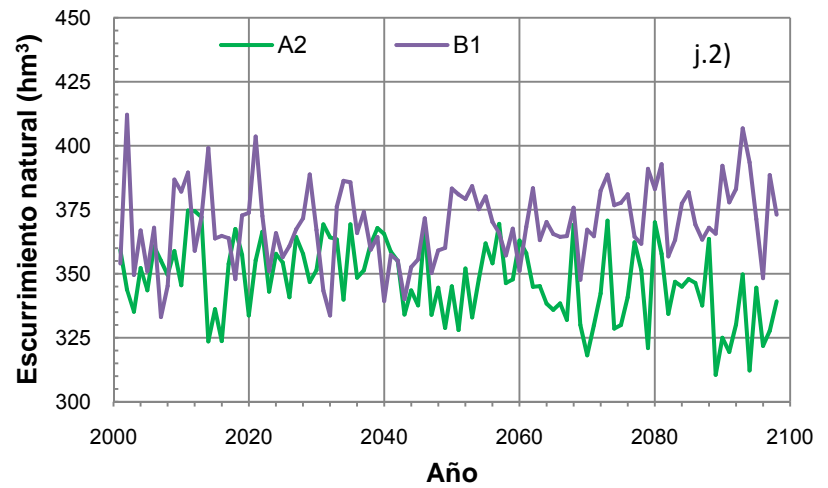
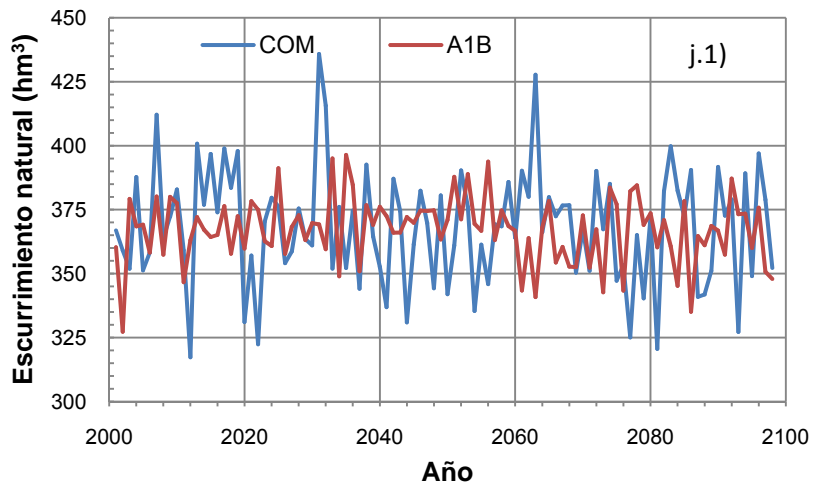
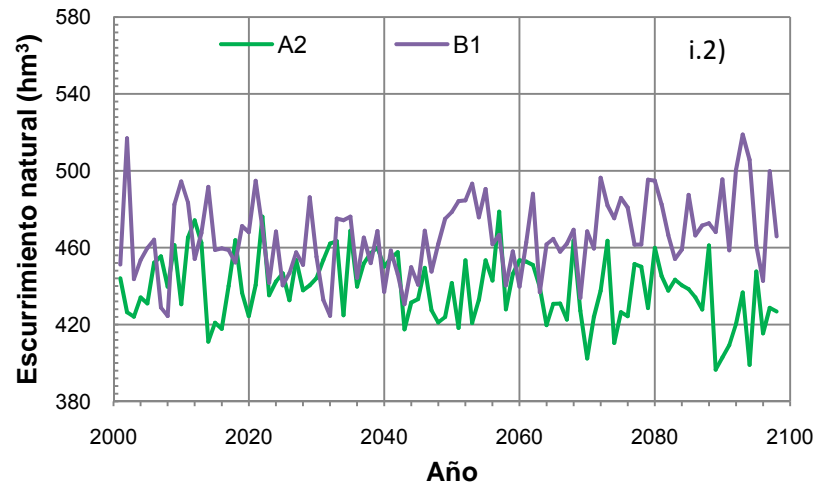
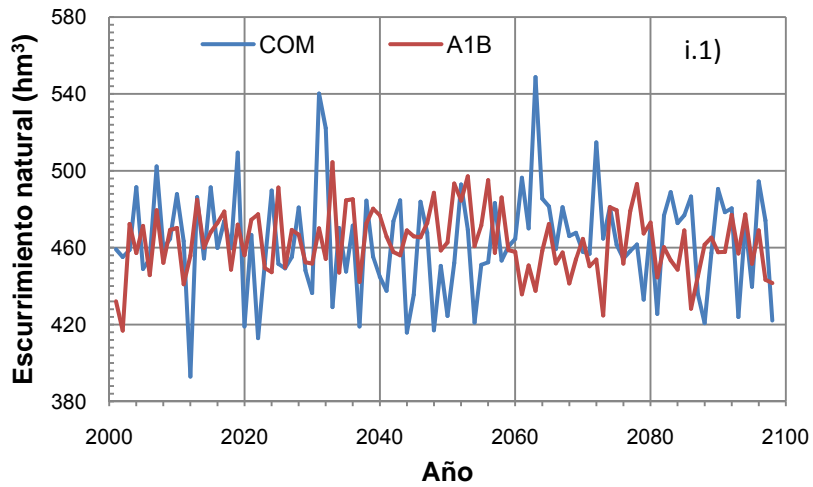
**Escenarios de escurrimiento para las subcuencas: c) Duero, d) Jaltepec**



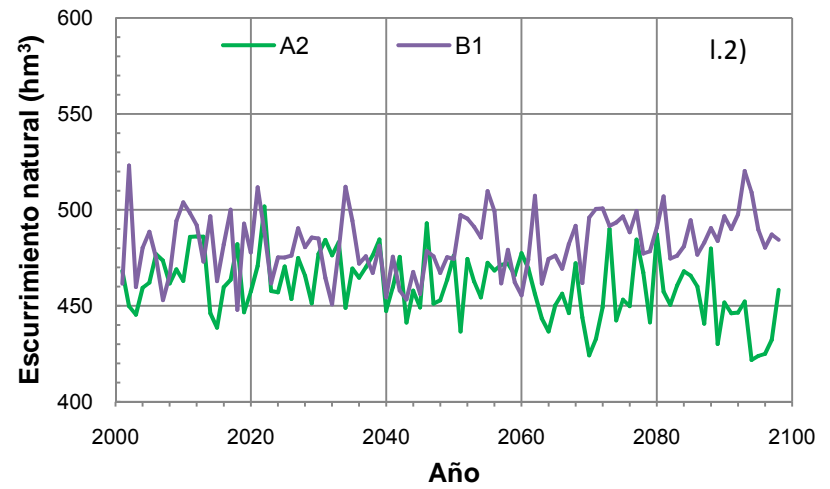
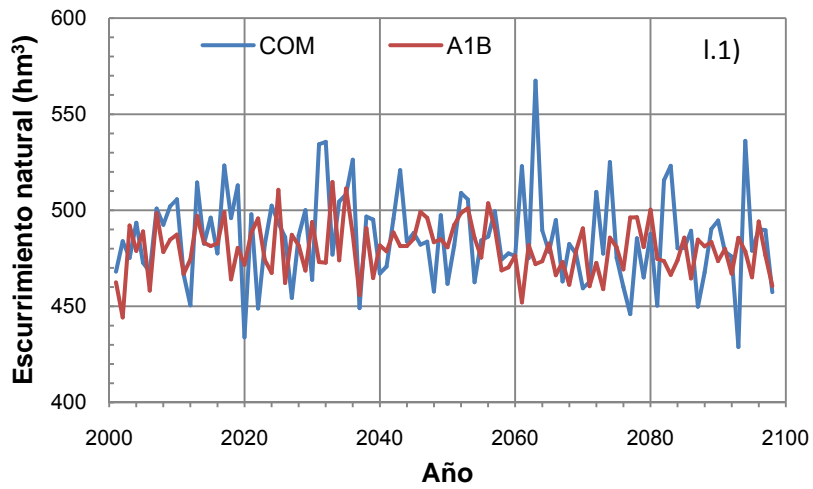
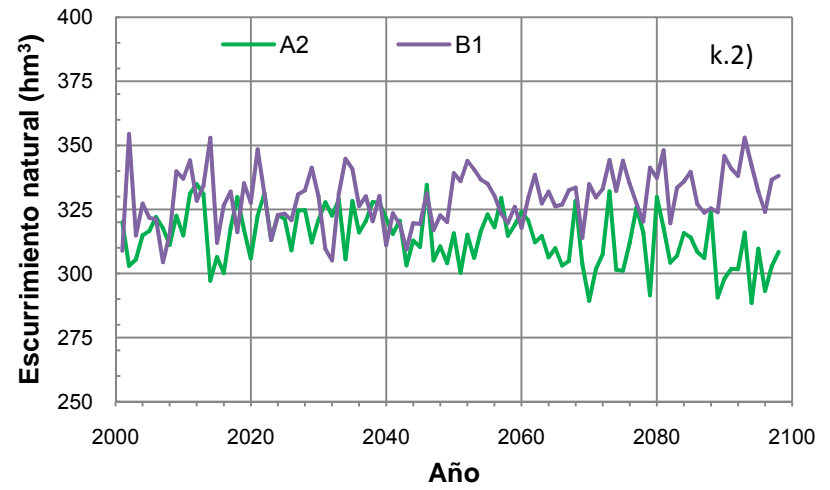
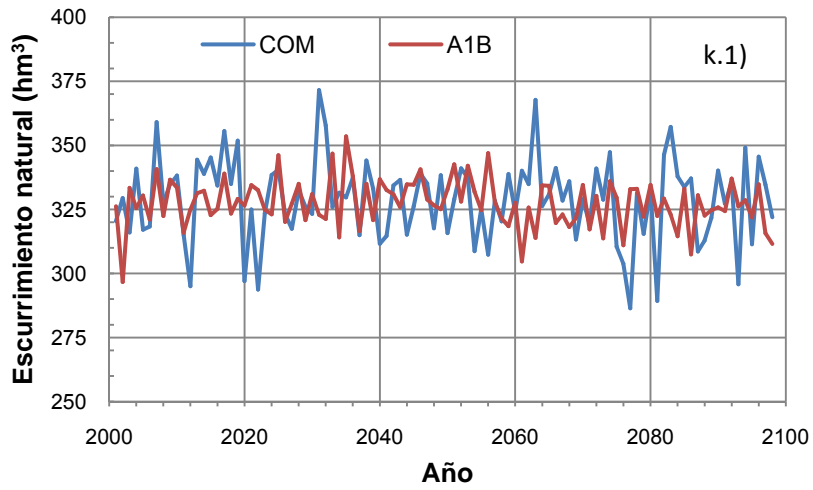
**Escenarios de escurrimiento para las subcuencas: e) La Gavia, f) Laja1**



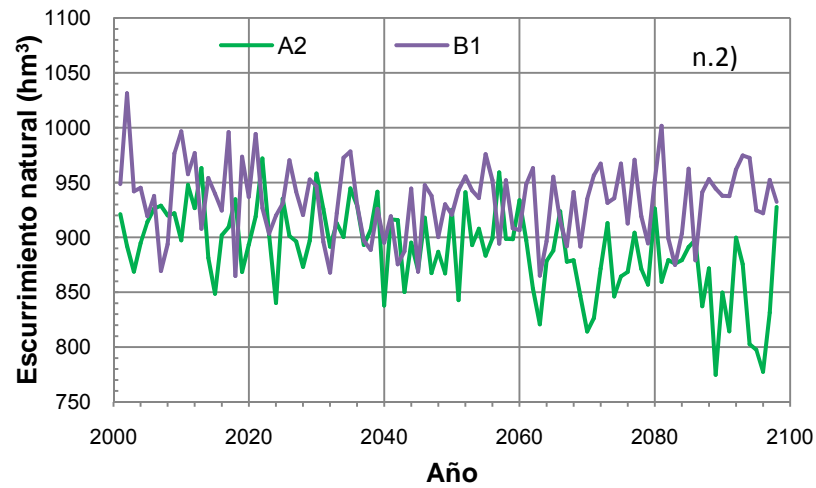
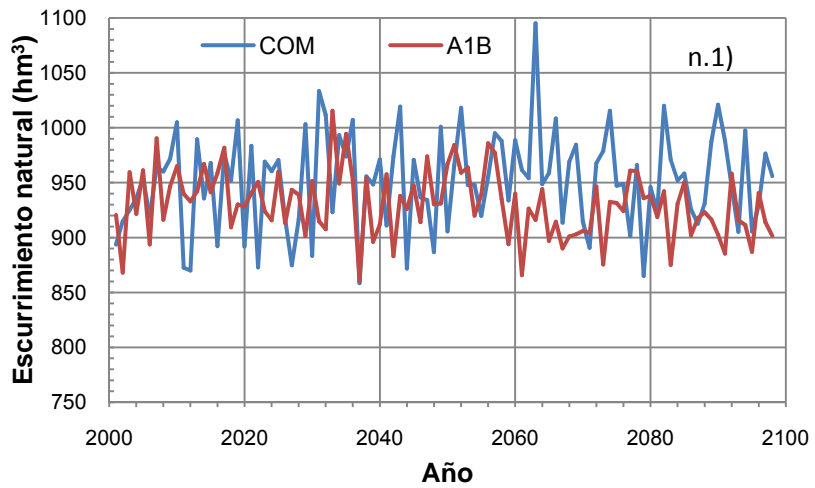
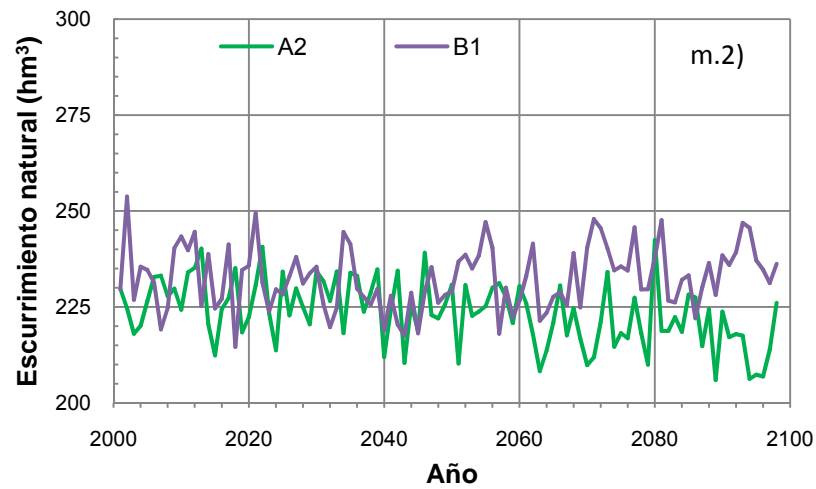
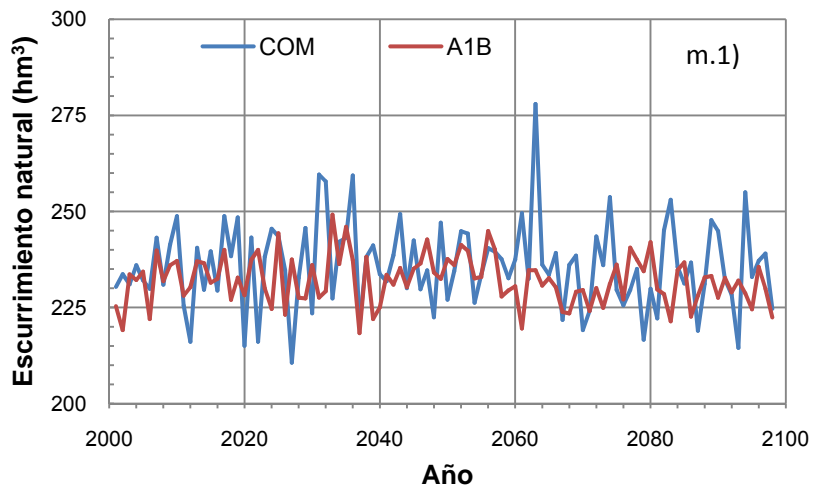
**Escenarios de escurrimiento para las subcuencas: g) Laja2, h) Lerma1**



Escenarios de escurrimiento para las subcuencas: i) Lerma2, j) Lerma3

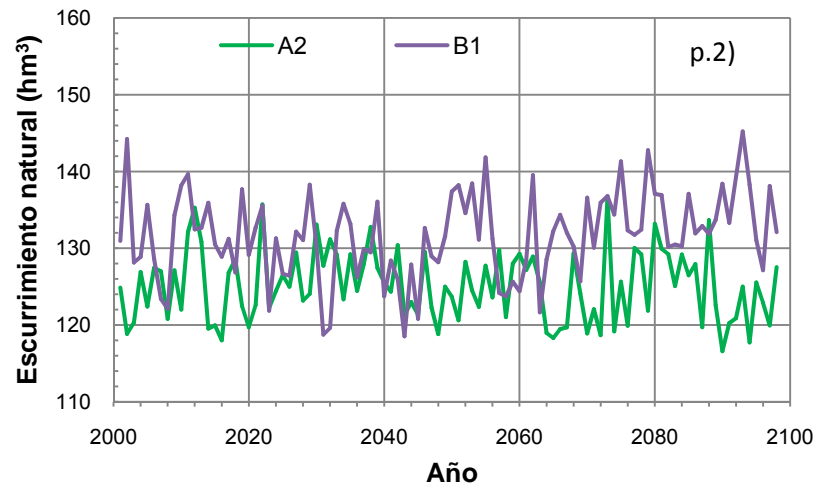
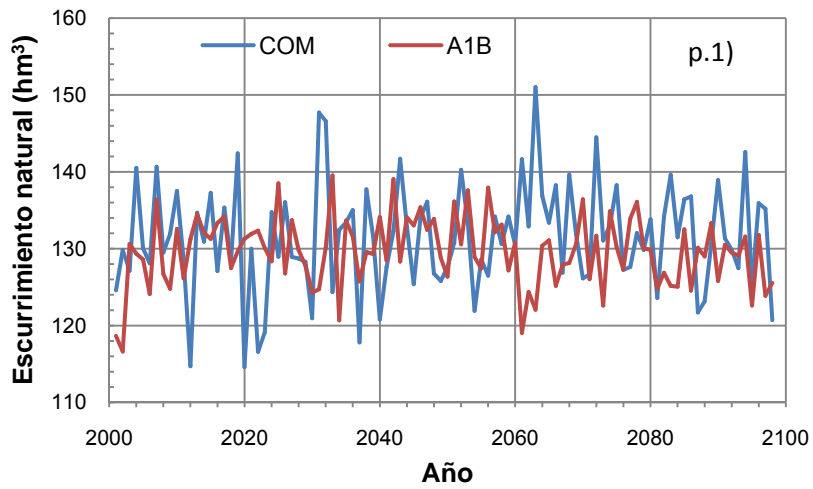
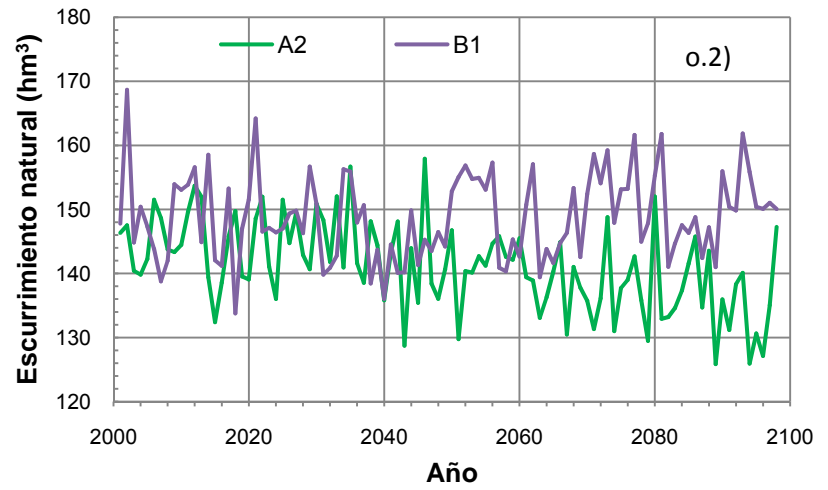
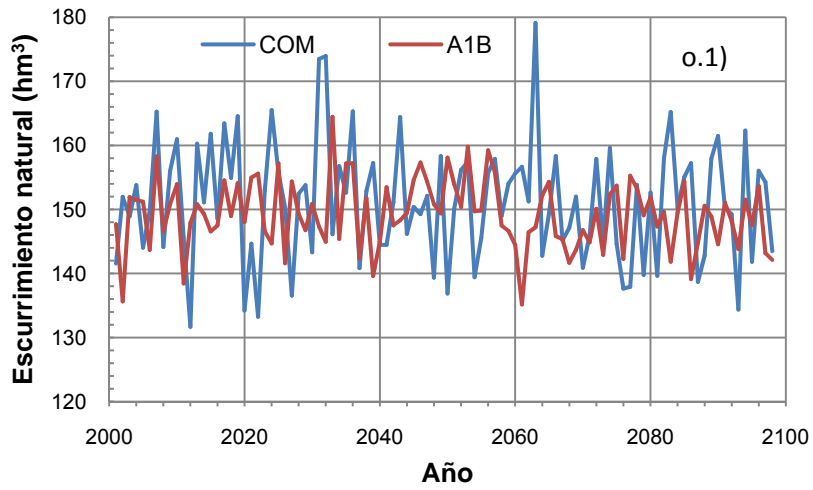


Escenarios de escurrimiento para las subcuencas: k) Lerma4, l) Lerma5

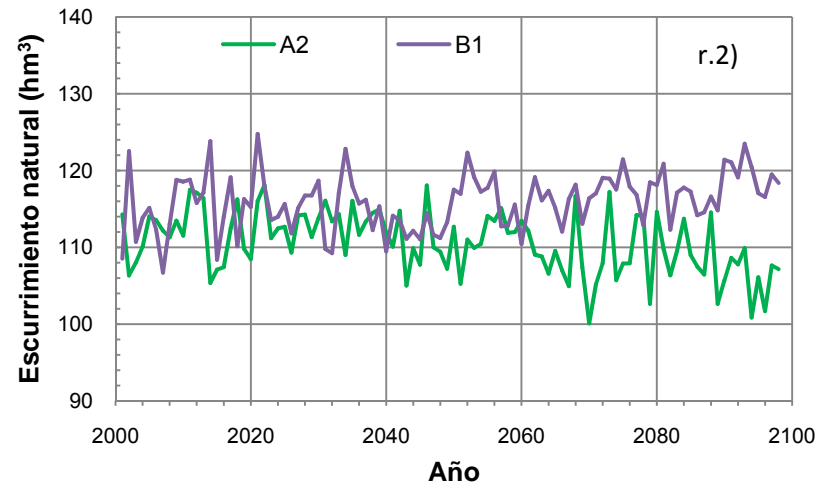
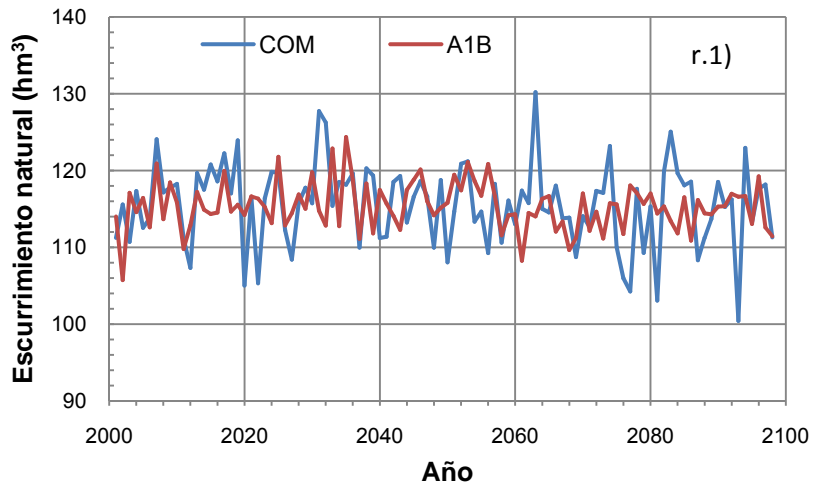
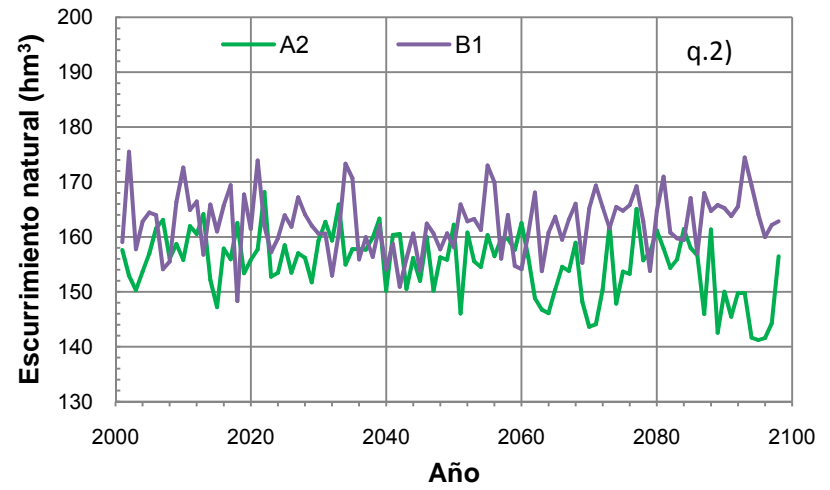
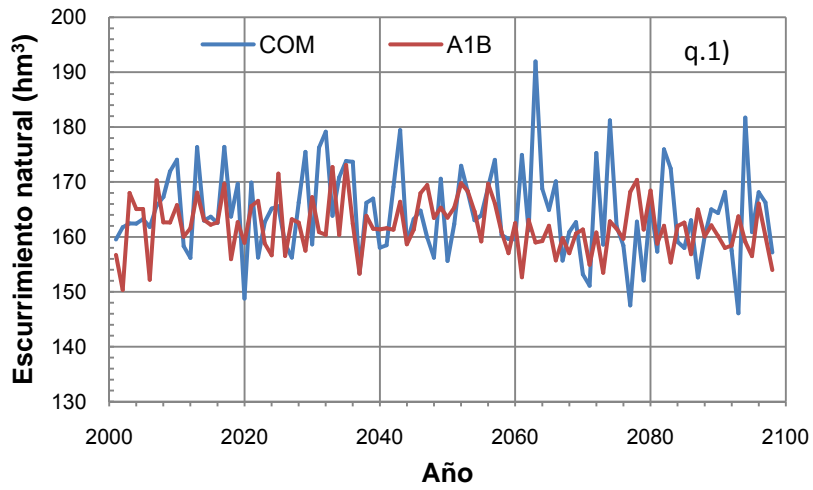


**Escenarios de escurrimiento para las subcuencas: m) Lerma6, n) Lerma7**

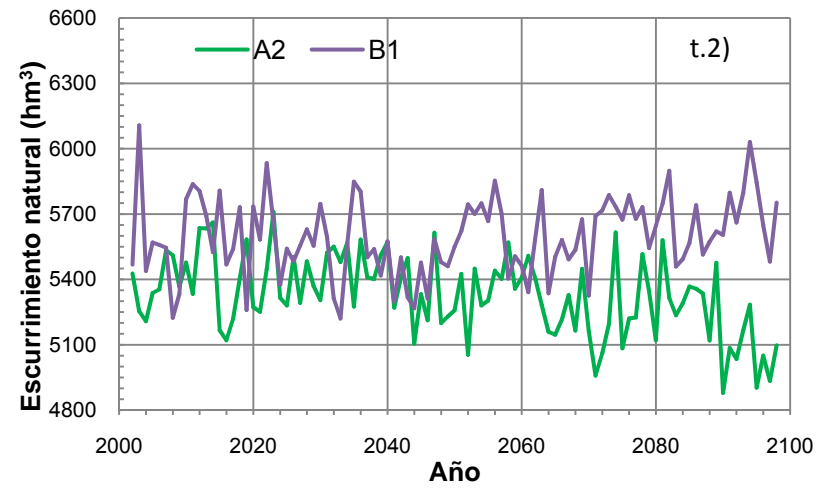
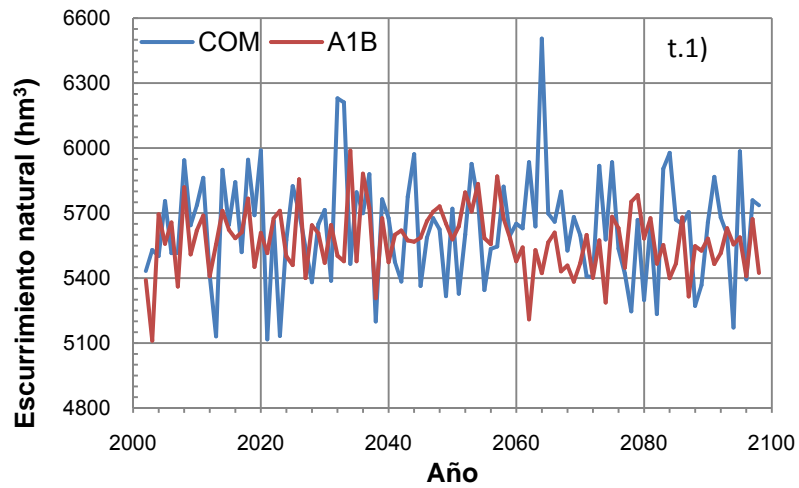
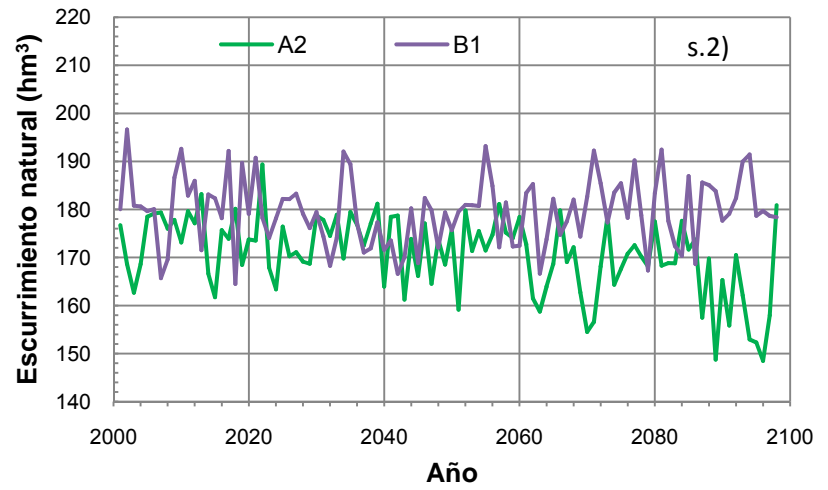
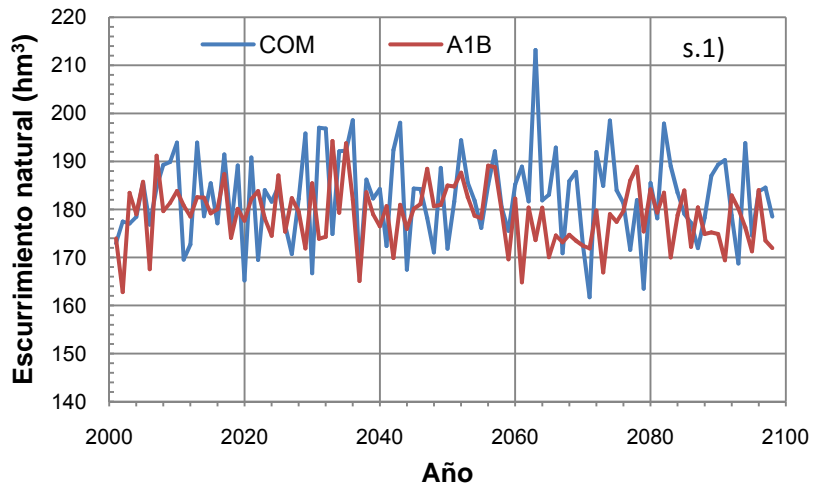




Escenarios de escurrimiento para las subcuencas: o) Patzcuaro, p) Río Querétaro

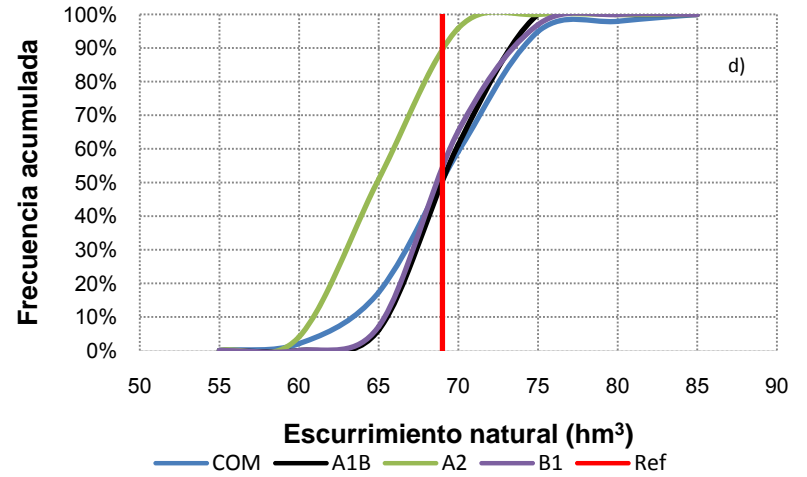
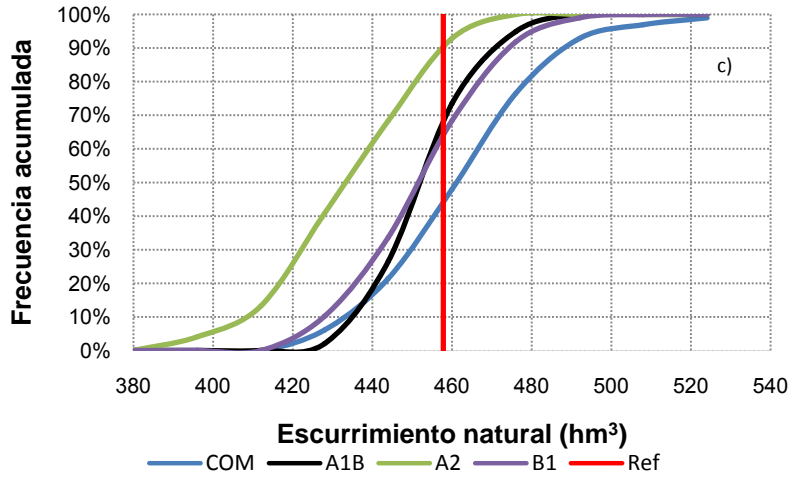
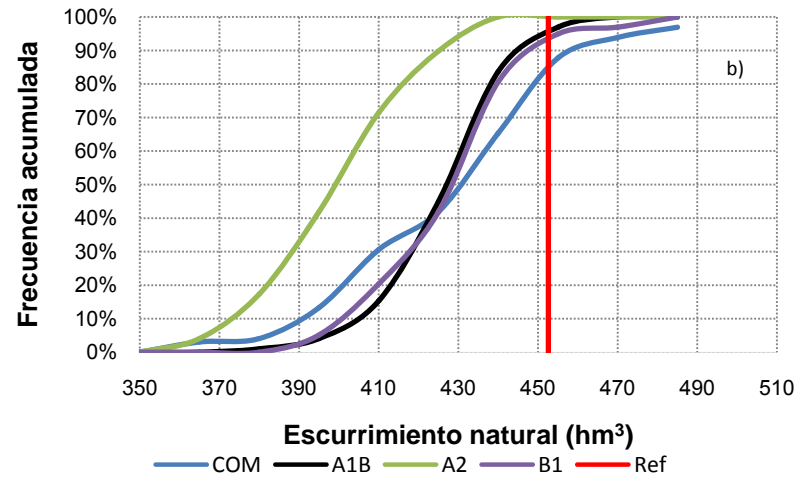
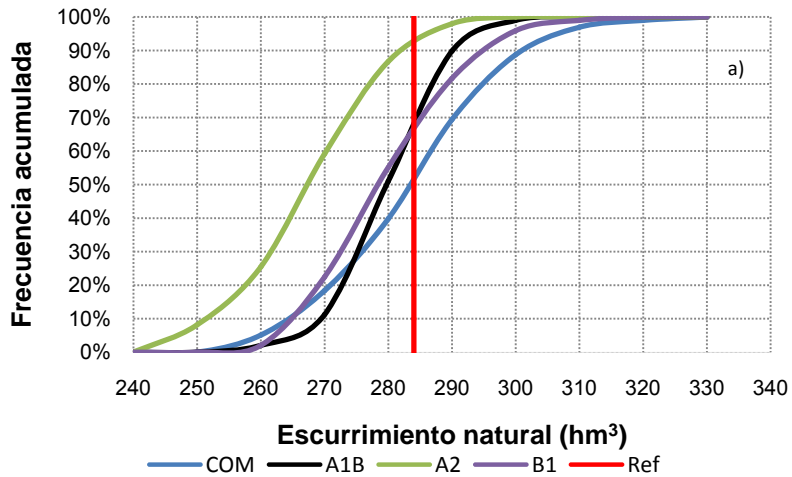


Escenarios de escurrimento para las subcuencas: q) Río Turbio, r) Yuriria

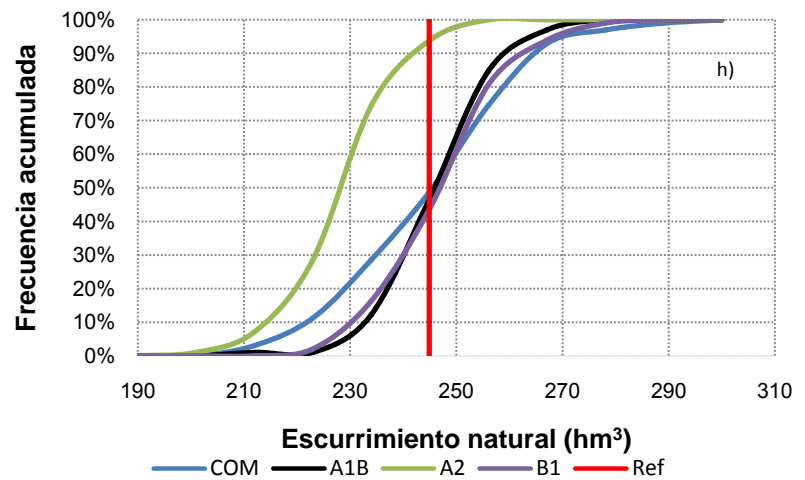
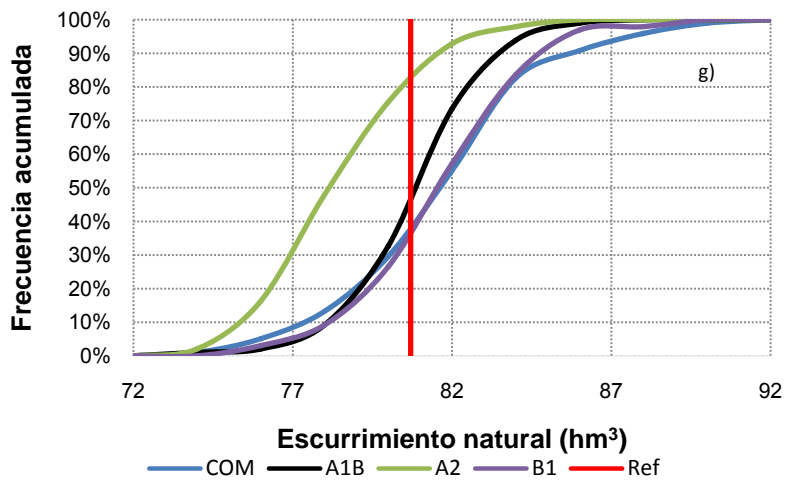
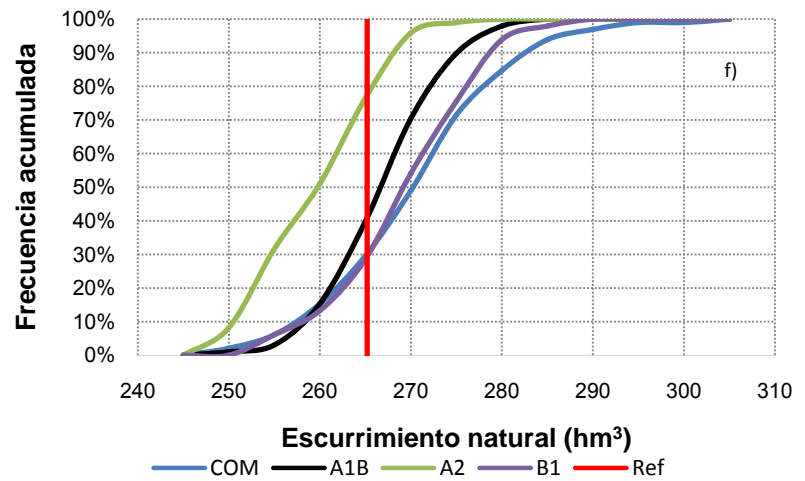
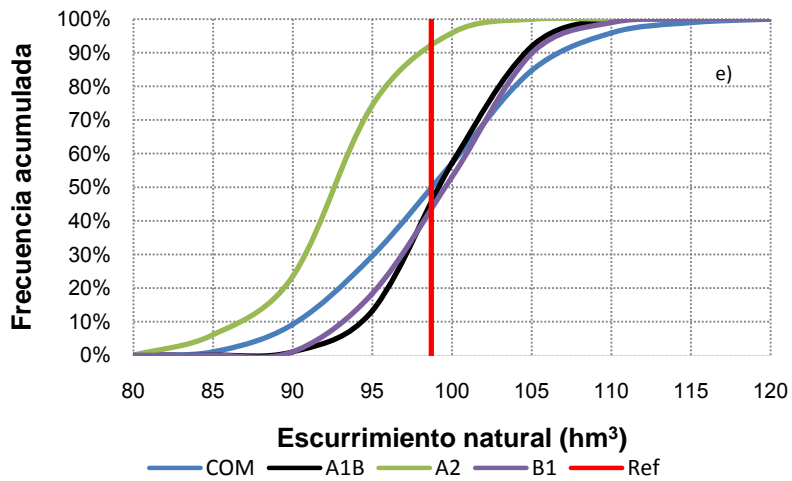


Escenarios de escurrimento para las subcuencas: s) Zula, t) Lerma-Chapala

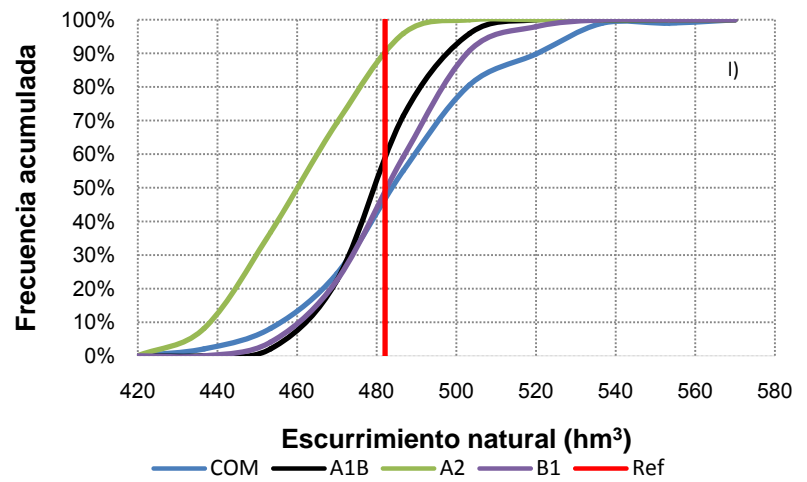
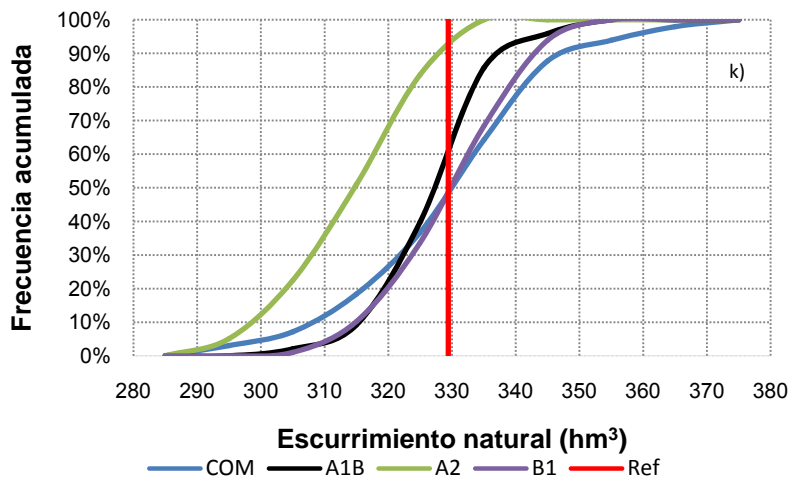
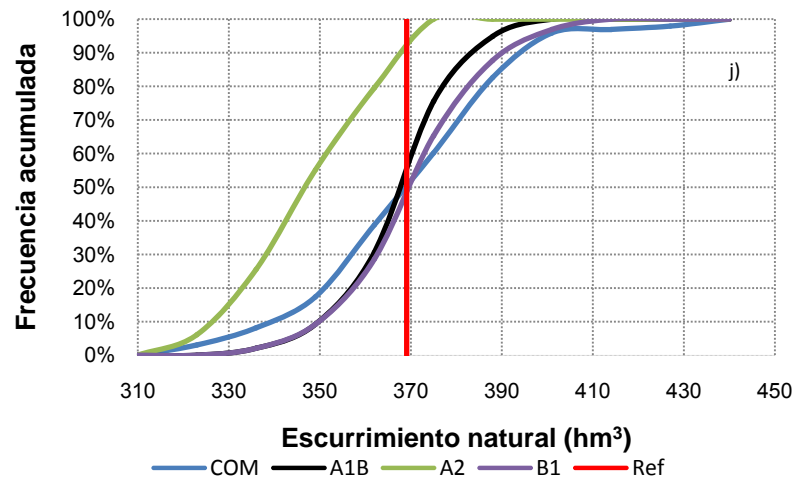
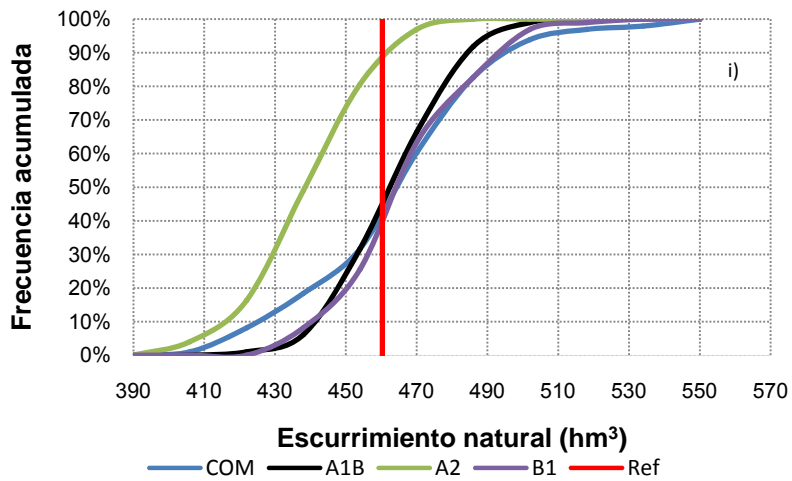
#### a.4 Distribución de frecuencia acumulada del escurrimiento por subcuenca



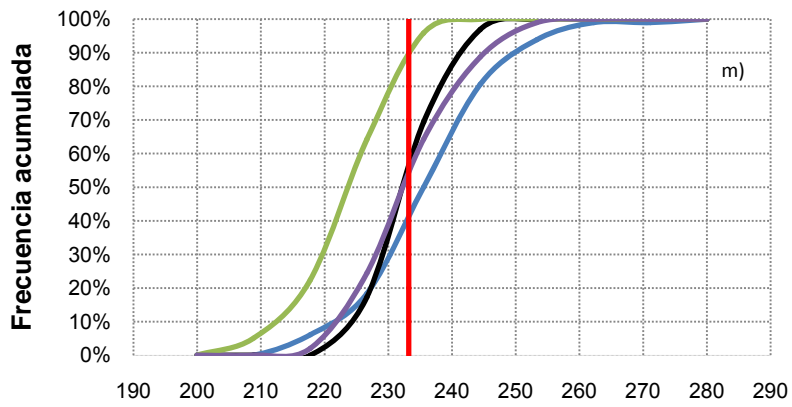
**Distribución de frecuencia acumulada del escurrimiento bajo las condiciones de los escenarios de cambio climático para las subcuencas a) Angulo, b) Cuitzeo, c) Duero, d) Jaltepec**



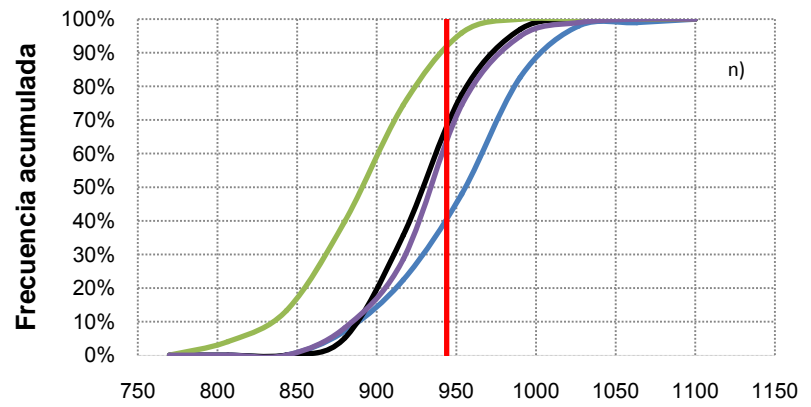
**Distribución de frecuencia acumulada del escurrimiento bajo las condiciones de los escenarios de cambio climático para las subcuencas e) La Gavia, f) Laja1, g) Laja2, h) Lerma1**



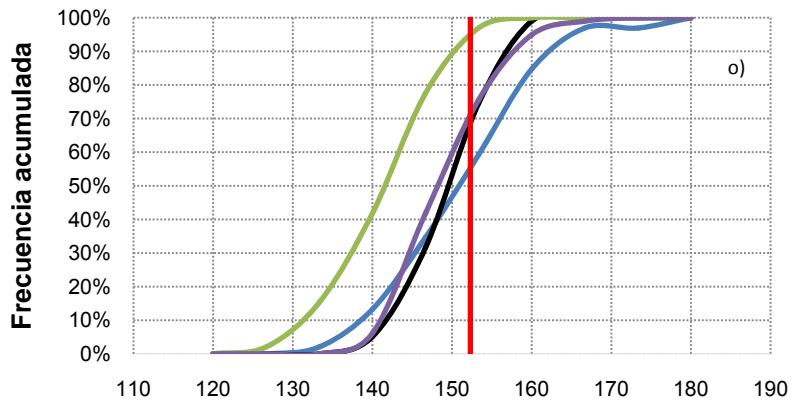
**Distribución de frecuencia acumulada del escurrimiento bajo las condiciones de los escenarios de cambio climático para las subcuencas i) Lerma2, j) Lerma3, k) Lerma4, l) Lerma5**



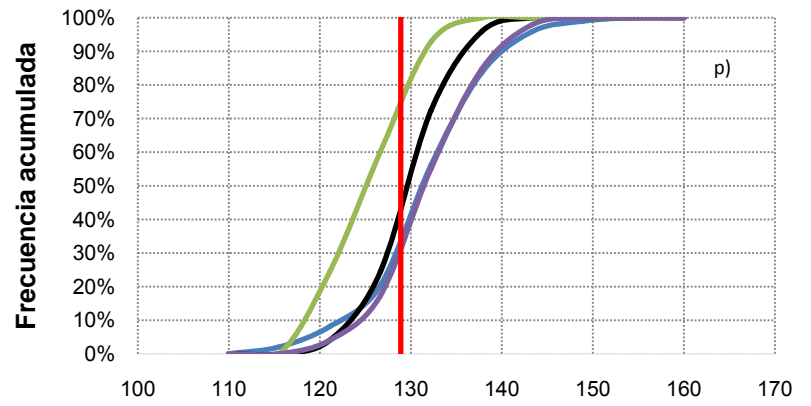
**Escorrentamiento natural (hm<sup>3</sup>)**  
 — COM — A1B — A2 — B1 — Ref



**Escorrentamiento natural (hm<sup>3</sup>)**  
 — COM — A1B — A2 — B1 — Ref

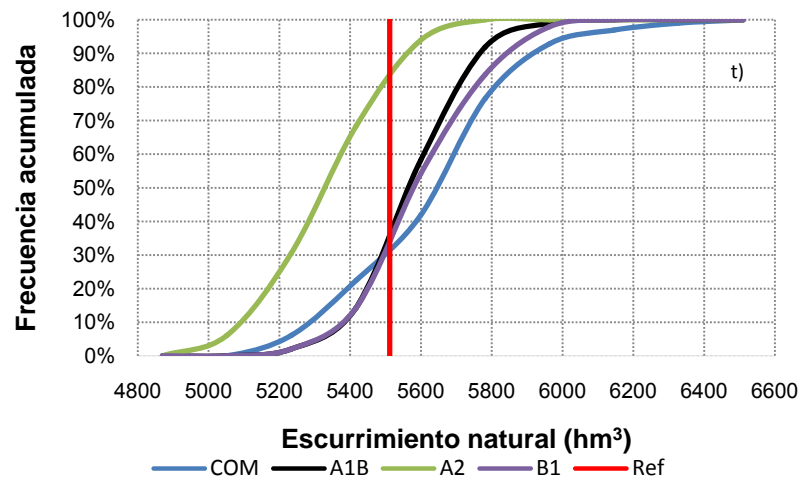
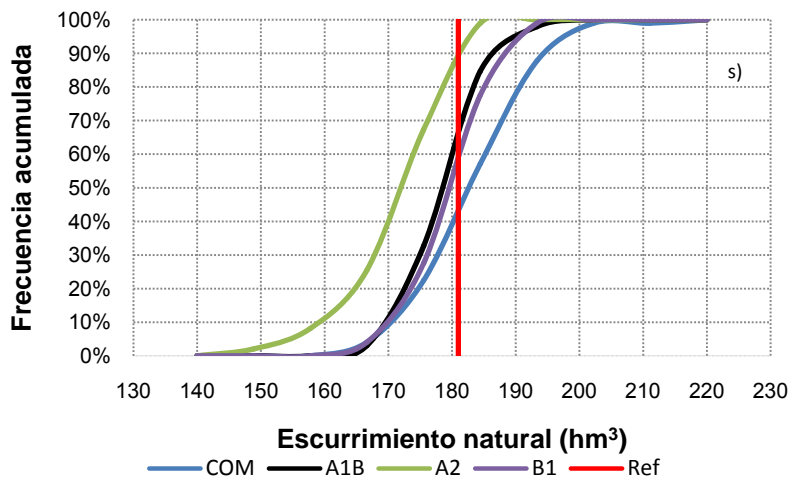
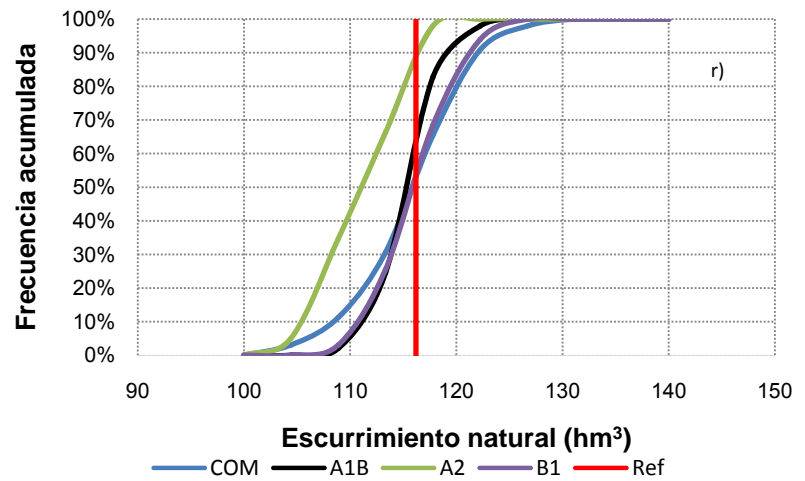
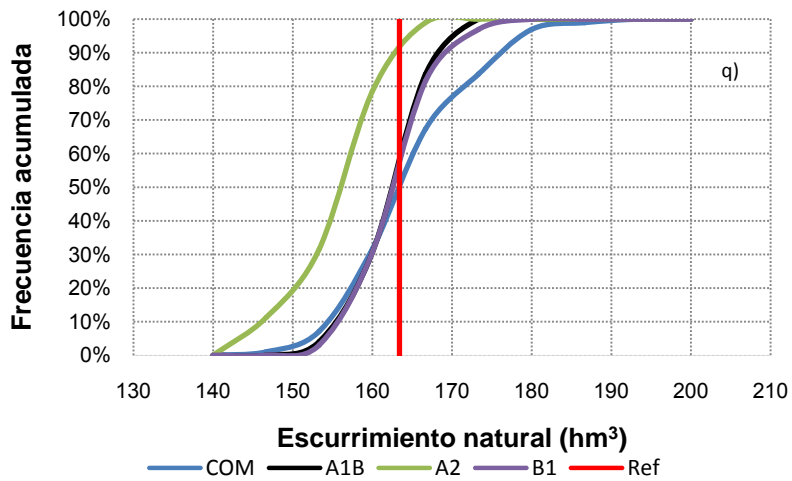


**Escorrentamiento natural (hm<sup>3</sup>)**  
 — COM — A1B — A2 — B1 — Ref



**Escorrentamiento natural (hm<sup>3</sup>)**  
 — COM — A1B — A2 — B1 — Ref

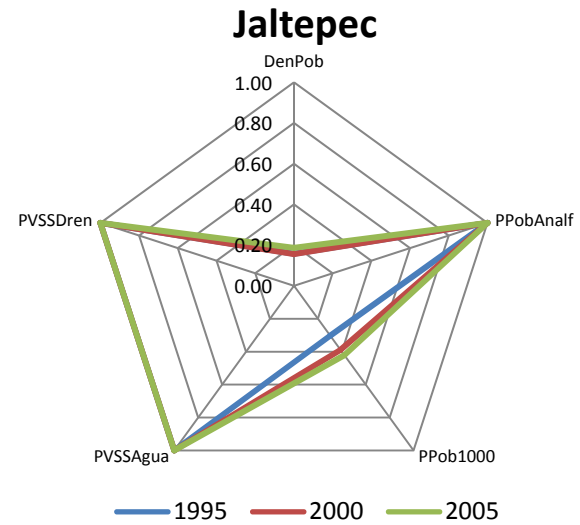
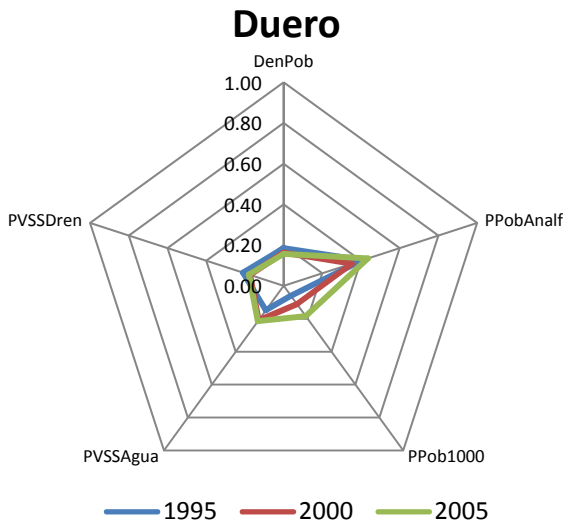
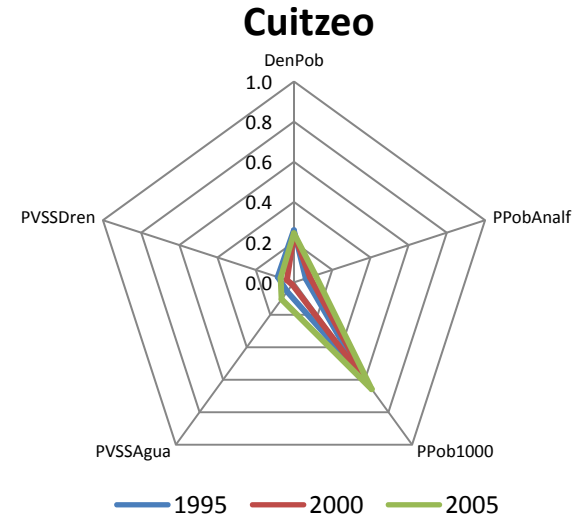
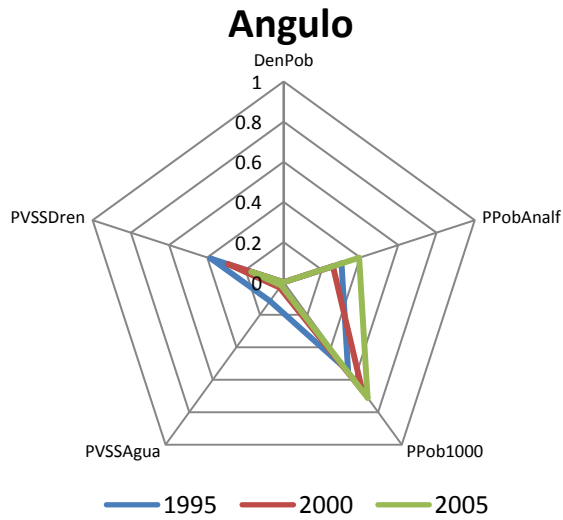
**Distribución de frecuencia acumulada del escurrimiento bajo las condiciones de los escenarios de cambio climático para las subcuencas m) Lerma6, n) Lerma7, o) Patzcuaro, p) Río Querétaro**



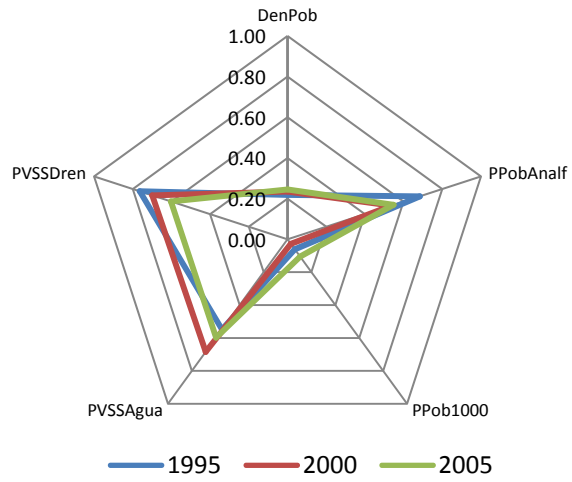
**Distribución de frecuencia acumulada del escurrimiento bajo las condiciones de los escenarios de cambio climático para las subcuencas q) Río Turbio, r) Yuriria, s) Zula, t) Lerma-Chapala**



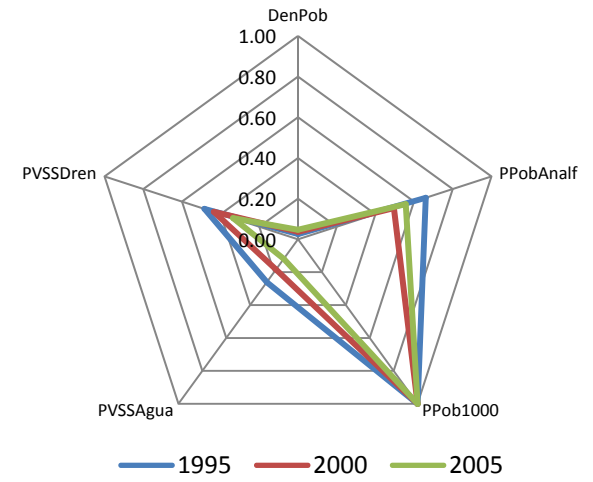
### a.5 Gráficas del índice de vulnerabilidad social por subcuenca



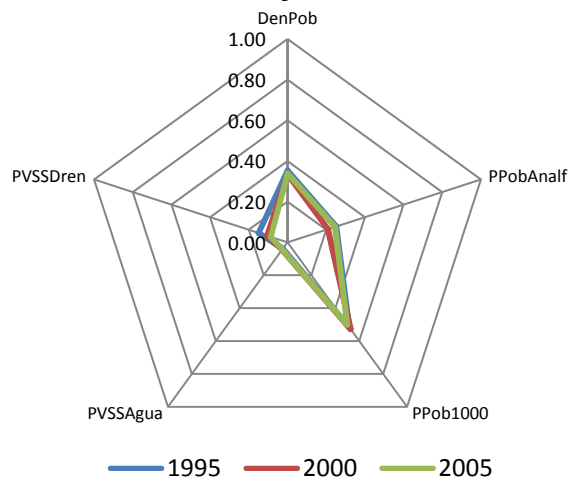
### La Gavia



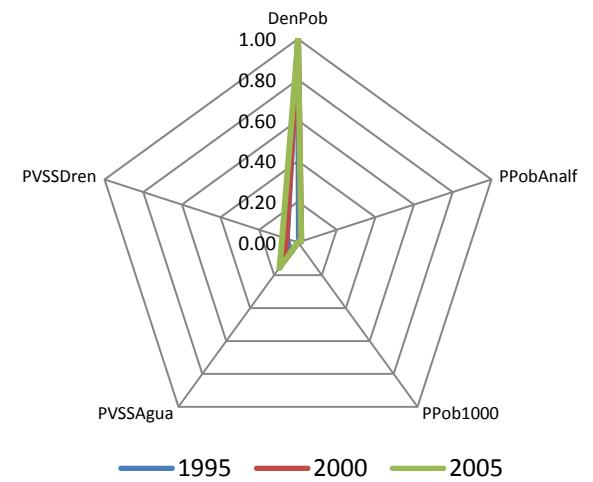
### Laja 1



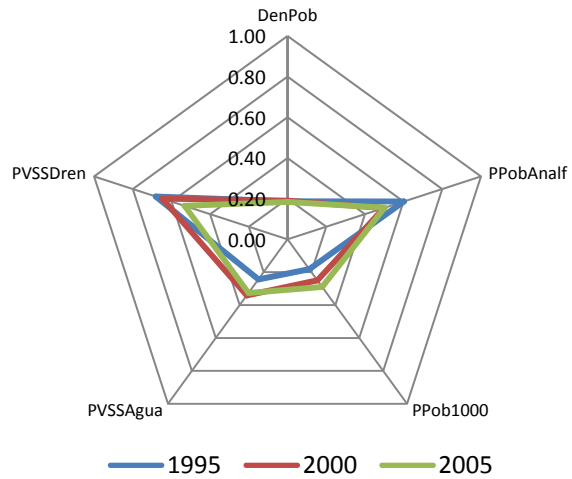
### Laja 2



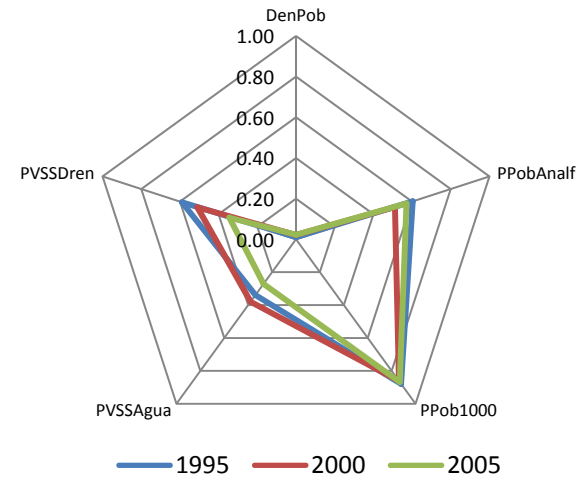
### Lerma 1



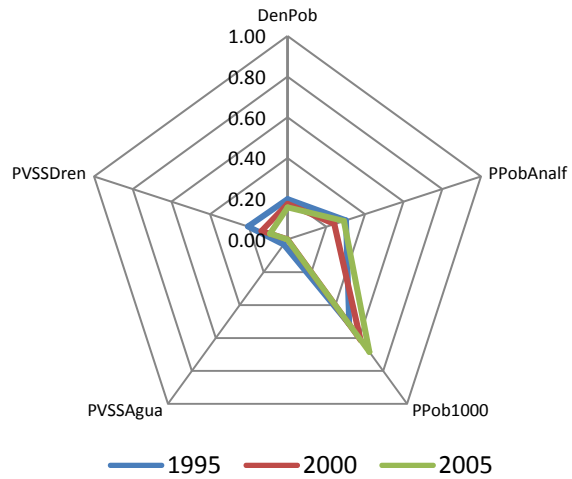
### Lerma 2



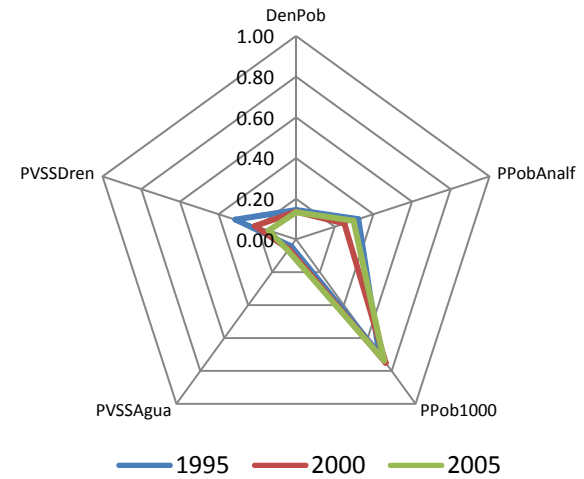
### Lerma 3



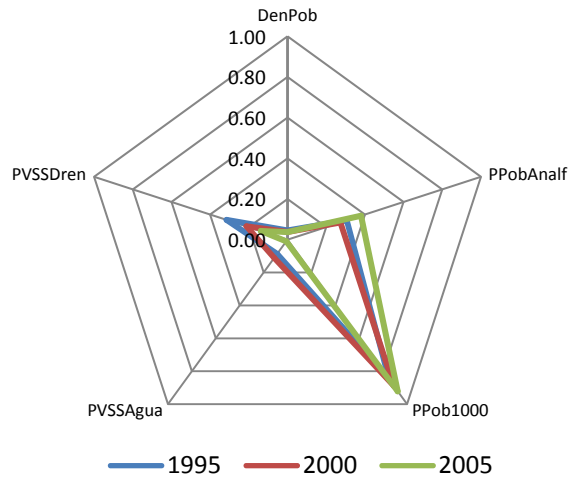
### Lerma 4



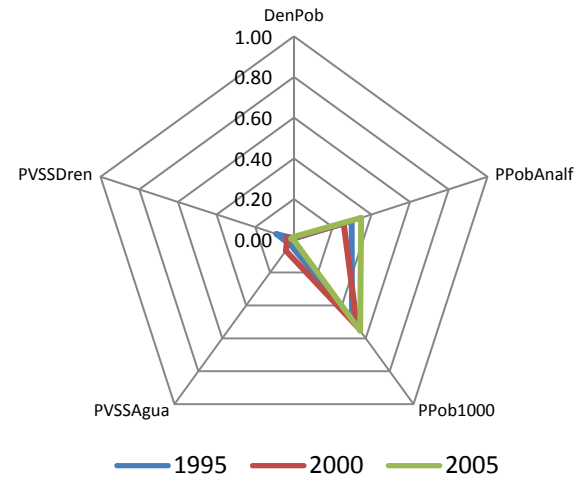
### Lerma 5



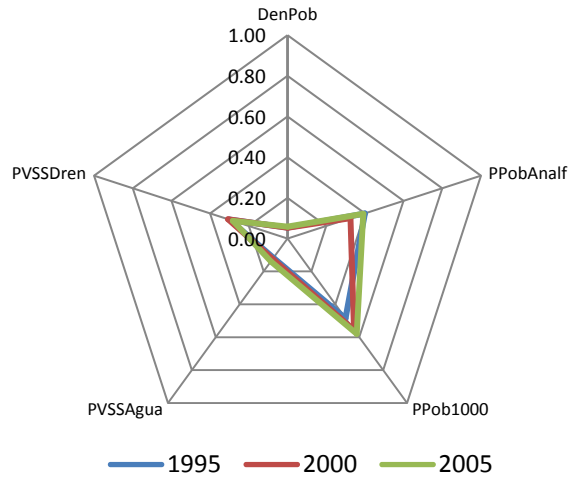
### Lerma 6



### Lerma 7



### Patzcuaro



### Querétaro

