



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

**Evaluación del cambio climático y sus
impactos sobre los cultivos de trigo, maíz y
agave de la Región Ciénega de Chapala
(Análisis retrospectivo y análisis prospectivo)**

Tesis

que para obtener el grado de

**Doctora en Ciencias en Biosistemática, Ecología y
Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas**

Presenta

Patricia Zarazúa Villaseñor

DIRECTOR

Dr. José Ariel Ruiz Corral

CODIRECTOR

Dr. Diego Raymundo González Eguiarte

Zapopan, Jalisco

7 de Abril de 2011



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

Doctorado en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas

Evaluación del cambio climático y sus impactos sobre los cultivos de trigo, maíz y agave de la Región Ciénega de Chapala (Análisis retrospectivo y análisis prospectivo)

Por
Patricia Zarazúa Villaseñor

Aprobado por:

Dr. José Ariel Ruiz Corral
Director de Tesis e integrante del Jurado

8 Marzo 2011
Fecha

Dr. Diego Raymundo González Eguiarte
Codirector de Tesis e integrante del Jurado

8 Marzo 2011
Fecha

Dr. Hugo Ernesto Flores López
Asesor de Tesis e integrante del Jurado

7/MARZO/2011
Fecha

Dr. José Ron Parra
Asesor de Tesis e integrante del Jurado

MARZO 9, 2011
Fecha

Dr. Raymundo Villavicencio García
Integrante del Jurado

2/MARZO/2011
Fecha

Dr. Agustín Gallegos Rodríguez
Lector de Tesis

2/MARZO/2011
Fecha

Dr. Diego Raymundo González Eguiarte
Coordinador de la Orientación en Ciencias Agrícolas

8 Marzo 2011
Fecha

Dedicatorias

A Dios, por permitirme lograr una gran meta en mi vida.

A Adalberto, por su amor, motivación y paciencia.

A Edith y Raquel, gracias por su cariño y paciencia, este trabajo también es de Ustedes.

A mis padres Ma. Elena y Bonifacio, por su cariño y enseñanzas, que siempre me acompañan en todas mis actividades.

A mis segundos padres Margarita y Adalberto (q.e.p.d.), por su cariño y ejemplo de vida.

A mis hermanas y hermanos, Olivia, Micaela, María Elena, Ulises, Miguel Ángel y Nancy, por su apoyo.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por otorgarme la beca que hizo posible la realización de mis estudios.

A la Universidad de Guadalajara, en especial el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, por brindarme la oportunidad de realizar este Posgrado.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias por permitirme desarrollar esta investigación dentro del Proyecto “Modelo de desarrollo agroecológico integral de los municipios de La Barca, Jamay, Ocotlán y Poncitlán en la Región Ciénega del Estado de Jalisco” en la Convocatoria Regional CONACYT 2007.

Al Dr. José Ariel Ruiz Corral, por su interés en mi formación dentro del área de Agrometeorología, y su orientación y enseñanzas en la realización de esta investigación.

Al Dr. Diego Raymundo González Eguiarte, por sus consejos y orientación en la presente investigación y durante el desarrollo de mis estudios.

Al Dr. Hugo Ernesto Flores López, responsable del proyecto en INIFAP, quien me brindó su apoyo y valiosa asesoría para desarrollar esta investigación.

Al Dr. José Ron Parra, por su apoyo y valiosa asesoría en esta investigación.

A los Doctores Agustín Gallegos Rodríguez y Raymundo Villavicencio García, por su apoyo en la finalización de mis estudios.

Al Instituto Nacional de Ecología, que en conjunto con el INIFAP, me permitieron desarrollar esta investigación dentro del Proyecto “Evaluación de la vulnerabilidad y propuesta de medidas de adaptación a nivel regional de algunos cultivos básicos y frutales ante escenarios de cambio climático” en la Convocatoria Instituto Nacional de Ecología-INIFAP 2009.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial al Dr. Víctor Magaña Rueda y su equipo de trabajo, por permitir el uso de la base de datos de anomalías para la elaboración de escenarios climáticos futuros.

A mis amigos Pablo y Marcos, por su apoyo incondicional y gran amistad.

A mis compañeras y compañeros del Posgrado BEMARENA, por sus palabras de aliento y apoyo durante este proceso.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xv
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	4
2.1. Variabilidad climática y cambio climático	4
2.1.1. Factores que influyen en la variabilidad climática	4
2.1.1.1. Factores externos	4
2.1.1.2. Factores internos	5
2.1.1.3. Dinámica interna del sistema climático	7
2.1.2. Cambios observados en la composición atmosférica	9
2.1.2.1. Funciones de la atmósfera	9
2.1.2.2. Composición de la atmósfera	10
2.1.2.3. Relaciones entre factores físicos y químicos de la atmósfera	11
2.1.2.4. Efectos de la contaminación atmosférica sobre el clima y del clima sobre la contaminación atmosférica	13
2.1.3 Cambios observados en parámetros climáticos	14
2.1.3.1. Tendencias de temperatura	14
2.1.3.2. Tendencias de precipitación	16
2.1.3.3. Tendencias observadas en México	17
2.2. Efecto de variaciones climáticas en cultivos agrícolas	18
2.2.1. Efecto del incremento de CO ₂	20
2.2.2. Efecto de variaciones de temperatura	21
2.2.3. Efecto de variaciones en la humedad	24
2.2.4 Interacción incremento de CO ₂ -factores abióticos	25
2.3. Escenarios futuros de cambio climático	26
2.3.1. Escenarios de emisiones	27
2.3.1.1. Familia de escenarios A1	27
2.3.1.2. Familia de escenarios A2	29
2.3.1.3. Familia de escenarios B1	29

2.3.1.4. Familia de escenarios B2	29
2.3.1.5. Escenario COMMIT	29
2.3.2. Modelos de circulación general	30
2.3.3. Escenarios climáticos futuros en el Mundo	31
2.3.3.1. Impactos en actividades agrícolas	32
2.3.4. Escenarios climáticos futuros en México	33
2.4. Características agroecológicas de algunos cultivos representativos de la Región Ciénega de Chapala	36
2.4.1. El trigo de invierno	36
2.4.2. El maíz de temporal	38
2.4.3. El agave tequilero como cultivo semiperenne	39
3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	41
4. MATERIALES Y MÉTODOS	42
4.1. Materiales	42
4.1.1. Área de estudio	42
4.1.1.1. Ubicación	42
4.1.1.2. Clima	42
4.1.1.3. Suelos	43
4.1.1.4. Vegetación	43
4.1.1.5. Actividad económica	44
4.1.1.6. Estaciones climatológicas	45
4.2. Métodos	46
4.2.1. Metodología utilizada en la determinación de parámetros climáticos, agroclimáticos y fenológicos analizados en esta investigación	47
4.2.2. Análisis retrospectivo de la climatología de la Región Ciénega de Chapala	53
4.2.2.1. Identificación de tendencias en los patrones de temperatura y precipitación	53
4.2.2.2. Identificación de cambio de tendencia y serie de datos representativa de la climatología regional actual	54
4.2.3. Escenarios climáticos para el período 2007-2099 en la región de estudio	55
4.2.3.1. Validación del modelo ensamble	56

4.2.3.2. Generación de los escenarios para temperatura media mensual y precipitación acumulada mensual	57
4.2.3.3. Generación de los escenarios para temperatura mínima mensual y temperatura máxima mensual	57
4.2.3.4. Evaluación del impacto de las variaciones climáticas identificadas sobre la agroclimatología regional	58
4.2.4. Estimación del impacto de los cambios climáticos y agroclimáticos sobre algunas especies agrícolas	58
4.2.4.1 Trigo de invierno	59
4.2.4.2. Maíz de temporal	59
4.2.4.3. Agave tequilero	60
4.2.5. Medidas de adaptación para el desarrollo agrícola regional	61
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
5.1. Análisis retrospectivo de la climatología en la Región Ciénega de Chapala	62
5.1.1. Estimación del punto de quiebre o cambio de tendencia	65
5.1.2. Determinación de la climatología actual de la Región Ciénega de Chapala	70
5.1.3. Determinación de la agroclimatología actual de la Región Ciénega de Chapala	73
5.2. Análisis prospectivo de la climatología en la Región Ciénega de Chapala	75
5.2.1. Estimación de temperatura media mensual y precipitación acumulada mensual para la serie 2007-2099	75
5.2.1.1. Validación del modelo de ensamble para la Región Ciénega de Chapala	75
5.2.1.2. Escenarios futuros para temperatura media mensual y precipitación acumulada mensual	76
5.2.2. Estimación de las temperaturas mínima y máxima mensuales para la serie 2007-2099	82
5.2.2.1. Modelos de regresión	82
5.2.2.2. Escenarios futuros para temperatura mínima y temperatura máxima	84
5.2.2.3. Escenarios futuros para los tipos climáticos Köppen-García	94

5.3. Impacto de los cambios climáticos sobre el agroclima de la Región	95
5.3.1. Impactos en el agroclima	96
5.3.1.1 Evapotranspiración	96
5.3.1.2 Cociente P/ETP	100
5.3.1.3. Estación de crecimiento	103
5.3.1.4 Temperaturas diurnas y nocturnas	105
5.3.1.5. Unidades calor acumuladas	106
5.3.1.6. Horas frío	107
5.3.2. Impactos en especies agrícolas	107
5.3.2.1 Trigo de invierno	108
5.3.2.2. Maíz de temporal	112
5.3.2.3 Agave tequilero	121
5.4. Consideraciones en la adaptación al cambio climático de la Región	125
Ciénega de Chapala	
5.4.1. Selección de cultivos	126
5.4.2. Selección de variedades	127
5.4.3. Fecha de siembra	128
5.4.4. Manejo del suelo	128
5.4.5 Impacto de plagas y malezas	130
6. CONCLUSIONES	132
7. BIBLIOGRAFÍA	134
8. ANEXOS	147

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición química del aire seco troposférico (0 ~ 15 km por arriba de la superficie terrestre), año de referencia 1989.	10
Cuadro 2. Estimaciones de población y concentración de los principales gases de efecto invernadero para las 4 familias de escenarios.	28
Cuadro 3. Anomalías de temperatura mundiales proyectadas para fines del Siglo XXI.	32
Cuadro 4. Modelos de Circulación General utilizados para generar el Ensamble de escenarios climáticos en México.	34
Cuadro 5. Tipos de vegetación en la Región Ciénega de Chapala.	43
Cuadro 6. Superficie dedicada a la actividad agrícola en los municipios de la Región Ciénega de Chapala.	44
Cuadro 7. Información de las 10 estaciones climatológicas analizadas de la Región Ciénega de Chapala.	45
Cuadro 8. Valores de los coeficientes K_{pan} para cada estación climatológica.	50
Cuadro 9. Categorías establecidas para el Cociente C/ETP por UNEP.	52
Cuadro 10. Localización de los puntos de la cuadrícula y las estaciones climatológicas, utilizados en el proceso de validación del modelo generado por la UNAM.	56
Cuadro 11. Intervalos térmicos diurnos y nocturnos para definir las condiciones óptimas, subóptimas y marginales para el cultivo de <i>Agave tequilana</i> en Jalisco.	60
Cuadro 12. Resultados de la prueba SNHT para los tres parámetros climáticos en las 10 estaciones meteorológicas y a nivel de Región Ciénega de Chapala.	66
Cuadro 13. Año de cambio de tendencia para temperatura máxima promedio anual (T_x), temperatura mínima promedio anual (T_i) y precipitación acumulada promedio anual (P_p), por localidad y regional.	67
Cuadro 14. Resultados de la Prueba de T para comparación de las series de 30 años 1961-1990 y 1977-2006, de la Región Ciénega de Chapala.	70
Cuadro 15. Valores normales para las dos series climáticas comparadas y sus diferencias.	71
Cuadro 16. Algunos parámetros climáticos actuales para la Región Ciénega de	72

Chapala (1977-2006).	
Cuadro 17. Agroclimatología actual (1977-2006) para la Región Ciénega de Chapala.	74
Cuadro 18. Valores mensuales de temperatura media para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.	77
Cuadro 19. Valores mensuales de precipitación acumulada para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.	78
Cuadro 20. Coeficientes de los modelos de regresión para estimar temperatura mínima mensual y temperatura máxima mensual, y sus valores <i>p</i> .	83
Cuadro 21. Análisis de varianza de los modelos de regresión para la temperatura mínima y temperatura máxima mensuales.	84
Cuadro 22. Valores mensuales estimados de temperatura mínima para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.	85
Cuadro 23. Valores mensuales estimados de temperatura máxima para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.	86
Cuadro 24. Valores mensuales estimados de la oscilación térmica para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.	86
Cuadro 25. Impactos del cambio climático sobre el agroclima.	95
Cuadro 26. Tendencia en los valores de la estación de crecimiento en la Región Ciénega de Chapala para algunos años seleccionados en el análisis prospectivo.	103
Cuadro 27. Valores estimados de las Unidades Calor Acumuladas para los ciclos PV y OI en la Región Ciénega de Chapala, para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.	106
Cuadro 28. Tendencias observadas para dos variables agroclimáticas y dos variables fenológicas del trigo de invierno en los meses de enero a junio, para algunos períodos del análisis retrospectivo.	109
Cuadro 29. Coeficientes de correlación para los parámetros agroclimáticos del trigo observados en el período 1961-2006.	109
Cuadro 30. Modelos Gompertz ajustados para estimar dos variables agroclimáticas del trigo.	110
Cuadro 31. Tendencias observadas de los valores de la estación de crecimiento en algunos períodos del análisis retrospectivo.	112

Cuadro 32. Duración de las etapas fenológicas siembra-floración y floración- madurez fisiológica, y ciclo de cultivo del maíz durante el ciclo PV en algunos períodos del análisis retrospectivo.	113
Cuadro 33. Valores observados de temperatura nocturna y temperatura diurna en el ciclo PV de algunos períodos del análisis retrospectivo.	113
Cuadro 34. Tendencias esperadas para tres variables fenológicas del cultivo de maíz para algunos años seleccionados en el análisis prospectivo.	114
Cuadro 35. Tendencia de los requerimientos hídricos del cultivo de maíz por mes (ETc) y su relación con la evapotranspiración de referencia (ETo) para algunos años seleccionados en el análisis prospectivo.	116
Cuadro 36. Modelos Gompertz utilizados para estimar el número de días con temperatura máxima mayor a 35°C y número de días con temperatura mínima menor a 10°C en la zona de estudio.	120
Cuadro 37. Tendencia de los días con temperatura mínima menor a 10°C y días con temperatura máxima mayor a 35°C en el ciclo PV para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.	120
Cuadro 38. Tendencias de las condiciones de desarrollo del agave de acuerdo con las temperaturas nocturnas (Tn) y diurnas (Td) en la región de estudio en algunos años seleccionados del análisis prospectivo.	121
Cuadro 39. Estimación de la duración de las etapas siembra-floración y floración-madurez fisiológica del trigo bajo diferentes fechas de siembra. Análisis prospectivo.	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Concentraciones importantes de gases efecto invernadero de larga vida en los últimos 2000 años.	6
Figura 2. La complejidad de la respuesta vegetal al estrés abiótico.	20
Figura 3. Ubicación geográfica municipal de la Región Ciénega de Chapala.	42
Figura 4. Distribución de las 10 estaciones climáticas de la Comisión Nacional del Agua en la Región Ciénega de Chapala.	46
Figura 5. Diagrama que muestra cómo se abordó metodológicamente la investigación.	46
Figura 6. Tendencia de la temperatura mínima promedio anual durante el período 1961-2006 en las 10 estaciones de la Región Ciénega de Chapala.	63
Figura 7. Tendencia de la temperatura máxima promedio anual durante el período 1961-2006 en las 10 estaciones de la Región Ciénega de Chapala.	64
Figura 8. Tendencia de la precipitación acumulada promedio anual para el período 1961-2006 en las 10 estaciones de la Región Ciénega de Chapala.	65
Figura 9. Líneas de tendencia observadas para la temperatura mínima normal anual en °C, de acuerdo al punto de quiebre detectado en la Región Ciénega de Chapala en un período de 46 años (1961-2006).	69
Figura 10. Líneas de tendencia observadas para la temperatura máxima normal anual en °C, de acuerdo con punto de quiebre detectado en la Región Ciénega de Chapala en un período de 46 años (1961-2006).	69
Figura 11. Valores observados vs valores esperados de temperatura media mensual para el período 2000-2006 en la Región Ciénega de Chapala.	76
Figura 12. Valores observados vs valores esperados de precipitación acumulada mensual para el período 2000-2006 en la Región Ciénega de Chapala.	76
Figura 13. Temperatura media anual para dos períodos: valores observados en 1977-2006 y valores esperados en 2007-2099 en la Región Ciénega de Chapala.	79
Figura 14. Precipitación acumulada anual para dos períodos: valores	80

observados en 1977-2006 y valores esperados en 2007-2099 en la Región Ciénega de Chapala.

- Figura 15. Tasas de cambio en porcentaje, de la temperatura media anual y la precipitación acumulada anual, para algunas décadas de la Región Ciénega de Chapala, valores negativos indican porcentaje de decremento. 81
- Figura 16. Autocorrelación de los residuales para los parámetros transformados de temperatura mínima y temperatura máxima con desfase de 12. 82
- Figura 17. Tendencias de la temperatura máxima (Tx), temperatura mínima (Ti) y oscilación térmica (OT) anuales para dos períodos: valores observados en 1977-2006 y valores estimados 2007-2099 en la Región Ciénega de Chapala. 84
- Figura 18. Tendencia de la temperatura mínima anual en la Región Ciénega de Chapala. 88
- Figura 19. Tendencia de la temperatura máxima anual en la Región Ciénega de Chapala. 89
- Figura 20. Tendencia de la temperatura media anual en la Región Ciénega de Chapala. 90
- Figura 21. Tendencia de la oscilación térmica anual en °C en la Región Ciénega de Chapala. 91
- Figura 22. Tendencia de la precipitación acumulada anual en la Región Ciénega de Chapala. 93
- Figura 23. Evolución de tipos climáticos con clasificación Köppen-García para cuatro períodos tridecadales. 94
- Figura 24. Tendencias de la ETP anual en mm para algunos años seleccionados del análisis prospectivo. 97
- Figura 25. Distribución temporal y espacial de la evapotranspiración potencial anual en mm en la Región Ciénega de Chapala. 99
- Figura 26. Tendencia futura del número de meses húmedos al año en la zona de estudio. 100
- Figura 27. Tendencia del cociente P/ETP en algunos años seleccionados del análisis prospectivo. 101

Figura 28. Distribución temporal y espacial del Cociente P/ETP en la Región Ciénega de Chapala.	102
Figura 29. Evolución de la estación de crecimiento durante el siglo XXI.	104
Figura 30. Temperaturas diurna y nocturna anuales estimadas para el período 2007-2099 en la Región Ciénega de Chapala.	105
Figura 31. Tendencias estimadas del número de horas frío acumuladas durante el ciclo OI en la zona de estudio para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.	107
Figura 32. Tendencia del número de días con temperatura máxima mayor a 25°C y número de días con temperatura mínima menor a 5°C durante el período enero a junio, para dos series de tiempo, análisis retrospectivo (1961-2006) y análisis prospectivo (2007-2099).	111
Figura 33. Tendencia futura del número de días S-F y número de días F-M en algunos años seleccionados del análisis prospectivo.	111
Figura 34. Tendencia de la duración en días de cada etapa fenológica del cultivo de maíz para diferentes años seleccionados en el análisis prospectivo.	115
Figura 35. Tendencia de la evapotranspiración real, precipitación y evapotranspiración del cultivo para algunos años seleccionados en la Región Ciénega de Chapala en el análisis prospectivo.	117
Figura 36. Tendencias de excesos y déficits hídricos en el balance hídrico en algunos años seleccionados del análisis prospectivo para la estación de crecimiento de maíz. La línea de puntos indica el inicio de los déficits en días julianos.	118
Figura 37. Tendencias de la temperatura diurna y temperatura nocturna para dos series de tiempo, 1961-2006 y 2007-2099 durante el ciclo PV en la Región Ciénega de Chapala.	119
Figura 38. Tendencia de la temperatura diurna media anual y su distribución en la Región Ciénega de Chapala para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.	123
Figura 39. Tendencia de la temperatura nocturna media anual y su distribución en la Región Ciénega de Chapala para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.	124

Figura 40. Impacto de la temperatura nocturna anual sobre la asimilación neta de CO₂ en el cultivo de agave, para algunos años seleccionados del análisis prospectivo. 125

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Extracto del Protocolo de Kyoto, referente a los artículos que establecen el compromiso adquirido por los países miembros.	147
Anexo 2. Gráficas de caja mensuales para los parámetros climáticos Temperatura máxima, Temperatura mínima, Temperatura media y Precipitación acumulada, en las 10 estaciones estudiadas, en el período 1961-2006.	152
Anexo 3. Localización en carta topográfica de cada una de las estaciones climatológicas utilizadas en este estudio y su distancia más corta a la Ribera del Lago de Chapala calculada mediante el Método trigonométrico de Haversine.	168
Anexo 4. Climatología actual para las estaciones climáticas de la Región Ciénega de Chapala.	173
Anexo 5. Glosario de términos utilizados en el documento.	183

RESUMEN

Uno de los retos a los que se enfrenta el país en la actualidad es a los efectos del cambio climático, los cuales se verán reflejados en un sinnúmero de actividades. En el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012, se contempla la necesidad de evaluar los impactos del cambio climático en las actividades agrícolas a nivel regional, con el fin de determinar las mejores medidas de mitigación y adaptación. De acuerdo a esto se plantearon como objetivos del presente trabajo la evaluación del clima y del agroclima, tanto de manera retrospectiva como prospectiva, así como la estimación de sus impactos en tres especies agrícolas en la Región Ciénega de Chapala. Se hizo uso de información climatológica de 10 estaciones de la Comisión Nacional del Agua con registros del período 1961-2006. Se realizó una comparación de medias entre los períodos 1961-2006 y 1977-2006 considerando los parámetros temperatura máxima media anual, temperatura mínima media anual, temperatura media anual y precipitación acumulada media anual, con el fin de determinar el período de datos representativo de la climatología actual en la región de estudio. Para la estimación de los escenarios climáticos futuros se validó y utilizó la base de datos de anomalías de temperatura media mensual y precipitación acumulada mensual elaborada por la UNAM a partir del uso de un modelo de circulación general ensamble. En este estudio se seleccionó el escenario de emisión de gases de efecto invernadero A2 para extraer los valores de anomalías climáticas. Con esta información y siguiendo varios métodos para la determinación de parámetros agroclimáticos, se estimaron los posibles impactos en tres especies agrícolas de importancia en la región, el maíz como cultivo representativo del ciclo Primavera-Verano; el trigo como cultivo del ciclo Otoño-Invierno; y el agave tequilero como cultivo representativo del ciclo anual. El análisis retrospectivo muestra que se ha presentado una tendencia al incremento en los parámetros de temperatura máxima y mínima, mostrando variaciones a escala espacial. Se detectó que en el año 1982 se tiene un punto de ruptura de la tendencia para la temperatura mínima anual, y 1992 lo fue para la temperatura máxima anual, con lo que se consideró un cambio significativo en la tendencia de estos parámetros. La comparación de medias entre las series 1961-1990 y 1977-2006 muestra alta significancia para los parámetros de temperatura máxima normal anual, temperatura media normal anual y oscilación térmica normal anual por lo que se decidió considerar como climatología actual los parámetros climáticos de la serie 1977-2006. Para el análisis prospectivo se validó el

modelo ensamble para el período 2000-2006 resultando con una r^2 de 0.94 para la temperatura media mensual y de 0.85 para precipitación acumulada mensual. Los escenarios futuros muestran un incremento de casi 4°C para la temperatura media anual y una disminución del 10% de precipitación acumulada anual para fines del siglo XXI. Las temperaturas máxima y mínima mensuales, sufrirán también incrementos, siendo más marcado el correspondiente a la temperatura máxima. Como impactos en la agroclimatología se esperan un efecto más fuerte en los parámetros relacionados con la temperatura, como son incremento en la evapotranspiración de hasta 350 mm al año; disminución del cociente P/ETP que lleva a la región de ser una zona subhúmeda seca a semiárida; reducción de la estación de crecimiento en la temporada húmeda del año que en la actualidad es de 155 días y a fines del siglo XXI sería de 137 días; incremento de las temperaturas diurnas y nocturnas que llegarían a ser de 27.6°C y 18.7°C respectivamente; incremento en la acumulación de unidades calor_{Base10} de 666 para el ciclo Primavera-Verano y de 593 unidades calor_{Base5} para el ciclo Otoño-Invierno; y una disminución hasta la desaparición del número de horas frío. El impacto en la rápida acumulación de unidades calor en los cultivos de trigo y maíz, provocará un acortamiento en la duración del ciclo; sin embargo, no se prevén deficiencias significativas de humedad para cultivos de temporal. En el cultivo de agave, el incremento de temperaturas diurnas y nocturnas tendrá efectos negativos en la tasa de asimilación de CO₂ y por tanto en su rendimiento. Estos cambios tendrán como consecuencia la necesidad de investigar sobre las mejores prácticas de adaptación de los cultivos regionales, dentro de las cuales pueden estar la selección de especies mejor adaptadas a las futuras condiciones, el cambio en las fechas y variedades de siembra, la mejora de las condiciones del suelo para un incremento en la capacidad de almacenamiento de humedad y prácticas de mejoramiento del microclima y clima local del área de producción.

ABSTRACT

A challenge that our country faces today is the impact of climate change, which will be reflected in a lot of activities. The National Development Plan 2007-2012 considers the necessity of evaluating the climate change impacts on agricultural activities at a regional scale in order to determine the best mitigation and adaptation measures. Therefore, the objectives of this study were to evaluate the climate and agro-climate under retrospective and prospective views, and to estimate their impacts on three crops in the Ciénega de Chapala Region. We used databases of ten weather stations from Comisión Nacional del Agua for the period 1961-2006. In order to determine the representative data period of the present climatology in the Region, a means-comparison analysis was made between the periods 1961-1990 and 1977-2006 considering the parameters annual mean maximum temperature, annual mean minimum temperature, annual mean temperature and annual cumulative mean precipitation. The data base of monthly mean temperature and precipitation anomalies from UNAM was validated and used to estimate the future climatic scenarios, which is derived from an ensemble GCM model. We chose the A2 greenhouse gases emission scenario to extract the climatic anomalies values. With these data and using different methods to determine agro-climatic parameters, the possible climatic change impacts were estimated in regard to three agricultural specie; corn as a representative crop of spring-summer season, wheat corresponding to the fall-winter cycle, and agave representative of a semi-perennial cycle. Retrospective analysis shows the presence of a rise tendency in the maximum and minimum temperatures, with variations in spatial scale. It was detected a breakpoint for the minimum temperature tendency in 1982 and for the maximum temperature tendency in 1992, which was considered as a significant change in the parameters tendency. Means comparison test between 1961-1990 y 1977-2006 data series showed that they are significantly different respect to annual mean maximum temperature, annual mean temperature and annual thermal oscillation; thus the present regional climatology was characterized by using the period 1977-2006 climatic parameters. Validation of the ensemble GCM model reported a r^2 value of 0.94 for monthly mean temperature and a r^2 value of 0.85 for monthly mean precipitation. The future scenarios show an increment of near 4°C in annual mean temperature and a drop of 10% in annual mean precipitation by the end of the present century. The monthly maximum and minimum temperatures also will rise, but being more notorious the changes corresponding to maximum

temperature. The most relevant agro-climatic impacts determined by the end of the Century XXI were those related to temperature such as an increase in evapotranspiration of about 350 annually; a diminished P/ETP rate, which will transformed the moisture regional conditions from dry-subhumid to a semiarid environment. The growing season will be narrowed from 155 (present) to 137 days; day and night temperatures will increase reaching regional mean values of 27.6°C and 18.7°C, respectively. Growing degree days (GDD, Base 10°C) accumulated during the spring-summer cycle will increase in 666 units; while GDD (Base 5°C) accumulated during the fall-winter cycle will increase 593 units. Chilly hours will decrease gradually during the 21st Century until disappear. The major and faster accumulation of GDD will cause that corn and wheat crop cycle be shortened, however not significant moisture deficiencies were detected for corn crop during the rainy season cultivation cycle. For the agave crop, the increment of day/night temperatures will influence negatively in CO₂ assimilation rates and hence its yield. These changes evidence the necessity of developing research about the best adaptation practices for the regional crops. Some of them could be related to species with better adaptation to the new climatic conditions, changes in plantation dates, the use of new and improved varieties, the improvement of soil properties to increase the soil water holding capacity, and practices aimed to modify the microclimate and local climate of production areas.

1. INTRODUCCIÓN

El clima es uno de los aspectos ambientales con mayor variabilidad observada, debido a la interacción de los diversos factores modificadores del clima, tales como latitud, altitud, relieve, exposición del terreno, vegetación, corrientes marinas, cuerpos de agua y vientos. Esto trae como consecuencia una gran diversidad de tipos climáticos en todo el planeta.

En la actualidad es aceptado por la comunidad mundial que el planeta Tierra está experimentando un fenómeno de calentamiento atmosférico global. El incremento de las temperaturas ha sido consecuencia del aumento en la concentración atmosférica de los llamados “gases de efecto invernadero”, entre los que destacan CO₂, metano, halocarbonos, hexafluoruro de azufre y óxido nitroso. La mayoría de ellos incrementó sus concentraciones a partir de la Revolución Industrial aproximadamente entre mediados del siglo XVIII y principios del siglo XIX, lo que desató un auge sobre la utilización de combustibles fósiles y el uso de sustancias químicas en la fabricación de ciertos equipos de refrigeración. La liberación de estos gases permitió su acumulación en las capas atmosféricas medias y altas, favoreciendo la acumulación de ozono y con ello la captación de radiación solar, modificando la cantidad de radiación solar emitida hacia el exterior del planeta y con ello el incremento de la temperatura. A fines del siglo pasado y principios de este siglo, se detectaron los años más calurosos de los últimos 140 años. Los cinco años más calurosos han sido 1998, 2002, 2003, 2004 y 2005 de acuerdo con el cuarto reporte sobre cambio climático global del IPCC (2007), la temperatura superficial promedio se ha incrementado $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ durante los últimos cien años, y la lluvia se ha incrementado entre 0.2 a 0.3% en las zonas tropicales.

A pesar de que en el año de 1983 se creó la Comisión sobre Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, el compromiso sobre la protección del medio ambiente no ha sido adoptado por la mayor parte de los países, entre ellos varios industrializados, lo que lleva a suponer que el incremento en las temperaturas del aire continuará, provocando con ello cambios sustanciales en las condiciones climáticas de la superficie terrestre.

De acuerdo con varios investigadores, los cambios detectados pueden variar de región a región, por lo que los impactos de los mismos también variarán en la misma escala

espacial. Algunas regiones agrícolas se verán amenazadas por el cambio climático, mientras que otras podrían verse beneficiadas.

En México como en la mayoría de los países del mundo, existe preocupación por el cambio climático y sus posibles impactos sobre el sector productivo primario. En el documento “México. Cuarta comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático” (INE, 2009), se establece que en el país, para el período 2010-2030 la temperatura media anual puede variar de $0.5\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ a $1.3\pm 0.8^{\circ}\text{C}$, del 2040 al 2060 de $1.3\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ a $2.3\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ y del 2070 al 2090 de $2.5\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ a $3.5\pm 1.3^{\circ}\text{C}$, y que la precipitación anual podría disminuir 11%.

En el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 (PND) elaborado en el mandato del Presidente Felipe Calderón Hinojosa, (Calderón, 2007), se establece en las estrategias 11.2 y 11.3 la necesidad de desarrollar escenarios climáticos a nivel regional así como evaluar sus impactos en sistemas ecológicos, definiendo vulnerabilidad y medidas de adaptación adecuadas. En el Tercer Informe de Ejecución del PND 2007-2012, se informa sobre los inicios del estudio de “Evaluación de la vulnerabilidad y propuestas de adaptación a nivel regional de algunos cultivos básicos y frutales ante escenarios de cambio climático”, lo que ha obligado a instituciones responsables de investigación científica a desarrollar proyectos regionales con la finalidad de cubrir los objetivos planteados al respecto en el PND 2007-2012.

La mayoría de las iniciativas en el país para hacer frente al cambio climático global, están relacionadas con el desarrollo de estrategias enfocadas a la selección de medidas de adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático (INE, 2009). Sin embargo, aún queda mucho por investigar con relación al carácter regional y estacional del cambio climático en México, sobre todo para cuantificar los tipos y niveles de modificación climática que han estado experimentando las diferentes regiones agropecuarias del país, con sus consecuentes requerimientos de ajuste de patrones de cultivo y sistemas de producción.

Jalisco es uno de los estados del país de mayor producción agrícola, tanto para consumo interno como para exportación. La diversidad de climas presentes en Jalisco permite una gran diversidad de especies agrícolas, desarrolladas tanto en ciclo primavera-verano como

en otoño-invierno, y varias especies agrícolas durante todo el año. Esta gran variabilidad en la producción agrícola requiere por tanto, de una correcta planeación del desarrollo agropecuario, de tal forma que permita a los productores y a los tomadores de decisiones, realizar los programas de apoyo a la actividad productiva en aras de un buen desarrollo de la comunidad.

En aras de lograr una adecuada planeación del desarrollo agrícola en una región, es determinante el considerar los escenarios climáticos presentes y futuros, que permitan contar con suficiente información para la elección de cultivares, por lo que deberá generarse información lo más detallada posible, fundamentada en las condiciones climáticas pasadas y detectando su tendencia y con ello los impactos que se esperarían.

2. ANTECEDENTES

2.1. Variabilidad climática y cambio climático

El sistema climático es definido como “un sistema complejo e interactivo compuesto por la atmósfera, superficie terrestre, hielo y nieve, océanos, otros cuerpos de agua y elementos vivos” (IPCC, 2007). El clima se caracteriza en términos de valores medios y de variaciones de temperatura, precipitación y viento, que puede abarcar desde meses hasta millones de años, siendo el período de promedio habitual de 30 años (WMO, 1983).

De acuerdo con el cuarto reporte sobre cambio climático global (IPCC, 2007), el término *variabilidad climática natural*, se refiere a las variaciones del estado medio, desviaciones típicas y sucesos extremos del clima en todas las escalas espaciales y temporales, más amplias que las de los fenómenos meteorológicos. La variabilidad puede ocurrir por procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o debido a variaciones del forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad externa).

Por su parte Mavi y Tupper (2004) establecen que la variabilidad climática natural, es una característica del clima global y ocurre en escalas de tiempo, tanto largas como cortas. Mencionan que varios climatólogos consideran que estas fluctuaciones climáticas de corto y largo plazo no son fenómenos aleatorios, sino eventos organizados los cuáles son controlados por fuerzas o fuentes de energía asociados con la Tierra misma o con cuerpos planetarios del sistema solar. Aunadas a estas variaciones naturales, se encuentran los cambios inducidos por las actividades humanas. En años recientes, se ha considerado que la liberación de gases efecto invernadero a la atmósfera es la causa de patrones de cambio climático.

2.1.1. Factores que influyen en la variabilidad climática

2.1.1.1. Factores externos.

a. Periodicidades astronómicas. Varios investigadores de la variabilidad y el cambio climático, consideran que las periodicidades astronómicas influyen en la atmósfera de manera directa e indirecta. La periodicidad más importante está asociada con la fuerza de las mareas solares y lunares, y de otros planetas (Munk *et al.*, 2002). Se ha visto que la

capa de los 500 mb de presión, cambia considerablemente en el hemisferio norte durante las primeras 24 horas después de una ráfaga solar. Los cambios muestran un alza en la altura de esa capa en la región del polo geomagnético y un descenso en su altura en una región muy amplia que coincide con la zona auroral. Otros resultados han mostrado que el flujo de aire estratosférico hasta el nivel de los 3 km se incrementa en el segundo o tercer día después de una ráfaga solar con emisión de rayos X (Otaola *et al.*, 1993).

b. Ciclos de las manchas solares. La principal causa externa conocida de la variabilidad climática interanual y del cambio climático, son los cambios en la luminosidad solar. La variación en la luminosidad solar coincide con la alteración solar más conocida de 11.08 años, llamada ciclo de manchas solares, encontrándose que la disminución de tal alteración coincide con la pequeña era de hielo ocurrida de 1430 a 1850 en Europa. Garduño (1994), indica que evidentemente, un aumento (o disminución) de la luminosidad del sol debe calentar (o enfriar) el clima y esto se registrará más claramente cuanto más fuerte o duradero sea aquél (o aquélla). La correlación entre el número de manchas solares y la precipitación pluvial anual puede ser positiva, negativa, o inexistente, dependiendo del lugar donde se han efectuado las mediciones meteorológicas. Así, por ejemplo, en las latitudes ecuatoriales se han encontrado correlaciones positivas según las cuales, en promedio, cae más lluvia durante los años del máximo solar que durante los del mínimo. Por otro lado, en las estaciones de latitud media (20° a 40°) parece haber menos precipitación alrededor de los años del máximo que en los cercanos al mínimo. W. Köppen, en 1914, usando series largas de datos de temperatura recolectadas de todas las fuentes disponibles en el mundo, mostró que, durante los años 1804-1910, la temperatura media global anual fue más baja durante el máximo que durante el mínimo de manchas solares (Otaola *et al.*, 1993). Otro efecto encontrado es con la presencia del fenómeno de El Niño, ya que al estudiar la serie de Niños con respecto al número de manchas solares, se ha observado una relación no con el número de las manchas, sino con sus cambios, es decir, con los gradientes en el número de manchas, además, se observa que los eventos tienden a ocurrir cerca del mínimo de actividad solar (Otaola *et al.*, 1993).

2.1.1.2. Factores internos

a. Gases efecto invernadero. La razón por la cual la superficie de la tierra resulta tan caliente se debe a los gases efecto invernadero, que actúan como un manto parcial para las radiaciones emitidas de onda larga que provienen de la superficie. Este manto se conoce

como efecto invernadero natural (IPCC, 2007). El principal gas efecto invernadero es el vapor de agua seguido por dióxido de carbono (CO_2), ozono (O_3), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) (Mavi y Tupper, 2004). La atmósfera absorbe más de la radiación terrestre reflejada cuando las concentraciones de gases efecto invernadero se incrementan, lo cual ha ocurrido en la atmósfera terrestre por billones de años debido a la presencia natural de estos gases. De acuerdo al IPCC (IPCC, 2007) las actividades humanas están cambiando la concentración y distribución de los gases efecto invernadero y aerosoles en la atmósfera. La cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera se incrementó en un 35% aproximadamente en la era industrial y se sabe que este incremento se debe a la actividad humana, básicamente a la quema de combustibles fósiles y eliminación de bosques (IPCC, 2007). Ver Figura 1.

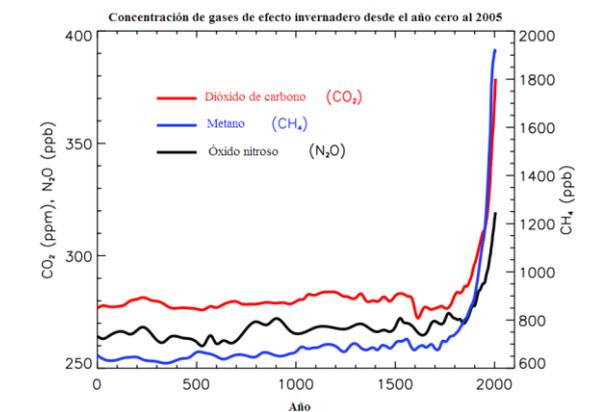


Figura 1. Concentraciones importantes de gases efecto invernadero de larga vida en los últimos 2000 años. Los incrementos experimentados desde aproximadamente el año 1750 se atribuyen a las actividad humana de la Era Industrial. Las unidades de concentración se miden en partes por millón (ppm), o partes por miles de millones (ppb), indicando la cantidad de moléculas de gases de efecto invernadero por millones o miles de millones de moléculas de aire, respectivamente, en una muestra de la atmósfera. (Modificado de la Figura FAQ2.1 Figura 1 del Capítulo 2 del Cuarto Reporte Mundial sobre Cambio Climático, IPCC 2007).

b. Aerosoles. Son partículas presentes en la atmósfera con una amplia variación en tamaño, composición y concentración química. Algunos aerosoles son emitidos directamente dentro de la atmósfera mientras que otros se forman de compuestos emitidos (IPCC, 2007). La actividad volcánica puede emitir grandes cantidades de gases que contienen azufre (principalmente dióxido de azufre) hacia la estratósfera. Una vez que alcanzan la estratósfera, algunos gases rápidamente se oxidan a ácido sulfúrico y se condensan con vapor de agua para formar una nube de aerosol. Los aerosoles volcánicos incrementan el

albedo del planeta y el efecto radiativo dominante es un incremento en la dispersión de la radiación solar, lo cual reduce la radiación neta disponible a la tropósfera, lo que lleva a un enfriamiento (Mavi y Tupper, 2004). Actividades humanas tales como explotación minera y procesos industriales han incrementado el polvo en la atmósfera. Las partículas de aerosoles influyen directamente en los forzamientos radiativos y en la absorción de la radiación solar e infrarroja de la atmósfera (IPCC, 2007).

c. Criósfera. Cambios en la cubierta de hielo y nieve en la superficie terrestre, así como en nubes, operan en escalas largas de tiempo, excepto para la cubierta de nieve estacional. La Organización Mundial de Meteorología, mediante el monitoreo de la cubierta de nieve iniciado en 1972, muestra que la extensión de nieve del hemisferio norte ha sido menor desde 1987, particularmente en primavera. Esto podría traer una disminución del albedo superficial con el consecuente incremento de temperatura en el período de invierno para las áreas de latitudes altas en el hemisferio norte (IPCC, 2007).

d. Cambios en el uso del suelo. Los cambios de la superficie del suelo principalmente la deforestación a gran escala, afecta el albedo regional y el movimiento aerodinámico. Esto perturba la transferencia de energía, agua y otros materiales dentro del sistema climático. Estos efectos son comúnmente más regionales en sus impactos en el clima, que en las capas atmosféricas (Mavi y Tupper, 2004). El impacto del cambio de uso del suelo se ha hecho evidente en zonas tropicales en las que la vegetación tropical ha sido cambiada a cultivos agrícolas, con lo que la absorción de CO₂ atmosférico ha disminuido (Lawton *et al.*, 2001). Así mismo en zonas con cubierta de nieve que han sido utilizadas para plantaciones forestales, se ha detectado cambio en el albedo y por lo tanto un forzamiento radiativo positivo (Pielke *et al.*, 2002).

2.1.1.3. Dinámica interna del sistema climático.

La circulación atmosférica del planeta, tiene un número determinado de patrones de variabilidad, los cuales se expresan en el clima superficial. Las fuentes más importantes de esta variabilidad de corto plazo son El Niño/Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO por sus siglas en inglés) y los cambios en la temperatura de los océanos. Estos patrones de conexión, tienden a ser más marcados durante el invierno, especialmente en el hemisferio norte, cuando la circulación media es más fuerte. La fuerza de estas conexiones y la forma en que influyen en el clima superficial

también varían en escalas de tiempo. Tanto la NAO como ENSO, muestran cambios importantes en sus expresiones sobre el clima superficial en escalas de tiempo multi-decadal durante el siglo XX (IPCC, 2007).

a. El Niño/Oscilación del Sur (ENSO). La mayoría de la variabilidad interna del clima en el trópico y gran parte de las latitudes medias, está relacionada a ENSO. Este es un fenómeno natural y las condiciones oceánicas y atmosféricas en el pacífico tropical, varían considerablemente. Históricamente, los eventos ENSO ocurren aproximadamente cada 3 a 7 años fluctuando de manera irregular entre la fase El Niño y su opuesta, la fase La Niña (Mavi y Tupper, 2004).

Durante años de El Niño o ENSO, los vientos alisios en el pacífico se debilitan por lo que las aguas más calientes del pacífico tropical, generalmente confinadas a la región del pacífico oeste, se esparcen a lo largo del ecuador y por tanto, las temperaturas de la superficie del mar en el pacífico central y del este son más elevadas en uno o dos grados centígrados. Con la aparición de una zona de agua caliente en el pacífico central y del este, la región de mayor actividad convectiva, es decir la zona de mayor formación de nubes cumulonimbus profundas y precipitaciones más intensas, se desplaza hacia esta parte de los trópicos.

Tal corrimiento en la zona más lluviosa no se debe a mayor evaporación *in situ*, sino a que la convergencia de humedad se da ahora en esta región. Con tales cambios, donde antes llovía poco (por ejemplo, en las islas del pacífico o frente a las costas de Perú y Ecuador) ahora se producirán lluvias intensas e incluso inundaciones, mientras que donde antes llovía mucho lloverá menos durante El Niño, como en el pacífico del oeste (Indonesia, norte de Australia, Filipinas). Incluso los huracanes que afectan por lo regular a Filipinas, Taiwán, etc., comienzan a formarse cerca de Tahití, Fiji, etc., causando graves daños a la población. Patrones inversos ocurren durante La Niña (Magaña *et al.*, 1997).

b. Oscilación del Atlántico Norte (NAO). Durante este movimiento de gran escala, ocurren cambios en la presión atmosférica de las regiones subtropicales del Atlántico Norte, cerca de las Azores. Una baja presión subpolar, que se extiende de sur a norte de Groenlandia, determina la fuerza y orientación del gradiente de presión sobre el Atlántico Norte y las áreas de latitudes medias. Las precipitaciones en Europa están relacionadas a la NAO.

Cuando esta es positiva, se presentan condiciones más secas que lo normal sobre la parte sur de Europa y el Mediterráneo y una precipitación mayor a la normal en Islandia y Escandinavia (Mavi y Tupper, 2004).

c. Temperatura superficial del mar. La atmósfera se encuentra siempre en un proceso dinámico, esto es, en un período corto de tiempo puede ocurrir un cambio en la temperatura. Se considera que el océano es el encargado de que la atmósfera regrese a su estado inicial una vez que haya ocurrido algún fenómeno meteorológico. Una vez que el océano adopta una condición térmica diferente a la normal, esta condición es transportada desde la superficie a profundidades hasta de 300 ó 400 metros, de esta manera se tiene un gran almacenamiento de calor en un área bastante grande. Durante estaciones turbulentas cuando el viento es fuerte, el mar se agita llevando los cambios de temperatura a láminas más profundas. Cuando las condiciones se estabilizan, el agua generada en las turbulencias, ya sea cálida o fría, permanece a bajas profundidades hasta que inicia la siguiente tormenta estacional que es cuando es traída a la superficie y puesta en contacto con la atmósfera. Se tienen correlaciones entre los patrones de temperatura superficial del mar de un invierno y la temperatura del siguiente invierno.

2.1.2. Cambios observados en la composición atmosférica.

La atmósfera terrestre es la capa gaseosa que circunda la Tierra. La atmósfera seca está compuesta casi enteramente por nitrógeno y oxígeno, más cierto número de gases traza, como el argón, el helio y ciertos gases de efecto invernadero radiativamente activos, como el dióxido de carbono o el ozono. Además contiene vapor de agua, en cantidades muy variables, contiene nubes y aerosoles (IPCC, 2007). Está formada por 6 subcapas: Tropósfera, Estratósfera, Mesósfera, Termósfera o Ionósfera, Exósfera y Magnetósfera.

2.1.2.1. Funciones de la atmósfera.

Dentro de las funciones de la atmósfera terrestre están el contener elementos indispensables para la vida en forma gaseosa como el oxígeno, CO₂ y nitrógeno; protección de radiaciones dañinas al filtrar rayos UV y rayos X provenientes del sol; permite el paso de luz solar importante para la vida; protege de un rápido enfriamiento por las noches y un rápido calentamiento en el día; hace posible que la temperatura media de la superficie de la tierra sea de +15° C en lugar de -18° C si no existiera la atmósfera; el

transporte de energía de zonas ecuatoriales a latitudes medias y altas; transporte de vapor de agua a través de procesos dinámicos de circulación general del aire que determinan la precipitación; permite la disipación y descomposición de emisiones naturales y antropogénicas; protege del impacto de pequeños meteoritos para que no alcancen la superficie terrestre (Könhe y Woßner, 2009).

2.1.2.2. Composición de la atmósfera.

Como se mencionó anteriormente la atmósfera terrestre contiene nitrógeno, oxígeno y CO₂, pero se presenta una gran cantidad de compuestos como se muestra en el Cuadro 1. Varios gases en la atmósfera son producto de la evolución y sus concentraciones han permanecido relativamente constantes durante millones de años (NOAA, citado por Krupa, 1999).

Cuadro 1. Composición química del aire seco troposférico (0 ~ 15 km por arriba de la superficie terrestre), año de referencia 1989. (Adaptado de Krupa, 1999).

Constituyente químico^a	Fórmula	Tasa de mezcla^b	Fuentes^c
Argón	Ar	0.93%	R
Nitrógeno	N ₂	78.10%	B, V
Oxígeno	O ₂	20.90%	B, V
Amoníaco ^d	NH ₃	0.1 – 1 ppkmv	A, B
Bióxido de carbono	CO ₂	354 ppmv	A, B, V
Monóxido de carbono ^d	CO	40 – 150 ppkmv ^e	A, B, P
CFC-11	CFCl ₃	280 ppmmv	A
CFC-12	CF ₂ Cl ₂	480 ppmmv	A
Formaldehído	HCHO	0.1 – 1 ppkmv	A, P
Helio	He	5.2 ppmv	R
Hidrógeno	H ₂	0.5 ppmv	A, B, P
Criptón	Kr	1.1 ppmv	R
Metano	CH ₄	1.72 ppmv	A, B
Neón	Ne	18.2 ppmv	V
Ácido Nítrico	HNO ₃	50 – 1000 ppmmv ^e	P
Monóxido de nitrógeno ^d	NO	5 – 100 ppkmv ^e	A, B, P
Bióxido de nitrógeno ^d	NO ₂	10 – 100 ppkmv ^e	B, P
Óxido nitroso	N ₂ O	310 ppkmv	A, B, P
Ozono ^d	O ₃	10 – 100 ppkmv ^e	P
Bióxido de azufre ^d	SO ₂	0.2 ppkmv ^e	A, P, V
Xenón	Xe	0.09 ppmv	R

^a Los nombres en negritas indican una tasa de mezcla relativamente constante.

^b La tasa de mezcla se define como la tasa de la masa de un gas dado en relación a la masa del aire seco. Para los componentes de frecuencia baja, las tasas de mezcla (fracciones molares) se expresan como ppmv (partes por millón en volumen) = 10⁻⁶; ppkmv (partes por mil millones en volumen) = 10⁻⁹; ppmmv (partes por millón de millones en volumen) = 10⁻¹²

^c A = emisiones antropogénicas; B = Biósfera; P = Fotoquímica; R = Descomposición radiactiva; V = Actividad volcánica

^d Gases traza con tasas de mezcla de amplia fluctuación.

^e Áreas contaminadas del exterior donde las concentraciones son aún más altas.

Hay también algunos gases traza como se muestra en este Cuadro 1, en concentraciones variables. Aún cuando muchos de estos gases traza no son nuevos en la atmósfera, una variabilidad significativa en sus concentraciones en tiempo y espacio son predominantemente influidas por la actividad humana. Sin embargo, es importante reconocer que algunos de los constituyentes atmosféricos tales como el bióxido de azufre, son producidos por ambas causas (naturales como en el caso de erupciones volcánicas; antropogénicas como en el caso de la combustión de fósiles), mientras que otros como los clorofluorocarbonos son totalmente nuevos y son debidos a la influencia humana (Krupa, 1999).

2.1.2.3. Relaciones entre factores físicos y químicos de la atmósfera.

La tropósfera, que es la capa de la atmósfera en la cual se desarrolla la vida, sufre un descenso de temperatura con el incremento de altura, lo cual es debido a un fuerte efecto de calentamiento sobre la superficie terrestre originado por la absorción de la radiación solar visible y la cercana a la radiación ultravioleta (Krupa, 1999).

De la enorme cantidad de energía radiada por el sol en forma de ondas electromagnéticas, la tierra intercepta tan sólo una dos mil millonésima parte del total emitido. La energía más intensa proviene de las partes del visible y el ultravioleta del espectro, mientras que la intensidad de la radiación de longitudes de onda larga, como el infrarrojo, es relativamente baja. De esa cantidad de radiación que llega al tope de la atmósfera, las nubes reflejan cerca de un 25%, absorben un 1% y difunden, a través de las gotitas de agua y cristales de hielo de las nubes, alrededor de un 14% que llega a la superficie terrestre como radiación de onda muy corta. En el resto de la atmósfera, donde no hay nubes, se absorbe directamente un 16% de la radiación incidente (3% por el ozono estratosférico y 13% por el vapor de agua de la tropósfera) y se difunde un 18% (11% que alcanza la superficie y 7% que se pierde en el espacio exterior). Por lo tanto, de manera directa, a la superficie de la tierra llega sólo un 26% de la radiación incidente, y de ésta se refleja un 5% que se pierde hacia el exterior. De lo anterior se puede deducir que la cantidad de radiación efectiva que absorbe la superficie terrestre es un 46% de la radiación extraterrestre incidente en la parte alta de la atmósfera (Otaola *et al.*, 1993).

En la estratósfera ocurren una serie de reacciones fotoquímicas (reguladas por la luz) que involucran O₃ (ozono) y O₂ (oxígeno molecular). El O₃ absorbe fuertemente la radiación

solar en la región del espectro de 210 a 290 nm lo que evita la incidencia de la radiación biológicamente nociva sobre la superficie, mientras que el O₂ la absorbe a ≤ 200 nm. El O₂ y el O₃ activados se disocian, hay una fotólisis (disociación en presencia de la luz), y se inicia una serie de reacciones en las cuales el O₃ se forma y se destruye, lo que lo lleva a un estado de equilibrio (Krupa, 1999).

Las actividades humanas traen como consecuencia la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), los que se acumulan en la atmósfera, provocando un incremento en sus concentraciones con el paso del tiempo (IPCC, 2007). La concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la capa superficial de la atmósfera fue de aproximadamente 280 ppmv (partes por millón de volumen) antes de que iniciara la era industrial. A fines del siglo XX, la concentración se mantuvo en 365 ppmv. Así la concentración de CO₂ se ha incrementado cerca de 30% en un período de 200 años.

El dióxido de azufre (SO₂) y los compuestos de nitrógeno (NO₂, N₂O y NH₃), son algunos de los mayores contaminantes aéreos emitidos por fuentes industriales y domésticas. El SO₂ es oxidado a sulfato, el cual existe en la atmósfera principalmente como aerosol. Los aerosoles de sulfato se encuentran en mayor cantidad en el Hemisferio Norte que en el Sur. El nivel medio anual de S₂O sobre áreas continentales es de 0.1 a 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ (microgramos por m⁻³). Los aerosoles de sulfato dispersan o reflejan la luz del sol, resultando en un ligero enfriamiento de la superficie terrestre. A partir de 1990 las emisiones globales se han incrementado a una tasa promedio de 2.7% anual. El N₂O, que se encuentra a bajas concentraciones en la atmósfera (310 ppbm, partes por billón de masa), se incrementa lentamente a una tasa de casi 0.25% por año. A pesar de su baja concentración, es un importante GEI debido a su larga vida (150 años) y su gran potencial de calentamiento (casi 30 veces más que el CO₂) (Mavi y Tupper, 2004).

El metano (CH₄), es el siguiente mayor contribuyente al calentamiento global con casi el 20% de influencia. Aunque el incremento anual de carga de metano a la atmósfera es de una centésima parte de la del CO₂, su efecto es mucho mayor. Su concentración se ha incrementado en casi 145% sobre los últimos 200 años a una tasa del 1% anual (Mavi y Tupper, 2004).

El ozono es tóxico para una gran variedad de organismos vivos. En la tropósfera es producido por una cadena de reacciones químicas y fotoquímicas que involucran óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. Cerca de la superficie de la tierra, las concentraciones de ozono son altamente variables en espacio y tiempo, con los más altos valores sobre regiones industriales bajo condiciones climáticas apropiadas. La concentración global del ozono a nivel del suelo (media anual) es de $45 \mu\text{g m}^{-3}$. Algunas mediciones en Europa indican que el ozono se ha incrementado de $20 \mu\text{g m}^{-3}$ a $60 \mu\text{g m}^{-3}$ durante el siglo XX (Mavi y Tupper, 2004).

Los clorofluorocarbonos (CFC) son producidos exclusivamente por el hombre y se crearon para reemplazar al amoníaco y dióxido de azufre utilizados como refrigerantes (Molina, 1996). Incluyen CFC-11 (CFCl_3), CFC-12 (CCl_2F_2), CFC-113 ($\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$), y CCl_4 . Estos compuestos han sido utilizados por varios años como solventes, líquidos para refrigeración, propulsor en latas de aerosol. Sus concentraciones han sido medidas en la atmósfera desde 1978. Se ha determinado que las emisiones antropogénicas de CFC's y algunas otras substancias a la atmósfera, disminuyen la capa de ozono estratosférico. La tasa actual de incremento de los CFC's en la atmósfera es de casi el 4% anual. Aunque las concentraciones de CFC's son mayores en el hemisferio norte que en el sur, las tasas de incremento observadas son más altas en el hemisferio sur (Mavi y Tupper, 2004).

En el caso de los halones, dos de estos compuestos que contienen bromo, el halón 1301 (CBrF_3) y el halón 1211 (CBrClF_2), han ido incrementando su concentración atmosférica al utilizarse en los extintores de incendios, en la aviación y aplicaciones militares. Estos compuestos también pueden destruir la capa de ozono estratosférico. Sus concentraciones atmosféricas en 1984 fueron de casi 1 y 1.2 pptv (parte por trillón de volumen) respectivamente de acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial, WMO por sus siglas en inglés (WMO, 1983), y en 1990 fueron de 2 y 1.7 pptv (IPCC, 1992). Actualmente el uso de materiales que contienen estos compuestos, ha disminuido, pero las concentraciones permanecen en la atmósfera debido a que los halones tienen un tiempo de vida de 65 años de acuerdo con lo reportado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2010).

2.1.2.4. Efectos de la contaminación atmosférica sobre el clima y del clima sobre la contaminación atmosférica.

Las relaciones entre el clima y la contaminación atmosférica son intensas, y ambos se influyen mutuamente en múltiples aspectos. La contaminación atmosférica altera el clima al modificar las radiaciones solares debido al incremento de contaminantes, los cuales pueden absorber parte de la radiación o bien desviarla mediante la formación de nubes de smog. Estos procesos afectan de manera directa la temperatura, incrementándola en algunas zonas y disminuyéndola en otras. La precipitación también se ve afectada debido a cambios en la formación de nubes que se ven afectadas por la acumulación de aerosoles como se vio anteriormente.

Por otro lado, el clima también tiene efectos sobre la contaminación atmosférica, como es el caso del incremento de presión atmosférica que no permite una adecuada dispersión de contaminantes y por lo tanto se incrementa su concentración en ciertas áreas. Vientos fuertes y turbulencias dispersan los contaminantes pero los arrastran a zonas más alejadas de su origen. La presencia de niebla o bruma, agravan la contaminación al no permitir una adecuada circulación (Seoáñez, 2002).

2.1.3. Cambios observados en parámetros climáticos.

2.1.3.1. Tendencias de temperatura.

En diferentes regiones del planeta se han realizado estudios para conocer las tendencias de temperatura y determinar sus diferencias con respecto a la climatología actual utilizando para ello metodologías que disminuyan errores sistemáticos al utilizar series de 30 años, y que permitan detectar variaciones pequeñas en temperaturas (Leroy, 1999). Dichas diferencias conocidas como anomalías, se obtienen al promediar las temperaturas en diferentes períodos tales como decadales (diez años), tridecadales (30 años) y en algunos casos quinquenios (5 años). Se han determinado a escala global, regional y local, encontrando diferencias entre ellos.

Para los estudios retrospectivos, los investigadores han utilizado valores de anomalías determinadas a nivel global, que se encuentran en la base de datos HadCRUT3 la cual es una serie de datos de las anomalías de temperatura superficial históricas, para cada mes desde enero de 1859 en una cuadrícula de 5° x 5°, a nivel global. Estos datos son producto de la colaboración del *Meteorological Office Hadley Centre* y el *Climatic Research Unit* de la *University of East Anglia* en el Reino Unido (Met Office, 2010).

El promedio global de la temperatura del aire superficial se ha incrementado en cerca de 0.6° C a partir de 1860 que es la fecha más lejana con la que se cuenta con suficiente información. Nuevos análisis indican que el calentamiento en el siglo XX es, probablemente, el más grande de cualquier otro siglo en los pasados 1000 años para el hemisferio norte. A nivel global la década de los 1990's fue la más cálida y el año 1998 fue el más caluroso desde 1860. Dos períodos de incremento de temperatura son notables: uno entre 1910-1945, con un incremento de temperatura global de 0.14°C, y otro en el período 1976-1999 con un incremento de temperatura de 0.17°C (Salinger, 2005).

Jones *et al.* (2009), reportan que el año 2009 fue el sexto más caluroso en el record global (una anomalía de 0.43°C sobre la media del período de referencia 1961-1990), excedido por 1998, 2002, 2003, 2004 y 2005. Las temperaturas medias normales para este período de referencia (1961-1990) fueron de 14.0°C a escala global, 14.6°C en el Hemisferio Norte y 13.4°C en el Hemisferio Sur.

En lo que respecta a las anomalías de temperatura de manera estacional, es interesante notar que para todas las estaciones del año, la tendencia al calentamiento no inicia sino hasta cerca de 1910. Todas las estaciones muestran cierta elevación alrededor de 1940, tal como en la serie anual a escala global. El invierno y la primavera no muestran mucha variación en los 1970's, mientras que el verano y otoño muestran una disminución gradual de temperatura. Todas las estaciones muestran un calentamiento general desde mediados de los 1970's, pero una disminución ligera en los últimos cinco años del período 1961-1990 (Jones *et al.*, 2009). En promedio, la temperatura mínima nocturna diaria sobre el área terrestre, se ha incrementado en cerca de dos veces la temperatura diurna máxima diaria a partir de 1950 (aproximadamente 0.2°C comparada con 0.01°C por década). Esta tendencia ha alargado el período libre de heladas en varias regiones de latitudes medias y altas, observando una disminución del 10% en el número de días con helada a nivel global (Salinger, 2005).

A escala regional se encuentran ciertas variaciones con respecto a la escala global, debido a que la temperatura se ve afectada por diversos factores entre los que se encuentran la altitud, la cercanía del mar y el albedo que varía de acuerdo a tipo de suelo y cubierta vegetal (Garduño, 1994).

Estas diferencias a escala espacial son debidas a los fenómenos ocurridos en los océanos como el ENSO (El Niño/Oscilación del Sur) y el NAO (Oscilación del Atlántico Norte), los cuales afectan la climatología de grandes superficies del planeta, como se indicó en temas anteriores. Estas variaciones afectan a nivel temporal como es el caso de temperaturas invernales (Enfield y Mestas-Núñez, 1999; Pezzuli *et al.*, 2005), lo cual se refleja en el cálculo de temperaturas medias anuales.

2.1.3.2. Tendencias de Precipitación.

A nivel global, la precipitación se ha incrementado en un 2% durante el siglo XX, sin embargo, este incremento no ha sido homogéneo ni espacial ni temporalmente. En las latitudes medias y altas del hemisferio norte, la precipitación se ha incrementado entre 7 y 12% entre las latitudes 30°N y 85°N, especialmente durante el otoño e invierno boreales (Salinger, 2005).

La tendencia global de la precipitación en tierra firme fue analizada utilizando datos del GHCN (siglas en inglés de la Red Histórica de Climatología Global del National Climatic Data Center en Estados Unidos) en una cuadrícula de 5° x 5° latitud/longitud. Las series de datos utilizadas abarcan el período 1901-2005 para determinar anomalías en porcentaje tanto en el cambio del siglo XX al siglo XXI como entre décadas.

Para la mayor parte de Norteamérica y especialmente en las regiones de latitudes altas en Canadá, la precipitación anual se ha incrementado en el período de 105 años. Lo contrario sucede en la parte suroeste de Estados Unidos, la parte noroeste de México y la Península de Baja California en donde la tendencia de la precipitación anual ha sido negativa (de 1 a 2% por década), tal que las sequías han prevalecido en años recientes (IPCC, 2007).

Relacionada a la precipitación se tienen diferentes tendencias en otros parámetros hídricos como son evapotranspiración, sequías, escurrimientos, descargas en ríos y humedad del suelo. Desgraciadamente no se cuenta con suficiente información que permita generar un análisis de tendencias en períodos largos de tiempo y en muchas de las ocasiones la información obtenida no es confiable. Se ha considerado utilizar el Índice de severidad de sequía de Palmer (IPCC, 2007), para detectar tendencias en los parámetros hídricos. Comparando las áreas de tendencia de precipitación con la tendencia de severidad de sequía, se observa una relación entre disminución de precipitación con incremento de

severidad de sequía, como es el caso de la parte oeste de África y la parte noreste de Estados Unidos.

2.1.3.3. Tendencias observadas en México.

Magaña *et al.* (2004) puntualizan que por su ubicación geográfica, la República Mexicana es afectada por sistemas meteorológicos de latitudes medias durante el invierno, y por sistemas tropicales durante el verano, por lo que el clima mexicano se debe estudiar considerando procesos de interacción océano-atmósfera-continente. Por extenderse desde regiones tropicales hasta latitudes medias, y debido a lo complejo de su topografía, en México se tiene una gran variedad de climas que van desde los cálidos, con temperaturas medias anuales mayores a 32°C, hasta los fríos, con temperaturas menores a los 10°C. En el 93% del territorio nacional, las temperaturas medias varían entre 10 y 26°C, por lo que en el país se presentan climas cálido-húmedos en 23% de la superficie, secos en el 28%, muy secos en el 21% y templados-subhúmedos en el 21%.

México, al igual que diversos países, necesita revisar el estado del conocimiento en cuanto a cambio climático para enfocar nuevos proyectos de investigación, por una parte, y para implementar políticas de mitigación y de adaptación por la otra. Desde que se tiene el tema de cambio climático en las agendas políticas en la década de los ochenta, diversos centros de investigación en el país se han abocado a estudiar tanto los aspectos físicos como los sociales del fenómeno (Tejeda y Rodríguez, 2007).

a. Tendencias en temperatura. Las tendencias observadas a nivel regional presentan diferentes patrones aún a escala local, tal es el caso de un estudio realizado en la cuenca del Lago de Cuitzeo en Michoacán, en donde para períodos de 63 a 83 años se encontraron incrementos estadísticamente significativos que van de 2°C a 4°C en temperatura media mensual para algunas estaciones climatológicas dentro de la cuenca, contrastando con disminución de temperatura media mensual también estadísticamente significativa en el rango de -2.5°C a -4.5°C en otras estaciones de la misma cuenca (Carlón y Mendoza, 2007).

Para el estado de Nuevo León, Herrera *et al.* (2009), detectaron incrementos en las temperaturas máximas extremas de 0.5°C a 1.08°C en algunas partes del estado, inclusive mayores a la media estimada a nivel global. Para otras zonas del estado se detectaron

decrementos de las temperaturas máximas extremas de -2.9°C a -0.07°C . Lo mismo ocurrió con las temperaturas mínimas extremas, ya que se detectaron incrementos del rango de 0.6°C a 5.5°C , así como decrementos que van de -9.2°C a -1.03°C en diferentes partes del estado.

Por su parte Brito *et al.* (2009), en un estudio para detectar tendencias de temperatura máxima y mínima en Zacatecas, encontraron también patrones opuestos en diferentes partes del estado. Las anomalías observadas para la temperatura máxima fueron de -2.20°C a 1.12°C en el período comprendido de 1963 a 2002, mientras que las observadas para la temperatura mínima fueron de -2.50°C a 0.88°C para el mismo período.

b. Tendencias en precipitación. Méndez *et al.* (2008), en un estudio para detectar tendencias en precipitación en toda la República Mexicana para el período comprendido entre 1920 a 2004, encontraron tanto tendencias positivas como negativas en toda el área y durante todo el año. Estacionalmente determinaron que para la primavera se tienen tendencias de anomalías que van de -5.27 a 4.53 mm, para verano de -10.22 a 10.79 mm, en otoño de -8.93 a 6.95 mm y para invierno de -3.34 a 3.75 mm. Los decrementos e incrementos más altos durante todo el año se presentaron para los estados de las costas del Golfo de México y pacífico sur.

Pereyra-Díaz *et al.* (2004), observaron las tendencias en precipitación como efecto de El Niño sobre la ciudad de Villahermosa en Tabasco en un período de 50 años. Encontraron que durante años Niño el período húmedo sufre un muy ligero incremento de 0.5%, mientras que en años Niña el incremento es del 9%. Para años mixtos con presencia de Niño y Niña, el período húmedo sufre un decremento altamente significativo con una disminución del 18%.

Por su parte Ruiz *et al.* (2000) en un estudio para determinar tendencias en la estación de crecimiento para maíz de temporal en el estado de Jalisco, encontraron valores de anomalías de precipitación mensual en el período húmedo que van de -9.4 mm a 8.8 mm entre dos períodos de 25 años (1947-1971 y 1972-1996), afectando estas variaciones los parámetros de inicio, fin y duración de la estación de crecimiento.

2.2. Efecto de variaciones climáticas en cultivos agrícolas

Azcón-Bieto *et al.* (2008) indican que aún no se conoce bien cómo afectarán los cambios de CO₂, temperatura y régimen hídrico a los ecosistemas terrestres, y en particular a las plantas. La fotosíntesis es uno de los procesos que se ven afectados por la luz, temperatura, humedad del aire, disponibilidad hídrica y nutrientes minerales del suelo. A estos factores hay que añadir también la disponibilidad de CO₂, como principal sustrato de la fotosíntesis, debido a los grandes incrementos que se han venido presentando en las últimas décadas.

Se conoce que las plantas reaccionan ante condiciones de estrés, ya sea este por condiciones climáticas desfavorables o condiciones químicas en aire y suelo. El estrés abiótico, tal como sequía, salinidad, temperaturas extremas, toxicidad química y estrés oxidativo, son serias amenazas para la agricultura y resultan en el deterioro del ambiente.

Este tipo de estrés es la principal causa de pérdida de cultivos en el mundo reduciendo el rendimiento medio de los principales cultivos en más del 50% (Wang *et al.*, 2003). La respuesta compleja de la planta al estrés abiótico, la cual involucra varios genes y mecanismos moleculares-bioquímicos, se presenta en la Figura 2.

Los factores de estrés primario, sequía, salinidad, enfriamiento, calor y contaminación química, están frecuentemente interconectados y provocan daño celular y estrés secundario, como el estrés osmótico y estrés oxidativo. Las señales iniciales de estrés, como efectos iónicos u osmóticos, la temperatura, cambios en la fluidez de la membrana, disparan la corriente de señales y los controles de transcripción, con los que se activa el mecanismo de respuesta al estrés para restablecer la homeostasis y proteger y reparar las membranas y proteínas dañadas.

Una respuesta inadecuada en uno o varios de los pasos en la señalización y activación de genes, puede resultar al final en cambios irreversibles de la homeostasis celular y en la destrucción de proteínas funcionales y estructurales, y en las membranas, llegando a la muerte celular.

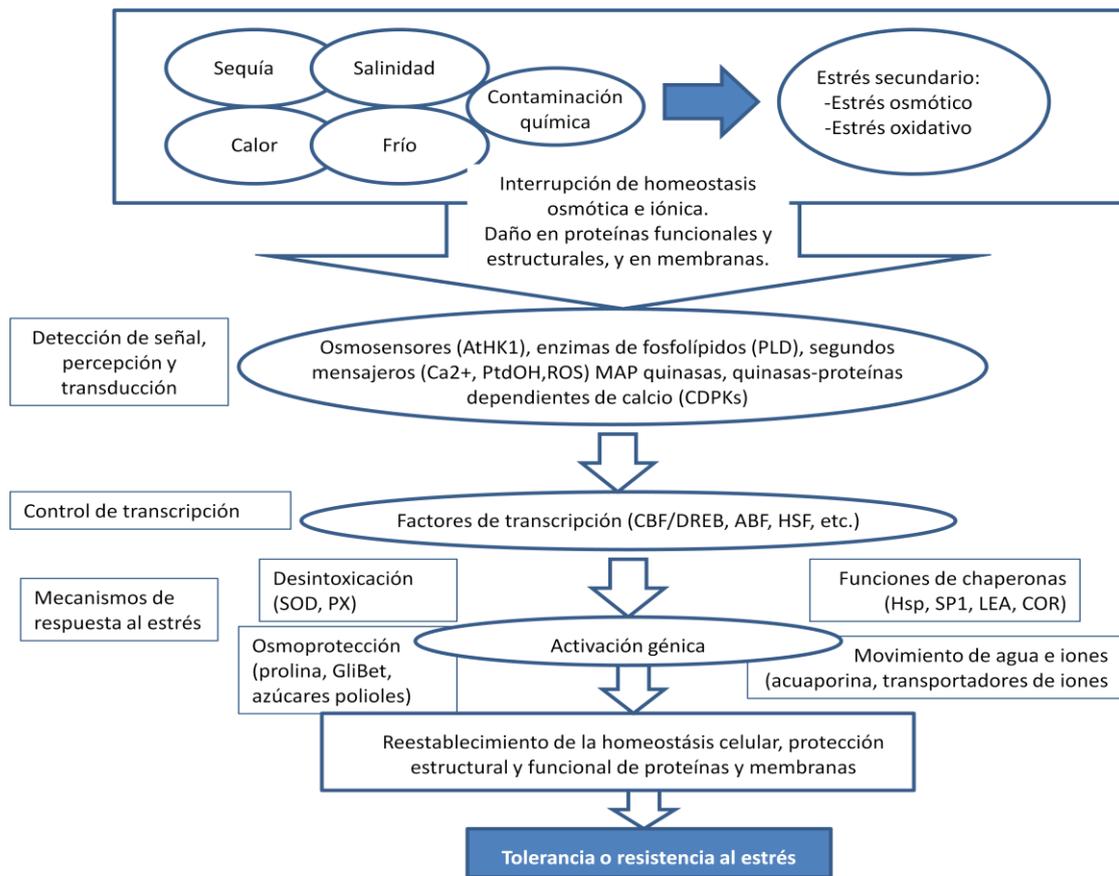


Figura 2. La complejidad de la respuesta vegetal al estrés abiótico. Adaptado de Wang *et al.* 2003.

2.2.1. Efecto del incremento de CO₂.

Dentro de los gases de efecto invernadero cuyas estimaciones a futuro son hacia el incremento, se encuentra el CO₂ el cual es vital para el desarrollo de las plantas. Debido a esto varias investigaciones mencionan que se tendrían efectos benéficos por la buena disponibilidad de CO₂ en la atmósfera. Algunas investigaciones reportan como valores actuales de concentración de CO₂ de 370 a 380 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (Morgan *et al.*, 2005; IPCC, 2007), y otros reportan que a fines del siglo XXI se esperaría una concentración de 500 hasta 1000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (Houghton *et al.*, 2001; IPCC, 2007). La captura del CO₂ atmosférico mediante la fotosíntesis es crucial para la producción de alimentos, fibras y combustibles para la humanidad, por lo que cambios en el clima futuro juegan un papel importante en la modificación de procesos clave involucrados en la productividad

fotosintética (Attipalli *et al.*, 2010). La respuesta de las plantas ante estos escenarios futuros variará dependiendo del tipo fotosintético al que pertenezcan.

Varios investigadores reportan respuesta positiva en plantas C3 (Mauney *et al.*, 1992), tales como incrementos significativos en las tasas fotosintéticas debido al incremento en la concentración del CO₂ intercelular, aceleración en el flujo del CO₂ y la eficiencia relativa de la carboxilación con respecto a la oxigenación, resultando en una fotorrespiración reducida (Attipalli *et al.*, 2010). Como respuestas significativas estos autores obtuvieron incrementos en altura de planta, grosor de tallo, en ramificaciones, y en la biomasa, entre otros.

En relación a las plantas del tipo fotosintético C4, al cual pertenece un grupo pequeño de especies entre ellas el teocintle, caña de azúcar, maíz y sorgo, se considera que no tendrán respuesta notoria al incremento del CO₂ atmosférico debido a que en condiciones de niveles normales de CO₂ este grupo de plantas acumula altas cantidades en los conductos de la cubierta celular lo que satura la reacción de la carboxilasa e inhibe la fotorrespiración (Attipalli *et al.*, 2010). Sin embargo algunas investigaciones han reportado un incremento en la tasa fotosintética en plantas C₄ sólo bajo condiciones de sequía o de déficit de presión de vapor, en condiciones de alta luminosidad, resultando en un incremento del desarrollo del 10 al 20% (Ghannoum *et al.*, 2000). La estimulación al crecimiento en plantas C4 ha sido mayor en malezas que en especies agrícolas (Rogers *et al.*, 2008; Attipalli *et al.*, 2010).

La respuesta de las plantas del tipo CAM (por sus siglas en inglés de metabolismo del ácido crasuláceo) en las que se incluye el agave, es más compleja que la de las plantas C3 y C4, debido a sus características de fijación nocturna del CO₂. Aunque se han reportado incrementos en la producción de biomasa del 20 al 40% en condiciones de elevada concentración de CO₂, también se ha reportado disminución en la asimilación nocturna del CO₂, fijación del CO₂ durante el día y el uso eficiente del agua para algunas plantas CAM (Borland *et al.*, 2009; Attipalli *et al.*, 2010). La falta de aclimatación de las especies CAM bajo condiciones de elevada concentración de CO₂ en el aire, podría reforzar la importancia del cultivo de plantas de este grupo (Attipalli *et al.*, 2010).

2.2.2. Efecto de variaciones de temperatura.

La radiación solar es la principal fuente de energía calorífica en la atmósfera. La temperatura es la intensidad de la energía calorífica y es de vital importancia para la vida orgánica. La temperatura gobierna los procesos físicos y químicos que a su vez, controlan las reacciones biológicas dentro de la planta. Esto controla la tasa de difusión de gases y líquidos dentro de la planta, y la solubilidad de los nutrientes depende de la temperatura (Mavi y Tupper, 2004).

Los cambios drásticos en la temperatura pueden actuar directamente modificando los procesos fisiológicos existentes, principalmente la fotosíntesis, e indirectamente produciendo un patrón alterado del desarrollo subsecuente a la imposición del cambio ocurrido en la temperatura (Downton y Slatyer, citados por Ramos *et al.*, 2009).

Existe para cada una de las especies vegetales, una temperatura por debajo de la cual sus semillas no germinan. Esta temperatura se denomina “cero de germinación” y suele ser más baja que la correspondiente al “cero de crecimiento”, debido al calor generado en la combustión de las reservas de la semilla. La germinación se produce muy lentamente en las proximidades del “cero de germinación”. Si se mantienen estas temperaturas, la semilla germinará, pero una vez consumidas sus reservas, la plántula morirá si aquéllas no han superado el “cero de crecimiento”. A medida que las temperaturas van siendo más altas, se acorta el tiempo necesario para cumplir la etapa que va desde la siembra a la nacencia hasta una temperatura óptima que hace que aquélla sea mínima (Terrón, 2001).

Temperaturas del suelo excesivamente altas son dañinas a las raíces y pueden causar lesiones al tallo. La primera respuesta de las plantas al impacto del estrés por temperatura alta se traduce en una reducción en la duración de todas las etapas de desarrollo, además de causar reducciones en el tamaño de sus órganos y finalmente disminuir su rendimiento (Ramos *et al.*, 2009).

La fotosíntesis es el proceso fisiológico más afectado por la temperatura alta; el daño causado puede llegar a depender de la estabilidad de los cloroplastos para mantener las reacciones fotosintéticas activas, y de la velocidad de síntesis de la clorofila; así mismo, puede llegar a variar de acuerdo a la capacidad de respuesta del genotipo (Ramos *et al.*, 2009).

La exposición a temperaturas extremadamente bajas y fuertes nevadas, dañan a las plantas de varias formas como son la sofocación por falta de oxígeno cuando se forma una gruesa cubierta de nieve sobre el suelo; sequía fisiológica y desecación, que resultan de una excesiva transpiración en un período cálido y una lenta absorción de humedad del suelo cuando éste se mantiene aún congelado; quiebre de la planta, debido a una expansión del suelo; congelamiento, cuando se presentan heladas en zonas de clima cálido. Guy (1999), indica que cuando una célula experimenta un rápido incremento en la temperatura, cerca de 10°C arriba de la temperatura inicial, se observa un cambio drástico en la síntesis de proteínas, la síntesis de la mayoría de las proteínas disminuye o cesa, y sólo la síntesis de un grupo pequeño de proteínas es fuertemente activada.

La respuesta de inducción térmica es atribuida a los elementos promotores *cis*-reguladores que son los sitios de unión para los factores transactivos de choque de calor o choque térmico (Heat Shock Factors, HSF). Los HSF's comparten la secuencia común "nGAAnnTTCnnGAA". Los HSF's vegetales, que se encuentran categorizados en las clases A, B y C, parecen ser una única familia que contiene cierto número de miembros: 21 del *Arabidopsis*, más de 16 del jitomate y 15 de la soya. Estos son acompañantes o "chaperones" que funcionan durante el desarrollo normal como en condiciones de estrés, por lo que no es de sorprender que los HSF's realicen diversas funciones que controlan la activación de los genes del choque térmico (Mishra *et al.*, 2002; Morimoto y Schöffl, citados por Wang *et al.*, 2003).

En plantas transgénicas, se ha observado una sobre-manifestación de HSF1 y HSF3 (clase A), que llevan a la expresión de varios genes *hsp* (heat shock protein), que les confiere termo-tolerancia (Prändl mencionado por Wang *et al.*, 2003). En plantas de jitomate, una sobreexpresión del factor HsfA1 resultó en tolerancia al estrés por calor, mientras en frutas fue extremadamente sensible a temperaturas elevadas (Mishra *et al.*, 2002). Estos estudios han demostrado la importancia del papel de los Factores de Transcripción (TF) en la adquisición de tolerancia al estrés, lo que puede, finalmente, contribuir a las prácticas agrícolas y ambientales. Aunque la modificación en plantas de los TF de respuesta al estrés permite una sobreexpresión de los genes asociados al estrés, esto también podría activar genes de no-estrés, que afectaría las características agronómicas normales de un cultivo. Un efecto negativo de los TF modificados es el crecimiento tardío en plantas transgénicas (Abe *et al.*, 2003).

2.2.3. Efecto de variaciones en la humedad.

El funcionamiento de los ecosistemas terrestres depende en gran medida de las entradas y salidas de agua, que determinan la cantidad y calidad del agua disponible para los seres vivos. La disponibilidad de agua en el suelo es el principal limitante de la productividad de los sistemas agrícolas y es la agricultura el principal consumidor de agua en numerosos países (Villalobos *et al.*, 2002).

La lluvia contribuye con el 65% de la producción alimentaria mundial, mientras que el restante 35% de los alimentos es producido mediante irrigación. En la mayoría de los países del mundo, la precipitación es, al menos parte del año, insuficiente para el desarrollo de cultivos, por lo que los sistemas agrícolas de secano se ven afectados por las variaciones anuales en la precipitación (Mavi y Tupper, 2004).

El agua es requerida por las plantas para la producción de hidratos de carbono, para mantener la hidratación del protoplasma, y como vehículo para el traslado de alimentos y elementos minerales. La tensión de la humedad interna causa reducción de la división y elongación celular, y por tanto, del desarrollo vegetal. Así mismo, el agua hace más eficiente la absorción de fertilizantes al permitir la disolución y el traslado del mismo hacia la raíz (Havlin *et al.*, 1999). El agua junto con algunos nutrimentos, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta y mediante la transpiración, es convertida a vapor dentro de las hojas y removida a la atmósfera a través de los estomas. La tasa de transpiración es influenciada por la radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica, viento, características del cultivo y prácticas de cultivo (Allen *et al.*, 2006).

Comúnmente el estrés hídrico ocurre antes que el estrés por calor en el verano, ya sea por causas de falta de irrigación o insuficiente precipitación. La ocurrencia simultánea de temperatura alta y estrés hídrico a menudo se presenta en algunas regiones del mundo; cuando esto ocurre se observa disminución en la producción, reducción en el crecimiento de la raíz, reducción en el potencial hídrico, disminuye la termo-estabilidad de la membrana celular, se presenta una acumulación del ácido abscísico (ABA), cierre estomático, disminución en la asimilación de CO₂, disminución de la respiración y acumulación de azúcares, entre otros (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

Haake, citado por Wang *et al.* (2003), indica que la expresión del CBF4, aislado en *Arabidopsis*, es rápidamente inducida durante el estrés por sequía y por el tratamiento auxiliar de ácido abscísico (ABA), pero no por estrés por frío. Una sobreexpresión del CBF4 bajo el promotor constitutivo CaMV35S resultó en la expresión de genes inducidos por sequía y frío, bajo condiciones de no estrés y plantas transgénicas de *Arabidopsis* mostraron más tolerancia a condiciones de congelamiento y sequía.

2.2.4 Interacción incremento de CO₂-factores abióticos.

En el desarrollo de plantas de cualquier tipo fotosintético, es necesario el considerar otros factores ambientales, que afectan la respuesta de las plantas a concentraciones elevadas de CO₂. El efecto de temperatura sobre el proceso de fotosíntesis puede variar dependiendo del tipo fotosintético de las plantas y a diferentes concentraciones de CO₂, observándose que en ambientes de alta concentración de CO₂, las plantas C3 incrementan considerablemente la fotosíntesis neta, en cambio en condiciones de concentración de CO₂ normales (concentraciones actuales), las plantas C4 tienen mayor fotosíntesis que las plantas tipo C3 como respuesta al incremento de temperatura, mientras que en ambientes de alta concentración de CO₂ atmosférico sus respuestas son similares. Se han reportado investigaciones sobre la interacción de la temperatura con el incremento del CO₂, obteniéndose diversas respuestas tales como reducción en el rendimiento de trigo como efecto de esta interacción (Amthor, 2001), respuestas positivas en algodón (Yoon *et al.*, 2009), respuestas negativas en arroz (Ziska y Bunce, 2007). Aún siendo plantas del mismo tipo fotosintético, se observan respuestas diferentes.

En plantas que crecen en condiciones de elevado CO₂, se requieren cantidades relativamente altas de nitrógeno (N) del suelo, esto es, aunque la respuesta a las condiciones de elevado CO₂ sea positiva, si el suelo está deficiente en N, el resultado final será una respuesta negativa (Attipalli *et al.*, 2010). En algodón se tuvo una respuesta positiva a la interacción incremento de CO₂ – incremento de fertilización potásica al suelo (Reddy y Zhao, citados por Attipalli *et al.*, 2010). En trigo, Adamsen *et al.* (2005), determinaron que en condiciones de elevado CO₂ atmosférico, la planta toma más rápidamente N del suelo, pero si esta asimilación ocurre en las primeras etapas de la

estación de crecimiento, se tendrá un rápido desarrollo vegetativo que resultará en la reducción del rendimiento del grano.

Estudios interactivos sobre la disponibilidad e incremento de CO₂ muestran que una elevada concentración de este gas en la cavidad subestomatal, provocará un cierre de los estomas lo que mejoraría la eficiencia del uso del agua en las hojas y la planta completa (Long *et al.*, 2004). Pero no solo esta respuesta se puede obtener, ya que como reportaron Wullschleger *et al.* (2002), plantas cultivadas bajo condiciones de elevado CO₂ desarrollaron más su sistema radicular, tanto en longitud como en volumen, debido a la translocación de carbono hacia esta parte vegetal, permitiendo una mejor búsqueda de agua en capas más profundas del suelo.

2.3. Escenarios futuros de cambio climático

Gay (2000) señala que gracias a la investigación científica, que ha analizado y correlacionado los registros históricos de temperatura y de la concentración de CO₂ en la atmósfera, se ha establecido que existe una estrecha relación entre estas dos variables, por lo que se puede esperar que ante un aumento en las concentraciones de CO₂, como el que se ha venido dando desde la Revolución Industrial, se presente un aumento en la temperatura global.

Aunque parece claro que el aumento de la concentración de CO₂ influye en el calentamiento de la superficie terrestre por el incremento del efecto invernadero, no es fácil saber con qué intensidad, pues existe un gran número de fenómenos climáticos que pueden afectar el cambio de temperatura, como se vio anteriormente. A la hora de calcular el efecto del CO₂ con la temperatura, es importante tener en cuenta que las variaciones debidas al efecto invernadero nunca pueden exceder los límites marcados por la latitud y las variaciones estacionales, ya que deberá considerarse la radiación solar recibida (Seoáñez, 2002).

Para estimar los posibles efectos de los cambios de concentración en el CO₂ y otros gases, se crearon los escenarios de emisiones futuras, los cuales de acuerdo con la definición del IPCC (IPCC, 2007) son representaciones plausibles de la evolución futura de las emisiones de sustancias que podrían ser radiativamente activas, basadas en un conjunto coherente de

supuestos sobre las fuerzas que las determinan (desarrollo demográfico y socioeconómico, evolución tecnológica) y las principales relaciones entre ellos.

2.3.1. Escenarios de emisiones.

En el Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES por sus siglas en inglés) (IPCC , 2001), establecen 40 escenarios de acuerdo a la concentración estimada de los gases de efecto invernadero: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), óxido de nitrógeno (NO^x), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (sin incluir metano) (NMVOCs), dióxido de azufre (SO_2), clorofluorocarbonos (CFCs) e hidroc fluorocarbonos (HCFCs), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs), y hexafluoruro de azufre (SF_6) para el período comprendido de 1990 a 2100.

Las emisiones totales acumuladas de CO_2 para los 40 escenarios caen dentro del rango de 773 a 2538 Gigatoneladas de carbono (GtC), con una mediana de 1509 GtC. Siendo el CO_2 el gas de efecto invernadero con mayores concentraciones, y por lo impráctico de trabajar con los impactos combinados al utilizar el efecto de todos los gases de efecto invernadero, se determinó agrupar los escenarios en 4 familias o líneas evolutivas de escenarios en las cuales se tienen establecidos rangos de concentraciones futuras de CO_2 para los períodos comprendidos de 2000 a 2020, 2021 a 2050 y 2051 a 2100. Cada una de estas familias tiene como resultado de políticas sociales y económicas específicas, la producción de mayor o menor concentración de CO_2 y por lo tanto de incrementos o decrementos de temperatura y precipitación. En el Cuadro 2 se presentan valores numéricos estimados de la población y las concentraciones de CO_2 para el período 1990-2100 de cada grupo de escenarios.

2.3.1.1. Familia de escenarios A1.

Los escenarios en esta línea evolutiva o familia describen un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante.

Cuadro 2. Estimaciones de población y concentración de los principales gases de efecto invernadero para las 4 familias de escenarios. Adaptado de IPCC (2001)

Característica estimada	Grupo escenarios	Familia o línea evolutiva					
		A1			B2		
		A1FI	A1B	A1T	A2	B1	B2
Población (miles de millones)	2020	7.6	7.5	7.6	8.2	7.6	7.6
	2050	8.7	8.7	8.7	11.3	8.7	9.3
	2100	7.1	7.1	7.0	15.1	7.0	10.4
Dióxido de Carbono combustibles origen fósil (Gt/año) ¹	2020	11.2	12.1	10.0	11.0	10.0	9.0
	2050	23.1	16.0	12.3	16.5	11.7	11.2
	2100	30.3	13.1	4.3	28.9	5.2	13.8
Dióxido de Carbono del uso de la tierra (Gt/año)	2020	1.5	0.5	0.3	1.2	0.6	0.0
	2050	0.8	0.4	0.0	0.9	-0.4	-0.2
	2100	-2.1	0.4	0.0	0.2	-1.0	-0.5
Dióxido de azufre (Mt/año) ²	2020	87	100	60	100	75	61
	2050	81	64	40	105	69	56
	2100	40	28	20	60	25	48
Metano (Mt/año)	2020	416	421	415	424	377	384
	2050	630	452	500	598	359	505
	2100	735	289	274	889	236	597
Óxido nitroso (Mt/año)	2020	9.3	7.2	6.1	9.6	8.1	6.1
	2050	14.5	7.4	6.1	12.0	8.3	6.3
	2100	16.6	7.0	5.4	16.5	5.7	6.9
CFC/HFC/HCFC (equivalentes a Mt de Carbono/año)	2020	337	337	337	292	291	299
	2050	566	566	566	312	338	346
	2100	614	614	614	753	299	649
PFC (equivalentes a Mt de Carbono/año)	2020	42.7	42.7	42.7	50.9	31.7	54.8
	2050	88.7	88.7	88.7	92.2	42.2	106.6
	2100	115.3	115.3	115.3	178.4	44.9	121.3
Fluoruros de azufre (equivalentes a Mt de Carbono/año)	2020	47.8	47.8	47.8	63.5	37.4	54.7
	2050	119.2	119.2	119.2	104.0	67.9	79.2
	2100	94.6	94.6	94.6	164.6	42.6	69.0
Monóxido de Carbono (Mt/año)	2020	1204	1032	1147	1075	751	1022
	2050	2159	1214	1770	1428	471	1319
	2100	2570	1663	2077	2326	363	2002

¹ Medido en Gigatoneladas/año

² Medido en Megatoneladas/año

En esta familia se presentan tres grupos de escenarios que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía: A1FI, utilización intensiva de combustibles de origen fósil; A1T, utilización de fuentes de energía no de origen fósil; y

A1B, utilización equilibrada de todo tipo de fuentes, en el supuesto de que todas las fuentes de suministro de energía y las tecnologías experimenten mejoras.

2.3.1.2. Familia de escenarios A2.

La familia de escenarios A2, describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

2.3.1.3. Familia de escenarios B1.

La familia de escenarios B1, describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

2.3.1.4. Familia de escenarios B2.

La familia de escenarios B2, describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

2.3.1.5. Escenario COMMIT.

Un escenario adicional que cabe mencionar es el COMMIT o CCC (compromiso de composición constante) y que corresponde al escenario idealizado si todos los países

cumplieran con las cuotas de emisiones de gases de efecto invernadero bajo el artículo 3 del Protocolo de Kyoto (Anexo 1). El escenario COMMIT es el escenario que supone menor concentración futura de estos gases y es una idealización de lo que sucedería si todas las naciones se comprometieran con el medio ambiente (Magaña, 2009). Este escenario se utiliza como muestra científica y no como una posibilidad. La temperatura media global y el nivel del mar continuarán debido a la inercia termal del océano. El calentamiento podría exceder 1°C y el pronóstico para el año 2400 es de 2°C a 6°C (IPCC, 2007).

2.3.2. Modelos de circulación general

De acuerdo al consenso alcanzado por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático en su cuarto informe de evaluación (IPCC, 2007), el futuro del planeta está en riesgo a menos que se actúe de forma conjunta. Por esto, gran parte de las acciones establecidas para enfrentar el cambio climático se agrupan en dos apartados: la mitigación y la adaptación. La mitigación busca reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero reduciendo su concentración en la atmósfera y con esto, reducir la amenaza de calentamiento en el planeta. La adaptación, por otro lado, busca desarrollar estrategias y acciones para disminuir la vulnerabilidad a las anomalías climáticas de regiones, grupos sociales o sectores económicos, de forma tal que los impactos negativos proyectados bajo un cambio climático sean menores o eliminados, y que incluso se puedan aprovechar las oportunidades asociadas a un nuevo clima.

Para proponer e implementar acciones de adaptación es necesario estimar los impactos potenciales del cambio climático a nivel regional o local. Para ello se requiere de establecer posibles escenarios climáticos que consideren aquéllos factores que intervienen en las condiciones climáticas y las condiciones de gases de efecto invernadero proyectadas bajo los escenarios de emisiones anteriormente descritas.

Las proyecciones sobre el clima son generalmente resueltas en la escala global utilizando el sistema completo de ecuaciones dinámicas sobre el dominio geométrico del globo terrestre usando algún tipo de representación espacial y temporal de las variables, e incluyendo en la mayor parte de los casos procesos físicos de escalas menores no representados explícitamente en las ecuaciones (Holton citado por Amador y Alfaro,

2009). Este tipo de aproximación al problema se realiza mediante los denominados Modelos Acoplados de Circulación General (MACG). Datos faltantes en el tiempo o regiones con pocos datos climáticos, introducen importantes incertidumbres en las predicciones (Amador y Alfaro, 2009).

Se han desarrollado varios MACG en todo el mundo, con diferencias en factores que influyen en el clima como la presión atmosférica en la capa superior; resolución horizontal y vertical del modelo en la atmósfera y océano; dimensión vertical oceánica; ajustes de flujos de calor y aguas en el acoplamiento de atmósfera, océano y hielo; características terrestres como humedad del suelo, vegetación y dirección de ríos; así como en el tipo de escenarios de emisión de gases de efecto invernadero que utilizan para las estimaciones. También se presentan diferencias en los parámetros climáticos que generan como temperatura media, máxima, mínima mensual o diaria, precipitación, humedad relativa, radiación, presión de vapor, etc. Todos ellos generan resultados en una cuadrícula con dimensiones que varían entre $1.1^{\circ} \times 1.1^{\circ}$ a $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ tanto para puntos en tierra firme como para puntos sobre el océano (IPCC, 2007; IPCC-DDC, 2009; Magaña, 2009).

La aplicación de estos modelos a escala regional presenta ciertos inconvenientes como son el uso de un modelo en particular puede producir errores significativos en la estimación; y la escala espacial en que se presentan los MACG, es bastante grande como para poder determinar medidas de adaptación a nivel regional. Para evitar estos inconvenientes se sugiere en el primer caso, el uso de la combinación de varios modelos, proceso conocido como ensamble multimodelo, ya que se disminuirían los errores sistemáticos que con frecuencia son flujo-dependientes; y en el segundo caso, el uso de técnicas de reducción de escala como el método de ajuste dinámico que utiliza la información de los MACG y los ajusta con la información de los modelos climáticos regionales de alta resolución; o el uso de métodos de ajuste estadísticos que mediante las salidas de los MACG e información de series de tiempo históricas, construyen escenarios climáticos para sitios individuales con resoluciones a diferente escala temporal (Amador y Alfaro, 2009).

2.3.3. Escenarios climáticos futuros en el Mundo.

Mucho se ha hecho para las proyecciones de temperatura para el siglo XXI a partir del Tercer Reporte de Evaluación del Cambio Climático del IPCC (Michaels *et al.*, 2002), que

indican un incremento de temperatura debido al aumento de emisiones de gases de efecto invernadero consistentes con el incremento poblacional y desarrollo social para ese siglo. En el cuarto reporte de evaluación sobre el cambio climático del IPCC, se realizó la proyección de temperatura y precipitación futuras, mediante el uso de un modelo de ensamble que abarcó 23 modelos de circulación general, aprobados por el IPCC (IPCC, 2007). Este ensamble utilizó los 7 escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero ya mencionados, y promediando estos resultados se obtuvieron a nivel mundial los valores de anomalías entre el período base 1980-1999 y 2090-2099, los cuales se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Anomalías de temperatura mundiales proyectadas para fines del Siglo XXI. Adaptado de IPCC, 2007.

Escenarios de emisiones	Anomalías de temperatura en °C entre los períodos 1980-1999 y 2090-2099	
	Estimación óptima	Intervalo probable
	COMMIT	0.6
B1	1.8	1.1 – 2.9
A1T	2.4	1.4 – 3.8
B2	2.4	1.4 – 3.8
A1B	2.8	1.7 – 4.4
A2	3.4	2.0 – 5.4
A1FI	4.0	2.4 – 6.4

2.3.3.1. Impactos en actividades agrícolas.

a. Zonas de trópico árido y semiárido. De acuerdo con Sivakumar *et al.* (2005), la productividad agrícola en las zonas de trópico en Asia, es sensible no solo al incremento de temperaturas, sino también a los cambios de naturaleza y características de los monzones. Las simulaciones del impacto del cambio climático utilizando modelos de simulación de cultivos, muestran que el rendimiento disminuye lo que podría traer como consecuencias serios impactos en la seguridad alimentaria. En los trópicos áridos y semiáridos de África, que ya se enfrentan a dificultades con el estrés ambiental, el cambio climático resulta en el incremento de frecuencia de sequías que colocan en gran riesgo a la agricultura. En Latinoamérica, la agricultura y los recursos hídricos son los más afectados debido al

impacto de temperaturas extremas (calor o frío excesivo) y los cambios en precipitación (sequías o inundaciones). Sobre regiones agrícolas de Asia, el calentamiento medio anual proyectado probablemente será de $1.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ en el período de los 2020's, $3.1 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ en los 2050's y de $4.6 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ en los 2080's, para las precipitaciones de verano e invierno los modelos muestran alta incertidumbre en las proyecciones futuras. El calentamiento anual futuro sobre África se proyecta en un rango de 0.2°C por década a más de 0.5°C por década, mientras que los cambios futuros para la precipitación media estacional no están bien definidos. En Latinoamérica, las proyecciones indican un ligero incremento en la temperatura y cambios en la precipitación.

b. Zonas de trópico húmedo y subhúmedo. Para las zonas de los trópicos húmedos y subhúmedos Zhao *et al.* (2005), mencionan que para África, las proyecciones indican impactos dominantes del incremento de temperatura los cuales muestran una disminución de la estación de crecimiento y una reducción de escurrimientos. Aunque el aumento de CO_2 podría incrementar la tasa fotosintética y el uso eficiente del agua en cultivos como trigo, arroz y soya, el incremento de temperaturas podría traer efectos dañinos en cultivos durante las etapas de desarrollo más sensibles, lo que llevaría a una disminución en rendimiento y calidad del grano. En el caso de Asia, los incrementos proyectados en la frecuencia y/o severidad de eventos extremos podrían exacerbar impactos adversos. Todos los escenarios climáticos apuntan a un incremento en la precipitación media anual sobre la región completa, lo que podría incrementar la frecuencia y severidad de inundaciones y la productividad agrícola sufriría pérdidas severas. Las proyecciones para Latinoamérica muestran, con un alto grado de confianza, la disminución de rendimiento para varios cultivos aún cuando los efectos directos de fertilización con CO_2 y medidas de adaptación moderada ya han sido considerados. Tal es el caso del trigo el cual tiene proyecciones del orden de hasta un 50% de disminución en el rendimiento, el maíz con disminución del rendimiento de 60% en algunas áreas, y la soya con disminuciones e incrementos en el rango de -22% a 40% en diferentes regiones.

2.3.4. Escenarios climáticos futuros en México

En el año 2007, el Instituto Nacional de Ecología en conjunto con la Universidad Autónoma de México y la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, se dieron a la tarea de establecer los escenarios climáticos futuros para el país. De acuerdo al

Informe Final de Trabajo del proyecto INE/A1-006/2007 (Magaña y Caetano, 2007), para llevar a cabo la estimación de escenarios climáticos a nivel regional, era necesario utilizar un ensamble de MCG para reducir la escala y hacer uso de herramientas estadísticas que permitieran corregir los errores sistemáticos de algunos modelos utilizados en el ensamble. Para este proyecto se hizo uso de la herramienta *Climate Predictability Tool* (CPT) (IRI, 2010), en el cual se obtuvieron varias salidas o experimentos de 10 modelos de circulación general listados en el Cuadro 4 y combinados con los 4 escenarios de emisión de gases A1B, A2, B1 y COMMIT ya explicados anteriormente.

Cuadro 4. Modelos de Circulación General utilizados para generar el ensamble de escenarios climáticos en México, (IPCC-DDC, 2009).

País de Origen	Centro de creación del Modelo	Nombre del modelo
Alemania	Max Planck Institute for Meteorology	mpi_echam5
Alemania y Corea	Meteorological Institute, University of Bonn, Germany; Meteorological Research Institute of KMA, Korea; Model and Data Group of MPI-M, Germany.	miub_echo_g
Australia	Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	csiro_mk3_0
Australia	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	csiro_mk3_5
Canadá	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis	cccma_cgcm3_1
Estados Unidos	Goddard Institute for Space Studies	giss_model_e_r
Estados Unidos	National Centre for Atmospheric Research	ncar_ccsm3_0
Japón	National Institute for Environmental Studies	miroc3_2_hires
Japón	Meteorological Research Institute	mri_cgcm2_3_2 ^a
Reino Unido	United Kingdom Meteorological Office	ukmo_hadcm3

Estos modelos fueron seleccionados considerando que aportaban el menor error posible de estimación. Para la calibración de los modelos se utilizaron los datos climatológicos de las estaciones CNA de México disponibles en el Centro de Distribución de Datos (IPCC-DDC, 2009), para el período comprendido de 1980 a 1999. Una vez establecidos los modelos se desarrolló el ensamble mediante el uso de las medianas por considerar que esta medida disminuye los sesgos y muestra los valores más probables (Magaña, 2009). La cuadrícula resultante de este proceso es de dimensiones 50 km x 50 km y con una resolución temporal mensual.

Magaña (2009) indica que bajo un escenario de menores emisiones, como lo es el A1B, los incrementos proyectados para la temperatura media anual en superficie son menores que para el escenario A2, aunque el patrón espacial que se obtiene es muy similar y tendiendo a incrementarse en la parte noroeste del país. Los mayores incrementos se esperan hacia finales del Siglo XXI y pueden alcanzar los 3.5°C entre los estados del noroeste de México, como Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Coahuila y la península de Baja California, mientras que para la parte central alcanzarán los 2.5°C y la zona este, sur y sureste con incrementos de hasta 2°C.

El caso de la precipitación es similar, ya que los resultados del ensamble son parecidos para estos dos escenarios A1B y A2. Se muestran disminuciones de precipitación hacia la parte sureste del país con anomalías de -200 mm a finales del siglo. Para el escenario A1B, se presentan zonas en la parte norte de Chihuahua y Coahuila con incrementos de precipitación del orden de 50 mm para el período 2010-2039 para ambos escenarios, pero conforme avancen los años en el escenario A2 se observan disminuciones a fines del siglo, no así para el escenario A1B que muestra un incremento constante para esos dos estados. Las partes más afectadas en la República se presentan en Veracruz, Tabasco, Yucatán y Quintana Roo y la costa de Jalisco.

La comparación de temperatura entre escenarios de emisiones muestra la importancia de la mitigación. Dependiendo de la vulnerabilidad de las regiones, un aumento superior a 2°C podría incrementar el riesgo de afectaciones a niveles muy peligrosos, principalmente para la agricultura y el manejo del agua (Magaña y Caetano, 2007).

Gay *et al.* (2004), en un estudio sobre el impacto del cambio climático sobre la producción de café en Veracruz, estimaron que para el 2050 las temperaturas para el verano se incrementarán en 2°C y lo mismo para invierno, en cuanto a la precipitación se espera para ese año una disminución de hasta 30mm anuales. Dichos valores incrementan las probabilidades de valores de temperatura mayores a la media actual y valores de precipitación menores a la media actual, de tal forma que para el 2050 la producción de café disminuiría de 549,158 a 140,000 ton considerando el escenario de emisiones A2.

Conde *et al.* (2006), por su parte, estimaron anomalías de temperatura y precipitación para el estado de Tlaxcala y su impacto en la agricultura de temporal para el cultivo de maíz. Mediante el uso de tres MCG y dos escenarios de emisión de GEI, determinaron para el año 2050 que la temperatura para el mes de julio se incrementará en 1.3°C a 2.7°C con respecto a la media actual, y que la precipitación sufrirá una disminución que puede llegar a ser de 20 mm para el mismo mes. Estas condiciones predicen mediante simulaciones, que la estación de crecimiento tiende a acortarse hasta en un 30%, mientras que el rendimiento de maíz de temporal para esta zona tiende a incrementarse hasta en un 22% debido principalmente a la disminución de heladas por incremento de temperaturas y al incremento de CO₂ establecido en los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero. Aunque los autores hacen notar que en esta zona, los impactos del evento El Niño afectan a las variables climáticas básicas, y no son considerados en los modelos de circulación general.

2.4. Características agroecológicas de algunos cultivos representativos de la Región Ciénega de Chapala.

2.4.1. El Trigo de invierno.

El trigo es una planta de tipo fotosintético C3, que se desarrolla en regiones templadas y subtropicales con una temporada fresca, seguida por una temporada cálida o relativamente cálida; regiones áridas, semiáridas, subhúmedas y húmedas con estación seca. Su ciclo vegetativo es de 100 a 130 días para siembra en primavera y de 180 a 250 días para siembra en invierno. De la siembra a la madurez requiere de 450 a 650 mm de agua, dependiendo de la variedad y del clima. Condiciones de alta humedad no le son favorables ya que propician la presencia de enfermedades fungosas. La germinación, emergencia, amacollamiento y elongación de las hojas tienen una temperatura base de 2°C pero la elongación del tallo y la fase reproductiva tienen una temperatura base sobre 6°C. Antes del espigamiento la temperatura base es de 4°C y después del espigamiento es de 9.5°C. El óptimo para fotosíntesis está entre 15° y 20°C. La temperatura umbral máxima para su desarrollo es alrededor de 25°C. El trigo de invierno requiere de un período de vernalización durante sus primeras etapas de crecimiento durante los días más largos. Los requerimientos de vernalización para las variedades de invierno, pueden ser sustituidos por un crecimiento bajo condiciones de días cortos a 21°C de temperatura diurna y 16°C de

temperatura nocturna. Temperaturas mayores a 25°C durante el llenado de grano, acortan el período y disminuyen el rendimiento. (Ruiz *et al.*, 1999).

Efectos observados por estrés abiótico.

Estrés hídrico. El trigo al igual que la gran mayoría de los cultivos, el agua es uno de los factores limitantes de su desarrollo. Garduño *et al.* (2003) y Tas y Tas (2007), indican que bajo condiciones de poca humedad, se presenta disminución en rendimiento y número de granos por m², en aquellos genotipos que sobresalen en condiciones normales de humedad, lo que sugiere seleccionar genotipos para cada condición de humedad. Kobata *et al.* (1992) por su parte, indican que el rendimiento del grano en condiciones de poca humedad, se redujo en un 33%, principalmente como resultado de la reducción en el tamaño del grano. Esta disminución en el tamaño del grano fue más marcada en los tallos secundarios que en el primario. El desarrollo de los tallos secundarios seguido a la antesis, se redujo en 84% en plantas expuestas a condiciones de sequía a temperaturas de 18°/13°C (diurna/nocturna) y en 91% en temperaturas de 27°/22°C (Wardlaw, 2002). No todos los órganos responden de manera similar a la sequía, los granos son más sensibles con un rango de potencial mátrico entre 0.46 a -0.73 MPa, seguidos por el pedúnculo expuesto, pedúnculo cubierto, glumas y el menos sensible es la hoja bandera con un rango de potencial mátrico entre -1.75 a -2.20 MPa (Wardlaw, 2002).

Estrés por temperatura. En las etapas iniciales de crecimiento del trigo, las altas temperaturas generalmente acortan el tiempo requerido para la diferenciación de órganos vegetativos y florales en las plantas, mientras que en las etapas de antesis a llenado de grano, las altas temperaturas pueden causar estrés, sobre todo cuando superan los valores críticos de crecimiento de los cultivos (Castañeda *et al.*, 2004). En trigo el aumento en 1°C en la temperatura del aire durante el crecimiento del grano, puede disminuir el rendimiento de grano en 4% (Stapper y Fischer, mencionados por Castañeda *et al.*, 2004).

En el proceso de la fotosíntesis, la inactivación de la Rubisco inducida por incrementos en la temperatura es asociada con marcados niveles de disminución de 3-PGA y moderados incrementos en RuBP, por lo que la disminución de la activación de Rubisco en plantas C3 se ha relacionado a un efecto en la Rubisco-activasa (Crafts-Brandner and Salvucci, 2002). Sojka *et al.* (1972), determinaron que en condiciones de estrés por calor y poca aireación en el suelo, se reduce el peso de la raíz y se incrementa el uso del agua por peso seco de

tejido vegetal producido, incrementándose más drásticamente cuando los períodos de falta de oxígeno se prolongan.

Mecanismos de protección contra el estrés por calor. Como respuesta del trigo al estrés por calor, la expresión del Hsp101 se incrementa al igual que en el maíz. En trigo el nivel de Hsp101 es mayor durante los inicios de la germinación y progresivamente disminuye, siendo la raíz el último órgano con presencia de esta proteína (Young *et al.*, 2001).

2.4.2. El maíz de temporal.

El maíz es una planta de tipo fotosintético C4, que se desarrolla en una amplia gama de condiciones ambientales. De la siembra a la madurez requiere de 500 a 800 mm de agua, dependiendo de la variedad y del clima. Son períodos críticos por necesidad de agua la germinación, primeras tres semanas de desarrollo y el período comprendido entre 15 días antes hasta 30 días después de la floración. Se ha encontrado que si hay un estrés por falta de agua, la baja en el rendimiento final puede ser de 6 a 13% por día en el período alrededor de la floración y de 3 a 4% por día en los otros períodos. La temperatura óptima para la germinación está entre 18° y 21°C, no se presenta germinación por debajo de los 10°C. La temperatura umbral máxima se encuentra entre los 27° y 30°C. La temperatura media óptima se encuentra entre 18° y 24°C (Benacchio, 1982).

Efectos observados por estrés abiótico.

Estrés hídrico. En el caso de estrés hídrico se han desarrollado varios estudios al respecto en México, con el fin de disminuir el daño que sufre el cultivo en la temporada de canícula (suspensión de lluvias y elevación de temperatura, ocurrida comúnmente en el mes de Agosto), que coincide con la época de floración, como lo mencionan Márquez *et al.* (2009). Se han realizado diversas investigaciones tratando de que las nuevas variedades no sólo sobrevivan en condiciones de déficit de humedad, sino que también tengan buenos rendimientos. Dentro de los procesos fisiológicos que se ven afectados en condiciones de estrés hídrico se tiene una disminución del crecimiento celular, disminución en la síntesis de proteínas, acumulación del ácido abscísico (ABA), cierre estomático, disminución en la asimilación de CO₂, disminución de la respiración y acumulación de azúcares, entre otros (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

Estrés por temperatura. En lo referente al estrés que la planta puede sufrir por incrementos de la temperatura, se ha observado que se realizan cambios en el metabolismo que resultan en la acumulación de algunos metabolitos y la reducción de otros, lo que puede alterar las rutas metabólicas y producir un desbalance difícil de corregir. Durante episodios de estrés por calor, el aminoácido no proteico ácido gamma-aminobutírico (GABA) se acumula a niveles de seis a diez veces más que en plantas que no se encuentran bajo estrés (Taiz y Zeiger, 2006).

Se ha observado que la fotosíntesis neta es inhibida a temperaturas arriba de 38°C, aunque se ve más afectada cuando la temperatura se incrementa rápidamente, esto a causa de la inactivación de la Rubisco, la cual empieza a decrecer su estado de activación a temperaturas arriba de 32.5°C y casi se inactiva completamente a 45°C (Crafts-Brandner and Salvucci, 2002).

Mecanismos de protección contra el estrés por calor. Young *et al.* (2001) confirmaron que la proteína Hsp101 del maíz, arroz y trigo, confiere un nivel de termotolerancia típico en monocotiledóneas. Mencionan que los altos niveles iniciales de Hsp101 en la plúmula, disminuye conforme se inicia la emergencia. Bajo condiciones normales (sin estrés), la proteína Hsp101 está presente en la región meristemática vegetativa en niveles bajos a moderados y disminuye durante el subsecuente desarrollo foliar. La proteína Hsp101 es abundante en la etapa joven de la inflorescencia masculina y es altamente inducida por calor, disminuyendo su nivel conforme avanza el desarrollo de la panoja hasta que no hay ninguna respuesta al calor durante toda la antesis. En la mazorca, el nivel de Hsp101 se incrementa durante el desarrollo inicial y está presente en los estilos en un nivel similar. A pesar de estos niveles, el Hsp101 no responde al calor en el endospermo y el embrión.

2.4.3 El agave tequilero como cultivo semiperenne.

El agave *Agave tequilana* Weber, es una planta semiperenne y en cuanto a tipo fotosintético pertenece a las plantas CAM (por sus siglas en inglés *crassulacean acid metabolism*), metabolismo del ácido crasuláceo, lo que les permite fijar el CO₂ atmosférico principalmente en las noches, cuando las temperaturas son menores a las diurnas, disminuyendo con esto la pérdida de agua por transpiración hacia la atmósfera (Nobel *et*

al., 1998). Se desarrolla en ambientes con precipitación anual que va de 700 a 1000 mm, con una atmósfera seca a moderadamente seca. El agave desarrolla raíces finas durante la temporada lluviosa, con el objetivo de captar la mayor cantidad de humedad y nutrimentos del suelo, dichas raicillas se secan al final del verano al no haber más humedad en el suelo (Pimienta y Ramírez, 2001). Presenta una tolerancia a bajas temperaturas, pero la absorción celular se reduce a la mitad cuando éstas llegan a -6 °C. Por otro lado la hoja de este agave puede tolerar temperaturas de hasta 55 °C, pero presentando síntomas de estrés como reducción de fotosíntesis e incremento de la respiración (Pimienta y Ramírez, 2001). La asimilación neta diaria de CO₂ sobre períodos de 24 horas para hojas de esta especie es mayor para temperaturas diurna/nocturna de 15°C/5°C, disminuyendo 10% a 25°C/15°C y 75% a 35°C/25°C. (Nobel, 1998; Ruiz, 2007).

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1. Hipótesis.

3.1.1. La climatología en la Región Ciénega de Chapala ha sufrido cambios estadísticamente significativos a escala local, desde el período 1961-1990 al período 1977-2006.

3.1.2. Los cambios climáticos, impactan de manera significativa el desarrollo de especies agrícolas en la zona.

3.1.3. El cambio climático impactará de manera considerable las especies agrícolas actualmente cultivadas en la Región Ciénega de Chapala.

3.2. Objetivos.

3.2.1. Analizar de manera retrospectiva el clima de la Región Ciénega de Chapala

- Identificar tendencias en los patrones de temperatura y precipitación.
- Identificar la serie de datos representativa de la climatología regional actual

3.2.2. Estimar los escenarios climáticos con base en modelos de circulación general en el período 2000-2099 para la Región Ciénega de Chapala.

- Estimar escenarios de parámetros climáticos mensuales
- Estimar escenarios de parámetros agroclimáticos para los ciclos PV, OI y anual

3.2.3. Evaluar el impacto de las variaciones climáticas identificadas, sobre algunos sistemas productivos regionales de los ciclos agrícolas primavera-verano, otoño-invierno y semiperenne.

3.2.4. Establecer medidas de adaptación a los impactos del cambio climático en la Región Ciénega de Chapala.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Materiales.

4.1.1 Área de estudio.

4.1.1.1. Ubicación.

La Región IV del estado de Jalisco, o Región Ciénega de Chapala, se localiza en el centro-este del Estado de Jalisco, México, entre los 20° 02' y 20° 41' de latitud Norte y 101° 59' y 103° 32' de longitud Oeste, alrededor del Lago de Chapala, el lago natural más grande de México (Figura 3).

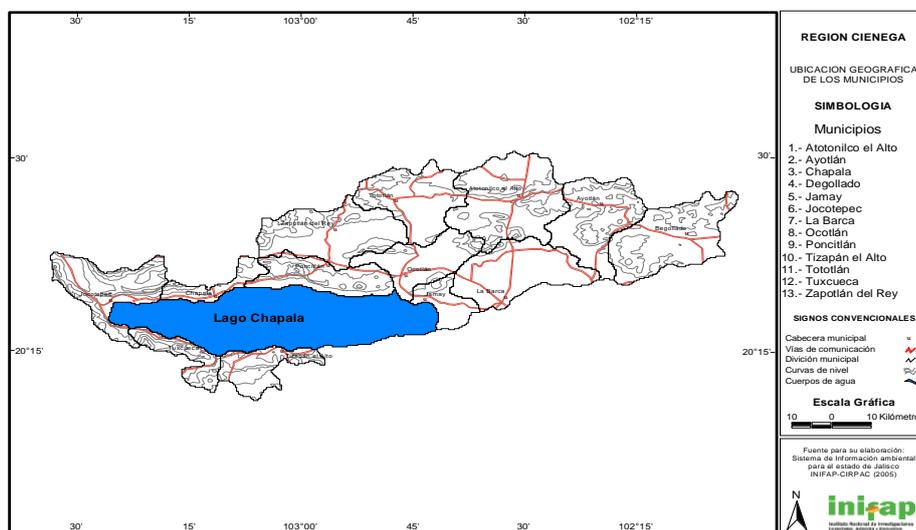


Figura 3. Ubicación geográfica municipal de la Región Ciénega de Chapala.

Esta región está formada por municipios de Atotonilco el Alto, Ayotlán, Degollado, La Barca, Chapala, Jamay, Jocotepec, Ocotlán, Poncitlán, Tizapán el Alto, Tototlán, Tuxcueca y Zapotlán del Rey.

4.1.1.2. Clima.

La climatología en la Región Ciénega de Chapala, ha tenido variaciones tanto a nivel temporal como espacial. Dichas variaciones han respondido a la fisiografía de la zona que cuenta con zonas planas, lomeríos y cerros, altitudes que van de los 1520 a los 2600 msnm y aunque se incluye en esta región al lago de Chapala, cada una de las estaciones

climatológicas recibe los efectos de este cuerpo de agua de manera diferente, ya que sus distancias varían entre 0.5 a 36 km entre trayectos libres de obstáculos y trayectos con obstáculos tales como cerros de diferentes alturas. En la Ciénega de Chapala se presentan dos tipos climáticos y sus subtipos de acuerdo a la clasificación Köppen-García (García, 2004) que son el clima Semicálido Subhúmedo (A)Ca(w₁)w(e)g y Templado Subhúmedo Ca(w₀)w(e)g, cubriendo una superficie de 80% y 20% respectivamente.

4.1.1.3. Suelos.

Se presentan los siguientes tipos de suelos de acuerdo a la clasificación FAO: en la parte norte se tienen las variantes Luvisol férrico y Feozem háplico; hacia el centro y este se tienen Feozem háplico y Vertisol pélico; hacia el oeste se tienen Feozem lúvico, Vertisol crómico, Vertisol pélico y Litosol; y hacia el suroeste se presentan suelos Feozem háplico, Luvisol vértico y Vertisol pélico (Ruiz *et al.*, 2005).

4.1.1.4. Vegetación.

Presenta una gran diversidad de especies, tanto inducidas como naturales (Cuadro 5).

Cuadro 5. Tipos de vegetación en la Región Ciénega de Chapala.

Municipio	Tipos de vegetación *	Algunas especies dominantes	Algunas especies Cultivadas	Agricultura **
Atotonilco el Alto	MS, VSA, VSH, AV	<i>Byrsonima crassifolia</i>	Maíz, Agave tequilero	T, R, A
Ayotlán	MS, BE, VSA, H	<i>Caesalpinia sp.</i> , <i>Cedrela odorata</i>	Lima, Maíz, Sorgo, Caña de azúcar, Agave	R, T, A
Degollado	MS, BE, I, VSA	<i>Celaenodendron mexicanum</i> , <i>Conostegia xalapensis</i>	Maíz, Sorgo, Garbanzo, Agave	T, R, A, S, P
La Barca	VSH, BC	<i>Guatteria anomala</i> , <i>Heliocarpus sp.</i> y <i>Jacquinia sp.</i>	Maíz, Sorgo, Trigo, Camote	T, R, A
Chapala	MS, BE, I	<i>Leucaena sp.</i>	Maíz, Sorgo	T, A
Jamay	MS, BE, I, VH	<i>Licania arborea</i>	Maíz, Sorgo, Trigo, Arroz, Jitomate	T, R, A
Jocotepec	MS, BE, I	<i>Hymenaea courbaril</i> , <i>Ipomoea sp.</i> , <i>Leucaena sp.</i>	Maíz, Jitomate, Sorgo, Agave	T, R, A
Ocotlán	MS, I	<i>Heliocarpus sp.</i> , <i>Acacia pennatula</i> , <i>Bursera fagaroides</i>	Maíz, Trigo, Sorgo, Alfalfa	T, R, A
Poncitlán	MS, BE, I	<i>Leucaena sp.</i>	Maíz, Sorgo, Trigo	T, A
Tizapán el Alto	MS, BE, I	<i>Orbignya guacuyule</i> , <i>Acacia pennatula</i>	Maíz, Hortalizas, Sorgo	R, T, A
Tototlán	MS, I, VH	<i>Cassia sp.</i>	Maíz, Sorgo, Garbanzo	T, R, A, P
Tuxcueca	MS, BE, I	<i>Leucaena sp.</i>	Maíz, Sorgo, Garbanzo	T, A
Zapotlán del Rey	MS, BE, I	<i>Ceiba sp.</i> , <i>Croton sp.</i> , <i>Acacia pennatula</i>	Maíz, Sorgo, Trigo	T, R, A

*Tipos de vegetación: MS= matorral subtropical, VSA= Vegetación secundaria arbustiva, VSH= Vegetación secundaria herbácea, AV= Área sin vegetación, BE= Bosque de encino, I= Pastizal inducido, H= Huizachal, BC= Bosque cultivado, VH= Vegetación halófila.

** Agricultura: T=Temporal, R=Riego, A=Anual, S= Semipermanentes, P= Permanentes.

Tomado de la carta de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000 INEGI. 1986.

4.1.1.5. Actividad económica.

El área de estudio representa el 6.1% de la superficie total del Estado de Jalisco y el 7.2% de la población del mismo, de la cual el 6.5% son personas económicamente activas. Las principales actividades económicas son la agricultura, ganadería y la industria (SEDEUR, 2001). La producción agrícola es de gran importancia porque representa para el estado el 23.5% del valor de su producción y ocupa el 36% de la superficie total de la región con cosechas de maíz, trigo, hortalizas y legumbres y una producción importante de agave. La actividad agrícola se realiza principalmente en tierras de temporal, en función de la disponibilidad de agua, tipo de suelo y pendiente topográfica menor al 8%; pero la agricultura de riego ocupa una superficie considerable en la región, tal como se muestra en el Cuadro 6. El 6% de la producción ganadera estatal corresponde a esta región con ganado vacuno, porcino y caprino.

Cuadro 6. Superficie dedicada a la actividad agrícola en los municipios de la Región Ciénega de Chapala.

Municipio	Superficie agrícola en hectáreas			Total municipal
	Riego	Temporal	Total	
Atotonilco el Alto	3,419	22,718	26,137	63,815
Ayotlán	6,328	11,809	18,137	51,857
La Barca	14,217	17,339	31,556	37,948
Chapala	729	1,283	2,012	24,222
Degollado	1,588	8,438	10,026	30,505
Jamay	3,995	7,223	11,218	21,690
Jocotepec	498	10,781	11,279	38,446
Ocotlán	2,934	12,815	15,749	39,549
Poncitlán	3,838	6,116	9,954	57,233
Tizapán el Alto	1,670	6,571	8,241	41,191
Tototlán	4,207	8,132	12,339	29,285
Tuxcueca	78	2,331	2,406	24,802
Zapotlán	4,186	9,750	13,936	32,090
Total regional	47,687	125,306	172,993	4,926,336

Fuente: Síntesis informativa del Distrito de Desarrollo Rural 06 La Barca. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Delegación Jalisco. 1995.

En esta zona se encuentra el lago de Chapala que tiene actividad turística y piscícola de gran importancia. En cuanto a la industria de transformación la aportación es del 4.3%,

siendo la industria mueblera la que está en primer lugar en la región. También hay producción de granos y forraje, leche, tequila, textiles, hortalizas y productos frutales.

4.1.1.6. Estaciones climatológicas.

En México, la red climatológica de la Comisión Nacional del Agua, provee desde 1901 (SMN, 2008), con la información climatológica básica, esto es, temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria, precipitación diaria y evaporación diaria, aunque no todas las estaciones actuales se iniciaron en esa fecha.

Se contó con la información climática de 10 estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua (CNA), de las cuales se presenta su localización geográfica y altitudinal en el Cuadro 7, y su distribución espacial en la Figura 4.

Cuadro 7. Información de las 10 estaciones climatológicas analizadas de la Región Ciénega de Chapala.

Estación	Municipio	Longitud W	Latitud N	Altitud Msnm	Distancia más corta a la ribera del Lago de Chapala en km	Clave estación
Atotonilco	Atotonilco el Alto	102°31'	20°33'	1606	36.459	14017
Chapala	Chapala	103°12'	20°17'	1527	0.679	14040
El Fuerte	Ocotlán	102°46'	20°18'	1551	2.034	14047
Jocotepec	Jocotepec	103°26'	20°17'	1548	2.353	14077
La Barca	La Barca	102°32'	20°17'	1558	18.85	14355
La Hierbabuena	Tototlán	102°45'	20°35'	1588	34.346	14090
Poncitlán	Poncitlán	102°55'	20°23'	1530	17.435	14111
Tizapán El Alto	Tizapán El Alto	103°02'	20°10'	1534	0.923	14189
Tototlán	Tototlán	102°47'	20°32'	1545	27.605	14154
Tuxcueca	Tuxcueca	103°12'	20°10'	1525	0.519	14156



Figura 4. Distribución de las 10 estaciones climáticas de la Comisión Nacional del Agua en la Región Ciénega de Chapala.

4.2 Métodos.

El desarrollo de la metodología para lograr los objetivos propuestos en esta investigación, se presenta de manera resumida en el diagrama de la Figura 5, el cual permite vislumbrar de manera general los procesos utilizados.

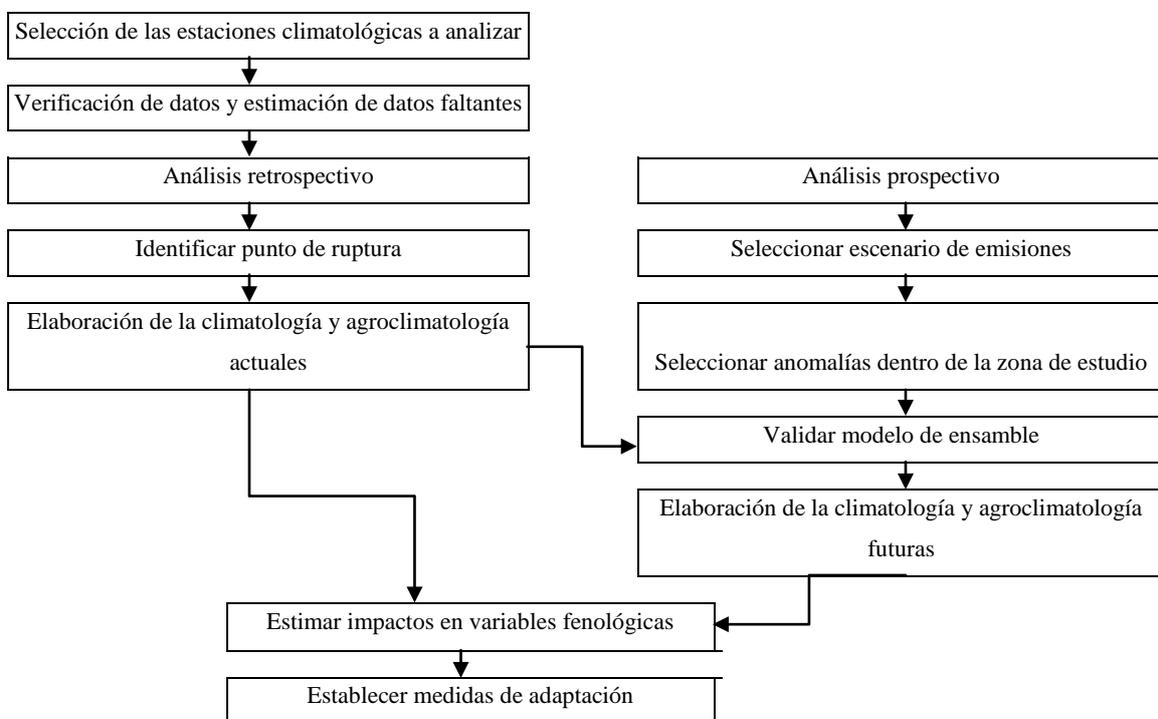


Figura 5. Diagrama que muestra cómo se abordó metodológicamente la investigación.

4.2.1. Metodología utilizada en la determinación de parámetros climáticos, agroclimáticos y fenológicos analizados en esta investigación.

En cualquier tipo de investigación referente al clima y agroclima de una región, y su impacto sobre variables fenológicas es necesario determinar varios parámetros que permitan conformar de manera completa tanto la climatología como la agroclimatología de la zona de estudio. En la presente investigación se utilizó la siguiente metodología con esta finalidad, tanto en el análisis retrospectivo como en el análisis prospectivo.

a. Parámetros relacionados con la temperatura del aire.

a.1. Climáticos.

Temperatura máxima en un período dado (T_x): Se utilizaron los valores de las temperaturas máximas diarias de las estaciones climatológicas analizadas. Con estos valores se determinaron valores de temperatura máxima mensual como el promedio en el mes de las temperaturas máximas diarias; temperatura máxima anual, como el promedio de las temperaturas máximas mensuales; y temperatura máxima normal anual, como el promedio de las temperaturas máximas anuales para los años correspondientes a una serie de tiempo determinada.

Temperatura mínima en un período dado (T_i): Se utilizaron los valores de las temperaturas mínimas diarias de las estaciones climatológicas analizadas. Con estos valores se determinaron valores de temperatura mínima mensual como el promedio en el mes de las temperaturas mínimas diarias; temperatura mínima anual, como el promedio de las temperaturas mínimas mensuales; y temperatura mínima normal anual, como el promedio de las temperaturas mínimas anuales para los años correspondientes a una serie de tiempo determinada.

Temperatura media en un período dado (T_m): Se utilizaron los valores de las temperaturas medias diarias de las estaciones climatológicas analizadas. Con estos valores se determinaron valores de temperatura media mensual como el promedio en el mes de las temperaturas medias diarias; temperatura media anual, como el promedio de las temperaturas medias mensuales; y temperatura media normal anual, como el promedio de las temperaturas medias anuales para los años correspondientes a una serie de tiempo determinada.

Oscilación térmica en un período dado (Ot): Se obtuvo como la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima mensual, anual o normal, según se requiera.

a.2. Agroclimáticos y fenológicos.

Horas frío: Obtenidas mediante el promedio de los valores resultantes de los métodos Da Mota y Weinberger (Ortiz, 1987). Valores negativos del número de horas frío se igualan a cero.

$$\text{HFA} = 2124.85 - 125.23 \left(\frac{T_{m_{12}} + T_{m_1}}{2} \right) \quad \text{Método de Weinberger}$$

$$\text{HFA} = \sum_{i=11,12,1,2} 485.1 - 28.52T_{m_i} \quad \text{Método de Da Mota}$$

Unidades calor UC: Mediante el método de grados día de desarrollo (Flores, 1994; Mavi y Tupper, 2004)

$$\text{GDD} = \sum \left[\left(\frac{T_x + T_i}{2} \right) - T_{\text{base}} \right]$$

Donde: T_x , es la temperatura máxima diaria

T_i , es la temperatura mínima diaria

Si $T_x > T_{\text{umbral}}$, $T_x = T_{\text{umbral}}$.

Si $T_i < T_{\text{base}}$, $T_i = T_{\text{base}}$

Las temperaturas umbral y base corresponden a las temperaturas cardinales de cada cultivo, para trigo son 25 y 5°C y para maíz 35 y 10°C, respectivamente.

Número de días siembra-floración (S-F) y número de días floración-madurez fisiológica (F-M). La determinación de estas variables fenológicas se realiza contabilizando los días transcurridos desde la siembra hasta completar los GDD requeridos para llegar a la etapa fisiológica (Flores, 1994). En esta investigación se manejaron los requerimientos térmicos específicos para las variedades comerciales de trigo y maíz, utilizadas en la zona de estudio y descritas más adelante en el apartado 4.2.4.

Número de días con temperatura mínima menor a la temperatura base del cultivo y número de días con temperatura máxima mayor a la temperatura umbral del cultivo. Se obtienen sumando el número de días del ciclo agrícola en que se presentan estas condiciones. Estos valores dependen de las temperaturas cardinales de cada especie agrícola y permiten identificar áreas potenciales para cada cultivo en base a la temperatura. Para estimaciones de estos parámetros se hace uso del Modelo Gompertz (Wheldon, 1988) utilizado para representar el comportamiento de variables en el tiempo. El modelo se representa como:

$$Y = Ae^{-Be^{-kt}}$$

Donde: A representa el límite de la asíntota

B , indica el desplazamiento en x

k , es la tasa de crecimiento en la escala de x

t , es la variable en el tiempo

Temperatura diurna y temperatura nocturna (T_d y T_n). Obtenidas mediante los modelos siguientes desarrollados por Villalpando (Ruiz *et al.*, 2002):

$$T_n = T_{mi} - \frac{[(T_x - T_i)(11 - T_o)]}{4(12 - T_o)\text{Sen}\left[\pi\frac{11 - T_o}{11 + T_o}\right]}$$

$$T_d = T_{mi} + \frac{[(T_x - T_i)(11 - T_o)]}{4(12 - T_o)\text{Sen}\left[\pi\frac{11 - T_o}{11 + T_o}\right]}$$

Donde: T_n , es temperatura nocturna

T_d , es temperatura diurna

T_{mi} , es la temperatura media diaria

T_x , es la temperatura máxima en el día

T_i , es la temperatura mínima en el día

T_o , es la diferencia $12 - 0.5N$ (Donde N es el fotoperíodo promedio anual)

b. Parámetros relacionados con la precipitación pluvial.

b.1. Climáticos.

Precipitación en un período dado (P_p): se utilizaron los valores de la precipitación diaria de cada estación climatológica analizada. Con estos valores se obtuvieron: precipitación acumulada mensual, como la suma de las precipitaciones diarias en el mes; precipitación

acumulada anual, como la suma de las precipitaciones en los doce meses del año; y, precipitación acumulada normal anual, como el promedio de la precipitación acumulada anual para los años correspondientes a la serie de tiempo requerida.

b.2. Agroclimáticos.

Evapotranspiración de referencia: Debido a la falta de información suficiente en las estaciones climatológicas de la CNA no fue posible estimar la evapotranspiración potencial con el modelo Penman-Monteith como lo recomiendan Allen *et al.* (2006), en su lugar se estimó la evapotranspiración de referencia con el modelo del Tanque evaporímetro (Allen *et al.*, 2006) para lo cual fue necesario estimar los coeficientes K_{pan} para cada estación climatológica de la zona de estudio.

$$ET_o = E * K_{pan} \quad \text{Modelo del Tanque evaporímetro}$$

Donde: ET_o , es la evapotranspiración de referencia en $mm \text{ día}^{-1}$

E , es la evaporación diaria en $mm \text{ día}^{-1}$

K_{pan} , es el coeficiente del tanque evaporímetro el cual se describe a detalle en Allen *et al.* (2006)

Los valores del coeficiente K_{pan} utilizados en esta investigación se muestran en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Valores de los coeficientes K_{pan} para cada estación climatológica.

Mes	Atotonilco	Chapala	El Fuerte	Jocotepec	La Hierbabuena	Poncitlán	Tototlán	Tuxcueca	Tizapán el Alto	La Barca
Ene	0.71	0.69	0.71	0.72	0.76	0.72	0.76	0.68	0.66	0.69
Feb	0.72	0.68	0.69	0.71	0.73	0.70	0.73	0.67	0.64	0.70
Mar	0.70	0.71	0.69	0.72	0.75	0.65	0.75	0.66	0.62	0.64
Abr	0.69	0.68	0.67	0.67	0.68	0.63	0.69	0.65	0.62	0.61
May	0.70	0.67	0.70	0.69	0.69	0.58	0.69	0.63	0.60	0.59
Jun	0.78	0.68	0.77	0.73	0.76	0.65	0.77	0.68	0.68	0.64
Jul	0.80	0.79	0.81	0.79	0.80	0.74	0.81	0.76	0.75	0.72
Ago	0.81	0.80	0.78	0.83	0.86	0.80	0.86	0.77	0.74	0.77
Sep	0.80	0.81	0.78	0.83	0.83	0.79	0.84	0.78	0.74	0.80
Oct	0.79	0.79	0.79	0.80	0.80	0.79	0.80	0.78	0.78	0.79
Nov	0.78	0.77	0.77	0.79	0.80	0.78	0.80	0.76	0.75	0.78
Dic	0.74	0.73	0.76	0.76	0.87	0.78	0.87	0.71	0.71	0.77

Para realizar las estimaciones de la evapotranspiración de referencia en los escenarios futuros se determinó utilizar el modelo de Hargreaves (Allen *et al.*, 2006) y se ajustó al modelo del Tanque evaporímetro.

$$ET_o = 0.0023(T_{mi} + 17.8)(T_x - T_i)^{0.5} Ra \quad \text{Modelo Hargreaves}$$

Donde: ET_o , es la evapotranspiración de referencia en mm día^{-1}

T_{mi} , es la temperatura media diaria

T_x , es la temperatura máxima diaria

T_i , es la temperatura mínima diaria

Ra , es la radiación extraterrestre en mm día^{-1}

Evapotranspiración de cultivo y requerimientos hídricos: Se refiere a la evapotranspiración generada por un cultivo en particular (Allen *et al.*, 2006).

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Donde: ET_c , es la evapotranspiración de un cultivo en particular

ET_o , es la evapotranspiración de referencia obtenida por alguno de los métodos antes mencionados.

K_c , es el coeficiente de cultivo que depende del tipo de cultivo y su etapa de crecimiento (Allen *et al.*, 2006).

Para la presente investigación en la determinación de valores de ET_c para maíz se siguió la metodología propuesta por FAO (Brouwer y Heibloem, 1986). Para los valores K_c de las etapas: inicial, desarrollo vegetativo, media o floración y etapa final o maduración, se hizo uso del modelo Hargreaves descrito por García (1979), en el cual se considera la relación del coeficiente de cultivo con el desarrollo. Este modelo es $k_c = -0.01335 + 0.04099C - 0.000402C^2$, donde C es el desarrollo del cultivo en días. Se asignaron los porcentajes de 16, 28, 33 y 23% del ciclo total para cada etapa del cultivo y con esto se determinaron los coeficientes K_c de cada etapa y se estimaron sus requerimientos hídricos por mes y totales.

Número de meses húmedos. Término utilizado en la clasificación del clima del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Ruiz *et al.*, 2004), derivado del concepto de mes húmedo de Troll y Paffen. Es determinado como el número de meses en el año en los que la precipitación acumulada mensual es igual o mayor

a la evapotranspiración acumulada mensual, sumando al final los meses que cumplen esta característica en el año.

Cociente P/ETP. Este cociente establecido por el *United Nations Environmental Programme* (UNEP) descrito en Williams y Balling (1996), cuantifica el grado de aridez o humedad del suelo en una localidad determinada.

$$\text{Cociente P/ETP} = \frac{Pp \text{ anual}}{ETP \text{ anual}}$$

Las categorías de este sistema de clasificación se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Categorías establecidas para el Cociente C/ETP por UNEP (Ruiz *et al.*, 2004).

Zona climática	Cociente P/ETP
Hiperárida	< 0.05
Árida	0.05 – 0.20
Semiárida	0.21 – 0.50
Subhúmeda seca	0.51 – 0.65
Subhúmeda húmeda	0.66 – 0.99
Húmeda	>0.99

Estación de crecimiento (EC). La estación de crecimiento de un cultivo corresponde a la etapa del cultivo con mayores requerimientos hídricos y que está delimitada por la relación entre la precipitación acumulada y los valores de la evapotranspiración de cultivo para las etapas inicial y final, medida en días julianos (Allen *et al.*, 2006).

Inicio de la estación de crecimiento: cuando $P \geq ETc$ inicial

Fin de la estación de crecimiento: cuando $P \leq ETc$ final

Los valores de ETc utilizados para estimar inicio y fin de la estación de crecimiento, fueron calculados con los Kc de 0.5 y 0.33 de acuerdo con lo indicado por FAO (1997), como promedios de los Kc de varios cultivos, con lo que se establece un período húmedo para el crecimiento de cualquier cultivo de temporal.

Balance hídrico en la estación de crecimiento húmeda. Para la estimación del balance hídrico en el período húmedo de la zona de estudio, se utilizó la metodología del balance hídrico simplificado descrita en Martelo (1997) y Ereño (2009). Se tomaron como ETo los valores de ETP calculados con el método Hargreaves y ajustados a Penman-Monteith. Como valores de ETc para el cultivo de maíz, se tomaron los factores de Kc de las cuatro etapas fisiológicas descritas en por FAO (Brouwer y Heibloem, 1986). Las etapas de maíz y sus coeficientes de cultivo son: etapa inicial (desde siembra hasta 10% de emergencia, 0.4; etapa de desarrollo (desde 10% de emergencia hasta inicio de floración, 0.8; etapa intermedia (desde floración hasta formación del grano), 1.15; y, etapa de terminación (desde formación de grano hasta madurez fisiológica), 0.7. Se utilizó como valor de capacidad de almacenamiento de humedad del suelo el valor determinado para la zona de estudio mediante la metodología descrita en el siguiente apartado.

Capacidad de almacenamiento de humedad del suelo. El valor de capacidad de almacenamiento de humedad del suelo se obtuvo con las imágenes generadas en IDRISI (Eastman, 2006) a partir del diagnóstico del recurso suelo en la zona de estudio mediante un muestreo intensivo del suelo en el que se determinó capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente y calculado a una profundidad de 60 cm como profundidad promedio para el desarrollo radicular del maíz.

$$CAHS = \frac{(HA)(Ps)(Da)}{10}$$

Donde: CAHS, es la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo en mm

HA, humedad aprovechable, calculada como contenido de humedad a capacidad de campo menos contenido de agua a punto de marchitez permanente en el suelo, en %

Ps, profundidad del suelo en cm

Da, densidad aparente del suelo en gr cm^{-3}

4.2.2. Análisis retrospectivo de la climatología de la Región Ciénega de Chapala.

4.2.2.1. Identificación de tendencias en los patrones de temperatura y precipitación.

Debido a que las estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua sólo reportan los datos diarios de temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media, precipitación y evaporación, fue necesario realizar la estimación de otros parámetros

climatológicos importantes para la investigación. Para ello se utilizaron los métodos descritos en el apartado 4.2.1.

De estas estaciones se trabajaron las variables climáticas de temperatura mínima y temperatura máxima, tanto mensual como anual; precipitación acumulada mensual y anual; y evaporación mensual; así mismo se trabajaron imágenes en el software IDRISI Andes 15.0 (Eastman, 2006), todas ellas obtenidas del SIG de INIFAP (Ruiz *et al.*, 2003). Dicha información abarca el período desde 1961 hasta 2006.

4.2.2.2. Identificación de cambio de tendencia y serie de datos representativa de la climatología regional actual.

Para determinar cambios en las tendencias de los parámetros de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación acumulada en la Región Ciénega de Chapala, se procedió a realizar la prueba de detección de ruptura de la serie con el método *Standard Normal Homogeneity Test* (SNHT) de Alexandersson (Alexandersson y Moberg, 1997) para cada una de las estaciones meteorológicas y para la Región Ciénega de Chapala.

$$T(k) = k\bar{z}_1^2 + (N - k)\bar{z}_2^2, \quad k = 1, 2, \dots, N$$

Donde:

$T(k)$, valor de prueba SNHT

N , número de años de la serie

k , es cada fila de valores iniciando en 1, que se utilizarán para formar las subseries. La subserie se forma de la fila 1 y va incrementando de 1 en 1.

\bar{z} , promedio de los valores estandarizados en la subserie k obtenidos como

$$z_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k z_i \qquad z_2 = \frac{1}{N - k} \sum_{i=k+1}^N z_i$$

Prueba de rechazo de H_0 : valor máximo $T(k) >$ valor crítico $T(\alpha, N)$

Para la determinación de la serie de datos representativa de la climatología de la Región Ciénega de Chapala, se realizó una prueba de comparación de medias de acuerdo a la metodología descrita por Mendenhall y Sincich (1997), entre la serie de datos 1961-1990 y la última serie de 30 años 1977-2006.

Estadístico de prueba:

$$t = \frac{(y_1 - y_2)}{\sqrt{s_p^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

Donde:

y_1 y y_2 , son las medias de las poblaciones

s_p^2 , es la varianza promedio

n_1 y n_2 , es el tamaño de las poblaciones

Siguiendo la recomendación de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1983), se seleccionó la serie que representara de manera más confiable la climatología de la zona de estudio generando la climatología actualizada para la Región Ciénega de Chapala, así como para las estaciones climatológicas que la conforman y desarrollando las clasificaciones de los sistemas Köppen-García, UNEP e INIFAP utilizando las metodologías descritas en García (2004) y Ruiz *et al.* (2004).

Una vez establecida la climatología actual de la zona de estudio se procedió a la elaboración de la agroclimatología actual, así como las estimaciones para las variables fenológicas utilizando para ello la metodología indicada en el apartado 4.2.1.

4.2.3. Escenarios climáticos para el período 2007-2099 en la región de estudio.

Para la estimación de posibles escenarios climáticos para la región de estudio, se utilizó la base de datos de anomalías mensuales para temperatura media y precipitación acumulada obtenidas del modelo ensamble (de 10 modelos de circulación general) para el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero A2 de acuerdo al IPCC (2007), elaborado por la UNAM (Magaña y Caetano, 2007), el cual se explica a detalle en el capítulo de Antecedentes. De los resultados a nivel nacional obtenidos por este ensamble, se extrajeron los valores de anomalías de temperatura media mensual y anomalías de precipitación acumulada mensual correspondientes a la Región Ciénega de Chapala. Dichas anomalías fueron ajustadas a los valores climatológicos representativos de la región de estudio para temperatura media mensual y precipitación acumulada mensual, de acuerdo al período resultante en el punto 5.2.2 de este capítulo correspondiente a la climatología representativa de la región de estudio.

4.2.3.1. Validación del modelo ensamble.

Como se mencionó anteriormente, el modelo utilizado para la generación de base de datos de las anomalías para temperatura media y precipitación acumulada, desarrollado por la UNAM, genera los escenarios a partir del año 2000, por lo que se determinó realizar la validación de este modelo en la región de estudio, para el período 2000-2006 del cual se tiene información referente a los parámetros climáticos mencionados. El área utilizada para este proceso abarcó 7 puntos de la cuadrícula generada para México, para lo que se seleccionaron las estaciones climatológicas de la CNA que se encontraran sobre o muy cercanas al punto de cuadrícula y que contaran con suficiente información para el período de tiempo mencionado anteriormente. Los puntos de la cuadrícula de la UNAM se lograron empatar con una estación, encontrándose también puntos que se empataron con dos estaciones. En el Cuadro 10 se observan tanto los puntos de la cuadrícula como las estaciones climatológicas utilizadas en este proceso.

Cuadro 10. Localización de los puntos de la cuadrícula y las estaciones climatológicas, utilizados en el proceso de validación del modelo generado por la UNAM.

CUADRÍCULA UNAM			ESTACIONES CNA					
No.	LONGITUD (Oeste)	LATITUD (Norte)	CLAVE	ESTACIÓN	MUNICIPIO	ESTADO	LONGITUD (Oeste)	LATITUD (Norte)
12	103° 15'	20° 15'	14040	Chapala	Chapala	Jalisco	103°12'	20°17'
13	102° 45'	20° 15'	14047	El Fuerte	Ocotlán	Jalisco	102°46'	20°18'
19	102° 15'	20° 45'	14060	El Tule	Arandas	Jalisco	102°26'	20°43'
13	102° 45'	20° 15'	14075	Jamay	Jamay	Jalisco	102°43'	20°19'
19	102° 15'	20° 45'	14076	Jesús María	Jesús María	Jalisco	102°13'	20°36'
18	102° 45'	20° 45'	14087	La Red	Tepatitlán de Morelos	Jalisco	102°50'	20°43'
12	103° 15'	20° 15'	14156	Tuxcueca	Tuxcueca	Jalisco	103°12'	20°10'
11	103° 45'	20° 15'	14168	Zacoalco de Torres	Zacoalco de Torres	Jalisco	103°35'	20°14'
17	103° 15'	20° 45'	14169	Zapopan	Zapopan	Jalisco	103°22'	20°43'
14	102° 15'	20° 15'	16141	Yurécuaro	Yurécuaro	Michoacán	102°14'	20°20'

Se correlacionaron los valores climáticos en cada punto detectado, los valores observados correspondientes a la climatología 2000-2006 y los valores esperados calculados sumando el valor de anomalía de la base de datos UNAM al valor de la climatología 1980-1999 obtenida de la base de datos INIFAP. En el caso de que se contaran con dos estaciones climatológicas para un punto de la cuadrícula, el valor de la climatología 1980-1999 se obtuvo promediando los valores de las dos estaciones.

4.2.3.2. Generación de los escenarios para temperatura media mensual y precipitación acumulada mensual.

Para la generación de los escenarios futuros, se seleccionaron las mismas 10 estaciones climáticas CNA de la Región Ciénega de Chapala que previamente fueron analizadas en el estudio retrospectivo. Se tomó como referencia la climatología representativa de la zona 1977-2006 y se ajustó con la climatología base de los modelos de circulación general, esto es, la correspondiente al período 1980-1999. Se calcularon los valores de temperatura media mensual y de precipitación acumulada mensual para cada mes en los años 2000 a 2099, mediante la fórmula de ajuste:

$$\text{Valor del parámetro} = \text{Valor}_{(1977-2006)} - \text{Valor}_{(1980-1999)} + \text{Anomalía}_{(\text{Ensamble})}$$

Se generaron gráficas lineales que cuentan con los valores de temperatura media anual y de precipitación acumulada anual para los dos períodos, 1977-2006 y 2007-2099, mediante EXCEL (Microsoft Inc., 2007) así como las imágenes raster de los dos parámetros para algunos años seleccionados, elaborados con IDRISI (Eastman, 2006).

4.2.3.3. Generación de los escenarios para temperatura mínima mensual y temperatura máxima mensual.

Se realizó un análisis de autocorrelación para las series de temperatura mínima mensual y temperatura máxima mensual de los valores observados en la zona de estudio, con el objetivo de determinar la presencia de estacionalidad utilizando para ello la Prueba de Durbin-Watson. Para la estimación de los parámetros de temperatura máxima mensual y temperatura mínima mensual se hizo uso del modelo trigonométrico (Bowerman, 2007) representado como:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{L}\right) + \beta_3 \text{cos}\left(\frac{2\pi t}{L}\right) + \beta_4 \text{sen}\left(\frac{4\pi t}{L}\right) + \beta_5 \text{cos}\left(\frac{4\pi t}{L}\right) + \varepsilon_t$$

Donde:

y_t , representa el logaritmo natural del parámetro climático; t representa el período en el tiempo, que en este caso es mensual; L representa el total de períodos en un ciclo, 12 en el caso de meses; y , ε_t , el término del error.

A este modelo se le incluyó el parámetro de temperatura media mensual, debido a que es el único valor considerado en los escenarios futuros. Se elaboraron los escenarios futuros mensuales de estos parámetros a nivel regional para algunos años seleccionados, así como la estimación de la oscilación térmica. Al igual que los parámetros de temperatura media promedio anual y precipitación acumulada anual, se generaron imágenes raster en IDRISI (Eastman, 2006), para algunos años seleccionados. Con los resultados obtenidos para los escenarios climáticos futuros se procedió a estimar los escenarios de clasificación climática Köppen-García para las tridécadas 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099, generando imágenes raster en IDRISI (Eastman, 2006).

4.2.3.4. Evaluación del impacto de las variaciones climáticas identificadas sobre la agroclimatología regional.

Una vez que se contó con los escenarios de los parámetros climáticos, se procedió a detectar el comportamiento de los parámetros agroclimáticos que tienen relevancia en los ciclos agrícolas. Para cada uno de los años de la serie 2007-2099 se determinó la evapotranspiración con el método de Hargreaves (Allen *et al.*, 2006) y se ajustó con un modelo de regresión al método del tanque evaporímetro, elaborando las imágenes de los escenarios de este parámetro agroclimático para algunos años seleccionados; el número de meses húmedos; el cociente P/ETP y la clasificación de la Región Ciénega de Chapala para las series 1977-2006 y 2090 de acuerdo con UNEP (Williams y Balling, 1996); la estación de crecimiento para el período anual mediante el método FAO (Allen *et al.*, 2006); unidades calor acumuladas base 10 para el ciclo Primavera-Verano mediante el método grados-día de desarrollo; unidades calor acumuladas base 5 para el ciclo Otoño-Invierno mediante el método grados-día de desarrollo; temperatura diurna y temperatura nocturna ciclo anual; y, horas frío acumuladas por promedio de los valores obtenidos mediante los métodos de Da Mota y Weinberger (Ortiz, 1987). Estos métodos fueron descritos en el apartado 4.2.1 de este capítulo. Se elaboraron cuadros comparativos de algunos años futuros seleccionados y la climatología actualizada 1977-2006 y para la estación de crecimiento se elaboraron gráficas para algunos años seleccionados.

4.2.4. Estimación del impacto de los cambios climáticos y agroclimáticos sobre algunas especies agrícolas.

Para definir el impacto sobre especies en estudio, se procedió a estimar los parámetros agroclimáticos específicos para las especies de trigo como cultivo representativo en el ciclo OI, maíz como cultivo representativo en el ciclo PV y agave como cultivo representativo para el ciclo anual.

4.2.4.1. Trigo de invierno.

Para el cultivo de trigo se consideraron las características fenológicas de la variedad Salamanca S75, la cual es utilizada en la actualidad por productores de la zona y que es sembrada a inicios de enero. De acuerdo a la información obtenida por varios productores y trabajos experimentales (INIA, 1975; Hernández, 1979), el cultivo requiere de 1040 unidades-calor efectivas en la etapa siembra-floración y 1640 en la etapa siembra-madurez fisiológica. En el análisis retrospectivo se determinaron las variables agroclimáticas número de días con temperatura máxima mayor a 25 °C y número de días con temperatura mínima menor a 5°C; así como las variables fenológicas número de días siembra-floración (S-F) y número de días floración-madurez fisiológica (F-M) considerando las unidades calor requeridas en cada etapa, con siembra el 14 de enero. En el análisis retrospectivo de estos parámetros se establecieron los períodos 1961-69, 1970-79, 1980-89, 1990-99 y 2000-06, con el fin de determinar tendencias observadas. En el análisis prospectivo se estimaron estos mismos parámetros. Las variables agroclimáticas número de días con temperatura máxima mayor a 25 °C y número de días con temperatura mínima menor a 5°C se estimaron mediante modelos Gompertz (Wheldon, 1988), ajustados previamente con valores observados y validando los modelos. Las variables fenológicas número de días siembra-floración (S-F) y número de días floración-madurez fisiológica (F-M) se estimaron proyectando a futuro las temperaturas medias calculadas previamente y utilizadas en la determinación de las unidades calor requeridas para completar cada etapa fenológica, considerando como fecha de siembra el 14 de enero.

4.2.4.2. Maíz de temporal.

Para analizar el impacto del cambio climático en este cultivo se recabó información sobre la fenología observada de algunas variedades comerciales utilizadas en la zona como son Pantera (ASGROW), DK-2002 (DEKALB), 3028W (PIONEER), Z-21 (HARTZ SEED), de las cuales se promediaron los parámetros días a floración y días a madurez fisiológica

de datos obtenidos en trabajos experimentales (Solano, 2006), y se obtuvieron las unidades calor requeridas para estas etapas mediante el método de grados-día de desarrollo efectivos, resultando valores de 812 y 1582, respectivamente.

Tanto para el análisis retrospectivo como para el prospectivo se determinaron las variables agroclimáticas número de días con temperatura mínima menor a 10°C y número de días con temperatura máxima mayor a 35°C mediante modelos Gompertz y ajustados con valores observados; temperatura diurna media anual y temperatura nocturna media anual con el método descrito por Ruiz *et al.* (2002); y las variables fenológicas número de días siembra-floración y el número de días floración-madurez fisiológica simulando la siembra al inicio de la estación de crecimiento previamente estimada. Para la tendencia de los requerimientos hídricos se consideró un ciclo de 140 días, similar al ciclo de las variedades sembradas en la región. Para el análisis retrospectivo se establecieron los períodos de tiempo 1970-79, 1980-89, 1990-99 y 2000-06 para observar tendencias y para el análisis prospectivo se realizaron las estimaciones anualmente desde el año 2007 hasta el 2099, presentándose como muestra sólo algunos años seleccionados.

4.2.4.3. Agave tequilero.

Para el cultivo de agave se estimaron las temperaturas diurnas y nocturnas anuales así como el valor de la asimilación neta de CO₂ mediante el modelo sugerido por Vargas (Ruiz, 2007). Para la establecer la condición de la zona de estudio con base en las temperaturas diurnas y nocturnas, se utilizaron los rangos establecidos por Ruiz *et al.* (2002) y que se muestran en el Cuadro 11. Se generaron las imágenes raster con IDRISI (Eastman, 2006) para las temperaturas en la Región Ciénega de Chapala, así como cuadros comparativos de los tres parámetros agroclimáticos.

Cuadro 11. Intervalos térmicos diurnos y nocturnos para definir las condiciones óptimas, subóptimas y marginales para el cultivo de *Agave tequilana* en Jalisco.

Variable	Condición		
	Óptima	Subóptima	Marginal
Temperatura nocturna (°C)	10 a 16	5 a 10 ó 16 a 25	< 5 ó > 25
Temperatura diurna (°C)	15 a 25	10 a 15 ó 25 a 35	< 10 ó > 35

4.2.5. Medidas de adaptación para el desarrollo agrícola regional.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el punto anterior, se establecieron posibles medidas de adaptación para que la actividad agrícola en la región no se vea gravemente afectada por las condiciones climáticas que prevén los escenarios futuros. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva sobre los posibles efectos del clima en la fisiología de los cultivos regionales, así como medidas de conservación de humedad del suelo, entre otras. Para el impacto de fechas de siembra sobre la duración de las etapas del cultivo de trigo, se realizó una simulación con fechas de 1 y 15 de noviembre, 1 y 15 de diciembre y 1 de enero, obteniendo la duración en días para la etapa siembra floración y floración-madurez fisiológica.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis retrospectivo de la climatología en la Región Ciénega de Chapala.

El comportamiento de los parámetros climáticos de temperatura mínima promedio anual, temperatura máxima promedio anual y precipitación acumulada anual de las diez estaciones climatológicas estudiadas para el período 1961-2006, se observa en las Figuras 6, 7 y 8.

Para la temperatura mínima promedio anual (Figura 6) y temperatura máxima promedio anual (Figura 7), se observan variaciones marcadas tanto a escala temporal (durante el período 1961-2006), como a escala espacial (variaciones entre localidades). Con relación a la precipitación acumulada promedio anual (Figura 8), las variaciones son más marcadas tanto en el contexto interanual como entre estaciones.

Cada una de las estaciones muestra diferentes tendencias para el mismo parámetro, aún dentro de la misma estación, encontrándose al inicio del período un incremento o decremento que cambia su tendencia al final del período (ver en Anexo 2 las gráficas de caja de los parámetros climáticos para cada estación climatológica estudiada de la serie 1961-2006).

Las estaciones de Chapala, El Fuerte, Jocotepec, Tuxcueca y Tizapán El Alto quedan sobre la ribera del lago de Chapala en un relieve plano, así como la estación de La Barca que aunque se encuentra a 18 kilómetros de la ribera, no hay cerros intermedios (ver en Anexo 3 la fisiografía para cada estación).

Esta fisiografía permite que el efecto termorregulador del lago mantenga relativamente estables las condiciones climáticas de dichas estaciones, las cuales presentan los valores de temperatura máxima promedio anual más bajos, con excepción de la estación La Barca, pero es más notorio para la temperatura mínima promedio anual en que se observan los valores medios más altos para estas 6 estaciones incluyendo a La Barca, esto es, en esta zona cercana a la laguna se observan las menores oscilaciones térmicas anuales.

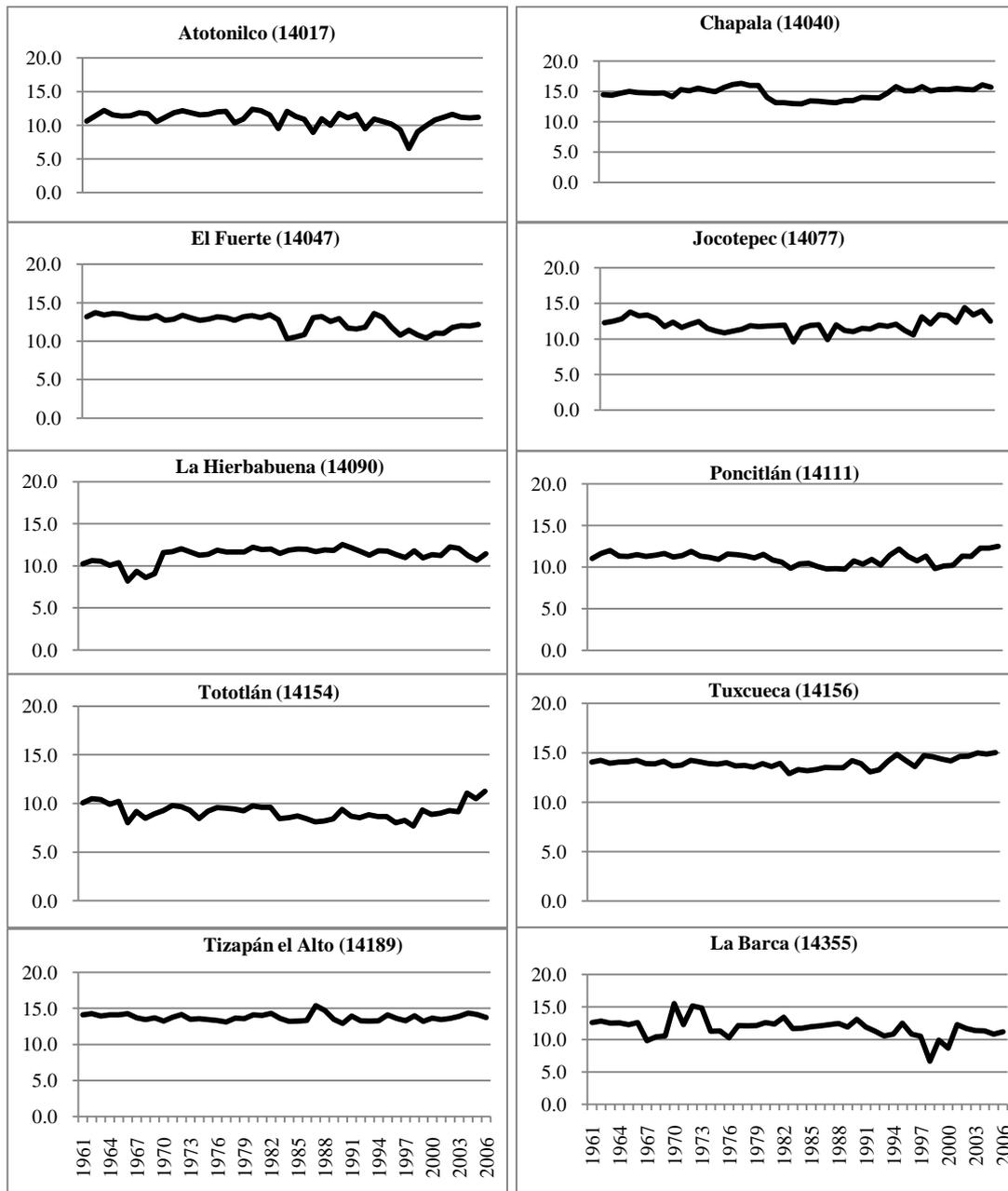


Figura 6. Tendencia de la temperatura mínima promedio anual durante el período 1961-2006 en las 10 estaciones de la Región Ciénega de Chapala.

En el caso de las estaciones Atotonilco, La Hierbabuena, Poncitlán y Tototlán, éstas se encuentran más alejadas del lago y con altitud de hasta 1700 m presente entre éstas y la ribera del lago. Para estas estaciones es más notoria la falta del efecto termorregulador del lago de Chapala, sobre todo en el parámetro temperatura mínima promedio anual, ya que se observan los valores medios más bajos de la Región Ciénega de Chapala, es decir, se tienen las oscilaciones térmicas más altas.

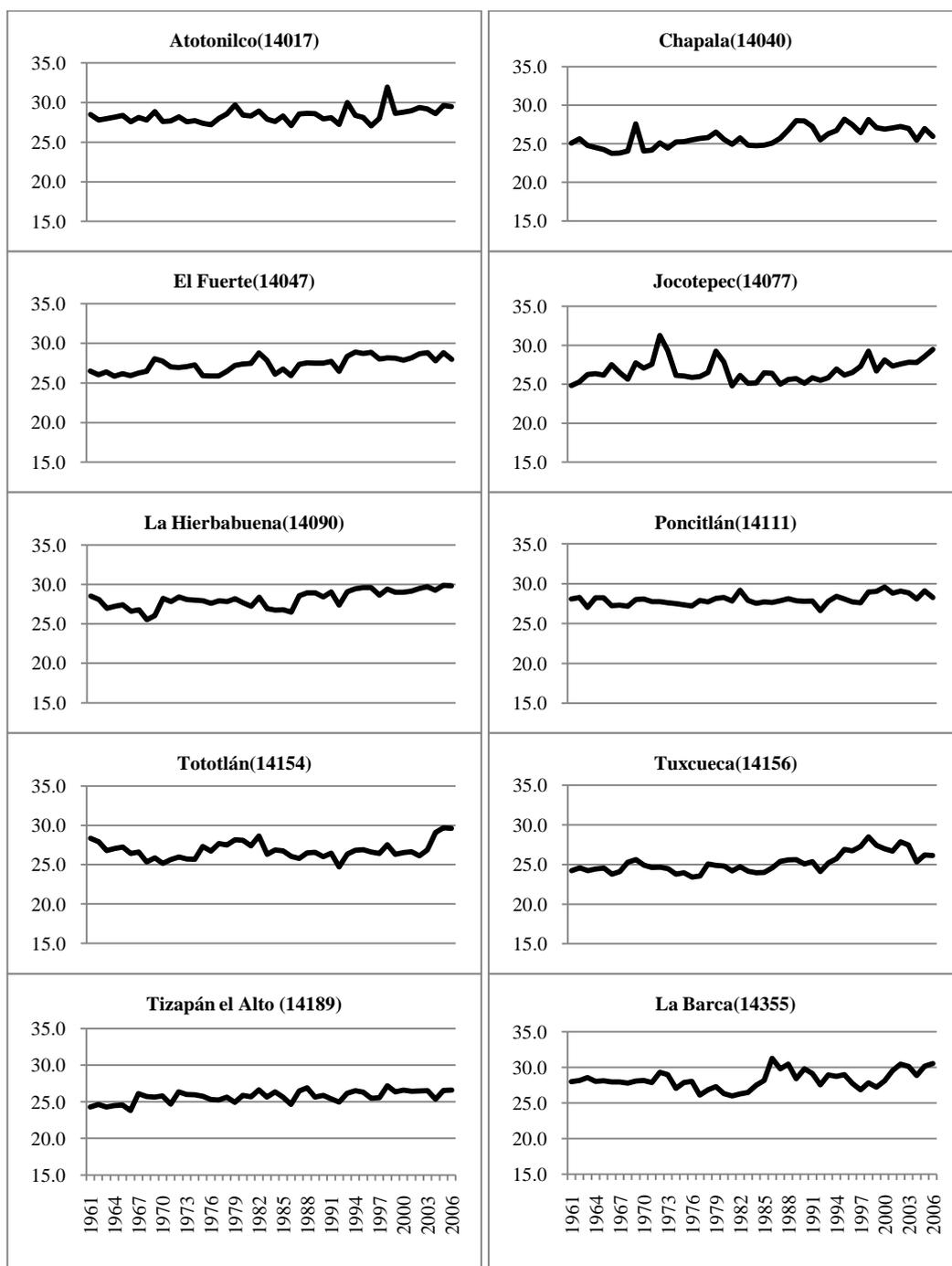


Figura 7. Tendencia de la temperatura máxima promedio anual durante el período 1961-2006 en las 10 estaciones de la Región Ciénega de Chapala.

En la temporada de lluvias la menor precipitación se recibe en Tototlán y la mayor en Chapala. En el período invernal Atotonilco el Alto es el que mayor porcentaje de lluvia recibe, y Ocotlán, La Barca y Poncitlán los que menos lluvia reciben en este período (Figura 8).

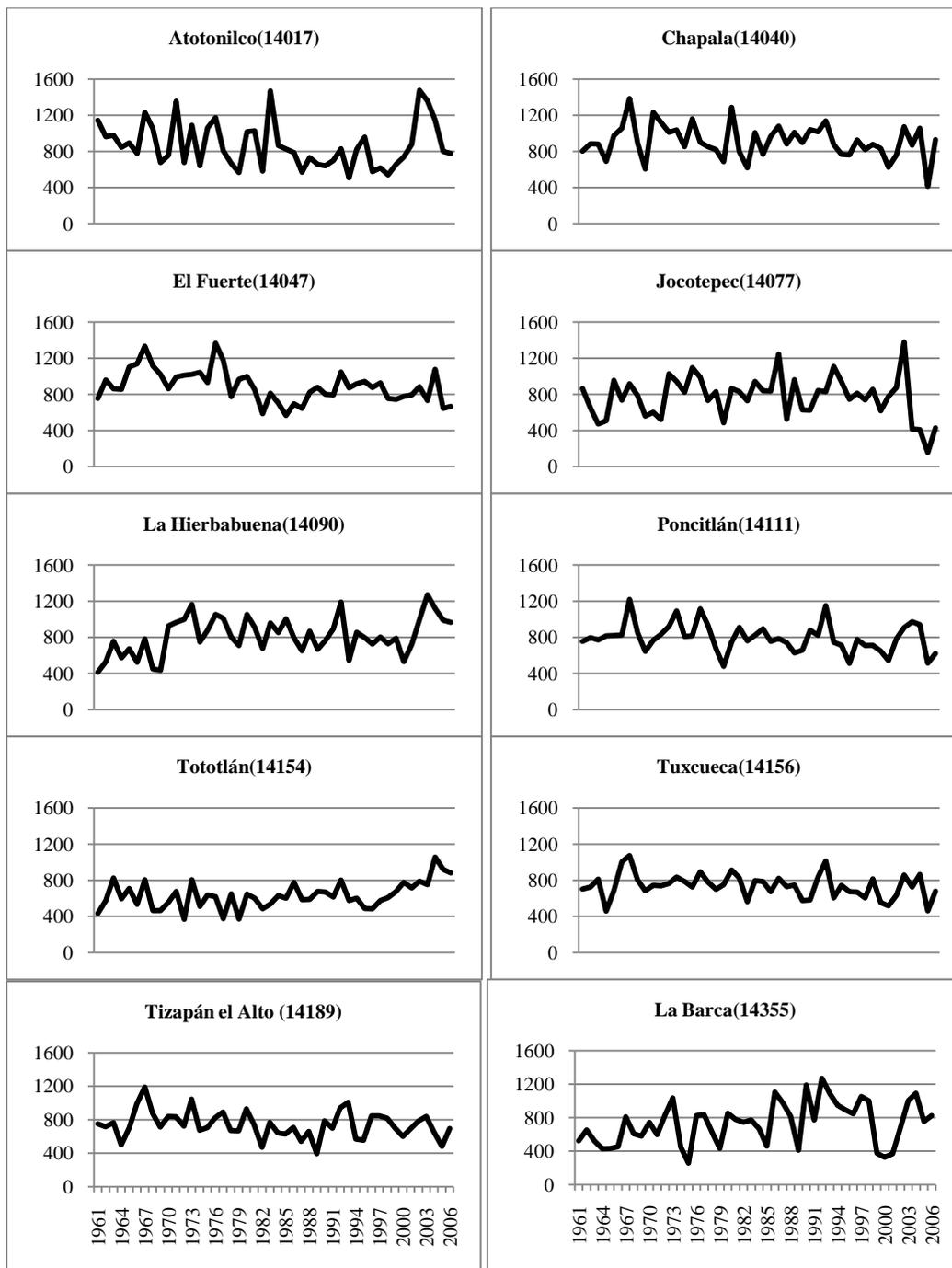


Figura 8. Tendencia de la precipitación acumulada promedio anual para el período 1961-2006 en las 10 estaciones de la Región Ciénega de Chapala.

Estos resultados muestran que las variaciones no mantienen un patrón bien definido, y que alrededor de la década de los 90's se observan los cambios de tendencia de los tres parámetros climáticos para la mayoría de las estaciones.

5.1.1. Estimación del punto de quiebre o cambio de tendencia.

En el análisis para detectar puntos de quiebre o de ruptura en las series de tiempo 1961-2006 con los valores anuales para cada una de las estaciones, se tuvieron como resultados de la prueba SNHT los valores de significancia mostrados en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Resultados de la prueba SNHT para los tres parámetros climáticos en las 10 estaciones meteorológicas y a nivel de Región Ciénega de Chapala.

Parámetro	Prueba Ho: No hay ruptura	Estación meteorológica										Región Ciénega
		14017	14040	14047	14077	14090	14111	14154	14156	14189	14355	
Temperatura mínima anual	Valor prueba T max	11.35	9.32	22.14	13.95	31.46	10.29	14.99	21.19	4.85	11.16	11.16
	Valor crítico T (46,0.05)	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28
	$p(0.05)$	**	**	**	**	**	**	**	**	**	NS	**
Temperatura máxima anual	Valor prueba T max	15.36	25.46	23.39	9.41	26.62	21.44	18.55	31.42	21.33	8.19	24.12
	Valor crítico T (46,0.05)	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28
	$p(0.05)$	**	**	**	**	**	**	**	**	**	NS	**
Precipitación acumulada anual	Valor prueba T max	5.25	4.08	16.43	14.11	15.82	5.91	16.52	4.85	5.05	7.86	1.98
	Valor crítico T (46,0.05)	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28	8.28
	$p(0.05)$	NS	NS	**	**	**	NS	**	NS	NS	NS	NS

Se observa que las variables térmicas muestran resultados altamente significativos para la mayoría de las estaciones, en cambio el parámetro de precipitación sólo resulta significativo para cuatro estaciones. Los años detectados con cambio de tendencia significativa para estos parámetros se muestran en el Cuadro 13.

Los parámetros temperatura máxima promedio anual y temperatura mínima promedio anual, muestran mayor frecuencia de cambios, no así la precipitación acumulada promedio anual de la que sólo cuatro estaciones muestran punto de quiebre.

La temperatura mínima no presenta un patrón bien definido de cambio para las estaciones ya que se observan puntos de ruptura de las series desde el año 1969 y hasta el 2003. La temperatura máxima anual muestra la mayoría de puntos de quiebre a partir del año 1986 y hasta el año 2003, para todas las estaciones, con excepción de la estación Tizapán el Alto que presenta el punto de cambio en el año 1966.

Cuadro 13. Año de cambio de tendencia para temperatura máxima promedio anual (Tx), temperatura mínima promedio anual (Ti) y precipitación acumulada promedio anual (Pp), por localidad y regional.

AÑO	Atotonilco	Chapala	El Fuerte	Jocotepec	La Hierbabuena	Poncitlán	Tototlán	Tuxcueca	Tizapán el Alto	La Barca	Región Ciénega
1961	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1962	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1963	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1964	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1965	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1966	-	-	-	-	-	-	-	-	Tx	-	-
1967	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1968	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1969	-	-	-	-	Ti, Pp	-	-	-	-	-	-
1970	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1971	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1972	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1973	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1974	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1975	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1976	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1977	-	-	Pp	-	-	-	-	-	-	-	-
1978	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1979	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1980	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1981	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1982	Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Ti
1983	-	-	Ti	-	-	-	-	-	-	-	-
1984	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1985	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1986	-	-	-	-	Tx	-	-	-	-	-	-
1987	-	Tx	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1988	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1989	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1990	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1991	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Ti	-
1992	-	-	Tx	-	-	-	-	-	-	-	Tx
1993	-	-	-	-	-	-	-	Ti	-	-	-
1994	-	Ti	-	-	-	-	-	Tx	-	-	-
1995	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1996	-	-	-	Tx	-	-	-	-	-	-	-
1997	Tx	-	-	Ti	-	Tx	-	-	-	-	-
1998	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1999	-	-	-	-	-	-	Pp	-	-	-	-
2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2002	-	-	-	Pp	-	-	-	-	-	-	-
2003	-	-	-	-	-	Ti	Tx, Ti	-	-	-	-
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Con respecto a la precipitación acumulada anual, sólo cuatro estaciones muestran punto de quiebre. Al respecto Gutiérrez *et al.* (2007) detectaron para los registros de precipitación en dos estaciones climatológicas analizadas con un período de 46 años, puntos de ruptura en los años 1974 a 1979 utilizando varios métodos de detección y concluyendo que estas pruebas permiten detectar rupturas en series de datos hidrometeorológicos. En el caso de la estación La Barca, un gran porcentaje de datos fue reconstruido, por lo que esto probablemente se ve reflejado en la homogeneidad de la serie para los parámetros previamente mencionados tal como lo indican González *et al.* (2002) quienes determinaron que la reconstrucción de una serie de precipitación puede generar homogeneidad. Respecto a los puntos de ruptura detectados para las temperaturas mínima y máxima anuales, se observan similitudes en los años en que se presentan, y considerando lo detectado por Wijngaard *et al.* (2003), quienes para un período de 99 años en una estación climatológica de Europa encontraron que la presencia de varios puntos de ruptura de tendencia fueron debidos a relocalización de la estación y cambio en los sensores térmicos, por lo que al no existir algún cambio de esta naturaleza en las estaciones analizadas en la presente investigación y ser coincidentes los años de ruptura, se puede considerar como un efecto de cambio climático en la región.

Para una identificación más general de estos cambios, se realizó el mismo análisis con los datos promediados de todas las estaciones climatológicas, con el fin de obtener el año de cambio de tendencia a nivel regional, lo que se muestra en la última columna de este Cuadro 13. Aquí se observa que se establecen dos puntos de quiebre con una diferencia de 10 años, 1982 para la temperatura mínima normal anual y 1992 para la temperatura máxima normal anual.

Considerando estos dos puntos de quiebre a nivel regional, para temperatura mínima y temperatura máxima y con el fin de establecer el efecto del tiempo en el cambio de tendencia, se elaboraron las gráficas de tendencia que se muestran en las Figuras 9 y 10.

Para la temperatura mínima normal anual se observan pendientes en diferente dirección, siendo de disminución para el período 1961-1982, pero de incremento en este parámetro para el período 1983-2006, indicando que para la Región Ciénega de Chapala la

temperatura mínima muestra un incremento en años recientes. También se observa una muy baja correlación con el tiempo para la primer serie, pero que aumenta para la segunda serie. De la variación de temperatura mínima en la serie 1961-2006, los valores detectados a partir del año de cambio de tendencia corresponden al 60% de la variación total.

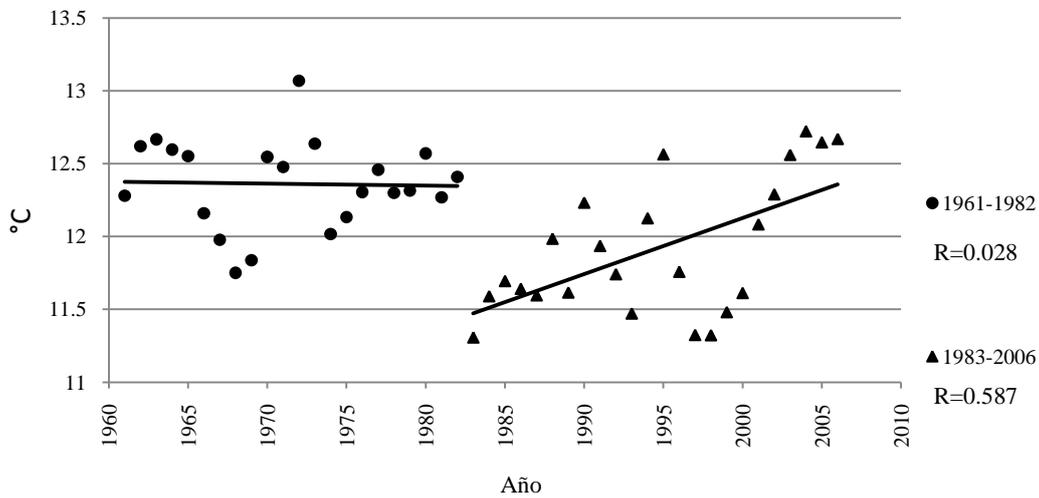


Figura 9. Líneas de tendencia observadas para la temperatura mínima normal anual en °C, de acuerdo al punto de quiebre detectado en la Región Ciénega de Chapala en un período de 46 años (1961-2006).

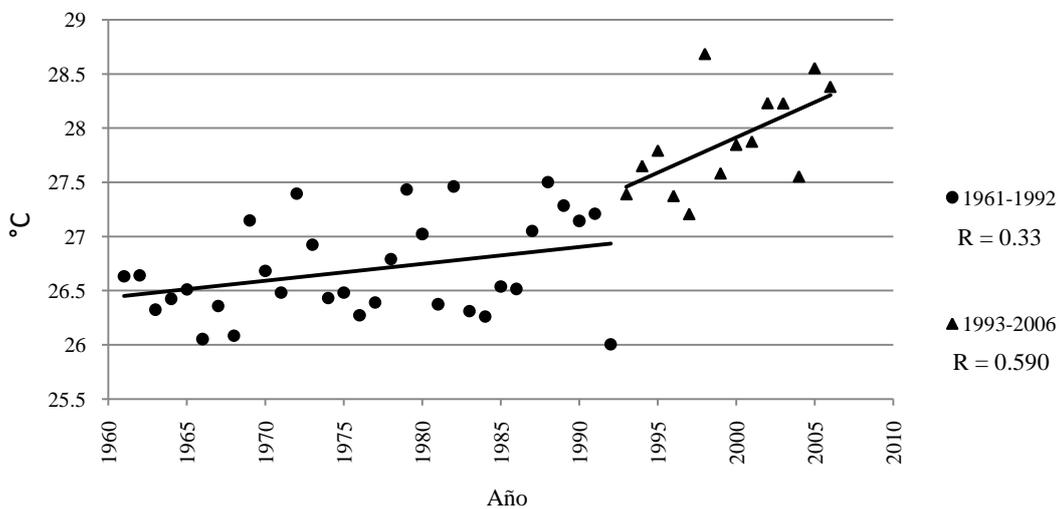


Figura 10. Líneas de tendencia observadas para la temperatura máxima normal anual en °C, de acuerdo con punto de quiebre detectado en la Región Ciénega de Chapala en un período de 46 años (1961-2006).

Las pendientes de las rectas son diferentes, indicando diferente tendencia. Para la temperatura máxima normal anual ambas pendientes son positivas, esto es, se ha

mantenido una tendencia al incremento en este parámetro durante un período de 46 años, siendo más pronunciada la pendiente en el período más reciente (1993-2006), así mismo se observa que para la primer serie de temperaturas máximas normales anuales, el tiempo no ejerce un efecto notorio como lo indica el bajo valor de correlación, pero en la segunda serie esta correlación es mayor ($R = 0.584$), indicando que el tiempo ya muestra efectos en el parámetro climático, lo que se confirma al obtener que el 57% de la variación total corresponde a esta última serie.

5.1.2 Determinación de la climatología actual de la Región Ciénega de Chapala.

Las observaciones sobre un cambio de tendencia mencionadas en el apartado anterior, llevaron a realizar un análisis comparativo entre dos series de tiempo, con la finalidad de establecer una climatología actual en la Región Ciénega de Chapala y sus estaciones climatológicas, considerando la recomendación de la Organización Meteorológica Mundial de un mínimo de 30 años como período requerido para una serie climática representativa. En el Cuadro 14 se muestran los resultados de la Prueba de t para comparación de dos series de 30 años de datos, la serie 1961-1990 y la serie 1977-2006. Se observaron diferencias significativas para la temperatura máxima normal anual, la temperatura media normal anual y la oscilación térmica, por el contrario la temperatura mínima normal anual y la precipitación acumulada normal anual no mostraron diferencias significativas, esto es que en ambas series de datos estos dos parámetros son estadísticamente iguales. Esto se debe en parte a que ambas series son idénticas en 30 años (65% de la información), y sólo difieren en los datos correspondientes al período 1961-1976.

Cuadro 14. Resultados de la Prueba de T para comparación de las series de 30 años 1961-1990 y 1977-2006, de la Región Ciénega de Chapala.

Parámetro climático	Valor-T	Valor-p ($\alpha= 0.05$)	
Temperatura mínima normal anual	1.57	0.122	N.S.
Temperatura máxima normal anual	-3.85	0.000	**
Temperatura media normal anual	-2.03	0.047	*
Oscilación térmica normal anual	-4.66	0.000	**
Precipitación acumulada normal anual	0.45	0.656	N.S.

*Significativo al 0.05; ** Altamente significativo al 0.01; N.S. : No significativo

Con base en la temperatura mínima y la precipitación pluvial es indistinto utilizar una u otra serie para caracterizar la climatología regional y local. Sin embargo, de acuerdo con los resultados mostrados en el Cuadro 15 en el que se puede observar una tendencia de incrementos de la temperatura máxima, temperatura media y oscilación térmica, con valores de 0.62°C, 0.22°C y 0.80°C respectivamente, y que el resultado de la oscilación térmica es reflejo de las tendencias en temperatura mínima y máxima, se considera que en un futuro, cuando la serie completa se extienda a un período mayor y que el porcentaje de traslape entre ésta y la tridécada más reciente sea considerablemente menor, las diferencias entre ambas series tenderán necesariamente a ser más notables y significativas.

Cuadro 15. Valores normales para las dos series climáticas comparadas y sus diferencias.

Serie	Temperatura mínima normal anual (°C)	Temperatura máxima normal anual (°C)	Temperatura media normal anual (°C)	Oscilación térmica normal anual (°C)	Precipitación acumulada normal anual (mm)
1961-1990	12.17	26.73	19.45	14.55	791.29
1977-2006	12.00	27.35	19.67	15.35	778.31
Diferencia	-0.18	0.62	0.22	0.80	-12.98

Estos resultados concuerdan con lo establecido por Englehart y Douglas (2005) quienes reportaron que el rango de temperatura diurna sobre México se ha incrementado de manera positiva como resultado de un aumento más rápido en temperaturas máximas que en mínimas, identificando como mecanismos forzantes el cambio de uso del suelo y cambios en la cubierta vegetal. Es de notar que en los años 1998, 2002, 2003, 2005 y 2006 se presentaron en la Región Ciénega de Chapala las temperaturas medias más altas del período 1961-2006.

La precipitación pluvial acumulada anual no presentó significancia, coincidiendo con la falta de punto de ruptura en la tendencia de la serie regional. Así mismo, este parámetro climático no muestra coincidencias con lo reportado por Magaña *et al.* (2004) con respecto a que los eventos de El Niño Oscilación del Sur ocurridos en 1982-1983 y 1997-1998 los cuales provocaron sequías muy fuertes en el territorio nacional, a nivel de la Región Ciénega de Chapala no provocaron disminuciones de precipitación considerables.

Las tendencias detectadas para las variables térmicas presentan variaciones a nivel local, esto es, a escala local no se observan las mismas tendencias, lo que habla sobre la

importancia del estudio en estaciones climatológicas específicas, aunque la aplicación de estos resultados sea a nivel regional, tal como lo observado por Carlón y Mendoza (2007) para una región de Michoacán, y Brito *et al.* (2009) para el estado de Zacatecas, que a nivel local encontraron diferentes tendencias para temperaturas máximas y mínimas, y lo reflejaron en una análisis regional, así mismo Camilloni (2008), reporta para una región en Argentina, diferentes tendencias para las variables térmicas en seis estaciones climáticas analizadas, en las que la temperatura máxima presenta tendencias positivas en todas las estaciones, pero la temperatura mínima muestra tendencias positivas en unas y negativas en otras.

La climatología actual en la Región Ciénega de Chapala correspondiente al período 1977-2006 muestra ligeras diferencias con respecto a la climatología presentada por Ruiz *et al.* (2004) quienes abarcaron el período 1961-2000 para 7 estaciones de nuestra región y 1961-2003 para las otras tres estaciones. Con estas observaciones se optó por considerar a la serie 1977-2006 como la representativa de la climatología actual en esta región, por lo que se procedió a calcular los parámetros climáticos de la Región Ciénega de Chapala la cual se muestra en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Algunos parámetros climáticos actuales para la Región Ciénega de Chapala (1977-2006).

PARÁMETRO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
T máxima media (°C)	23.9	25.8	28.4	30.6	31.7	29.8	27.2	26.9	26.8	26.7	25.8	24.2	27.3
T mínima media (°C)	7.2	8.3	10.0	12.3	14.5	15.9	15.3	15.1	14.7	12.8	9.7	8.0	12.0
Oscilación térmica (°C)	16.8	17.4	18.3	18.3	17.3	14.0	11.8	11.9	12.1	14.0	16.1	16.2	15.4
T media (°C)	15.5	17.0	19.2	21.5	23.1	22.9	21.2	21.0	20.7	19.7	17.8	16.1	19.7
Precipitación acumulada (mm)	21.1	5.8	3.0	4.8	21.3	147.1	199.3	170.1	135.9	47.3	13.5	9.1	778.3
Evaporación media (mm)	115.9	134.7	194.1	215.9	225.2	183.0	150.7	141.2	129.7	127.2	117.2	104.7	1839.7

Se observa que actualmente el mes más cálido del año es mayo y el más frío para esta región es enero. La oscilación térmica anual indica un clima catalogado como muy extremo, y la clasificación del Sistema Köppen-García categoriza a la Región Ciénega

de Chapala como de clima Semicálido subhúmedo. Los resultados para cada una de las 10 estaciones analizadas se presentan en el Anexo 4, en el cual se incluyen los parámetros climáticos, así como los sistemas de clasificación de clima Köppen-García, UNEP e INIFAP obtenidas de acuerdo a lo mencionado en el capítulo de Materiales y Métodos.

5.1.3. Determinación de la agroclimatología actual de la Región Ciénega de Chapala.

Como se vio en el apartado anterior, existen diferencias significativas entre la climatología 1961-1990 y la climatología 1977-2006, por lo que se consideró que también se tendrían diferencias entre las agroclimatologías para los dos períodos, por lo que se determinó la agroclimatología actual (1977-2006), la cual se presenta en el Cuadro 17. Se observaron algunos cambios en los valores de la agroclimatología actual, resultado principalmente de los incrementos en las temperaturas máximas.

Las temperaturas nocturna y diurna muestran muy ligeros incrementos de 0.1°C y 0.4°C, respectivamente; la evapotranspiración experimenta un incremento de 37.2 mm al año comparado con el valor de 1297 mm en la primer tridécada; el cociente P/ETP muestra signos de ligera disminución, reduciendo su valor de 0.61 en la tridécada 1961-1990 a 0.58 en la tridécada 1977-2006, conservando a la Región Ciénega de Chapala en una condición subhúmeda seca de acuerdo con lo establecido por UNEP (Williams y Balling, 1996), esta categoría es resultante del promedio de las 10 estaciones climatológicas analizadas con un coeficiente de variación de 15.2% para este parámetro agroclimático; la estación de crecimiento sufre una ligera reducción de tres días entre las dos tridécadas analizadas, lo que concuerda con lo reportado por Ruiz *et al.* (2000), quienes detectaron una disminución de la duración de la estación de crecimiento en dos períodos de 25 años en el estado de Jalisco.

En el ciclo Primavera-Verano, la capacidad térmica se incrementó en 55 unidades calor; el ciclo Otoño-Invierno en este estudio, experimentó un incremento de 33 unidades calor. En este Cuadro 17 se observa una mayor cantidad de unidades calor en el ciclo otoño-invierno, lo cual es debido a que su cálculo se basó en una temperatura base de 5°C mientras que las unidades calor para el ciclo primavera-verano se obtuvieron con una temperatura base de 10°C. En cuanto al número de horas frío se encontró un incremento de 41 horas con respecto a la primer tridécada que puede ser resultado de las tendencias a

disminuir en la temperatura mínima de algunas de las estaciones analizadas en los últimos años de la serie de datos.

Cuadro 17. Agroclimatología actual (1977-2006) para la Región Ciénega de Chapala.

PARÁMETRO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
T nocturna en °C	12.1	13.5	15.4	17.7	19.6	20.0	18.8	18.5	18.2	16.9	14.5	12.9	16.5
T diurna en °C	19.0	20.6	23.0	25.3	26.7	25.8	23.7	23.5	23.3	22.6	21.1	19.5	22.8
Evapotranspiración potencial en mm	86.8	93.5	123.4	136.9	147.4	130.2	119.6	116.1	106.1	101.7	89.5	83.5	1334.6
Cociente P/ETP	0.24	0.06	0.02	0.04	0.14	1.13	1.67	1.47	1.28	0.46	0.15	0.11	0.58
Duración de la Estación de Crecimiento en días													152
Unidades Calor Efectivas en el ciclo PV (UC _{BASE 10})													2110
Unidades Calor Efectivas en el ciclo OI (UC _{BASE 5})													2330
No. horas frío													145

En la Región Ciénega de Chapala a pesar de que han experimentado algunos cambios, estas condiciones climáticas han permitido a los productores agrícolas desarrollar una diversidad de cultivos entre cereales, hortalizas y frutales. De acuerdo con los requerimientos agroecológicos de cultivos reportados por Ruiz *et al.* (1999), éstos se cubren de forma adecuada, aunque para el caso del agave, que a partir del año 2000 ha incrementado considerablemente la superficie de plantación en la región de estudio, las condiciones térmicas actuales se encuentran en un nivel subóptimo por temperatura nocturna, que concuerda con lo reportado por Ruiz *et al.* (2002), quienes definieron para la misma zona de estudio un nivel óptimo por temperatura diurna y subóptimo por temperatura nocturna, esto es, actualmente el cultivo de agave sufre en su desarrollo ya que por ser una planta del tipo fotosintético CAM (*crassulacean acid metabolism*), temperaturas nocturnas entre 10°C a 16°C dan las tasas máximas de asimilación de CO₂, por lo que de acuerdo con estos autores, en la Región Ciénega de Chapala ya se tienen menores tasas de asimilación de CO₂.

Como complemento a la agroclimatología actual, se realizaron las clasificaciones climáticas y de aridez de INIFAP y UNEP para cada una de las estaciones climatológicas analizadas en esta investigación, las cuales son incluidas en la climatología actual de cada estación en el Anexo 4.

5.2. Análisis prospectivo de la climatología en la Región Ciénega de Chapala.

Las tendencias de la concentración de gases de efecto invernadero son positivas, según lo reportado por el IPCC (IPCC, 2007). De acuerdo con Hegerl *et al.* (2007), los incrementos en la concentración de los gases de efecto invernadero, son una de las causas del incremento de temperaturas en los últimos años, y seguirán provocando estos incrementos conforme aumenten su concentración en la atmósfera para el futuro. Específicamente en el país, según estimaciones para 2 escenarios, el optimista y el moderado (con incremento del PIB estimado en 5% y 3% correspondientemente), las emisiones de CO₂ para el 2010 serán de 526 y 464 millones de toneladas respectivamente, en comparación con lo producido en el 2000 que fue de 363 millones de toneladas (Quintanilla, 2004). Por supuesto las estimaciones de parámetros climáticos dependerán de los escenarios de emisiones utilizados, como comenta Magaña *et al.* (2004).

En la presente investigación la selección del escenario de emisiones de la familia A2 respondió al interés de presentar un panorama de la realidad en México, considerando que aunque se han establecido varios programas para el control de varios de los factores que intervienen en estas estimaciones, en la realidad no se han visto los resultados que se esperarían debido a diversas condiciones como son la social, económica y política por las que atraviesa México.

5.2.1. Estimación de temperatura media mensual y precipitación acumulada mensual para la serie 2007-2099.

5.2.1.1. Validación del modelo de ensamble para la Región Ciénega de Chapala.

Una vez estimados los valores de temperatura media mensual y precipitación mensual para las diez estaciones climatológicas, se realizó un análisis de correlación entre los valores observados en el período 2000-2006 y los valores esperados con el modelo ensamble para el mismo período, dando como resultado un valor de $r = 0.94$ para la temperatura media mensual y de $r = 0.85$ para la precipitación acumulada mensual. Las Figuras 11 y 12 muestran la correlación entre valores observados y valores esperados, para estos dos parámetros climáticos.

Se puede ver claramente, que para la temperatura media mensual, los valores esperados se encuentran muy cercanos a los valores observados, lo que indica una muy buena aproximación de la estimación del modelo ensamble generado por la UNAM. En el caso de la precipitación acumulada mensual, los valores esperados presentan un menor ajuste a los observados, pero se detecta poca dispersión entre los valores, confirmado por el valor de correlación r encontrado, que para una estimación de precipitación es bastante alto.

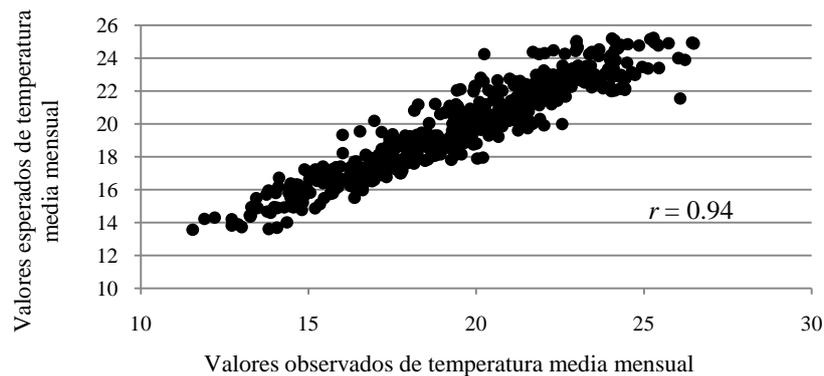


Figura 11. Valores observados vs valores esperados de temperatura media mensual para el período 2000-2006 en la Región Ciénega de Chapala.

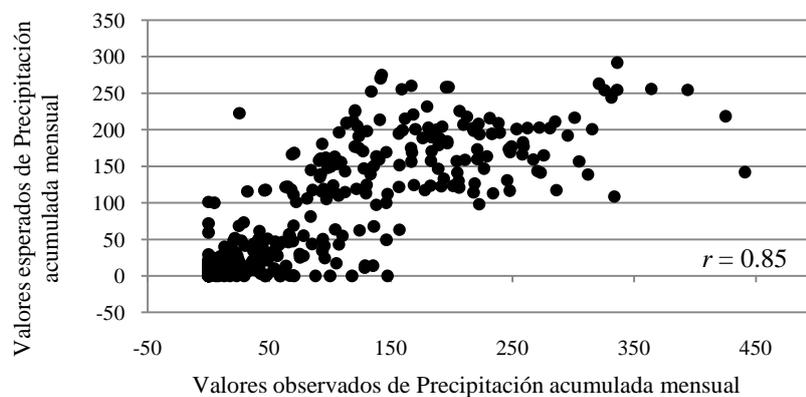


Figura 12. Valores observados vs valores esperados de precipitación acumulada mensual para el período 2000-2006 en la Región Ciénega de Chapala.

5.2.1.2. Escenarios futuros para temperatura media mensual y precipitación acumulada mensual.

Una vez establecida la adecuada estimación de los dos parámetros climáticos mediante el modelo ensamble se procedió a determinar los escenarios futuros para el período 2007-

2099. En el Cuadro 18 se muestran los valores estimados de la temperatura media mensual para algunos años seleccionados. Enero seguirá siendo el mes más frío hasta casi finales del siglo XXI y a partir de aproximadamente el año 2090 diciembre tendrá las temperaturas medias más bajas en el año. El mes más caliente del año seguirá siendo mayo, llegando a temperaturas medias de hasta casi 27°C en la última década del siglo XXI.

Cuadro 18. Valores mensuales de temperatura media para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2020	16.5	18.1	20.1	22.8	24.4	23.5	22.3	22.2	21.6	20.7	18.7	16.7
2030	16.6	18.0	20.1	22.8	24.4	23.8	22.5	22.2	21.9	20.8	18.8	16.7
2040	17.1	18.4	20.7	23.3	24.5	24.1	22.8	22.5	22.1	20.9	19.0	17.3
2050	17.4	18.7	21.0	23.5	25.1	24.7	23.4	23.1	22.4	21.2	19.4	17.9
2060	17.7	19.2	21.2	23.8	25.3	24.9	23.4	23.6	22.9	21.7	19.2	18.0
2070	18.1	19.3	21.7	24.6	26.3	25.6	24.2	23.9	23.3	21.8	19.4	18.3
2080	18.4	20.1	22.0	24.9	26.6	26.0	24.8	24.5	23.8	22.3	20.0	19.1
2090	19.2	20.8	22.4	25.2	26.9	26.4	25.3	24.8	24.6	22.5	20.9	19.1

Los meses que comprende el período primavera-verano, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre, tendrán incrementos de 3.8, 3.5, 4.0, 3.8, 3.8 y 2.8°C respectivamente al final del siglo con respecto a los valores de la climatología actual 1977-2006 para el mismo período, resultando en un incremento promedio de temperatura media para el período primavera-verano de 3.6°C. En lo que respecta al período otoño-invierno en los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril, a finales del siglo los incrementos de temperatura media serán de 3.1, 2.9, 3.6, 3.8, 3.2 y 3.7°C respectivamente, con un incremento promedio para el período otoño-invierno de 3.4°C, esto indica que este período tenderá a hacerse más cálido con respecto al período primavera-verano.

La precipitación acumulada anual en los escenarios futuros (Cuadro 19), muestra disminuciones en la década del 2020 las cuales se van incrementando conforme transcurre el siglo. El período primavera-verano a finales del siglo presentará una disminución de 74 mm con respecto al mismo período en la climatología actual 1977-2006 mientras que el porcentaje de lluvia invernal medido en los meses de enero, febrero y marzo en relación a la precipitación anual disminuye ligeramente de 3.8% en la climatología actual a 3.7% a fines del siglo XXI y que concuerda con las estimaciones realizadas por el IPCC (IPCC, 2007). Camilloni (2008) reportó tanto incrementos como decrementos de precipitación en

su región de estudio, lo que refuerza la idea de la realización de estudios de impacto de cambio climático a nivel regional.

Cuadro 19. Valores mensuales de precipitación acumulada para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2020	18.0	6.6	0.1	3.2	20.8	156.1	187.4	158.9	128.4	42.3	14.2	8.4
2030	19.4	7.4	2.8	3.9	23.3	144.9	190.1	170.7	136.8	56.8	17.9	8.9
2040	19.0	6.5	0.6	4.6	12.8	140.3	174.3	166.9	97.2	52.3	13.9	13.1
2050	15.0	5.0	1.3	3.8	22.4	155.7	188.6	173.0	120.9	49.6	13.7	10.9
2060	16.9	5.4	1.7	4.7	15.0	162.0	191.5	170.0	133.6	41.3	9.7	10.4
2070	17.5	7.0	2.9	3.2	15.7	113.2	166.2	162.5	114.3	42.6	14.4	8.2
2080	18.3	5.8	1.8	4.7	19.8	148.7	200.0	166.4	118.0	40.7	13.7	9.5
2090	17.7	5.8	2.5	2.9	13.7	139.6	192.7	151.4	106.8	42.6	14.1	10.2

Las Figuras 13 y 14 muestran las tendencias de los valores de temperatura media anual y precipitación acumulada anual desde el año 1977 y hasta fines del siglo XXI. En lo que corresponde a la temperatura media anual (Figura 13) se tendría un incremento constante durante todo el siglo, hasta llegar a un valor de 23.6°C en el 2099, que comparado con el valor actual de la climatología 1977-2006 que es de 19.7°C, indica un incremento total de casi 4°C, valor que cae dentro del rango proyectado por el IPCC (IPCC, 2007) para la región de Centroamérica. Al respecto Camilloni (2008) informa sobre incrementos de temperatura media anual que van de 0.7 a 0.9°C en una región de Argentina para el escenario A2 en la década 2020-2030.

El comportamiento del parámetro de precipitación acumulada anual en la Figura 14, ha mostrado grandes variaciones durante el período 1977-2006, lo cual puede deberse a la presencia o ausencia del fenómeno “El Niño Oscilación del Sur”, que de acuerdo con varios autores ha demostrado tener influencia en la precipitación del país (Magaña *et al.*, 2004).

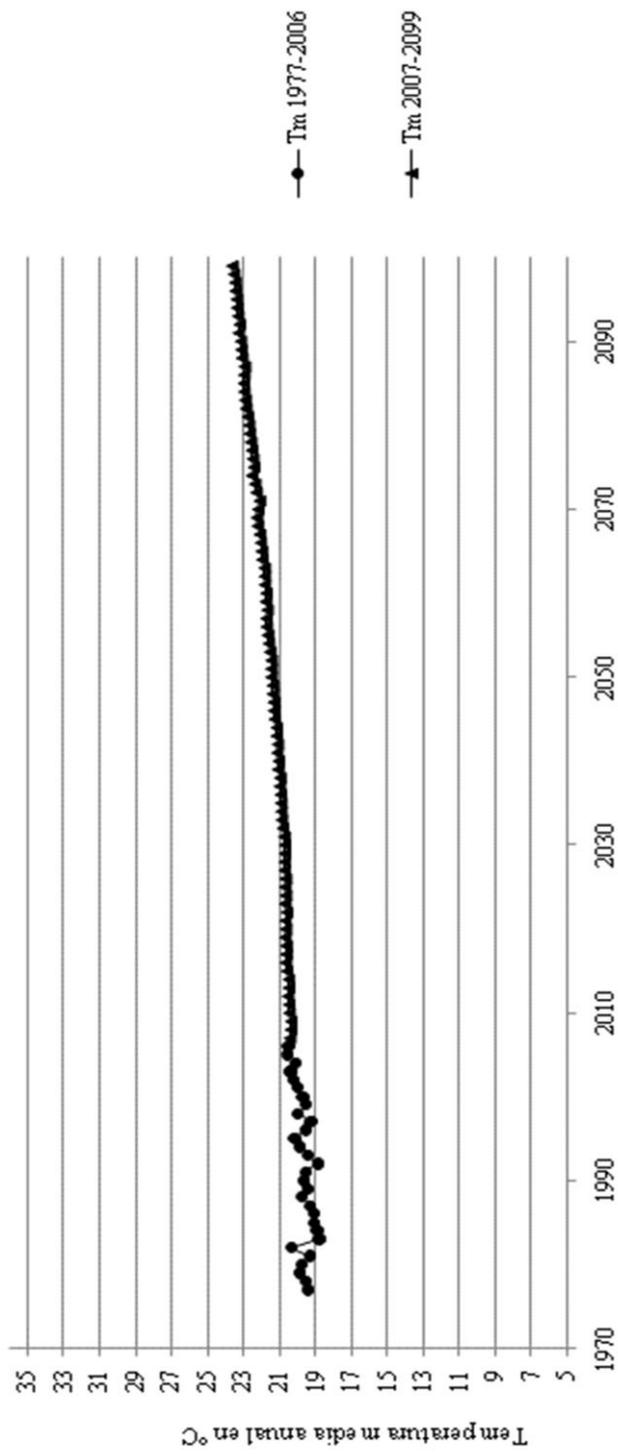


Figura 13. Temperatura media anual para dos períodos: valores observados en 1977-2006 y valores esperados en 2007-2009 en la Región Ciénega de Chapala.

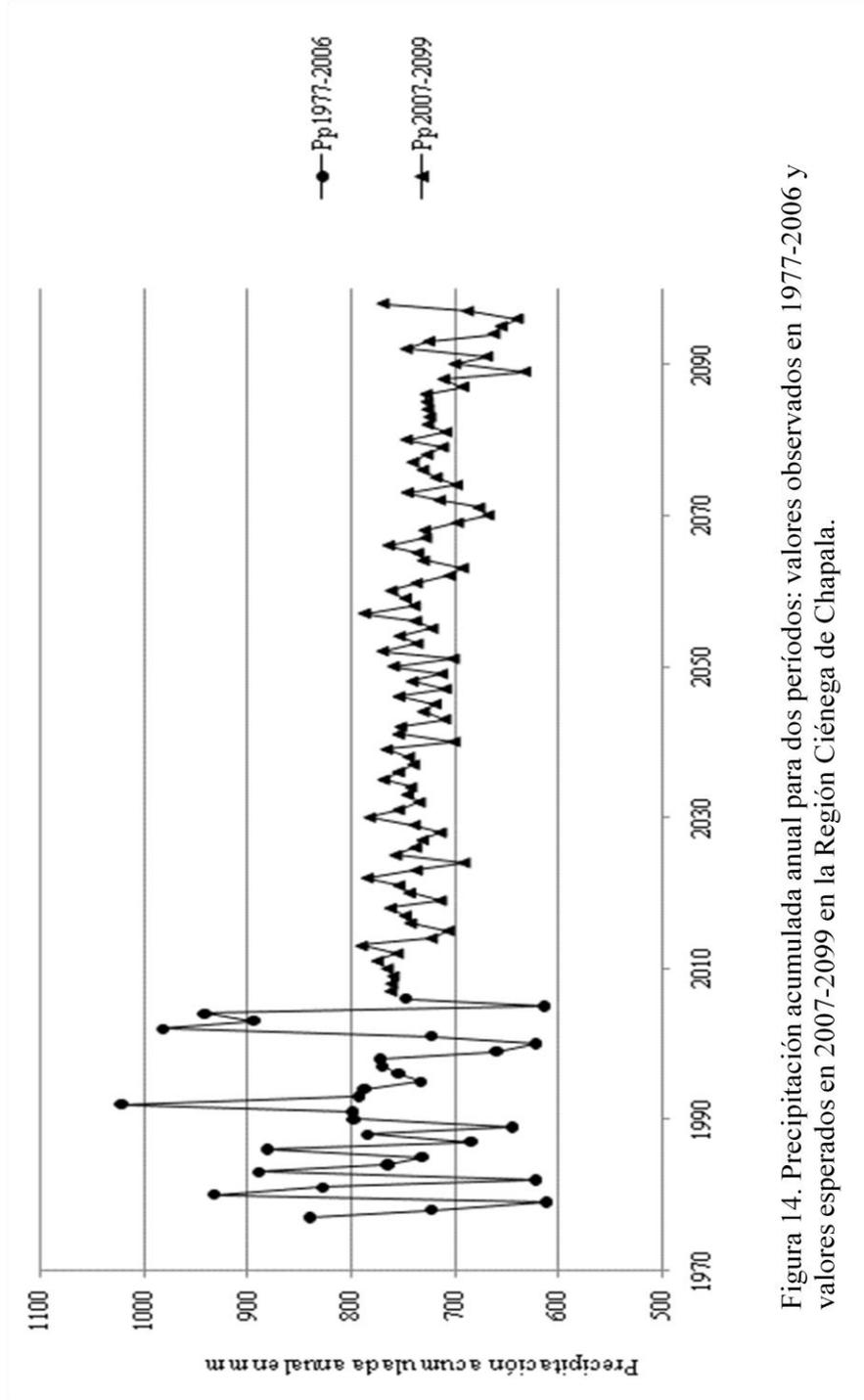


Figura 14. Precipitación acumulada anual para dos períodos: valores observados en 1977-2006 y valores esperados en 2007-2099 en la Región Ciénega de Chapala.

En la Figura 15, se presentan las tasas de cambio en porcentaje para cada década a partir de 1970 con respecto a los valores de la climatología actual 1977-2006. Se observan valores de aproximadamente 5% de cambio que se mantienen estables para la temperatura media anual, aunque con un incremento de más del 10% a partir del año 2060. En el caso de la precipitación acumulada anual, los porcentajes de cambio son más variables durante todo el período analizado, pero es de resaltar que estos cambios llegan a ser de hasta 15% menos que la precipitación actual en esta región de estudio debido a que para los escenarios futuros de este parámetro climático no se consideran los eventos extremos debido a que no son incluidos en los modelos de circulación aquí utilizados. Convendría realizar modelos específicos para este tipo de eventos ya que México se ve fuertemente influido por los fenómenos que ocurren en los océanos debido a su ubicación, por lo que ese tipo de investigación requeriría de un grupo interdisciplinario mayor.

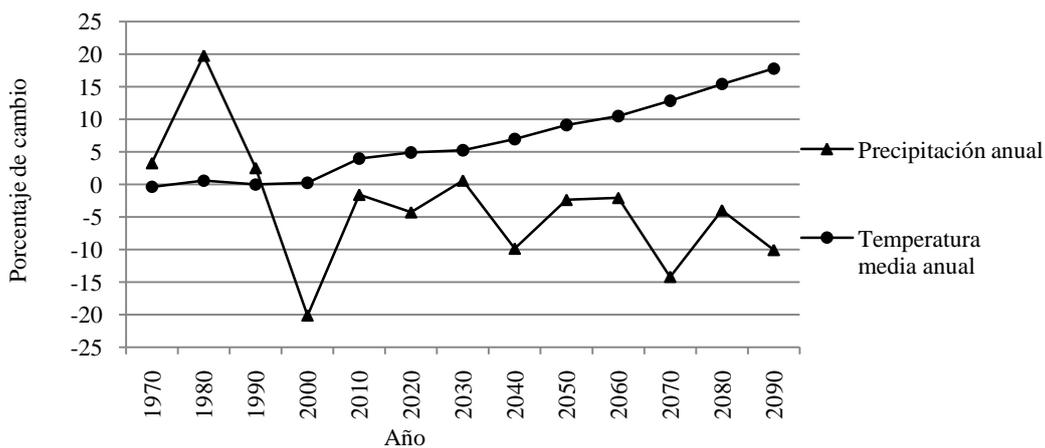


Figura 15. Tasas de cambio en porcentaje, de la temperatura media anual y la precipitación acumulada anual, para algunas décadas de la Región Ciénega de Chapala. Valores positivos indican porcentaje de incremento, valores negativos indican porcentaje de decremento.

Para estos dos parámetros se realizó una prueba de detección de cambio de tendencia o ruptura en la serie mediante el método SNHT, resultando altamente significativos los años 2063 para la temperatura media anual y 2061 para la precipitación acumulada anual, esto es, alrededor de la década de los años 2060's se esperaría un cambio en las tendencias de estos dos parámetros climáticos, la temperatura media experimentaría un incremento más marcado mientras que la precipitación acumulada disminuiría.

5.2.2. Estimación de las temperaturas mínima y máxima mensuales para la serie 2007-2009.

5.2.2.1. Modelos de regresión.

Con base en el análisis de los datos 1977-2006 para los parámetros climáticos de temperatura mínima y temperatura máxima mensuales, se detectó que ambos muestran autocorrelación positiva de acuerdo con la Prueba Durbin-Watson con valores de 1.16 y 1.22 para temperatura mínima mensual y temperatura máxima mensual respectivamente, que al compararlos con los valores críticos resultan en rechazo de H_0 , lo que indica que se tiene estacionalidad. En la Figura 16 se muestra esta característica.

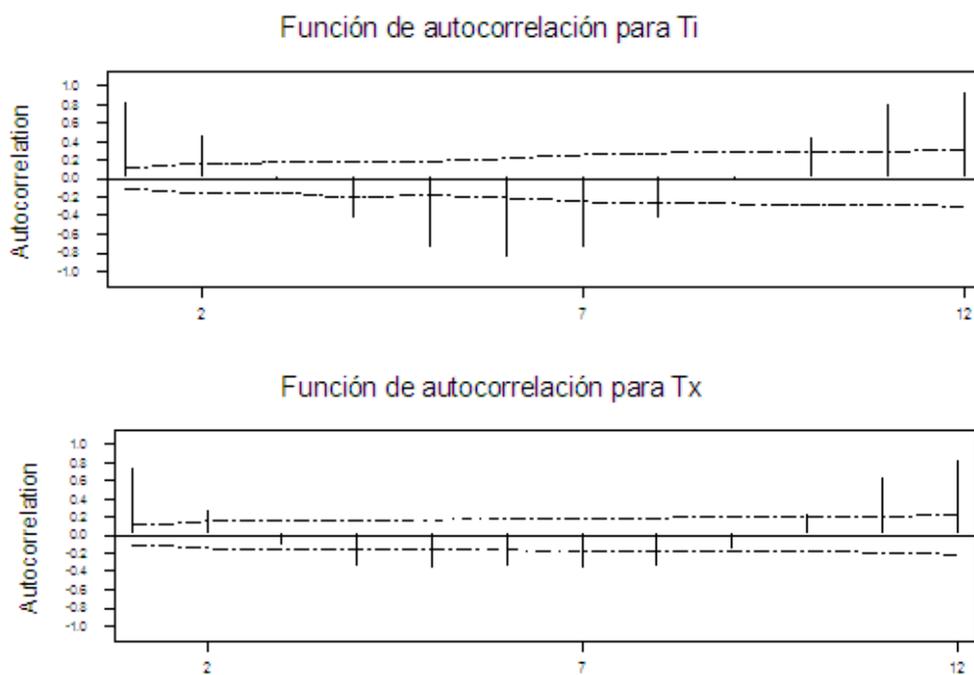


Figura 16. Autocorrelación de los residuales para los parámetros transformados de temperatura mínima y temperatura máxima con desfase de 12.

Esta autocorrelación positiva indica que un valor de temperatura mínima o máxima mayor al promedio en el período t tiende a ser seguida de un valor también mayor al promedio en el siguiente período, o bien, un valor menor al promedio en el período t tiende a ser seguido de un valor también menor al promedio en el siguiente período. Esto se explica debido a la estacionalidad de estos parámetros climáticos que se ven modificados de acuerdo con la estación del año.

Los dos parámetros se ajustaron bien (valores de r^2 de 95% para los dos parámetros) al modelo trigonométrico mencionado en el capítulo de Materiales y Métodos, quedando como:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{L}\right) + \beta_3 \text{cos}\left(\frac{2\pi t}{L}\right) + \beta_4 \text{sen}\left(\frac{4\pi t}{L}\right) + \beta_5 \text{cos}\left(\frac{4\pi t}{L}\right) + \beta_6 Tm + \varepsilon_t$$

Como se observa se incluye el valor de la temperatura media mensual debido a que es el único valor con el que se contaría para escenarios futuros. Los coeficientes de los modelos de regresión para cada uno de estos parámetros se muestran en el Cuadro 20. Se observa que todos los coeficientes son significativos, con excepción del coeficiente β_5 correspondiente al término $\text{cos}\left(\frac{4\pi t}{12}\right)$ del modelo. El coeficiente β_6 correspondiente a la temperatura media, resulta altamente significativo, por lo cual se consideró adecuada su inclusión en los modelos de estimación.

Cuadro 20. Coeficientes de los modelos de regresión para estimar temperatura mínima mensual y temperatura máxima mensual, y sus valores p .

Coeficiente	Valor del coeficiente para estimar T mínima		Valor del coeficiente para estimar T máxima	
	valor	valor p	valor	valor p
β_0	-2.3871	0	0.9865	0
β_1	-0.0002	0	7.3E-05	0
β_2	-0.1214	0	0.0545	0
β_3	-0.0477	0	0.0276	0
β_4	0.0232	0	-0.0137	0
β_5	-0.0038	0.294	0.0018	0.175
β_6	1.6517	0	0.771	0

En ambos modelos, el término de tendencia β_1 es significativo, pero de signo contrario, esto es, mientras que para la temperatura mínima muestra un decremento ligero, en la temperatura máxima la tendencia es a incrementarse muy ligeramente.

Los análisis de varianza de la regresión para los modelos de estimación de los dos parámetros climáticos se muestran en el Cuadro 21, y muestran alta significancia para ambos parámetros. Esto indica que para los parámetros de temperatura mínima mensual y temperatura máxima mensual, el uso de modelos trigonométricos permite obtener estimaciones que arrojan errores muy bajos, lo que es deseable en la predicción de valores

climáticos, y más aún en la predicción de escenarios futuros. La aplicación de estos modelos en otras zonas de estudio, deberá hacerse con reservas debido a que los modelos aquí obtenidos responden a las condiciones regionales estudiadas.

Cuadro 21. Análisis de varianza de los modelos de regresión para la temperatura mínima y temperatura máxima mensuales.

Parámetro	Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	F	p
Temperatura mínima	Regresión	6	40.8698	6.8116	2156.36	0.000
	Error	545	1.7216	0.0032		
	Total	551	42.5914			
Temperatura máxima	Regresión	6	4.56289	0.76048	1805.95	0.000
	Error	545	0.2295	0.00042		
	Total	551	4.79239			

5.2.2.2. Escenarios futuros para temperatura mínima y temperatura máxima.

En la Figura 17 se observan las tendencias futuras de estos dos parámetros climáticos, así como la tendencia de la oscilación térmica anual. La temperatura mínima muestra una ligera disminución a partir del año 2007 y hasta el año 2031, a partir de este año, se inicia un ligero incremento, con una tasa promedio de 0.06°C , que a fines del siglo llevará a la temperatura mínima anual a ser de 12.6°C .

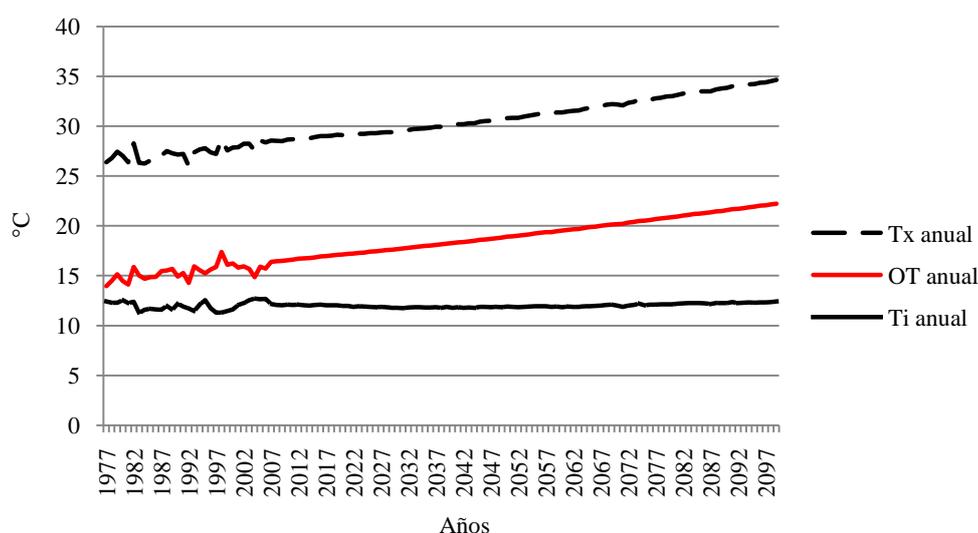


Figura 17. Tendencias de la temperatura máxima (Tx), temperatura mínima (Ti) y oscilación térmica (OT) anuales para dos períodos: valores observados 1977-2006 y valores estimados 2007-2099 en la Región Ciénega de Chapala.

La temperatura máxima anual por el contrario, muestra siempre una tendencia al incremento, se detecta una tasa de incremento de 0.81°C por cada década, por lo que este parámetro llega a ser, a fines del siglo, de 34.6°C, esto es 7.3°C más elevado con respecto al valor de temperatura máxima en la climatología actual 1977-2006 que es de 27.3°C.

Con respecto a los valores mensuales, las temperaturas mínimas que abarcan este período se muestran en el Cuadro 22, en el que se observa que enero se mantiene como el mes más frío durante este período y junio como el menos frío. Los incrementos de temperatura mínima mensual a fines del siglo (2099) con respecto a la climatología actual (1977-2006), serán de 0.1°, -0.2°, -0.4°, 0.5°, 0.6°, 1.1°, 2.3°, 2.3°, 1.2, 0.2, 0.2° y 0.0°C, lo que muestra un balance entre incrementos y decrementos de este parámetro climático a través del año. Para los meses que abarca el ciclo primavera-verano, de mayo a octubre, el promedio de temperatura mínima llegará a ser de 14.8°C que representa un incremento de 0.1°C con respecto al período 1977-2006 y para el ciclo otoño-invierno (noviembre a diciembre), la temperatura mínima promedio será de 9.7°C, un incremento de 0.4°C.

Cuadro 22. Valores mensuales estimados de temperatura mínima para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2020	7.47	8.50	10.00	12.56	14.89	15.20	15.05	15.40	14.37	12.54	9.98	7.83
2030	7.39	8.23	9.76	12.23	14.54	15.13	14.91	14.97	14.29	12.34	9.79	7.65
2040	7.52	8.36	10.00	12.35	14.27	15.08	14.83	15.01	14.21	12.11	9.70	7.96
2050	7.60	8.38	9.97	12.26	14.46	15.34	15.17	15.32	14.12	12.12	9.82	8.18
2060	7.60	8.53	9.92	12.21	14.35	15.20	14.85	15.45	14.35	12.30	9.47	8.07
2070	7.69	8.42	10.05	12.63	14.89	15.49	15.26	15.40	14.43	12.11	9.40	8.14
2080	7.74	8.73	10.09	12.60	14.85	15.57	15.48	15.64	14.58	12.34	9.63	8.49
2090	8.09	9.08	10.08	12.52	14.80	15.62	15.63	15.59	15.05	12.18	10.11	8.30

Las temperaturas máximas mensuales, tendrán los valores mostrados en el Cuadro 23. Mayo se mantiene como el mes más cálido, y a fines del siglo todos los meses presentarán temperaturas máximas arriba de 30°C. Los incrementos de este parámetro por mes en el año 2099 con respecto a la climatología actual 1977-2006 serán de 7.2°, 7.5°, 7.7°, 8.8°, 7.3°, 7.3°, 7.8°, 7.1°, 7.0°, 6.5°, 6.3° y 7.1°. Para el ciclo primavera-verano la temperatura máxima promedio será de 34.8°C, correspondiendo a un incremento de 6.5°C con respecto

a la climatología 1977-2006. Un incremento similar se tendrá para el ciclo otoño-invierno, llegando a una temperatura máxima promedio de 32.9°C.

Cuadro 23. Valores mensuales estimados de temperatura máxima para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2020	25.54	27.66	30.13	32.95	33.77	31.42	29.11	28.68	28.60	28.59	27.35	25.49
2030	25.93	27.78	30.37	33.20	34.07	31.99	29.57	28.87	29.10	28.94	27.66	25.73
2040	26.66	28.55	31.35	34.03	34.45	32.58	30.08	29.48	29.60	29.27	28.09	26.74
2050	27.33	29.16	31.93	34.60	35.36	33.50	31.02	30.36	30.11	29.87	28.82	27.62
2060	27.88	30.00	32.50	35.22	35.95	34.03	31.32	31.10	30.95	30.68	28.90	27.99
2070	28.60	30.42	33.36	36.51	37.30	35.03	32.37	31.68	31.65	31.07	29.39	28.67
2080	29.26	31.56	34.08	37.20	38.00	35.82	33.24	32.55	32.44	31.97	30.31	29.84
2090	30.47	32.78	34.76	37.83	38.71	36.59	34.06	33.16	33.59	32.41	31.63	30.12

La oscilación térmica (Cuadro 24), muestra un incremento general resultado principalmente del aumento de la temperatura máxima, ya que la tasa de cambio de esta no es proporcional a la tasa de cambio de la temperatura mínima. Este parámetro pasaría de 15.4°C anual en la actualidad, a un valor de 21.6°C anual a fines del siglo (año 2090), es decir el ambiente tenderá a ser más extremoso, sobre todo hacia condiciones más calurosas, lo anterior reforzará la importancia de analizar el comportamiento de las temperaturas máxima y mínima y no sólo considerar el valor de la temperatura media. Los meses de marzo a julio muestran la mayor amplitud de oscilación térmica a finales del siglo, con incrementos que van de 6.3°C a 7°C, con respecto a la climatología actual.

Cuadro 24. Valores mensuales estimados de la oscilación térmica para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2020	18.07	19.15	20.12	20.40	18.88	16.22	14.06	13.27	14.23	16.05	17.37	17.66
2030	18.54	19.55	20.62	20.98	19.53	16.86	14.66	13.90	14.81	16.60	17.87	18.08
2040	19.14	20.19	21.35	21.68	20.18	17.50	15.26	14.47	15.40	17.16	18.39	18.78
2050	19.73	20.78	21.96	22.34	20.90	18.16	15.85	15.05	15.99	17.75	19.00	19.44
2060	20.28	21.47	22.58	23.01	21.60	18.83	16.48	15.65	16.60	18.38	19.44	19.93
2070	20.91	21.99	23.31	23.87	22.42	19.53	17.11	16.28	17.23	18.96	19.99	20.54
2080	21.52	22.83	24.00	24.60	23.16	20.24	17.76	16.91	17.87	19.63	20.69	21.35
2090	22.39	23.70	24.68	25.31	23.91	20.97	18.43	17.56	18.55	20.24	21.53	21.82

Las variaciones estimadas en los escenarios futuros no son sólo temporales sino también espaciales, como se muestra en las Figuras 18 a 22 con las imágenes de distribución espacial y temporal en la Región Ciénega de Chapala de cada uno de los parámetros climáticos anuales de algunos años seleccionados y, con el fin de tener una comparación se muestra la imagen de los valores normales correspondientes a la climatología actual 1977-2006. Se observa en la distribución espacial de la temperatura mínima anual (Figura 18), que actualmente se tienen valores entre 10°C y 14°C, con un gradiente de este a oeste de la región. La tendencia de este parámetro es que presentará una ligera disminución hacia el año 2030 de aproximadamente 0.3°C, con un incremento a partir de este año y hasta el 2090 de casi 1°C, para llegar a fines del siglo a un rango entre 13°C y 14°C para toda la zona de estudio.

Para la temperatura máxima anual (Figura 19), se tienen actualmente valores entre 26°C y 29°C, siendo la parte este más cálida. Conforme avance el siglo se tendría un incremento de 1°C hasta el 2030 a nivel regional y a partir de este año se tendrían incrementos de 1°C por cada década, llegando a temperaturas de casi 35°C para el 2090. A finales del siglo la parte oeste que comprende los municipios de Chapala, Jocotepec, Tizapán el Alto y Tuxcueca será 1°C más caliente que el resto de la región.

La temperatura media en la Figura 20 presenta una distribución de valores actuales entre 19°C y 20°C, pero con tendencia a incrementos ligeros hasta el 2030, a partir de aquí los incrementos son mayores llegando a un valor de temperatura media para el año 2090 de hasta 23.5°C, esto es, a fines del siglo XXI la temperatura media anual en la Región Ciénega de Chapala se habrá incrementado en casi 4°C. Para este parámetro climático el municipio de Tototlán muestra los valores más bajos a nivel regional.

La distribución de la oscilación térmica (Figura 21), en la climatología actual muestra valores entre 12°C y 18°C, con un gradiente en dirección oeste-este, y conforme avance el siglo este parámetro se irá incrementando hasta llegar a un rango entre 20°C y 22°C, alrededor del año 2070 y que continuará hasta fines del siglo en toda la región de estudio. Estos incrementos en la oscilación térmica, serán reflejo de los incrementos significativos de la temperatura máxima como se ha venido mencionando.

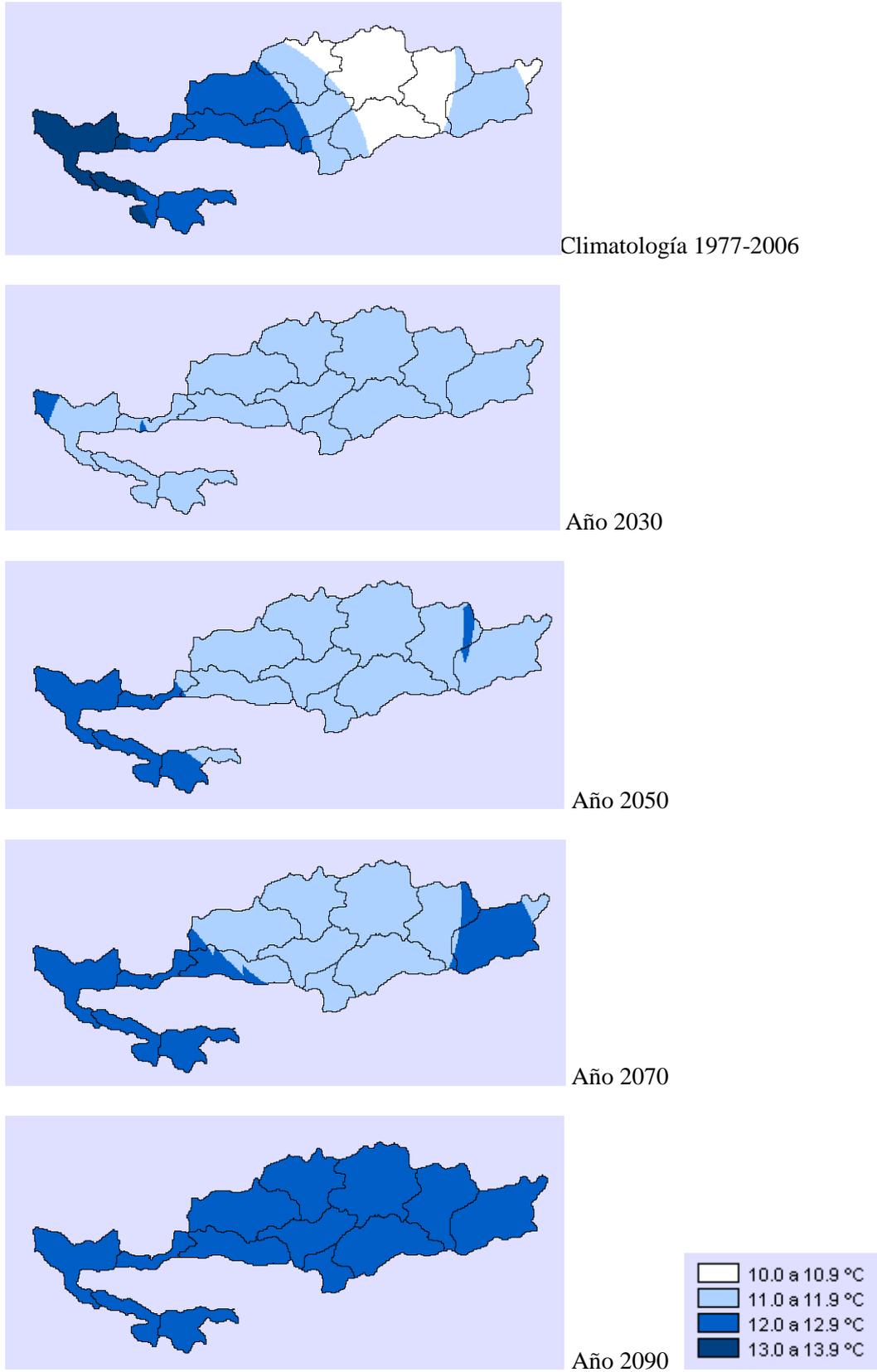
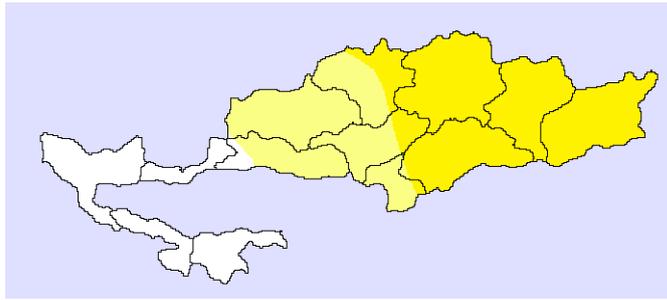
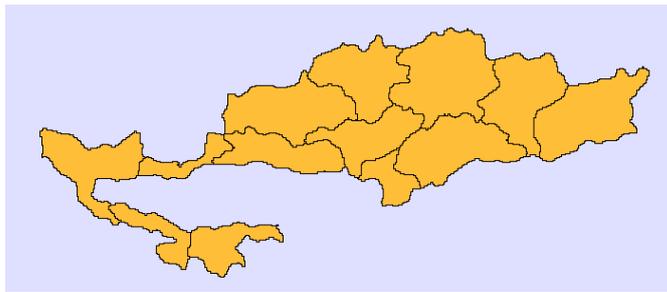


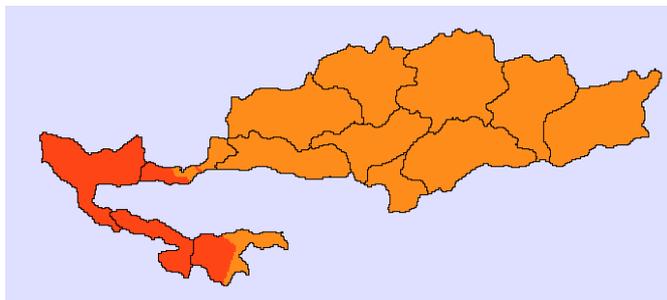
Figura 18. Tendencia de la temperatura mínima anual en la Región Ciénega de Chapala.



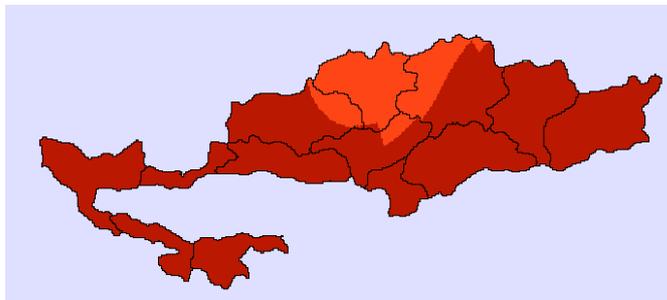
Climatología 1977-2006



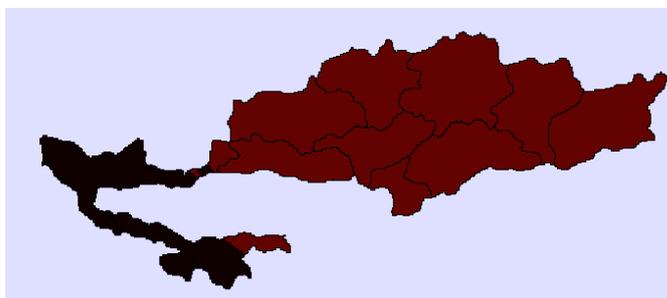
Año 2030



Año 2050



Año 2070



Año 2090

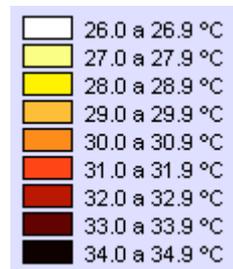


Figura 19. Tendencia de la temperatura máxima anual en la Región Ciénega de Chapala.

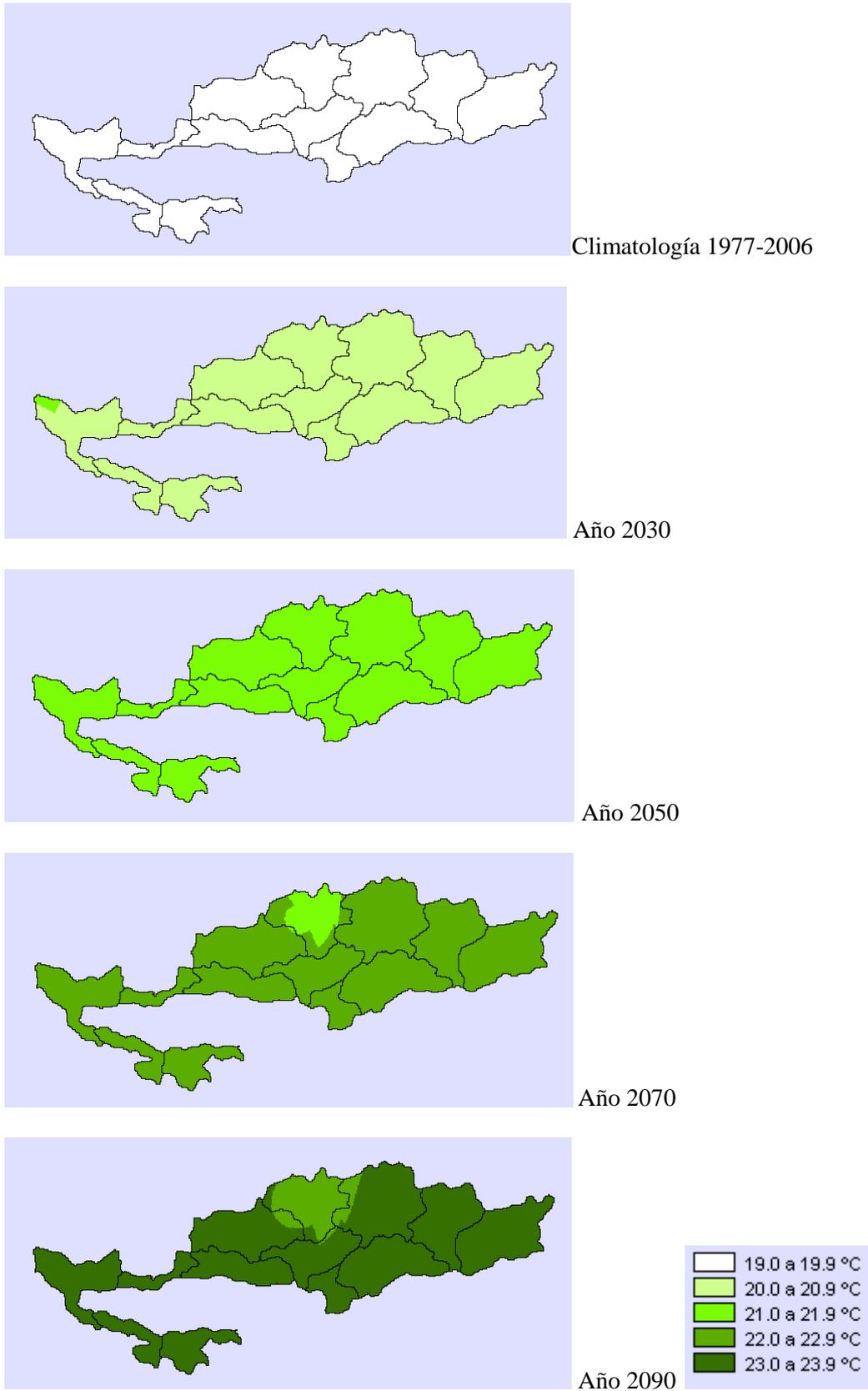
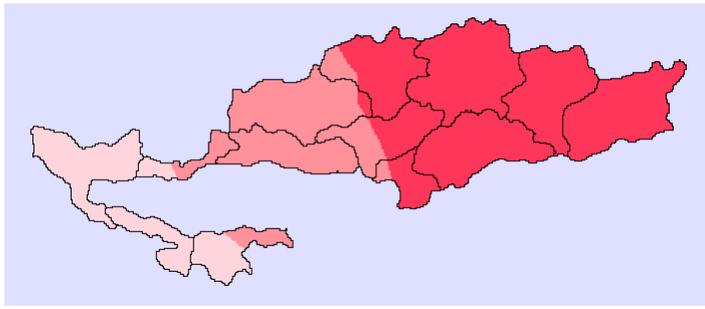
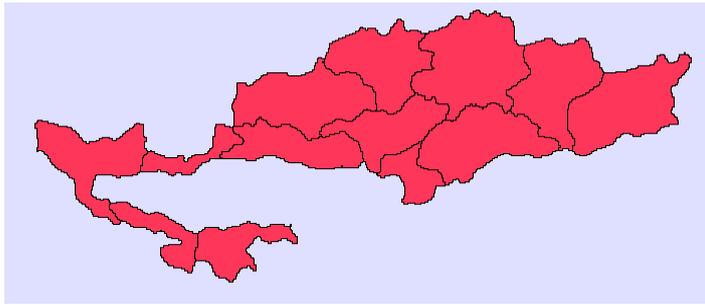


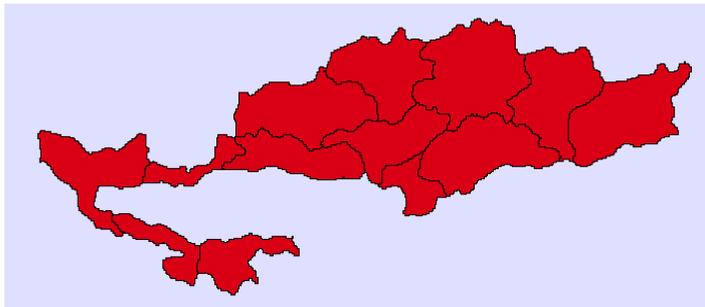
Figura 20. Tendencia de la temperatura media anual en la Región Ciénega de Chapala.



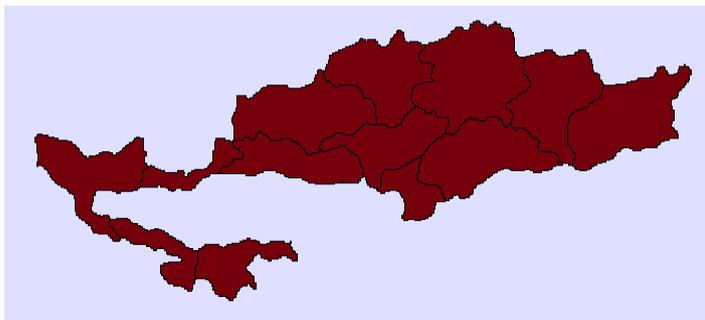
Climatología 1977-2006



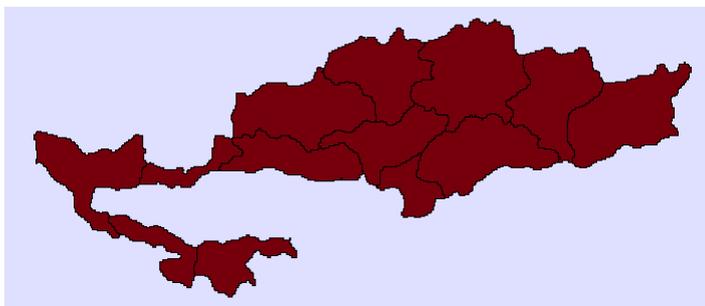
Año 2030



Año 2050



Año 2070



Año 2090



Figura 21. Tendencia de la oscilación térmica anual en °C en la Región Ciénega de Chapala.

Por último, en lo que respecta a la distribución de la precipitación acumulada anual, en la Figura 22 se observan que en la actualidad se presentan valores entre 750 y 850 mm al año, siendo más favorecido el municipio de Degollado. Durante el primer tercio del siglo (entre los años 2010 y 2030), se incrementa la superficie con valores de precipitación entre 800 y 850 mm beneficiando a los municipios de Atotonilco el Alto, Ayotlán, Degollado y La Barca. Después de este período se tendrán tendencias hacia una disminución, hasta llegar a fines del siglo a valores entre 600 y 750 mm con gradiente de oeste a este, esto es, se llegará a una disminución de entre 100 y 150 mm menos de precipitación a nivel regional, que corresponden a una disminución entre 11% y 13.4% de la precipitación actual.

De nuevo se menciona que no se están considerando los efectos de los eventos extremos como El Niño Oscilación del Sur, pero a medida que se logre recabar mayor información y de mejor calidad de las capas oceánicas, se estará en condiciones de realizar una mejor predicción de parámetros climáticos afectados por dichos eventos, realizando estimaciones tanto estacionales como interanuales (Harrison, 2005).

Con los resultados estimados para los escenarios futuros, se observa que a nivel de la Región Ciénega de Chapala se espera durante el presente siglo efectos directos en los parámetros climáticos, esto es, se predicen cambios en las tendencias climáticas derivados de un notorio calentamiento de la superficie del planeta. Dichos cambios se estima que variarán de una región a otra, por lo que es importante realizar estudios similares en zonas de condiciones diferentes, tanto climáticas como fisiográficas.

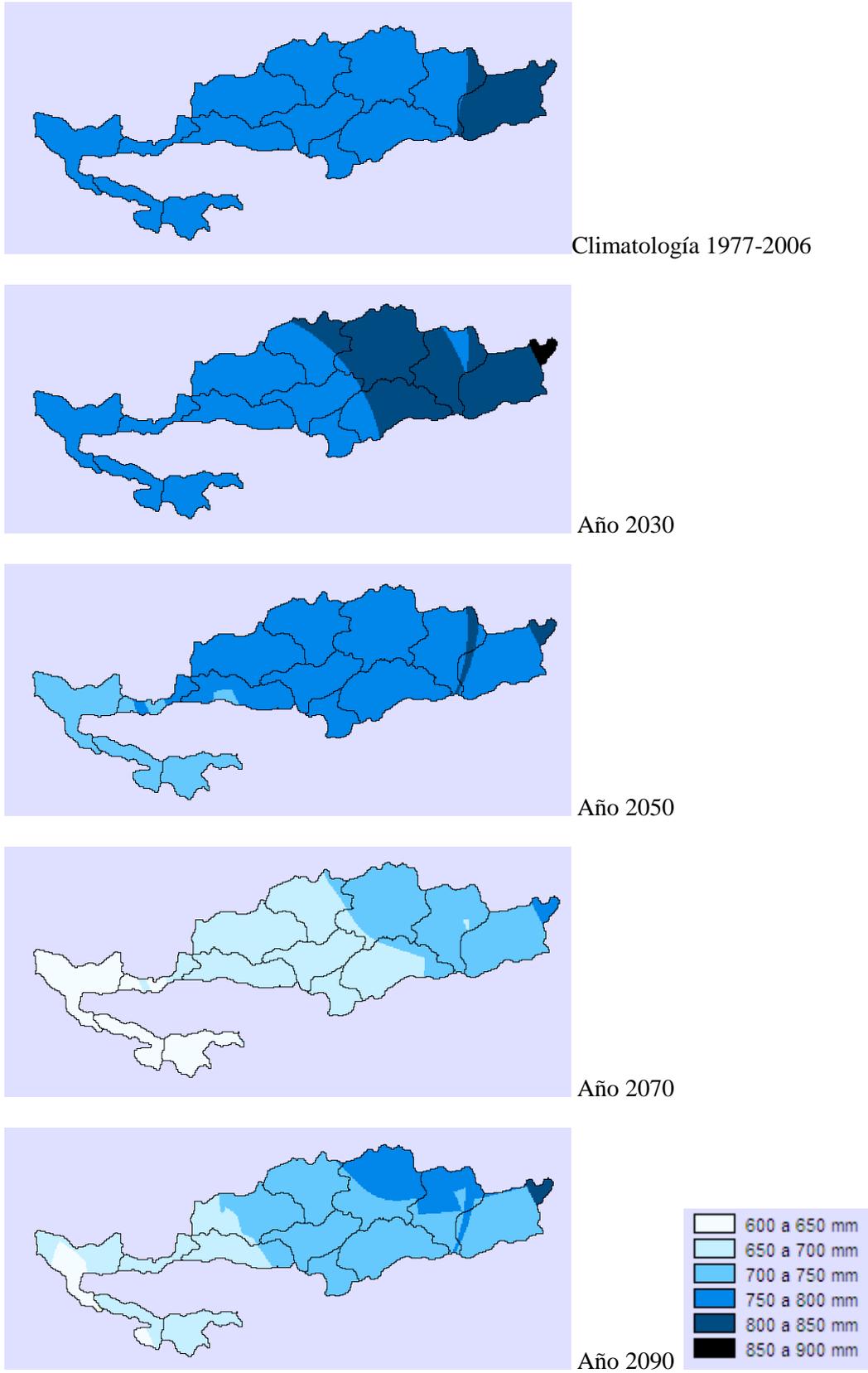


Figura 22. Tendencia de la precipitación acumulada anual en la Región Ciénega de Chapala.

5.2.2.3. Escenarios futuros para los tipos climáticos Köppen-García.

Una vez establecidos los valores futuros para los parámetros del clima en la zona de estudio, se determinaron los tipos climáticos de acuerdo con la clasificación climática Köppen-García (García, 2004), con los resultados mostrados en la Figura 23.

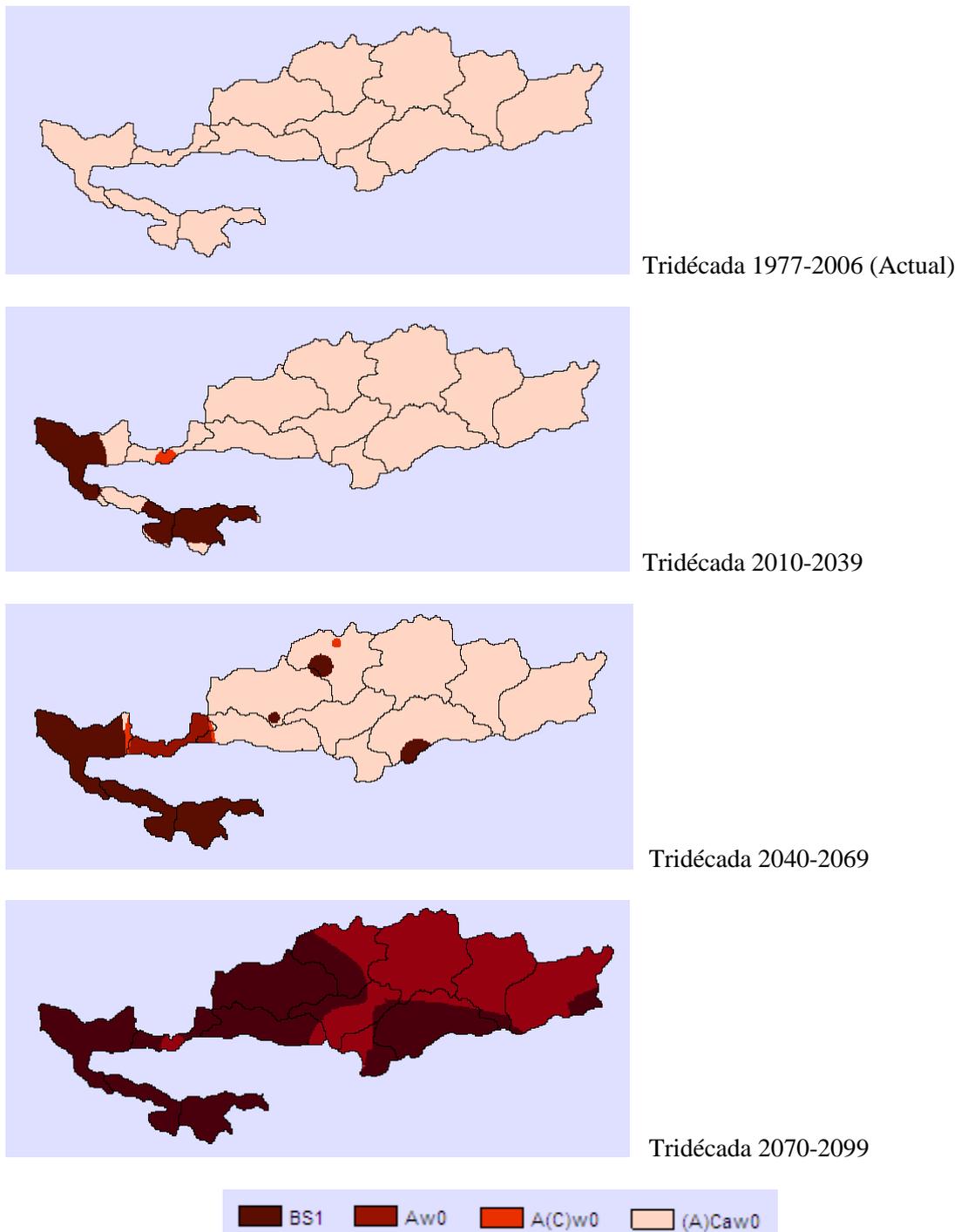


Figura 23. Evolución de tipos climáticos con clasificación Köppen-García para cuatro períodos tridecadales.

De acuerdo con la climatología actual, la Región Ciénega de Chapala presenta el tipo climático (A)Caw₀, esto es, actualmente el clima en la región es semicálido subhúmedo. Para los siguientes tres períodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099, la región de estudio presentará zonas con climas más cálidos y menos húmedos, pasando de semicálido subhúmedo a cálido subhúmedo, hasta llegar a fines del siglo a clima seco BS₁ en casi la mitad de la Región Ciénega de Chapala cubriendo los municipios de Chapala, Jamay, Jocotepec, Poncitlán, Tizapán el Alto, Tuxcueca, Zapotlán, parte de Tototlán y parte de Ocotlán y la otra mitad como clima cálido subhúmedo Aw₀ en los municipios de Atotonilco el Alto, Ayotlán, Degollado, parte de Tototlán y parte de Ocotlán. De acuerdo con estos resultados se esperaría un cambio en los tipos climáticos actuales debidos a las tendencias futuras, tanto de temperatura como de precipitación.

5.3. Impacto de los cambios climáticos sobre el agroclima de la Región.

De acuerdo con los resultados anteriores, para el transcurso del presente siglo, se esperarían incrementos en las temperaturas máximas, mínimas y medias y un decremento en la precipitación. El sector agrícola no escapa al efecto del cambio climático, ya sea de manera directa o indirecta las especies agrícolas se verán afectadas por los incrementos tanto de algunos gases de efecto invernadero como de sus consecuencias en los parámetros climáticos y agroclimáticos, tal como se observa en el Cuadro 25.

Cuadro 25. Impactos del cambio climático sobre el agroclima (Adaptado de Ruiz, 2010).

Parámetro climático	Tipo de impacto directo en agroclimatología	Tipo de impacto indirecto en agroclimatología	Cambios en sistemas agrícolas
Incremento de temperatura media	Disminución de la probabilidad de formación de rocío	Disminución de la disponibilidad de humedad en ambientes áridos y semiáridos	Incremento en la transpiración
	Incremento de evapotranspiración	Incremento de la capacidad de almacenamiento de humedad en la atmósfera	Se detiene la transpiración vegetal e inicia un estado de estrés
		Incremento de eventos lluviosos de alta intensidad.	Inundaciones y daños en plantas

		Incremento de erosividad de la lluvia	Erosión de la capa arable y pérdida de nutrimentos
	Incremento de la capacidad térmica anual y estacional	Incremento en temperaturas diurnas y nocturnas	Alteraciones en tasa fotosintética y respiración vegetal
		Incremento de unidades calor efectivas	Acortamiento del ciclo vegetal
		Disminución de horas frío	Condiciones no adecuadas para la vernalización
Cambio en patrones de precipitación	Cambios en la estación de crecimiento		Cambios en fechas de siembra y cosecha
			Acortamiento duración etapas de desarrollo
	Cambios en la cantidad e intensidad de lluvia estacional (sequía, inundaciones.)	Incremento de erosividad de lluvias	Erosión de la capa arable y pérdida de nutrimentos

5.3.1. Impactos en el agroclima.

5.3.1.1. Evapotranspiración.

Para la estimación de evapotranspiración se utilizó el modelo de Hargreaves, descrito en el capítulo de Materiales y Métodos, sin embargo debido a que la evapotranspiración potencial en el escenario actual se estimó con el método del tanque evaporímetro fue necesario ajustar un modelo que permitiera homologar las estimaciones de evapotranspiración realizadas con el método de Hargreaves. El modelo de regresión lineal utilizado fue $Y = 14.07 + 0.69 ETP_{Hargreaves}$ que ajustó con un valor de r^2 de 0.50. El modelo se validó con los valores de evapotranspiración obtenidos de aplicar el coeficiente K_{pan} a los valores observados de evaporación en cada estación climática de la CNA siguiendo el método del tanque evaporímetro. Los valores de los coeficientes K_{pan} se obtuvieron mediante interpolación para cada estación climática y se indican en el capítulo de Materiales y Métodos en el Cuadro 8.

El análisis de la tendencia de este parámetro agroclimático, muestra un incremento de 350 mm a finales del siglo XXI, como se observa en la Figura 24 donde se observa que

actualmente en la climatología 1977-2006, la evapotranspiración en la región de estudio es de 1334.6 mm al año, y que a fines del siglo esta será de hasta 1683.8 mm, lo que representa un incremento del 26% de evapotranspiración. Un análisis de correlación entre la ETP y la temperatura máxima resultó en un valor de 0.94, mientras que con la precipitación la correlación fue de 0.16, por lo que al ser la temperatura máxima el parámetro térmico que tendrá mayores aumentos a través del presente siglo y que la precipitación, sin considerar los eventos extremos, no muestra marcadas variaciones a futuro, el incremento estimado para la evapotranspiración será debido principalmente al primer parámetro climático mencionado.

Para explicar el incremento de evapotranspiración potencial en función del incremento de temperatura media se obtuvo el modelo $Y = -616 + 99.6Tm$ con un valor de r^2 de 0.99, mediante el cual es posible deducir que por cada grado que aumente la temperatura media anual, la evapotranspiración se incrementará 99.6 mm en el año.

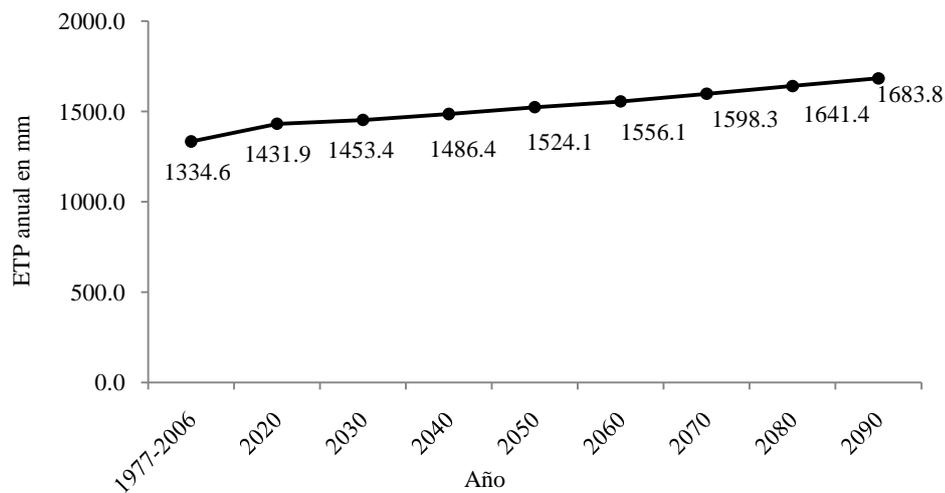


Figura 24. Tendencias de la ETP anual en mm para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

Los efectos de incremento en la evapotranspiración pueden variar, por ejemplo si en el suelo los mantos freáticos se encuentran alejados de la capa arable, el incremento en las temperaturas del aire provocaría una mayor evaporación del agua del suelo y del subsuelo, sobre todo en suelos arenosos, así como un incremento en la transpiración de la planta y por tanto mayor demanda de agua, que al no encontrarse cercana a la zona radicular, puede provocar estrés en la planta, lo que posiblemente incremente el proceso de transpiración

para llegar a un estado de equilibrio interno (Brouwer y Heibloem, 1986). Los incrementos en la evaporación del agua del suelo, debidos al aumento de temperaturas, llevarán a condiciones de déficit de humedad para las plantas y procesos de salinización del suelo en la estación seca del año.

En la Figura 25 se muestra la distribución temporal y espacial de la evapotranspiración potencial para la zona de estudio. Se observa que en la actualidad la Región Ciénega de Chapala presenta valores de evapotranspiración potencial que caen en el rango de 1200 a 1400 mm anuales para los municipios de Chapala, Jamay, Jocotepec, La Barca, Ocotlán, Tizapán el Alto, Tuxcueca, Tototlán, Zapotlán y parte de Degollado; y con valores entre 1400 a 1600 mm anuales para Atotonilco el Alto, Ayotlán y el resto de Degollado.

Conforme avance el siglo XXI, este parámetro agroclimático tenderá a incrementarse uniformizando sus valores entre 1400 y 1600 mm anuales en toda la zona de estudio, alrededor de los años 2030 a 2050. Para el año 2070 los municipios de Chapala, Tizapán el Alto, Tuxcueca y parte de Jocotepec y La Barca verán incrementada su evapotranspiración a valores entre 1600 y 1800 mm anuales, manteniéndose los demás municipios en los valores de 1400 a 1600 mm anuales. Ya a fines del siglo, alrededor del año 2090, la Región Ciénega de Chapala completa mantendrá una evapotranspiración uniforme con valores entre 1600 y 1800 mm anuales.

Los escenarios del incremento de evapotranspiración, están desarrollados con información obtenida de los modelos de circulación general, los cuales no detallan las estimaciones climáticas a nivel local. Es necesario considerar que los cambios que ocurran en el lago de Chapala, afectarán de manera directa la evapotranspiración de la zona por lo que la conservación de este cuerpo de agua es vital para evitar, en lo posible, cambios drásticos que aceleren la pérdida de humedad de la región de estudio.

Como se mencionó anteriormente, el incremento en este parámetro agroclimático conlleva impactos directos en la disponibilidad de agua, que puede ser representado por el número de meses húmedos, en los cuales la precipitación excede a la evapotranspiración.

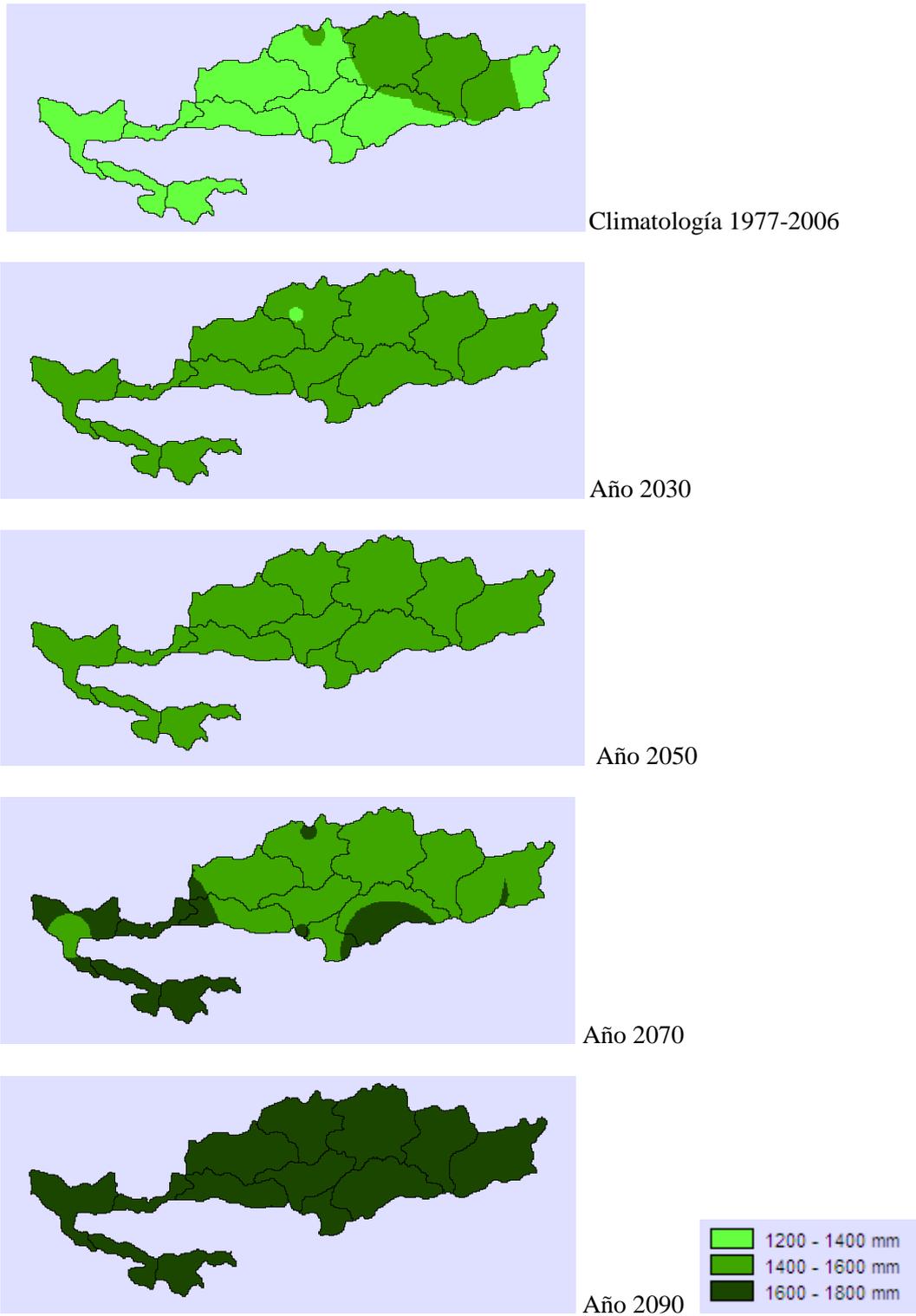


Figura 25. Distribución temporal y espacial de la evapotranspiración potencial anual en mm en la Región Ciénega de Chapala.

Como se observa en la Figura 26, en la climatología actual se cuenta con cuatro meses húmedos en el año, sin embargo conforme avance el siglo XXI, se observa una tendencia de disminución, lo que concuerda con lo reportado por Martelo (2004), quien indica que se estima una disminución del número de meses húmedos al año en todo el país de Venezuela, incrementándose la superficie con cuatro meses húmedos y disminuyendo la de 6 a 12 meses húmedos. Para nuestra zona de estudio después del año 2059 se incrementará la frecuencia de años con sólo tres meses húmedos, a partir del 2089 se tendrán años con dos meses húmedos, para llegar al 2094 con ningún mes húmedo.

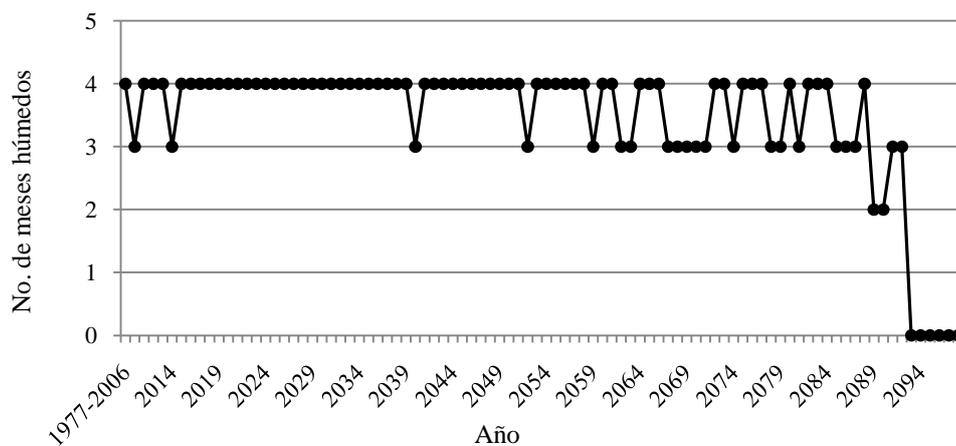


Figura 26. Tendencia futura del número de meses húmedos al año en la zona de estudio.

5.3.1.2. Cociente P/ETP.

Como indicador del grado de aridez, el cociente P/ETP muestra que los efectos del incremento de temperatura resultan en incrementos de la evapotranspiración potencial, como se indicó en el apartado anterior, y debido a que la precipitación pluvial no presentará incrementos significativos para el siglo XXI, el cociente P/ETP se verá también afectado.

En la Figura 27 se observa el valor de este cociente en la climatología actual y su tendencia en el transcurso del siglo XXI. La Región Ciénega de Chapala presenta en la actualidad un valor promedio del cociente P/ETP de 0.58, lo que la incluye en la categoría subhúmeda seca (Williams y Balling, 1996), y alrededor del año 2040 este valor desciende por debajo de 0.51, lo que la categoriza como semiárida.

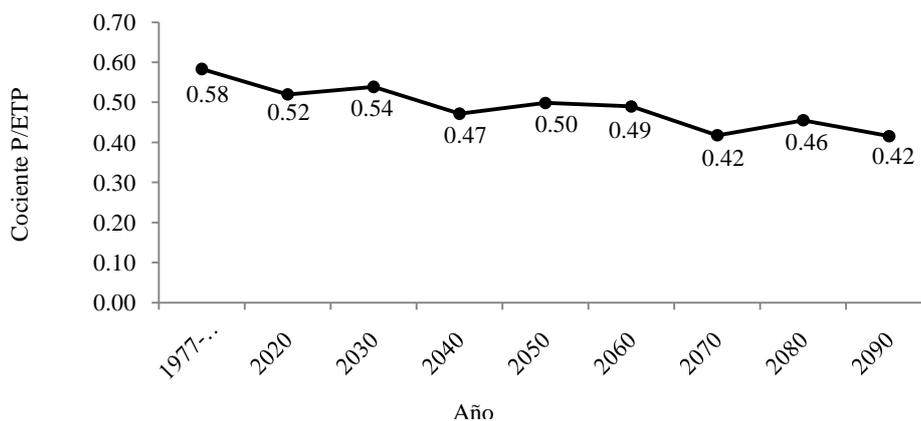


Figura 27. Tendencia del cociente P/ETP en algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

La distribución temporal y espacial de este parámetro agroclimático se observa en la Figura 28, en la que se muestra para la agroclimatología actual que el municipio de Chapala es el único que cae en la categoría de subhúmeda húmeda y los restantes municipios se encuentran categorizados como subhúmeda seca, una pequeña parte del municipio de Tototlán presenta valores más bajos por lo que se presenta una pequeña superficie en la categoría de semiárida. Estos valores de la climatología actual son similares a los reportados por Ruiz *et al.* (2004), y se considera que las diferencias son debidas a que en ese estudio se realizó el análisis de la climatología para la serie 1961-2000, mientras que en este estudio la climatología actual considera la serie 1977-2006. A fines del siglo XXI, toda la Región Ciénega de Chapala se encontrará en la categoría semiárida con valores del cociente P/ETP entre 0.21 a 0.50.

Estos resultados son indicativos de la degradación que podrá sufrir la zona de estudio, por lo que de nuevo se menciona la importancia de la conservación de las condiciones ambientales del lago de Chapala. El establecimiento de programas que permitan la adecuada alimentación al lago, la extracción de agua mediante un estricto control, la disminución de contaminantes, entre otras medidas, seguirán siendo necesarias para lograr mantener el efecto termorregulador de este lago.

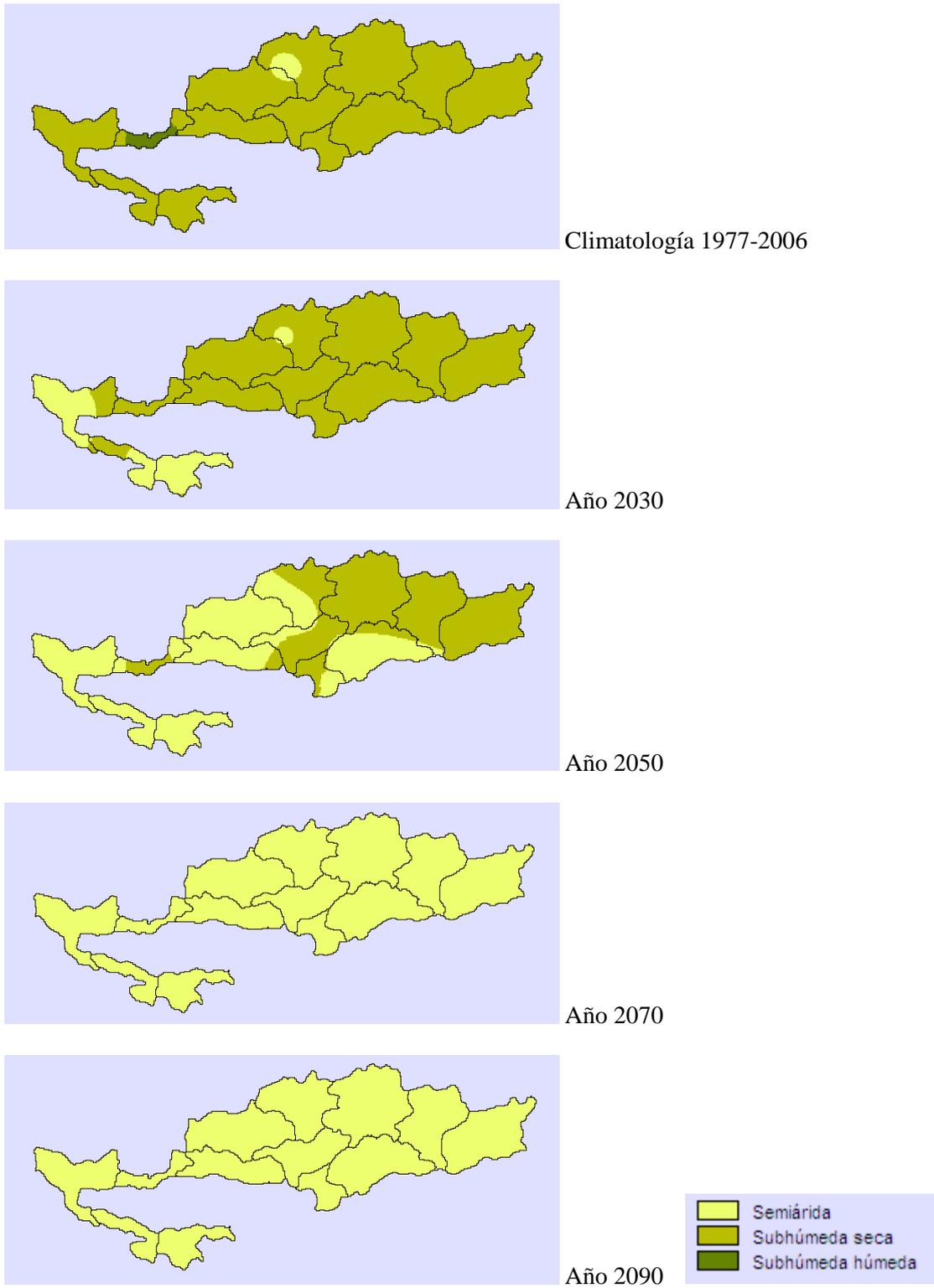


Figura 28. Distribución temporal y espacial del Cociente P/ETP en la Región Ciénega de

5.3.1.3. Estación de crecimiento.

La estación de crecimiento tenderá a experimentar algunos cambios, como se muestra en los resultados estimados para inicio, fin y duración de la misma en el Cuadro 26. Se observa que en la climatología actual 1977-2006 el inicio de la estación de crecimiento se tiene determinado alrededor del 13 de junio (164 en días julianos), para finales del siglo XXI el inicio se tendría el 18 de junio (169 en días julianos), pasando por años con inicio alrededor del 21 de junio. Esto indica que la estación de crecimiento experimentará retrasos de hasta una semana. Para la finalización de la estación de crecimiento, por el contrario, en la climatología actual se tiene el 15 de noviembre (319 en días julianos) y a fines del siglo se adelantaría al 2 de noviembre (306 en días julianos), esto es un adelanto de casi dos semanas. Con estas estimaciones, se tiene entonces el acortamiento de la duración de la estación de crecimiento desde 155 días (climatología actual) a 137 días (finales del siglo XXI), lo cual representa una disminución total de 18 días, lo que afectará a aquellas especies vegetales que tienen su desarrollo en esta época del año.

Cuadro 26. Tendencia en los valores de la estación de crecimiento en la Región Ciénega de Chapala para algunos años seleccionados en el análisis prospectivo.

AÑO	Inicio EC (días julianos)	Fin EC (días julianos)	Duración EC (días)
1977-2006	164	319	155
2020	164	313	149
2030	165	323	158
2040	167	318	151
2050	165	316	151
2060	166	308	142
2070	172	309	137
2080	167	303	136
2090	169	306	137

En la Figura 29 se puede observar cómo se van modificando las gráficas de la estación de crecimiento, que se forman con la línea de tendencia de la precipitación pluvial acumulada mensual y los cruces con las líneas de 0.5ETP y 0.33ETP de acuerdo con la metodología FAO (1997).

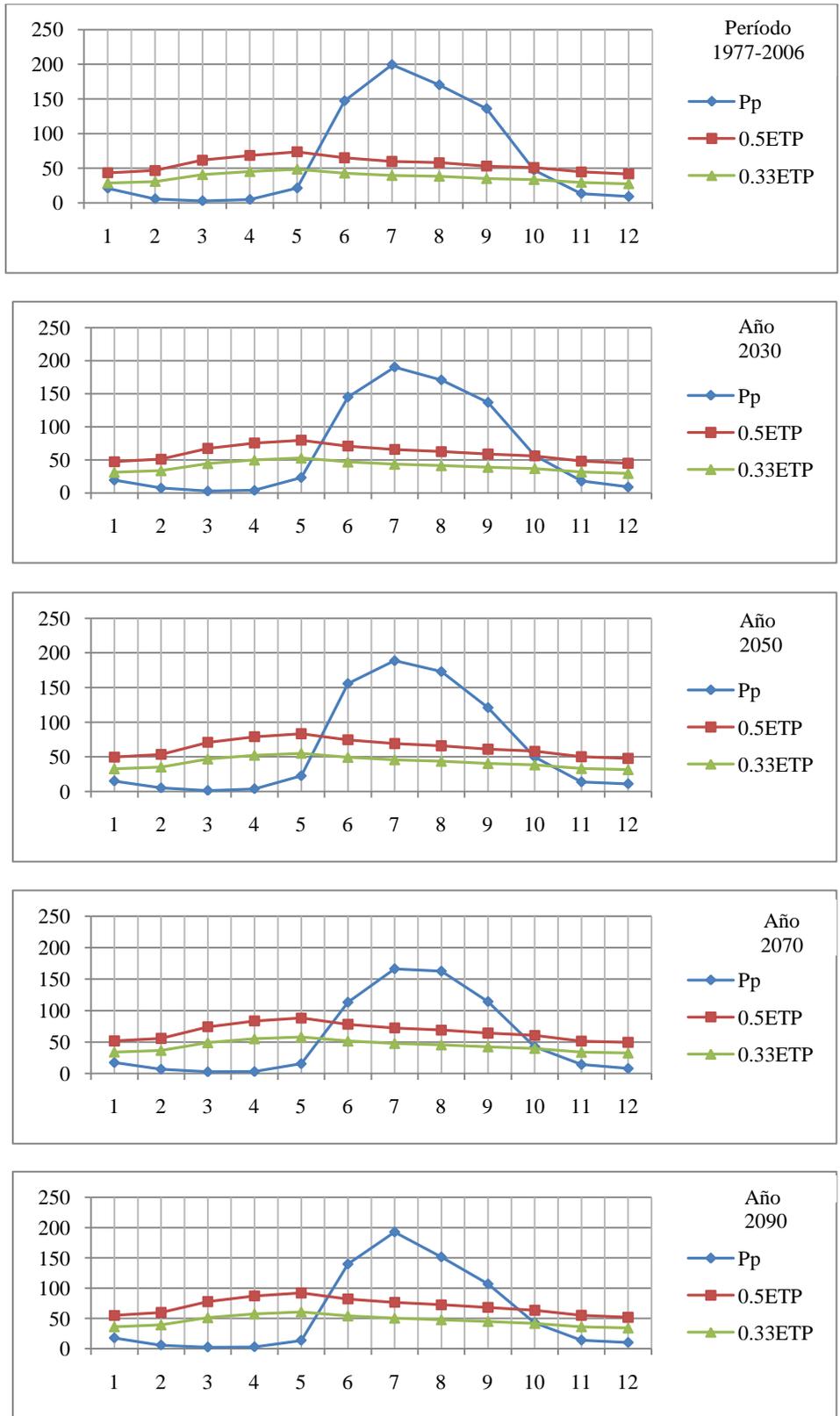


Figura 29. Evolución de la estación de crecimiento durante el siglo XXI.

De acuerdo con el acortamiento de la estación de crecimiento que se revela en la Figura 29, se pueden esperar impactos negativos en gran parte de las especies agrícolas de temporal, tal como mencionan Ruiz *et al* (2000), quienes encontraron, en un estudio retrospectivo, una disminución en promedio de 7 días, para el estado de Jalisco, de la duración de la estación de crecimiento durante la segunda mitad del siglo XX, detectando un incremento de la superficie con estación de crecimiento más corta y una disminución de la superficie con estación de crecimiento más larga.

5.3.1.4. Temperaturas diurnas y nocturnas.

Tanto durante el día como en la noche la planta realiza ciertas actividades metabólicas, en el día la temperatura del aire influye en la tasa fotosintética y durante la noche influye en la respiración vegetal. De acuerdo con las temperaturas medias estimadas para este siglo, se determinaron las temperaturas diurnas y nocturnas medias anuales, como se muestra en la Figura 30.

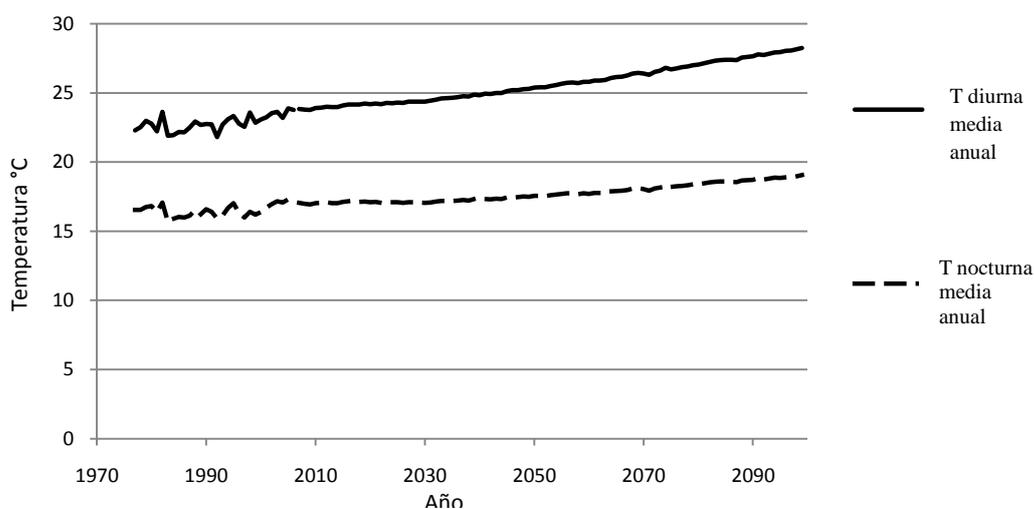


Figura 30. Temperaturas diurna y nocturna anuales estimadas para el período 2007-2099 en la Región Ciénega de Chapala.

La climatología de 1977-2006 indica que la temperatura diurna media actual es de 22.8°C, pero que sufrirá incrementos que la llevarán a fines del siglo hasta 27.6°C, mientras que la temperatura nocturna media anual inicia en 16.5°C y llegará a 18.7°C hacia finales de siglo. Estos resultados indican que los procesos de fotosíntesis y respiración de las plantas pueden verse afectados por estos dos factores. La respiración aumenta exponencialmente

con la temperatura y a partir de los 45°C disminuye como efecto de la degradación de proteínas y la pérdida de estabilidad de las membranas.

5.3.1.5. Unidades calor acumuladas.

Otro parámetro agroclimático que se puede ver afectado por el cambio climático es la cantidad de unidades calor acumuladas, tanto en el ciclo Primavera-Verano de mayo a octubre, como en el ciclo Otoño-Invierno de noviembre a abril, y que tiene una relación directa con las etapas de desarrollo de las plantas. En el Cuadro 27 se muestran los cambios esperados de este parámetro agroclimático en la Región Ciénega de Chapala para los dos ciclos de cultivo.

Cuadro 27. Valores estimados de las Unidades Calor Acumuladas para los ciclos PV y OI en la Región Ciénega de Chapala, para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

Ciclo PV	Unidades calor acumuladas UC _{Base 10}	Ciclo OI	Unidades calor acumuladas UC _{Base 5}
1977-2006*	2110	1977-2006*	2330
2020	2294	2019/2020	2504
2030	2317	2029/2030	2502
2040	2356	2039/2040	2575
2050	2448	2049/2050	2623
2060	2510	2059/2060	2694
2070	2606	2069/2070	2767
2080	2698	2079/2080	2853
2090	2776	2089/2090	2923

*Valor de la climatología 1977-2006

Para el ciclo Primavera-Verano se esperaría un incremento de 666 unidades calor para llegar a un valor de 2776 unidades calor, y de manera similar para el ciclo Otoño-Invierno se esperaría un incremento de 593 unidades calor para llegar a un valor de 2923 unidades calor. Los valores finales estimados en ambos ciclos de cultivos son resultado de la aplicación de la temperatura base que para esta investigación se consideraron para maíz (10°C) y para trigo (5°C), como representativos de los cultivos de la región en ambos ciclos agrícolas.

5.3.1.6. Horas frío.

Si el incremento de las temperaturas traerá una mayor acumulación de unidades calor, también se esperaría una disminución de las horas-frío necesarias para varias de las especies vegetales del ciclo Otoño-Invierno, tal como se observa en la Figura 31. Se observa que para la climatología actual 1977-2006 se tiene un total de 148 horas-frío acumuladas durante toda la duración del ciclo OI, para años futuros ese valor disminuirá drásticamente llegando a desaparecer para el ciclo OI 2039-2040, lo que afectaría a aquellas especies que requieren de cierto tiempo de vernalización.

El número de horas frío a partir del año 2019 muestra que se tienen valores negativos debido a los efectos negativos de temperaturas invernales altas, ya que el cálculo comúnmente se realiza con los modelos Da Mota y Weinberger, los cuales fueron generados en países con clima templados, por lo que al aplicarse en zonas semicálidas y cálidas resulta en valores negativos. Al respecto Perez *et al.* (2008), establecen como mejor modelo para zonas subtropicales el modelo dinámico, el cual considera el efecto de las altas temperaturas.

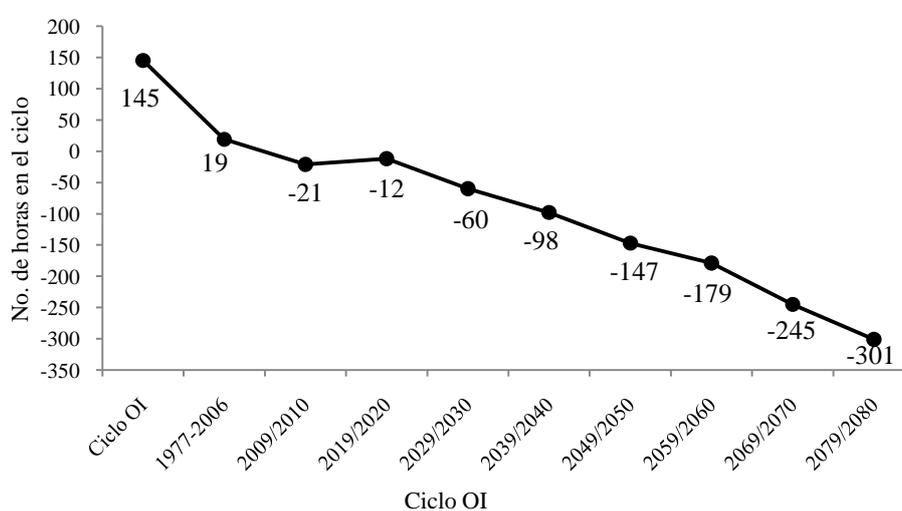


Figura 31. Tendencias estimadas del número de horas frío acumuladas durante el ciclo OI en la zona de estudio para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

5.3.2. Impactos en especies agrícolas.

Con estos resultados se considera que para los cultivos del ciclo PV, la rápida acumulación de unidades calor fomentará un rápido desarrollo de las especies agrícolas, reduciendo el

tiempo de la demanda hídrica, tal como lo mencionan Ojeda *et al.* (2011). Sin embargo en condiciones de aumento de evapotranspiración y temperatura del aire, las plantas tienden a incrementar el consumo de agua, por lo que el uso de variedades precoces o intermedias resistentes a condiciones de estrés hídrico sería una buena opción aun considerando un menor rendimiento.

Para el ciclo OI las condiciones serán similares, el desarrollo de los cultivos se acelerará y las tasas fotosintéticas se verán afectadas. Para este ciclo el adelanto en las fechas de siembra permitiría la disminución de los efectos del incremento de temperaturas en las etapas críticas del cultivo. En el caso de cultivos perennes, la etapa de inicio de floración (en el caso de frutales que requieren período de vernalización) se verá afectada al no acumular las suficientes horas frío, la etapa de fructificación puede presentar acortamiento por una rápida acumulación de unidades calor así como incrementos en su demanda hídrica lo que afectaría fuertemente sus rendimientos, tal como lo mencionan Ojeda *et al.* (2011). Será necesaria la evaluación de los impactos sobre cultivos específicos para su adaptación a los escenarios futuros.

Estos cambios tendrán impactos específicos en algunos cultivos de la región de estudio, tales como el trigo que es sembrado en enero; el maíz que se cultiva durante la estación de crecimiento del ciclo PV; y el agave tequilero como cultivo semiperenne. En este apartado se muestran los resultados sobre estos tres cultivos en específico, considerando tanto el período retrospectivo 1961-2006, como el período prospectivo 2007-2099.

5.3.2.1. Trigo de invierno.

Se analizó de manera retrospectiva la serie de tiempo 1961-2006, en lo referente al período que abarca el cultivo de trigo en la zona de estudio y que corresponde a los meses de enero a junio debido a que en la Región Ciénega de Chapala la variedad Salamanca con la que se realizó el análisis, es comúnmente sembrada en enero. Los parámetros agroclimáticos analizados fueron el número de días con temperatura máxima mayor a 25°C, número de días con temperatura mínima menor a 5°C, número de días desde la siembra hasta la floración y número de días desde la floración hasta la madurez fisiológica y se muestran en el Cuadro 28.

Alrededor del año 2000 se observa un incremento en el número de días con temperatura máxima mayor a 25°C y el número de días con temperatura mínima menor a 5°C, reflejo de los cambios observados en temperatura máxima y mínima a fines del siglo XX y principios del XXI. Con respecto a los parámetros días siembra-floración (S-F) y días floración-madurez (F-M) se observan ligeros decrementos e incrementos durante el transcurso de la serie, lo cual puede explicarse al considerar las tendencias opuestas que se observaron en las décadas de los 80's y 90's entre la temperatura máxima y la temperatura mínima, esto es una tendencia de incremento de la temperatura máxima y una tendencia de disminución de la temperatura mínima para período de enero a junio, en el cual se desarrolla el trigo en esta zona de estudio.

Cuadro 28. Tendencias observadas para dos variables agroclimáticas y dos variables fenológicas del trigo de invierno en los meses de enero a junio, para algunos períodos del análisis retrospectivo.

Período	Días Tx>25°C	Días Ti<5°C	Días S-F	Días F-M
1961-69	127	11	84	35
1970-79	132	7	81	36
1980-89	132	12	84	36
1990-99	143	16	82	37
2000-06	155	12	78	33

El análisis de correlación entre estos parámetros que se muestra en el Cuadro 29, indica que el número de días con temperaturas máximas mayores a 25°C afecta de manera negativa tanto a los días S-F, como a los días F-M, por el contrario el incremento en el número de días con temperatura mínima inferior a 5°C tiene una ligera correlación positiva con los parámetros anteriores, siendo mayor para los días S-F.

Cuadro 29. Coeficientes de correlación para los parámetros agroclimáticos del trigo observados en el período 1961-2006.

Parámetro agroclimático	Días con temperatura máxima mayor a 25°C	Días con temperatura mínima menor a 5°C
Días siembra-floración	-0.76	0.38
Días floración-madurez fisiológica	-0.42	0.04

Para la estimación prospectiva del número de días con temperatura máxima mayor a 25°C, número de días con temperatura mínima menor a 5°C de la serie 2007-2099, se utilizaron los modelos ajustados del modelo Gompertz presentados en el Cuadro 30. Para la estimación del número de días con temperatura máxima mayor a 25°C, se incluyó en el modelo el valor promedio de temperatura máxima en los meses de enero, febrero y marzo. Para el modelo de estimación de número de días con temperatura mínima menor a 5°C, se incluyó el promedio de la temperatura mínima de los meses de enero y febrero.

Cuadro 30. Modelos Gompertz ajustados para estimar dos variables agroclimáticas del trigo.

Parámetro agroclimático	Modelo Gompertz	Coficiente de determinación r^2
No. De días con temperatura máxima mayor a 25°C	$Y = 98e^{-2300e^{-0.32TxEFM}}$	0.904
No. De días con temperatura mínima menor a 5°C	$Y = 0.0002e^{13e^{-0.027TiEF}}$	0.773

Donde: Y , es el parámetro agroclimático; $TxEFM$, es el promedio de la temperatura máxima de los meses de enero, febrero y marzo; $TiEF$ es el promedio de la temperatura mínima de los meses de enero y febrero.

El modelo utilizado para estimar el número de días con temperatura máxima mayor a 25°C arrojó valores mayores a 180 días en el año 2083 (180.6 días) como se muestra en la Figura 32, cubriendo el total de días que abarcaría este cultivo al sembrarse en enero (el análisis para este cultivo, como se mencionó anteriormente, abarca los meses de enero a junio), por lo que en base a los resultados obtenidos en este parámetro, el cultivo ya no sería apropiado para la región bajo estas condiciones térmicas, esto es, durante todo el ciclo del cultivo se presentarían temperaturas máximas mayores a 25°C lo que mantendría bajo estrés calórico al cultivo durante todo este período, lo que constituye un potencial productivo nulo para esta especie. En lo que se refiere al número de días con temperatura mínima menor a 5°C, en esta misma figura, se observa una tendencia estable de 6 días con estas condiciones durante todo el período 2007-2099.

Al respecto Solís *et al.* (2004) indican la importancia de establecer fechas de siembra que permitan un alargamiento de la etapa reproductiva tardía, lo que mejora el rendimiento. Con esta consideración el análisis del impacto para los otros dos parámetros, días siembra-floración y días floración-madurez fisiológica, se realizó hasta el año 2083.

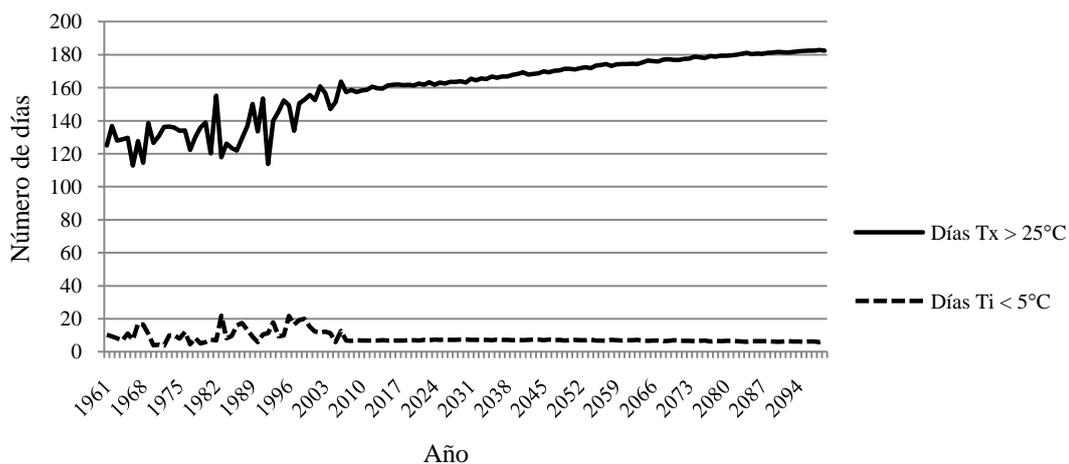


Figura 32. Tendencia del número de días con temperatura máxima mayor a 25°C y número de días con temperatura mínima menor a 5°C durante el período enero a junio, para dos series de tiempo, análisis retrospectivo (1961-2006) y análisis prospectivo (2007-2099).

En la Figura 33 se observan las tendencias de las variables fenológicas días S-F y días F-M. Las diferencias entre el valor observado en la climatología 1977-2006 y el estimado para el 2090 son 16 días menos para el parámetro días S-F y 4 días menos para días F-M, estos resultados indican el impacto que el cambio climático tendría sobre las unidades-calor acumuladas, que al incrementarse conforme pasa el tiempo, las etapas de desarrollo del cultivo se van acortando, esto es, el ciclo del cultivo de trigo tenderá a reducirse en 20 días a finales del siglo XXI.

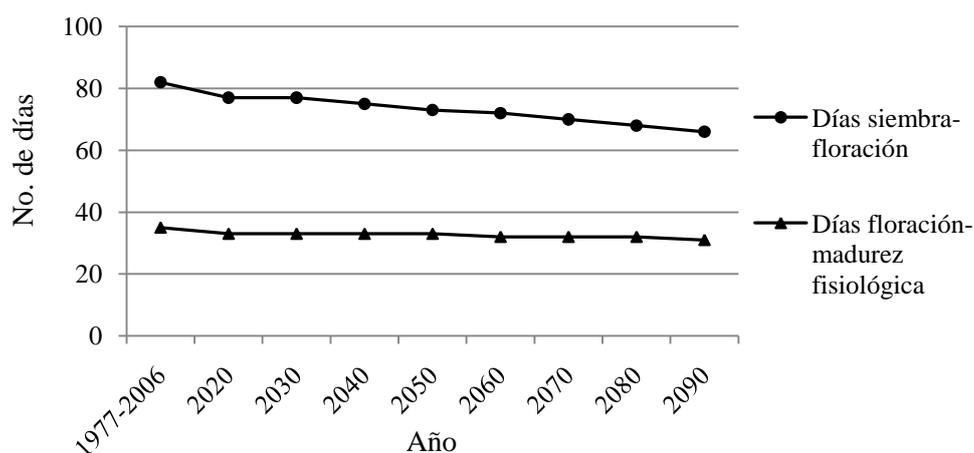


Figura 33. Tendencia futura del número de días S-F y número de días F-M en algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

5.3.2.2. Maíz de temporal.

Acorde con el análisis retrospectivo de la evolución de los parámetros precipitación pluvial y evapotranspiración, involucrados en la determinación de la estación de crecimiento, presentados en la sección 5.1. En el Cuadro 31 se observan los resultados referentes al inicio, terminación y duración de la estación de crecimiento de algunos períodos para la Región Ciénega de Chapala. Se detecta que la fecha de inicio de la EC experimentó un retraso de 2 días al final de la serie con respecto al período 1961-69, el cual se mantuvo casi constante en los períodos intermedios, mientras que la fecha de terminación de la EC muestra también un retraso de 5 días al final de la serie. Estos valores resultaron en el acortamiento de la duración de la estación de crecimiento en el período 1990-99, que a finales de la serie en el período 2000-06, se alargó en 4 días con respecto al período inicial 1961-69. Al respecto Ruiz *et al.* (2000) indican una disminución promedio en la duración de la estación de crecimiento para el estado de Jalisco de 6 días entre dos períodos de 25 años de la segunda mitad del siglo XX, incluyendo en su estudio cuatro de las diez estaciones climáticas analizadas en esta investigación, para las cuales obtuvieron en promedio un atraso de un día, valor similar al aquí reportado.

Cuadro 31. Tendencias observadas de los valores de la estación de crecimiento en algunos períodos del análisis retrospectivo.

Año	Inicio de la EC (días julianos/fecha)	Fin de la EC (días julianos/fecha)	Duración de la EC (días)
1961-69	163/12-Jun	316/12-Nov	153
1970-79	163/12-Jun	317/13-Nov	154
1980-89	166/15-Jun	322/18-Nov	156
1990-99	166/15-Jun	315/11-Nov	149
2000-06	165/14-Jun	322/18-Nov	157

Analizando el impacto sobre las unidades calor acumuladas en este período, considerando como fechas de siembra las correspondientes al inicio de la estación de crecimiento, las etapas S-F con requerimientos térmicos de 812UCE y siembra-madurez (S-M) con requerimientos térmicos de 1582UCE (cuyo cálculo se detalló en el capítulo de Materiales y Métodos), se presentan los valores mostrados en el Cuadro 32 correspondiente a algunos períodos de la serie retrospectiva 1961-2006. En este cuadro se muestra el impacto derivado de los cambios en la temperatura media ya que al incrementarse ésta, resulta en una rápida acumulación de unidades calor y por tanto un acortamiento en las etapas

fenológicas del maíz. Esta condición conlleva un menor período del proceso fotosintético, lo que se reflejaría en un menor llenado de grano como lo indican López *et al.* (2004), al detectar que la tasa de llenado de grano varía de 6.3 a 6.9 mm día⁻¹, para varios cultivares. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Ruiz *et al.* (2000b) quienes detectaron una disminución de la superficie potencial de siembra para variedades de maíz de ciclo intermedio-tardías, debido a la tendencia de incremento de las unidades calor en dos períodos de veinticinco años en la segunda mitad del siglo XX para el estado de Jalisco.

Cuadro 32. Duración de las etapas fenológicas siembra-floración y floración-madurez fisiológica y ciclo de cultivo del maíz durante el ciclo PV en algunos períodos del análisis retrospectivo.

Año	Días siembra-floración	Días floración-madurez	Duración ciclo del cultivo (días)
1961-69	71	79	150
1970-79	72	77	149
1980-89	73	80	153
1990-99	70	78	148
2000-06	67	71	138

Otros parámetros analizados en este análisis retrospectivo fueron temperaturas diurna y nocturna para el ciclo PV y sus resultados se muestran en el Cuadro 33. La temperatura nocturna sufrió una ligera disminución la cual se incrementa a fines de la serie, en cambio la temperatura diurna muestra un constante incremento que la lleva a finales del período a un valor de 24.8°C.

Cuadro 33. Valores observados de temperatura nocturna y temperatura diurna en el ciclo PV en algunos períodos del análisis retrospectivo.

Período	Temperatura nocturna °C	Temperatura diurna °C
1961-69	18.5	23.8
1970-79	18.6	23.8
1980-89	18.4	23.9
1990-99	18.6	24.3
2000-06	19.1	24.8

Se realizó un análisis de correlación entre estos dos parámetros agroclimáticos y el rendimiento de maíz en esta región para las variedades de maíz utilizadas en la zona,

obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.8 para temperatura nocturna y rendimiento, y de 0.5 para temperatura diurna y rendimiento. Estos dos parámetros influyen en la tasa fotosintética y en la respiración, lo que contribuye a la acumulación de biomasa.

Con respecto al análisis prospectivo de los parámetros agroclimáticos para el maíz en el período 2007-2099, se estimó el impacto de los cambios de la estación de crecimiento sobre las etapas de desarrollo S-F y F-M de acuerdo con los valores estimados de inicio de la estación de crecimiento detallados en el apartado 5.3.1.3, y considerando el incremento en la acumulación de unidades calor en períodos de tiempo más cortos (ver Cuadro 27). Estos impactos se muestran en el Cuadro 34.

Cuadro 34. Tendencias esperadas para tres variables fenológicas del cultivo de maíz para algunos años seleccionados en el análisis prospectivo.

Año	Fecha siembra (inicio de EC)	Días siembra-floración	Días floración-madurez
1977-2006*	13-Jun	72	77
2010	16-Jun	65	69
2020	13-Jun	63	68
2030	14-Jun	63	66
2040	16-Jun	62	65
2050	14-Jun	58	63
2060	15-Jun	58	59
2070	21-Jun	56	58
2080	16-Jun	53	55
2090	18-Jun	51	53

*Valor de la climatología 1977-2006

A fines del siglo XXI, la etapa S-F se acorta a 51 días, esto es 21 días de reducción; mientras que la etapa F-M se acorta a 53 días, una reducción de 24 días con respecto a la climatología actual 1977-2006. Esto sin embargo, se daría sólo en caso de seguir utilizando los mismos materiales genéticos y de que su fisiología y su genética lo permitieran.

Si consideramos los resultados obtenidos en párrafos anteriores con respecto a que el inicio de la EC se va retrasando, su duración se va acortando y que debido a que más rápidamente

se alcanzan las unidades calor requeridas por el cultivo de maíz éste irá acortando su duración, fue necesario realizar un análisis de los requerimientos hídricos que iría experimentando el cultivo por etapa fenológica, con los resultados expuestos en la Figura 34. Se observa que debido a la rápida acumulación de unidades calor, cada etapa fenológica experimentará un acortamiento, la relación de este acortamiento con las necesidades hídricas por etapa fenológica se muestran en el Cuadro 35.

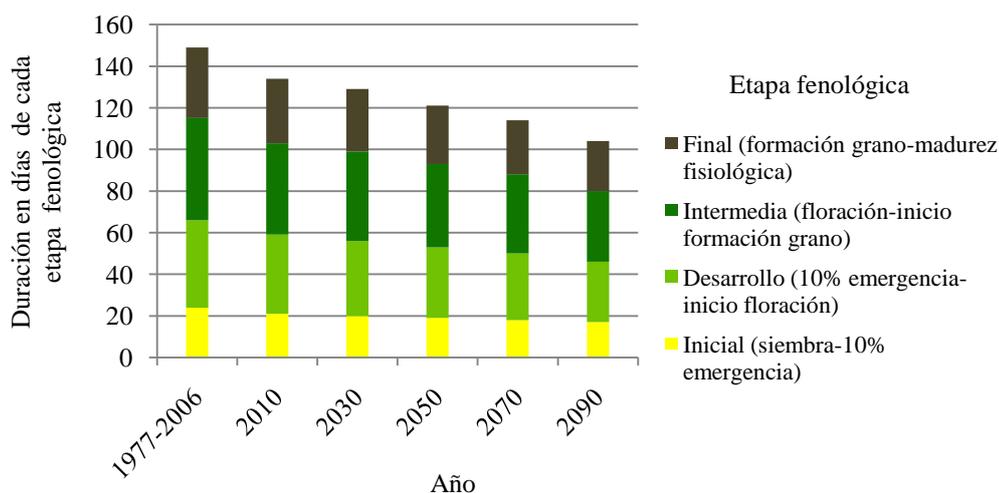


Figura 34. Tendencia de la duración en días de cada etapa fenológica del cultivo de maíz para diferentes años seleccionados en el análisis prospectivo.

Los valores actuales de evapotranspiración de referencia, el inicio de la EC del 13 de junio y la duración de 148 días del ciclo del cultivo, muestran que a la fecha el maíz requiere en promedio 514 mm de agua para cubrir sus necesidades. Conforme avance el siglo XXI la evapotranspiración de referencia se va incrementando, pero debido al acortamiento de la duración del cultivo, sus requerimientos hídricos van disminuyendo llegando a fines del siglo a ser de 396 mm. Esto nos indica que a pesar de los incrementos en la evapotranspiración, la rápida acumulación de unidades calor permitirá un desarrollo más rápido y por lo tanto menor requerimiento hídrico.

Si se siguen utilizando en la zona de estudio las variedades de maíz de ciclo intermedio a tardío que actualmente son sembradas, su desarrollo se acortaría pero el cultivo puede terminar su ciclo. En relación al rendimiento, estas condiciones no aseguran que se logre alcanzar un rendimiento adecuado ya que de acuerdo con lo indicado por López *et al.* (2004), la reducción de la duración en las etapas fenológicas intermedia y final del maíz afectará de manera directa el llenado del grano al verse afectada la cantidad de radiación

recibida por las plantas. Así mismo un rápido desarrollo vegetativo incrementará la necesidad de nutrimentos, de acuerdo con lo mencionado por varios investigadores citados por López *et al.* (2004), lo que conlleva a un incremento y mantenimiento de un alto nivel de fertilidad de los suelos.

Cuadro 35. Tendencia de los requerimientos hídricos del cultivo de maíz por mes (ETc) y su relación con la evapotranspiración de referencia (ETo) para algunos años seleccionados en el análisis prospectivo.

	1977-2006	2010	2030	2050	2070	2090
Duración ciclo siembra-madurez (días)	148	134	129	121	114	104
Mes	Eto mm día ⁻¹ (Etc mm mes ⁻¹)					
Jun	4.3 (54)	4.6 (43)	4.7 (49)	5.0 (49)	5.2 (28)	5.5 (37)
Jul	3.9 (112)	4.1 (114)	4.2 (119)	4.5 (123)	4.7 (116)	4.9 (122)
Ago	3.7 (117)	3.9 (120)	4.0 (123)	4.2 (128)	4.5 (130)	4.7 (132)
Sep	3.5 (109)	3.9 (113)	3.9 (113)	4.1 (110)	4.3 (114)	4.6 (106)
Oct	3.3 (95)	3.5 (85)	3.6 (65)	3.7 (40)	3.9 (40)	
Nov	3.0 (25)					
Requerimiento hídrico total mm/ciclo	514.0	474.0	468.0	449.0	427.0	396.0

Considerando las condiciones de capacidad de almacenamiento de humedad del suelo, obtenidas para la zona de estudio como se mencionó en el capítulo de Materiales y Métodos, se realizó una estimación del balance hídrico, con los resultados mostrados en la Figura 35. Se observa que la evapotranspiración de referencia (línea roja) va experimentando un incremento ligero durante todo el siglo XXI; la precipitación (línea azul) se muestra suavizada en la climatología 1977-2006 debido a que es el promedio de treinta años, conforme avance el siglo se tienen ligeras disminuciones; por último, la evapotranspiración real obtenida en el balance hídrico (línea negra), sigue la misma tendencia que la evapotranspiración de referencia, y que a fines del siglo experimentará un acortamiento en su duración y un incremento en su intensidad resultando en valores superiores a la precipitación alrededor de la tercer decena de septiembre.

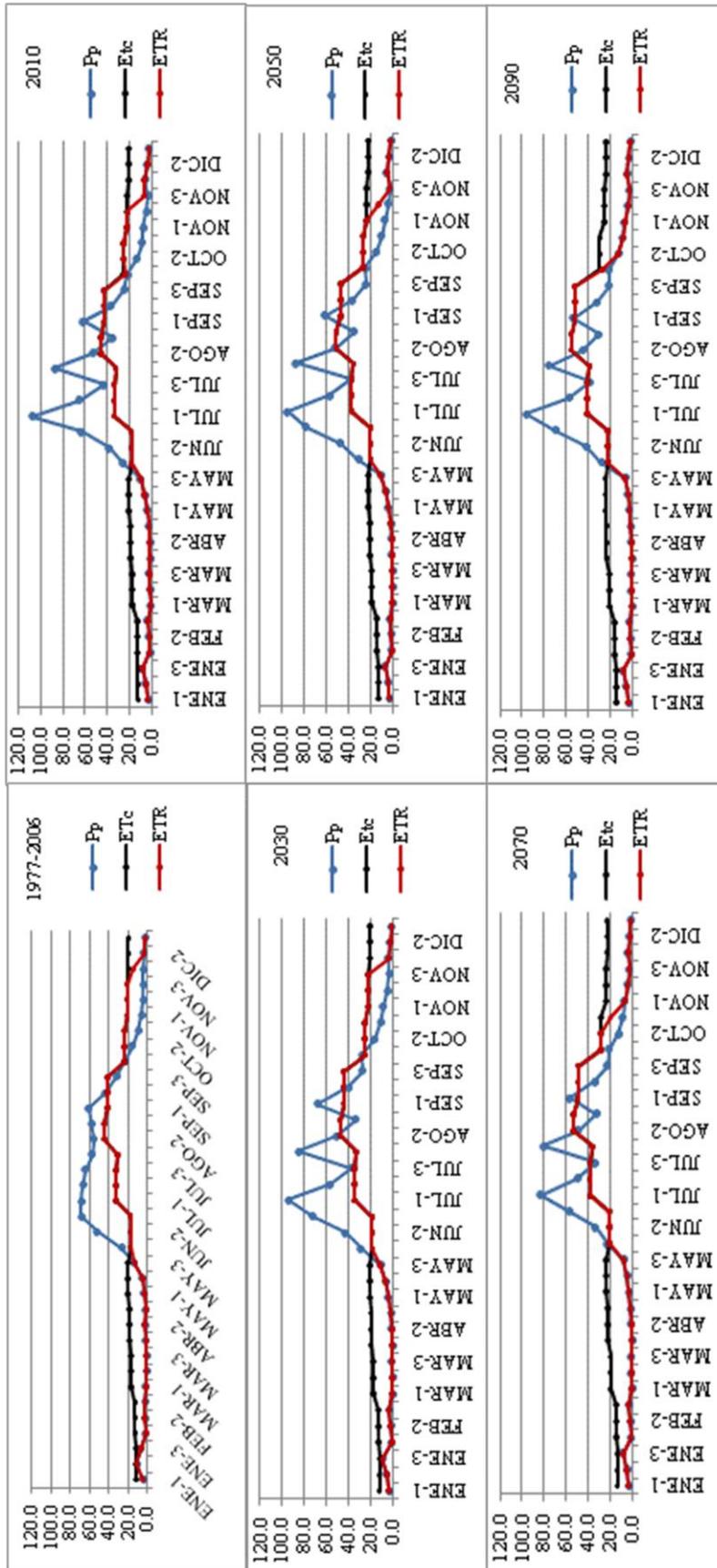


Figura 35. Tendencia de la evapotranspiración real, precipitación y evapotranspiración del cultivo para algunos años seleccionados en la Región Ciénega de Chapala en el análisis prospectivo.

El exceso de humedad (cuando la línea azul está por encima de la línea roja), va experimentando una disminución, mientras que el déficit de humedad (cuando la línea azul queda por debajo de la línea roja) va experimentando un incremento hacia los meses de septiembre y octubre. Considerando los requerimientos hídricos del cultivo, las demandas serán cubiertas de manera satisfactoria permitiendo que se logre completar el ciclo del cultivo con siembra en junio, debido al acortamiento de éste.

En la Figura 36 se observan las tendencias de los excesos y déficits dentro de la estación de crecimiento, en el balance hídrico del análisis prospectivo. Conforme avance el siglo XXI, los excesos van disminuyendo para llegar a fines del siglo a un valor de 89 mm, mientras que los déficits se van incrementando hasta llegar a un valor de 420 mm. En la línea punteada se muestra la tendencia del inicio de los déficits dentro de la estación de crecimiento, observándose que conforme avanza el siglo los déficits iniciarán más pronto llegando a fines del siglo a iniciar en la primera decena de octubre.

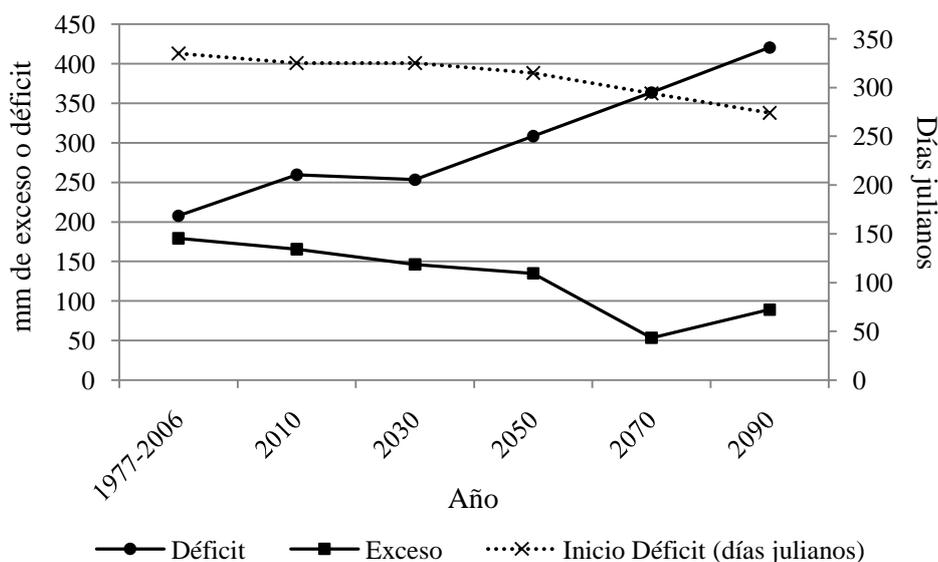


Figura 36. Tendencias de excesos y déficits hídricos en el balance hídrico en algunos años seleccionados del análisis prospectivo para la estación de crecimiento de maíz. La línea de puntos indica el inicio de los déficits en días julianos.

Los escenarios futuros para las temperaturas diurnas y nocturnas en el ciclo PV se muestran en la Figura 37. Se observa que muestran un incremento considerable con respecto a la serie retrospectiva. Las temperaturas nocturnas en el ciclo PV se incrementarán en 2.3°C llegando a finales del siglo a un valor de 20.3°C, mientras que las

temperaturas diurnas experimentarán un incremento de 4.8°C para llegar a un valor de 28.6°C.

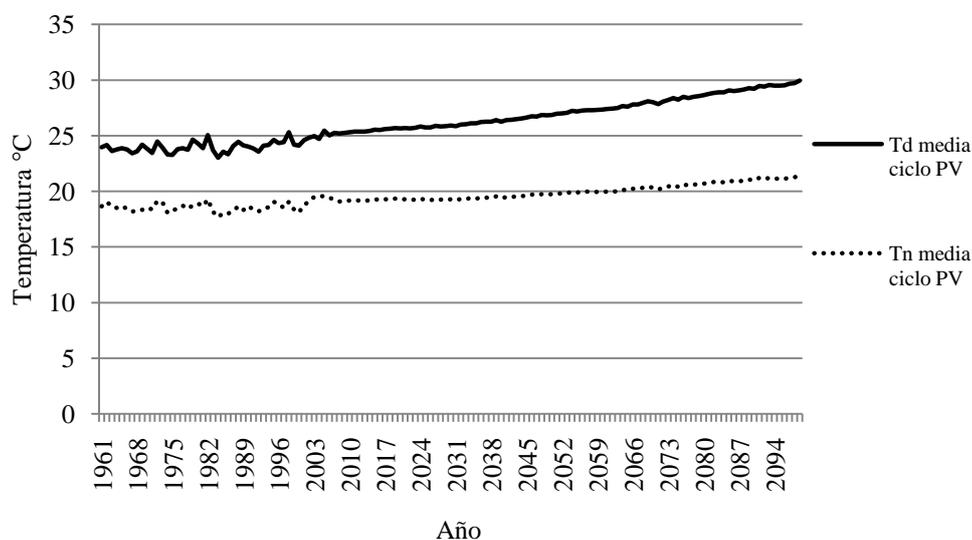


Figura 37. Tendencias de la temperatura diurna y temperatura nocturna para dos series de tiempo, 1961-2006 y 2007-2099 durante el ciclo PV en la Región Ciénega de Chapala.

El cultivo de maíz presenta como temperaturas medias óptimas de desarrollo entre 21 y 24°C de acuerdo con Benacchio (1982), no se presenta germinación por debajo de los 10°C y la temperatura umbral máxima se encuentra entre los 27 y 30°C, aunque la tasa fotosintética disminuye a temperaturas arriba de 32°C y cesa a temperaturas mayores a 38°C siendo afectada la etapa floración-madurez del grano. Para una adecuada actividad fotosintética el maíz prefiere temperaturas diurnas entre 25 y 35°C (Ruiz, *et al.* 1999), lo que concuerda con las estimaciones realizadas para la Región Ciénega de Chapala en esta investigación, ya que para fines del siglo se esperan temperaturas diurnas en el rango de 26.6 a 31.8°C.

Los modelos Gompertz utilizados para la estimación del número de días con temperaturas máximas mayores a 35°C y temperaturas mínimas menores a 10°C se muestran en el Cuadro 36. Se observa para estos dos modelos un coeficiente de determinación r^2 de 0.64 y 0.73 respectivamente, lo que nos indica un buen ajuste para este tipo de variables. La estimación de estos parámetros abarca los meses de mayo a octubre, correspondientes al ciclo actual de cultivo.

Cuadro 36. Modelos Gompertz utilizados para estimar el número de días con temperatura máxima mayor a 35°C y número de días con temperatura mínima menor a 10°C en la zona de estudio.

Parámetro	Modelo Gompertz	Coefficientes de determinación r^2
No. Días con $T_x > 35^\circ\text{C}$	$Y = 245 e^{-2900} e^{-0.225 T_{xM-O}}$	0.64
No. Días con $T_i < 10^\circ\text{C}$	$Y = 0.0009 e^{18.7} e^{-0.05 T_{iM-O}}$	0.73

Donde: T_{xM-O} corresponde al promedio de las temperaturas máximas de los meses de mayo a octubre; T_{iM-O} corresponde al promedio de las temperaturas mínimas de mayo a octubre.

Las estimaciones de estos parámetros mediante el uso de los modelos anteriores para el período 2007-2099 se muestran en el Cuadro 37. Se observa que en la actualidad para el ciclo primavera-verano se tiene un total de 8 días con temperaturas mínimas inferiores a 10°C, y sólo 3 días con temperaturas máximas mayores a 35°C, esto indica que las condiciones térmicas actuales están dentro del rango considerado adecuado para el cultivo de maíz de acuerdo a los requerimientos indicados por Ruiz *et al.* (1999). A medida que avance el siglo XXI para la variable fenológica número de días con temperatura mínima inferior a 10°C, se espera un ligero incremento (un día) en las primeras tres décadas y posteriormente un decremento ligero que lleva a esta variable a siete días al final del siglo, estos cambios ligeros responden a los cambios también ligeros estimados para las temperaturas mínimas en la región de estudio.

Cuadro 37. Tendencia de los días con temperatura mínima menor a 10°C y días con temperatura máxima mayor a 35°C en el ciclo PV para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

Año	Días $T_i < 10$	Días $T_x > 35$
1977-2006*	8	3
2020	7	11
2030	8	15
2040	9	20
2050	8	30
2060	8	39
2070	7	55
2080	7	71
2090	7	85

* Valor normal climatología 1977-2006.

En cuanto al número de días con temperatura máxima mayor a 35°C se observa un incremento constante que a fines del siglo llegará a ser de ochenta y cinco días en los que el cultivo de maíz deberá experimentar temperaturas máximas mayores a 35°C. Si consideramos que la duración del ciclo del maíz para el año 2090 será de 104 días, el resultado de 85 días con temperaturas máximas mayores a 35°C representa el 81% del ciclo de la planta bajo estas condiciones lo que provocaría condiciones de estrés y problemas de llenado de grano (Ruiz *et al.*, 1999).

5.3.2.3. Agave tequilero.

El análisis referente al impacto de las tendencias del clima sobre el cultivo del agave, se realizó considerando tanto los parámetros agroclimáticos observados (1961-2006), como los estimados (2007-2099), por lo que los resultados se presentan de manera conjunta. Como parámetros agroclimáticos se consideraron las temperaturas diurnas y nocturnas medias anuales, con los resultados mostrados en el Cuadro 38. En promedio con los valores regionales, en la climatología 1977-2006, la zona de estudio queda clasificada con la condición subóptima en base a la temperatura nocturna, y condición óptima en base a la temperatura diurna de acuerdo con los rangos presentados por Ruiz, *et al.* (2002) y detallados en el capítulo de Materiales y Métodos.

Cuadro 38. Tendencias de las condiciones de desarrollo del agave de acuerdo con las temperaturas nocturnas (Tn) y diurnas (Td) en la región de estudio en algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

Año	Temperatura promedio diurna/nocturna (°C)	Condición Tn	Condición Td
1977-2006	23/17	Subóptima	Óptima
2020	24/17	Subóptima	Óptima
2030	24/17	Subóptima	Óptima
2040	25/17	Subóptima	Óptima
2050	25/18	Subóptima	Subóptima
2060	26/18	Subóptima	Subóptima
2070	26/18	Subóptima	Subóptima
2080	27/18	Subóptima	Subóptima
2090	28/19	Subóptima	Subóptima

En base a la temperatura nocturna, esta condición de subóptima se mantiene durante todo el siglo XXI, mientras que de acuerdo con las temperaturas diurnas, las condiciones de desarrollo para este cultivo van demeritando, llegando a ser subóptima a partir del año 2050. Estas condiciones varían a nivel localizado dentro de la Región Ciénega de Chapala, como lo muestran las Figuras 38 y 39.

Como se observa la temperatura diurna media anual en la climatología actual (1977-2006), se encuentra entre los 22 y 22.9°C, alrededor del año 2030 se incrementará entre 24 y 24.9°C, en el 2050 entre 25 y 25.9°C, en el 2070 entre 26 y 26.9°C y a finales del siglo, en el 2090 llegará al rango entre 27 y 27.9°C (Figura 38). Las condiciones en la región de estudio se muestran uniformes en cada uno de los años observados. De acuerdo con los rangos establecidos por Ruiz *et al.* (2002) y detallados en el capítulo de Materiales y Métodos, la condición subóptima permanecerá hasta fines del siglo ya que los valores más altos estimados llegan a ser de 28.3°C.

En lo que respecta a la temperatura nocturna (Figura 39), se observa mayor variabilidad a nivel regional. Esto muestra que aún para la climatología actual 1977-2006, se tiene una pequeña porción de condición óptima (color blanco), pero el resto del área es de condición subóptima con valores entre 15 y 17.9°C. No se observan tendencias a llegar a una condición marginal para el agave en este parámetro agroclimático, ya que a fines del siglo se estiman temperaturas nocturnas de hasta 19°C clasificado todavía dentro de la condición subóptima. Esta tendencia en la temperatura nocturna afectará la asimilación neta del CO₂, ya que el agave es una planta del tipo CAM y fija el CO₂ principalmente por las noches.

Estas condiciones ambientales tendrán efectos en los procesos de fotosíntesis ya que como mencionan Nobel *et al.* (1998), la asimilación de CO₂ es favorecida por temperaturas diurnas/nocturnas de bajas a moderadas y disminuye drásticamente en ambientes donde las temperaturas diurnas/nocturnas son altas. La asimilación neta diaria de CO₂ sobre períodos de 24 horas para hojas de esta especie es mayor para temperatura diurna/nocturna de 15/5°C, disminuyendo 10% a 25/15°C y 72% a 35/25°C.

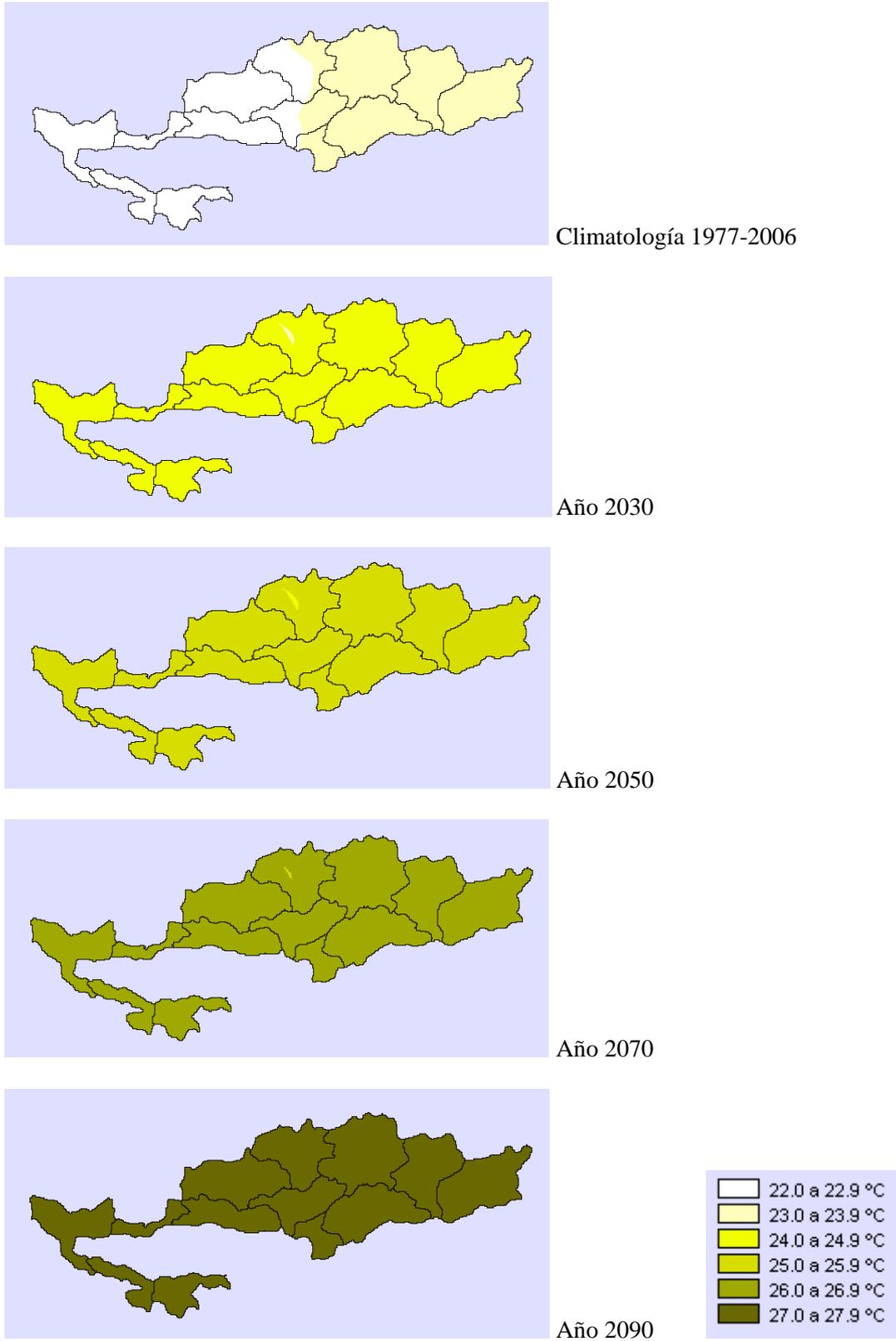


Figura 38. Tendencia de la temperatura diurna media anual y su distribución en la Región Ciénega de Chapala para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

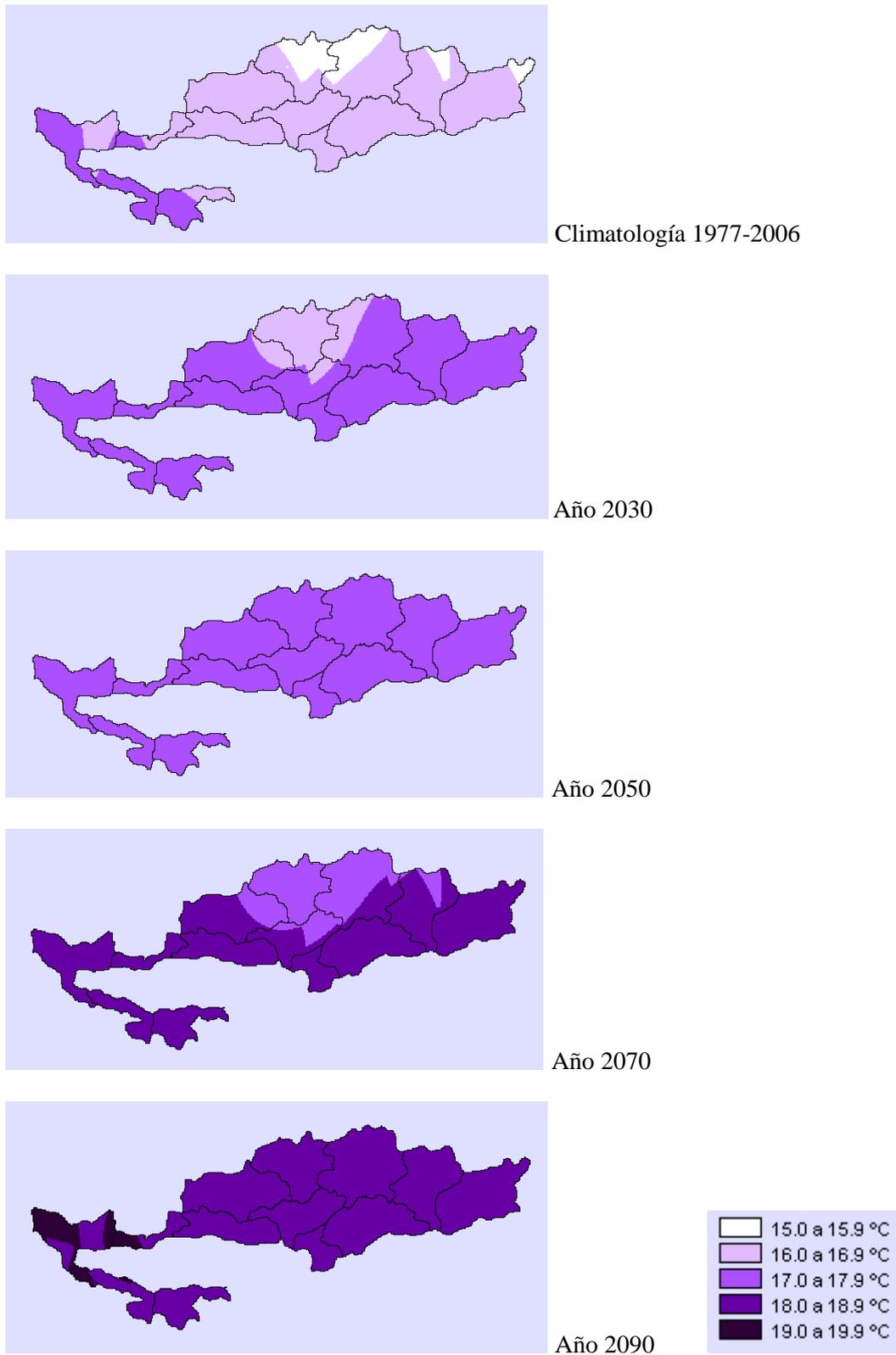


Figura 39. Tendencia de la temperatura nocturna media anual y su distribución en la Región Ciénega de Chapala para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

En la Figura 40 se observa que esta asimilación tenderá a ir disminuyendo conforme avance el siglo XXI debido a los incrementos sufridos por las temperaturas nocturnas. A nivel regional, los resultados para el período 1977-2006, concuerdan con los encontrados por Ruiz *et al.* (2002), con excepción de los municipios de Jocotepec, Tuxcueca y Tizapán el Alto que resultaron en condición subóptima por temperatura nocturna, no así en el estudio de Ruiz *et al.* (2002) en el que están considerados en condición óptima. Esto puede ser debido a que en la presente investigación ya se considera la climatología hasta el año 2006.

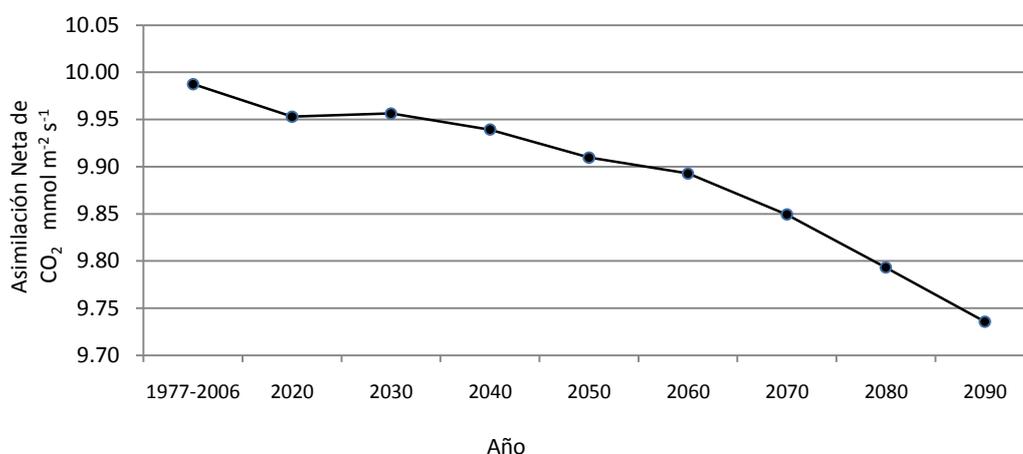


Figura 40. Impacto de la temperatura nocturna anual sobre la asimilación neta de CO₂ en el cultivo de agave, para algunos años seleccionados del análisis prospectivo.

Con respecto a la precipitación acumulada anual se estableció en el apartado 5.2.1.2 que este parámetro climático, a pesar de una tendencia a disminuir, no muestra signos de deficiencia para el desarrollo del agave en escenarios futuros. No hay estudios sobre escenarios hídricos futuros para el agave, pero en otros cultivos perennes se han reportado estimaciones de pérdida de rendimientos de hasta el 40%, por lo cual se considera necesario el utilizar nuevas variedades o bien la expansión hacia áreas más favorables (Lobell, *et al.* 2006).

5.4. Consideraciones en la adaptación al cambio climático de la Región Ciénega de Chapala.

La zonificación de cultivos es una actividad que debe ser realizada de manera constante de acuerdo a lo indicado por Ruiz *et al.* (1999), más aún cuando se consideran cambios en las

condiciones ambientales de las áreas agrícolas. Aunque la aclimatación de las plantas permite una adaptación a dichos cambios, ésta no siempre se realiza con la misma velocidad con la que se realizan los cambios ambientales.

FAO (2008) define como adaptación al cambio climático “aquellas actividades realizadas por individuos o sistemas, para evitar, resistir o aprovechar la variabilidad, los cambios y los efectos del clima actuales o previstos. La adaptación disminuye la vulnerabilidad de un sistema o aumenta su capacidad de recuperación ante las repercusiones.”

De acuerdo con lo reportado en este trabajo, se esperan cambios en los parámetros climáticos y agroclimáticos y por tanto, impactos en algunas especies agrícolas de uso en la región. Es por esto que se deberán tomar algunas medidas de adaptación que permitan seguir con el desarrollo agrícola en esta zona, tomando en consideración diversos factores que inciden en este desarrollo. En este apartado se tratan algunas actividades agrícolas a considerar con el propósito de lograr una adecuada adaptación a los cambios ambientales ya previstos en el presente siglo.

5.4.1. Selección de cultivos.

La selección de un cultivo en cualquier zona agrícola, requiere de realizar varios diagnósticos, entre ellos el relacionado con la climatología del lugar y sus condiciones a futuro. En este sentido, si se han estimado escenarios futuros para la Región Ciénega de Chapala con tendencias al incremento, tanto de temperaturas máximas como mínimas, es necesario replantearse la pregunta ¿se deberá elegir otro cultivo que se adapte mejor a estos cambios?, la respuesta estará tanto en los investigadores como en los productores. Tendiente a considerar el cambio de cultivo, se dan como ejemplos los siguientes: en este trabajo se ha presentado un estimado del impacto que tendrían los cambios detectados de temperatura sobre el cultivo de trigo en el ciclo otoño-invierno, que tiene como temperatura óptima de desarrollo un rango entre 15 a 20°C, fuera del cual la planta presentaría signos de daño o disminución del desarrollo. Si se consideran algunos otros cultivos, basándose en aquellos que también son producidos en esta zona y cuyos rangos térmicos óptimos son más amplios. Tal es el caso de la canola, cuyo rango de temperaturas óptimas se encuentra entre 12 a 30°C y el girasol con un rango de temperatura óptima entre

18 y 25°C. Ambos cultivos son de riego al igual que el trigo, y pueden ser una opción viable para el productor de esta región.

5.4.2. Selección de variedades.

Tanto la estación de crecimiento como la duración de las etapas siembra-floración y floración-madurez, se verán afectadas por este cambio en las temperaturas del aire. Para el caso del cultivo de maíz se puede optar por variedades de ciclo intermedio a largo debido a que sufrirán un acortamiento en su ciclo como respuesta a la rápida acumulación de unidades calor, lo que resulta en una disminución de los requerimientos hídricos los cuales son cubiertos por los escenarios de la precipitación en la estación de crecimiento del ciclo PV. De esta forma podemos deducir que el maíz verá satisfecho su requerimiento hídrico sin problema bajo escenarios de cambio climático pero su ciclo de desarrollo se verá recortado, por lo que se espera una reducción del rendimiento no tanto por falta de agua sino por un acortamiento del período reproductivo del maíz. Ante esta situación deberá considerarse cuidadosamente la posibilidad de utilizar variedades de ciclo corto, la cual es una recomendación típica en la generación de medidas de adaptación al cambio climático. Para establecer el tipo de variedades que deberán recomendarse se debe tomar en cuenta la evolución que tendrá, durante los próximos años, la capacidad térmica de la estación de crecimiento. Otra característica deseable en las variedades que se utilizarán en el siglo XXI es que sean poco sensibles a temperaturas por arriba de 35°C, por lo que probablemente tenga que incrementarse la proporción de germoplasma tropical en las nuevas variedades que serán formadas.

Para el caso del cultivo de trigo de invierno, los impactos para variedades de ciclo intermedio con duración de la etapa siembra-floración de 72 días y floración-madurez fisiológica de 80 días en promedio utilizadas en la actualidad, estas etapas irán acortando su duración debido al incremento de temperaturas, pero al sembrarse en enero, como es el caso en la actualidad, las plantas experimentarían temperaturas mayores a 25°C en gran parte de su ciclo por lo que serían buenas opciones aquellas variedades que logren completar sus etapas en períodos cortos tales como la H-562 del INIFAP que de acuerdo con Gómez *et al.* (2008), en su formación interviene germoplasma tropical y subtropical, lo cual le ha dado buena adaptación a regiones cálidas, con duración de la etapa siembra-floración de 55 a 61 días.

5.4.3. Fecha de siembra.

Otro factor importante en lograr una adaptación al impacto en la duración de las etapas de desarrollo en cultivos del ciclo otoño-invierno, como es el caso del trigo, puede ser la modificación de la fecha de siembra, de tal manera que le permita al cultivo acumular las unidades calor requeridas pero en forma más lenta. En este trabajo la estimación del impacto para el trigo se realizó considerando como fecha de siembra el 14 de enero, como se realiza en la zona de estudio. Con esta fecha de siembra se tuvieron una acumulación de 1040 unidades calor requeridas para la etapa siembra-floración en un lapso de 88 días y 600 unidades calor para la etapa floración-madurez fisiológica en un lapso de 42 días como promedio de la climatología actual 1977-2006. Como se indicó en el apartado 5.3.2.1, estas dos etapas se van acortando conforme avanza el siglo, para la misma fecha de siembra. Si se llegara a modificar ésta, adelantándola, se tendrían las duraciones mostradas en el Cuadro 39, que como se observa, las fechas de siembra que mantienen duraciones cercanas a las presentes son del 15 de noviembre al 1 de diciembre, aunque a fines del siglo se sigue detectando acortamientos en ambas etapas.

Cuadro 39. Estimación de la duración de las etapas siembra-floración y floración-madurez fisiológica del trigo bajo diferentes fechas de siembra. Análisis prospectivo

Año	Fecha de siembra									
	01-Nov	15-Nov	01-Dic	15-Dic	01-Ene	01-Nov	15-Nov	01-Dic	15-Dic	01-Ene
	Duración en días de la etapa siembra-floración					Duración en días de la etapa floración-madurez fisiológica				
2020	82	82	83	82	80	46	45	40	37	34
2030	82	83	83	83	80	46	44	41	36	34
2040	80	80	80	80	78	45	44	40	36	33
2050	78	78	78	79	76	45	43	41	35	33
2060	75	76	76	77	74	45	42	41	35	34
2070	73	75	75	76	73	43	41	40	34	32
2080	70	72	72	71	71	41	41	39	36	32
2090	69	70	69	68	68	39	39	38	37	32

5.4.4. Manejo del suelo.

Los escenarios futuros pronostican en la mayoría de las regiones, una disminución de la precipitación anual, lo que conllevaría a deficiencias hídricas de los cultivos. Más aún con

el aumento de temperaturas, aumenta la evapotranspiración, incrementándose también los requerimientos hídricos. Ante estos escenarios, el suelo juega un papel importante en la captación del agua y disminución de la evaporación. La aplicación de materiales orgánicos que mejoren la retención de humedad, es una práctica conocida, debido a que tienen una alta capacidad retentiva al incrementar el número de microporos, y mejoran la estabilidad de la estructura del suelo, lo que incrementa los valores de las variables hídricas de capacidad de campo y punto de marchitez permanente y con ello el agua disponible (Brady y Weil, 1996). Así mismo es necesaria en cualquier zona agrícola, ya que aporta al suelo nutrimentos y microorganismos que facilitan la asimilación del CO₂ y el N del aire, disminuyendo de esta manera su presencia en la atmósfera. Otra de las acciones ya conocidas es la de mantener una cubierta orgánica sobre el suelo, ya sea mediante la aportación de residuos de cosecha o bien, con el uso de cultivos de cobertera que disminuyen la erosión del suelo y permiten la conservación de la humedad.

El fertilizante químico es considerado como aportador de cantidades altas del N₂O a la atmósfera, pero como mencionan Bruulsema y Griffith (1997), no sólo los materiales químicos pueden liberar este compuesto, sino también los materiales orgánicos, por lo que su uso debe ser medido y las condiciones de su aplicación bien estudiadas, ya que el N es un elemento importante del desarrollo foliar y radicular, con lo que se incrementa la asimilación del CO₂ del aire.

Desjardins *et al.* (2005), en una revisión exhaustiva sobre prácticas de manejo del suelo para aumentar el secuestro de carbono indican como las más recomendables: labranza reducida siempre y cuando se disminuya la tasa de descomposición del carbono orgánico del suelo, o se incrementen los rendimientos del cultivo y con esto se incrementa la asimilación del C atmosférico; reducción de frecuencia de parcelas agrícolas en descanso para cultivos en rotación, tratando de incrementar el rendimiento y con ello la asimilación del C atmosférico; la introducción de especies forrajeras, especialmente pastos perennes o leguminosas, en la rotación de cultivos, debido a que varias investigaciones reportan que los pastos asimilan mayor cantidad del C atmosférico, y en el caso de las leguminosas éstas no requieren de altas dosis de fertilización nitrogenada; adición de nutrimentos mediante fertilizantes, lo que incrementa el rendimiento del cultivo y por tanto la asimilación del C atmosférico, pero en este caso se deberán considerar otros gases de efecto invernadero (CH₄ y N₂O), que son liberados en la fabricación y transportación de los fertilizantes. Estos

mismos autores mencionan como una práctica favorable al incremento de secuestro del C atmosférico por el suelo, el cambiar el cultivo a la implantación de praderas debido a que los pastos tienen mayor capacidad de secuestro del C atmosférico, pero para México no sería muy viable.

5.4.5. Impacto de plagas y malezas.

Otro efecto indirecto del cambio climático en los cultivos es a través de las plagas. Los factores ambientales son cruciales para el desarrollo, actividad y movilidad de los insectos, modificando la población de los mismos y la pérdida económica de los cultivos. Los áfidos son altamente sensibles a cambios de temperatura, ya que valores por debajo de 20°C y arriba de 25°C limitan su desarrollo y disminuyen su población, como reportaron Waghmare *et al.* (1995) para la especie *Melanaphis sacchari* en sorgo. En los trópicos, los áfidos muestran una notable adaptabilidad al clima regulando su población mediante estrategias de desarrollo, reproducción y dispersión (Mavi y Tupper, 2004).

También el cambio climático afectará a las poblaciones de insectos parasitarios, como señalan Stireman *et al.*, (2005), quienes encontraron una correlación alta entre la variabilidad climática y la presencia del género *Hymenoptera*. Estos mismos autores consideran que no sólo el efecto directo del cambio climático puede alterar las poblaciones de insectos, sino también la movilización de sus predadores naturales como aves, reptiles y algunos invertebrados.

Con el aumento en la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero se esperaría un incremento en malezas, principalmente del tipo fotosintético C₃ y algunas C₄, las cuáles verían favorecido su desarrollo por la elevada concentración de CO₂, lo que aunado a su facilidad de adaptación, serían una competencia más fuerte para los cultivos agrícolas (Attipalli *et al.*, 2010).

Es necesario que se refuerce la protección de los cultivos contra plagas y malezas, considerando que con el cambio climático se tendrán nuevas plagas de insectos que al deteriorarse sus hábitats comunes, buscarán otros que les brinden mejores condiciones de supervivencia. El uso de los pesticidas convencionales deberá ser más eficiente y controlado, para evitar las pérdidas de cosechas que pueden dejar las poblaciones de

insectos. Debe continuarse con el manejo integrado de plagas, la estimulación de las defensas naturales de las plantas y el uso de derivados bioquímicos, tales como las feromonas, para disuadir a los insectos del ataque al cultivo. Así mismo, deberá cuidarse la cosecha y el empaque, mediante el uso de tecnologías de almacenamiento y el uso adecuado de pesticidas y fumigantes (Beddington, 2009).

6. CONCLUSIONES

La Región Ciénega de Chapala muestra un cambio de tendencia significativo durante el período 1961-2006 para los parámetros climáticos de temperatura máxima media anual, temperatura mínima media anual y temperatura media anual. Dichos cambios ocurrieron entre 1982 y 2003. La precipitación anual no mostró cambio de tendencia significativo durante el período analizado. A nivel regional la temperatura máxima anual ha seguido una tendencia al incremento, la cual presenta una pendiente más pronunciada a partir del año 1992. En tanto la temperatura mínima anual presentaba una tendencia a la disminución antes del año 1982, a partir del cual se observa que muestra una tendencia al incremento. La temperatura media no resulta un indicador óptimo de cambio climático, debido a que al promediar las temperaturas máximas y mínimas con tendencias de signo opuesto el resultado manifiesta una condición térmica de aparente estabilidad con el tiempo.

En caso de caracterizar la climatología actual de la región, es conveniente considerar que los cambios climáticos más significativos se han llevado a cabo durante los últimos 20 años del siglo XX, por lo que es recomendable no utilizar información previa a este período.

Los escenarios futuros de la climatología de la Región Ciénega de Chapala muestran tendencias al incremento en las variables térmicas, principalmente temperatura máxima, y de un ligero decremento en la precipitación. La estimación de los valores futuros de precipitación no contempla los eventos extremos, por lo que es recomendable para futuras investigaciones hacer uso de modelos que incluyan estos eventos. La oscilación térmica presentará un incremento en sus valores con una pendiente ligera, lo que indica que en el futuro se tendrán condiciones térmicas más extremosas que las actuales.

Los escenarios futuros de la agroclimatología de la zona se ven impactados por las tendencias del clima: la evapotranspiración potencial tiende a incrementarse lo cual es reflejo del incremento en las temperaturas máximas; la precipitación no muestra un efecto importante en este parámetro agroclimático; el cociente P/ETP tiende a disminuir, por lo que a finales del siglo XXI llevará a la zona de estudio a una condición de semiárida. La estación de crecimiento en el período húmedo experimentará un acortamiento como resultado del incremento en evapotranspiración; las unidades calor efectivas de los cultivos

serán cubiertas más rápidamente tanto en el ciclo PV como en OI, lo que resulta en una menor demanda hídrica de las plantas; las horas frío disminuirán también, lo que afectará el desarrollo de especies con requerimiento de frío; las temperaturas diurnas y nocturnas se verán incrementadas como respuesta al aumento de temperaturas medias, lo que impactará los procesos de fotosíntesis y de respiración en las especies agrícolas de la zona; se espera un incremento del número de días con temperaturas mayores al umbral de los cultivos regionales, provocando que las plantas experimenten mayores lapsos de tiempo bajo estrés térmico.

Por lo anterior, se esperan impactos en las especies agrícolas actualmente cultivadas en la Región Ciénega de Chapala, principalmente por efecto del incremento de temperaturas y su efecto en la modificación de los valores de algunos parámetros agroclimáticos. El uso de variedades de ciclo intermedio-tardío, creación de variedades con germoplasma de trópico seco, adelanto en fechas de siembra e incremento en la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo mediante aportaciones adecuadas de materia orgánica que mejore las condiciones físicas del suelo, son algunas de las medidas de adaptación requeridas para mantener la actividad agrícola en la región.

El cultivo de trigo de invierno experimentará un acortamiento en las etapas siembra-floración y floración-madurez fisiológica, como respuesta a la rápida acumulación de unidades calor y su desarrollo se verá afectado por la presencia de mayor número de días con temperaturas mayores a la umbral; el cultivo de maíz también tendrá acortamientos en sus etapas fenológicas disminuyendo también sus requerimientos hídricos, por lo que su desarrollo estará restringido a las características del germoplasma; el cultivo de agave, encontrará condiciones que inhiban la adecuada asimilación de CO₂, lo que provocará la disminución de superficie que en la actualidad es considerada como potencialmente óptima.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abe H., T. Urao, T. Ito, M. Seki, K. Shinozaki, and K. Yamaguchi-Shinozaki. 2003. Arabidopsis AtMYC2 (bHLH) and AtMYB2 (MYB) function as transcriptional activators in abscisic acid signaling. *Plant Cell*. 15:63-78
- Adamsen F.J., G. Wechsung, F. Wechsung, G.W. Wall, B.A. Kimball, P.J. Pinter, R.L. LaMorte, R.L. Garcia, D.J. Hunsaker and S.W. Leavitt. 2005. Temporal changes in soil and biomass nitrogen for irrigated wheat grown under free-air carbon dioxide enrichment (FACE). *Agron. J.* 97: 160-168.
- Alexandersson H. y A. Moberg. 1997. Homogenization of Swedish temperature data. Part I: homogeneity test for linear trends. *International Journal of Climatology*, 17: 25-34.
- Allen R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO, Riego y Drenaje No. 56.
- Amador J. A. y E. J. Alfaro. 2009. Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*. 11: 39-52.
- Amthor J.S. 2001. Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration. *Field Crop Research* 73: 1-34.
- Attipalli R.R., G.K. Rasineni and A.S. Raghavendra. 2010. The impact of global elevated CO₂ concentration on photosynthesis and plant productivity. *Current Science* 99: 46-57.
- Azcón-Bieto, J. y M. Talón. 2008. Fundamentos de fisiología vegetal. 2ª. Edición. Mc Graw Hill. 651 p. España.
- Azcón-Bieto, J., I. Fleck, X. Aranda y N. Gómez-Casanovas. 2008. Fotosíntesis, factores ambientales y cambio climático. *In* Fundamentos de fisiología vegetal. Azcón-Bieto, J. y M. Talón (eds.). 2ª. Edición. Mc Graw Hill. 651 p. España.
- Beddington J. 2009. Food security: contributions from science to a new and greener revolution. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 365: 61-71.
- Benacchio, S.S. 1982. Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el Trópico Americano. FONAIAP-Centro Nal. De Inv.

- Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Maracay. Venezuela. 202 p.
- Borland A.M., H. Griffiths, J. Hartwell and A.C. Smith. 2009. Exploiting the potential of plants with crassulacean acid metabolism for bioenergy production on marginal lands. *Journal of experimental botany*, 60: 2879-2896.
- Bowerman, B.L., R.T. O'Connell y A.B. Koehler. 2007. Pronósticos, series de tiempo y regresión. Un enfoque aplicado. 4^a. Edición. Ciengage Learning. 695 p.
- Brady N.C. and R.R. Weil. 1996. The nature and properties of soils. 11th ed. Prentice Hall. 740 p.
- Brito C., L., S. C. Díaz C. y R. S. Ulloa H. 2009. Observed tendencies in maximum and minimum temperatures in Zacatecas, Mexico and possible causes. *International Journal of Climatology*. **29**: 211-221. DOI: 10.1002/joc.1733
- Brouwer C. and M. Heibloem. 1986. Irrigation water management: Irrigation water needs. FAO. Training manual no. 3.
- Bruulsema T.W. and W.K. Griffith. 1997. Climate change and Crop Nutrients. *Better Crops*. 81: 12-14. U.S.A.
- Calderón H. F. 2007. Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012. Presidencia de la República. México. [En línea]. 1 de diciembre de 2007. [En línea] <<http://www.pnd.calderon.presidencia.gob.mx>> [Consultado: 21 de diciembre de 2010].
- Camilloni I. 2008. Tendencias Climáticas observadas y escenarios futuros. Boltovskoy D. (ed.). *In Atlas de sensibilidad ambiental de la costa y el mar Argentino. Meteorología*. [En línea]. < <http://atlas.ambiente.gov.ar/>>. [Consultado el 27 de Febrero de 2010]
- Carlón A. T. y M. E. Mendoza. 2007. Análisis hidrometeorológico de las estaciones de la cuenca del Lago Cuitzeo. *Investigaciones Geográficas. Boletín* 63: 56-76. México.
- Castañeda S.M.C., C. López C., J. Molina M., T.B. Colinas L. y A. Livera H. 2004. Crecimiento y desarrollo de cebada y trigo. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 27: 167-175.
- Conde C., R. Ferrer and S. Orozco. 2006. Climate change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and possible adaptation measures. A Mexican case study. *Atmósfera*. 19: 181-194.
- Crafts-Brandner S.J. and M.E. Salvucci. 2002. Sensitivity of photosynthesis in the C4 plant, Maize, to heat stress. *Plant Physiology*. 129: 1-8. American Society of Plant

Biologists. U.S.A.

- Desjardins R.L., W. Smith, B. Grant, C. Campbell and R. Riznek. 2005. Management strategies to sequester carbon in agricultural soils and to mitigate greenhouse gas emissions. *In: Increasing climate variability and change. Reducing the vulnerability of agriculture and forestry.* Salinger J., M.V.K. Sivakumar and R.P. Motha (eds.). Springer. P. 281-297. U.S.A.
- Eastman, J.R. 2006. IDRISI v 15.1. IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing Vol. 1. Clark Labs - Clark University. Worcester, Mass. USA. 328 p
- Enfield D. B. and A. M. Mestas-Núñez. 1999. Multiscale variabilities in global sea surface temperatures and their relationships with tropospheric climate patterns. *Journal of Climate.* 12: 2719-2733. American Meteorological Society.
- Englehart P,J. and A.V. Douglas. 2005. Changing behavior in the diurnal range of surface air temperature over Mexico. *Geophysical Research Letters.* 32: L01701, Doi: 10.1029/2004GL021139
- Ereño C. 2009. Evaporación-Evapotranspiración. Apuntes del curso de Climatología de la Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Buenos Aires. [En línea]. <<http://www.filo.uba.ar/contenidos/carreras/geografia/catedras/climatologia/sitio/bcehidrico.pdf>>. [Consultado el 13 de octubre de 2010].
- Flores L., H.E. 1994. Análisis agroclimático del noreste de Jalisco, México, para el manejo en la producción de maíz (*Zea mays* L.) de temporal. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1997. Zonificación agro-ecológica. Guía general. Boletín de suelos de la FAO No. 73.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2008. Climate change adaptation and mitigation in agriculture, forestry and fisheries. Factsheet folders: Climate change, energy and food. [En línea]. < <http://www.fao.org/climatechange>>. [Consultado el 13 de octubre de 2010]
- García, B.J. 1979. Estructura metodológica para la caracterización agroecológica de áreas por procedimientos cuantitativos de análisis y su posterior zonificación. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. 401 p.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5ª. Edición. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 92 p. (Serie Libros No. 6).

- Garduño, R. 1994. El veleidoso clima. 1a. Edición. Ed. Fondo de Cultura Económica. México. [En línea] <<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/html/ciencias.html>> [Consultado el 20 de enero de 2010]
- Garduño Z. A.M., E. Solís M. y M.L. De la Cruz G. 2003. Tipos de trigo bajo riego normal y restringido en el Bajío. INIFAP Campo experimental Bajío. Proyecto GTO-2003-C02-11860. México.
- Gay C., F. Estrada, C. Conde y H. Eakin. 2004. Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura: escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz (México). In: El clima entre el mar y la montaña. García C. J. C., D. Liaño C., P. Fernández de Arróyabe H., C. Garmendia P. y D. Rasilla A. (Eds.). Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria. Serie A, No. 4.
- Gay G., C. (Compilador) (2000). *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México, 220 p. ISBN 968-36-7562-X
- Ghannoum, O., S. von Caemmerer, L.H. Ziska and J.P. Conroy. 2000. The growth response of C₄ plants to rising atmospheric CO₂ partial pressure: A reassessment. *Plant Cell Environ.*, 23: 931-942.
- Gómez M., N.O.; M. Sierra M.; M. González C.; M.A. Cantú A.; A. Ramírez F.; J.J. Wong P.; M. Manjarrez S.; J.L. Ramírez D. y A. Espinosa C. 2008. H-562, híbrido de maíz de alto rendimiento para el trópico húmedo y seco de México. *Agricultura Técnica en México*. 34: 101-105. México.
- González H., J.C.; M. De Luis; P. Štěpánek; J. Raventós y N.M. Cuadrat. 2002. Reconstrucción, estabilidad y proceso de homogeneizado de series de precipitación en ambientes de elevada variabilidad pluvial. VII Reunión Nacional de Climatología. Grupo de Clima de la Asociación de Geógrafos Españoles. Revista Albarracín. España.
- Gutiérrez L. A.; F. Arellano L.; J. Aparicio M. 2007. Determinación de períodos de cambio climático, empleando pruebas de ruptura de series. *Revista Tláloc AMH* 38: 4-11. México.
- Guy C. 1999. The influence of temperature extremes on gene expression, genomic structure, and the evolution of induced tolerance in plants. In: *Plant responses to*

- environmental stresses. From phytohormones to genome reorganization. Lerner H.R. (editor). Marcel Dekker, Inc. U.S.A.
- Harrison M. 2005. The development of seasonal and inter-annual climate forecasting. *In*: Increasing climate variability and change. Salinger J., M. V. K. Sivakumar and R. P. Motha (eds.). Springer. P. 201-220. U. S. A.
- Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale y W. L. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, U.S.A.
- Hegerl, G.C., F.W. Zwiers, P. Braconnot, N.P. Gillett, Y. Luo, J.A. Marengo Orsini, N. Nicholls, J.E. Penner and P.A. Stott. 2007. Understanding and attributing climate change. In: Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, U.S.A.
- Hernández P., J.A. 1979. Ensayo de rendimiento de variedades de trigo bajo riego en las regiones de Lagos de Moreno y La Barca, Jalisco. Tesis profesional Facultad de Agricultura. U. de G. México. 90 p.
- Herrera S. S., R. D. Valdez C., J. A. Vidales C., H. Rodríguez F., E. Olivares S., R. Vázquez A. y M. Pando M. 2009. Mapas de tendencia y dimensión fractal de temperaturas extremas y evaporación en Nuevo León. XXX Ciclo de Seminarios de Posgrado e Investigación de la Facultad de Agronomía. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.
- Houghton J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden and D. Xiaosu (eds.). 2001. Climate Change 2001: the scientific basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). 2009. México. Cuarta comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. p. 119-174. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1986. Carta de Uso del Suelo y Vegetación Escala 1:250 000. México.
- Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA). 1975. Nueva variedad de trigo para el Bajío: Salamanca S75. Centro de Investigaciones Agrícolas del Bajío.

- Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y Secretaría de Agricultura y Ganadería. México. (Boletín No. 32)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1992. Climate change: The IPCC 1990 and 1992 assessments. 168 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. Special report on emissions scenarios. Nakicenovic N. and R. Swart (ed.). [En línea]. <www.grida.no/climate/ipcc/emission/500.htm>. [Consultado el 3 de marzo de 2009]
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of working group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (B. Metz, O. Davidson, P. Bosch, R. Dave and L. Meyer, eds.). Cambridge University Press, U.K. and U.S.A. 851 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change-Data Distribution Centre (IPCC-DDC). 2009. Model output described in the 2007 IPCC Fourth Assessment Report (SRES scenarios), multi-year means. [En línea]. <http://www.ipcc-data.org/ar4/gcm_data.html>. [Consultado el 14 de marzo de 2010].
- International Research Institute (IRI). 2010. IRI Tools. International Research Institute for Climate and Society. [En línea] <<http://portal.iri.columbia.edu/portal/server.pt>> [Consultado el 14 de marzo de 2010].
- Jones P. D., D. E. Parker, T. J. Osborn, and K. R. Briffa. 2009. Global and hemispheric temperatures anomalies land and marine instrumental records. *In* Trends: a compendium of data on global change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U. S. Department of Energy. U. S. A.
- Kobata T., J.A. Palta and N.C. Turner. 1992. Rate of development of postanthesis water deficits and grain filling of spring wheat. *Crop Science*. 32:1238-1242
- Könhe y Woñner, 2009. Consultado el 9 de abril de 2010 en <http://www.kowoma.de/en/gps/additional/atmosphere.htm>
- Krupa S. V. 1999. Polución, población y plantas. Colegio de Postgraduados. 184 p. México.
- Lawton R. O., U. S. Nair, R. A. Pielke, and R. M. Welch. 2001. Climatic impact of tropical lowland deforestation on nearby montane cloud forests. *Science*. 294: 584-587.
- Leroy S. S. 1999. Optimal detection of global warming using temperature profiles: A

- methodology. *Journal of Climate*. 12: 1185-1198.
- Lobell D.B.; C.B. Field; K.N. Cahill and C. Bonfils. 2006. Impacts of future Climate change on California perennial crop yields: Model projections with Climate and crop uncertainties. *Agricultural and Forest Meteorology*. 141: 208-218.
- Long S.P., E.A. Ainsworth, A. Rogers and D.R. Ort. 2004. Rising atmospheric carbon dioxide: Plants FACE the future. *Annu. Rev. Plant Biol.* 55: 591-628.
- López S., J.A., C.A. Reyes M., S. Castro N. y F. Briones E. 2004. Componentes del crecimiento de grano de cultivares prolíficos de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana*. Vol. 27: 23-26. México.
- Magaña R., V.O. 2009. Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones. ITESM e INE. México.
- Magaña V. y E. Caetano. 2007. Informe final del Proyecto: 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 Autónoma de México.
- Magaña V., C. Conde, O. Sánchez y C. Gay. 1997. Assessment of current and regional Climate scenarios for Mexico. *Climate Research* 9: 107-114.
- Magaña V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrisoza y J. Pérez. 2004. El Niño y el clima. *In: Magaña R. V. (ed.). Los impactos de El Niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México, p. 23-66.
- Magaña V., J.M. Méndez, R. Morales y C. Millán. 2004. Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México. *In: Martínez J. y A. Fernández B. (comps.). Cambio climático: una visión desde México*. SEMARNAT e INE. México. Pp. 203-213.
- Márquez S., F., L. Sahagún C. y E. Barrera G. 2009. Nuevo método de mejoramiento genético para resistencia a sequía en maíz. *Revista Geografía Agrícola*. 42: 9-14. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Martelo M.T. 1997. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o). *In: Técnicas agrometeorológicas en la agricultura operativa de América Latina*. Actas de la reunión regional: Reunión de Expertos. Colombia. Organización Meteorológica Mundial.

- Martelo M.T. 2004. Consecuencias ambientales generales del cambio climático en Venezuela. Primera comunicación Nacional en cambio climático de Venezuela.
- Mauney, J.R., K.F. Lewin, G.R. Hendrey and B.A. Kimball. 1992. Growth and yield of cotton expose to free-air CO₂ enrichment. *Crt. Rev. Plant Sci.*, 11: 213-222.
- Mavi, H. S. and Tupper, G.T. 2004. Agrometeorology. Principles and applications of climate studies in agriculture. Food Products Press. N.Y. U.S.A. 364 p.
- Mendenhall, W. y Sincich, T. 1997. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Ed. Prentice Hall. 1182 p.
- Méndez G. J., J. J. Návar C. y V. González O. 2008. Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas. Boletín* 65: 38-55. México.
- Meteorological Office Hadley Centre (Met Office). 2010. HadCRUT3 Dataset. [En línea] <<http://hadobs.metoffice.com/hadcrut3/>> [Consultado el 8 de mayo de 2010].
- Michaels P. J., P. C. Knappenberger, O. W. Frauenfeld and R. E. Davis. 2002. Revised 21st century temperature projections. *Climate Research*. 23: 1-9.
- Microsoft Inc., 2007. Microsoft Office. EXCEL. U.S.A.
- Mishra S.K., J. Tripp, S. Winkelhaus, B. Tschiersch, K. Theres, L. Nover and K.D. Scharf. 2002. In the complex family of heat stress transcription factors, HsfA1 has a unique role as master regulator of thermotolerance in tomato. *Gene Dev*. 16: 1555-1567.
- Molina M. 1996. Los clorofluorocarbonos y el ozono estratosférico un problema global. *Ciencia Hoy*. Vol. 6 No. 36. [En línea] <<http://www.centromariomolina.org/doctos>> [Consultado el 24 de junio de 2009]
- Morgan P.B., G.A. Bollero, R.L. Nelson, F.G. Dohleman and S.P. Long. 2005. Smaller than predicted increased in aboveground net primary production and yield of field-grown soybean under fully open-air [CO₂] elevation. *Global Change Biology* 11: 1856:1865.
- Munk W., M. Dzieciuch, and S. Jayne. 2002. Millennial Climate variability: Is there a tidal connection? *Journal of Climate*. 15: 370-385
- Nobel, P.S.; M. Castañeda; G. North; E. Pimienta B. and A. Ruiz C. 1998. Temperature influences on leaf CO₂ exchange, cell viability and cultivation range for *Agave tequilana*. *Journal of Arid Environments*. 39: 1-9.
- Ojeda B., W., E. Sifuentes I., M. Íñiguez C. y M.J. Montero M. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia* 45:

1-11. México.

- Ortiz S., C. A. 1987. Elementos de Agrometeorología Cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 327 p.
- Otaola J. A., B. Mendoza y R. Pérez. 1993. El Sol y la Tierra. Una relación tormentosa. 1ª. Edición. Ed. Fondo de Cultura Económica. México. [En línea] <<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/html/ciencias.html>>. [Consultado el 24 de junio de 2010].
- Pereyra-Díaz D., U. Bando M. y M. A. Natividad B. 2004. Influencia de La Niña y El Niño sobre la precipitación de la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, México. Universidad y Ciencia. **20**: 33-38. México.
- Perez F.J., J. Ormeño N., B. Reynaert and S. Rubio. 2008. Use of the dynamic model for the assessment of winter chilling in a temperate and a subtropical climatic zone of Chile. Chilean Journal of Agricultural Research 68: 198-206.
- Pezzuli S., D. B. Stephenson, and A. Hannachi. 2005. The variability of seasonality. Journal of Climate. 18: 71-88.
- Pielke R. A., G. Marland, R. A. Betts, T. N. Chase, J. L. Eastman, J. O. Niles, D. D. S. Niyogi, and S. W. Running. 2002. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 360: 1705-1719.
- Pimienta B., E. y B.C. Ramírez H. 2001. Fisiología del agave azul. Programa General de apoyo y desarrollo tecnológico a la cadena productiva agave-tequila. Universidad de Guadalajara. 31 p.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2010. Gráficos vitales sobre ozono 2.0 enlace clima. United Nations Environment Programme. Division of Technology, Industry and Economics. 48p.
- Quintanilla M., J. 2004. Escenarios de emisiones futuras en el sistema energético mexicano. In: Martínez J. y A. Fernández B. (comps.). Cambio climático: una visión desde México. SEMARNAT e INE. México. Pp. 391-410.
- Ramos O. V. H., S. Castro N., J. A. López S., F. Briones E. y A. J. Huerta. 2009. Impacto del estrés hídrico y la temperatura alta sobre plantas cultivadas: el caso del maíz (*Zea mays* L.) en Tamaulipas. Revista Digital Universitaria. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Vol. 3. [En línea] <<http://www.turevista.uat.edu.mx>> [Consultado el

17 de agosto de 2009].

- Rogers H.H., G.B. Runion, S.A. Prior, A.J. Price and A.H. Torbert. 2008. Effects of elevated atmospheric CO₂ on invasive plants: comparison of purple and yellow nutsedge (*Cyperus rotundus* L. and *C. esculentus* L.). *J. Environ. Qual.* 37: 395-400.
- Ruiz C. J. A., J. L. Ramírez D., F. J. Flores M. y J. J. Sánchez G. 2000. Cambio climático y su impacto sobre la estación de crecimiento de maíz en Jalisco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana.* 23: 169-182. México.
- Ruiz C. J. A., J. L. Ramírez D., F. J. Flores M. y J. J. Sánchez G. 2000b. Cambio climático y efectos sobre las áreas potenciales para maíz en Jalisco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana.* 23: 183-194. México.
- Ruiz C. J.A. 2010. El cambio climático y sus efectos en los sistemas producto y temas transversales con énfasis en el Norte de México. INIFAP-SAGARPA. México.
- Ruiz C., J. A.; González A., I.J.; Anguiano C., J.; Vizcaíno V., I.; Alcántar R., J.J.; Flores L., H.E. y Regalado R., J.R. 2004. Clasificación climática del Estado de Jalisco. Libro Técnico Núm. 1. INIFAP. México. 178 p.
- Ruiz C., J.A., L.E. Valdéz E., H.E. Flores L., G. Medina G., J.L. Ramírez D., J.F. Pérez D., J.J. Aceves R., A. González A., L. Soltero D., S. Medina O., J.R. Regalado R., J.R. Chávez C., P. Díaz M., C. González S., C. Santiago D. y F.M. Del Toro C. 2005. Potencial productivo agrícola de la Región Ciénega de Jalisco. INIFAP-SAGARPA. Libro Técnico No. 9. 252 p.
- Ruiz C., J.A, I.J. González A., J.R. Regalado R., J. Anguiano C., I. Vizcaíno V. y D.R. González E. 2003. Recursos edafo-climáticos para la planeación del sector productivo en el Estado de Jalisco. Libro Técnico No. 2. INIFAP-CIRPAC. Ed. Conexión Gráfica. 172 p.
- Ruiz C., J.A. 2007. Requerimientos agroecológicos y potencial productivo del agave *Agave tequilana* Weber en México. p.11-36. *In* Rulfo V., F.O. et al. (ed.). Conocimiento y prácticas agronómicas para la producción de *Agave tequilana* Weber en la zona de denominación de origen del tequila. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro.
- Ruiz C., J.A.; E. Pimienta B. y J. Zañudo H. 2002. Regiones térmicas óptimas y marginales para el cultivo de *Agave tequilana* en el Estado de Jalisco. *Agrociencia.* 36: 41-53. México.

- Ruiz C., J.A.; G. Medina G.; C. Ortíz T.; R. Martínez P.; I.J. González A.; H.E. Flores L. y K.F. Byerly M. 1999. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Libro técnico No. 3. INIFAP. México.
- Salinger M. J. 2005. Climate variability and change: past, present and future – an overview. *In: Increasing climate variability and change.* Salinger J., M. V. K. Sivakumar and R. P. Motha (eds.). Springer. P. 9-29. U. S. A.
- Secretaría de Desarrollo Urbano. (SEDEUR). 2001. Plan De Desarrollo Regional Integral 2001-2007. Gobierno de Jalisco. [En línea]. <<http://sedeur.jalisco.gob.mx>> [Consultado el día 16 de julio de 2007]
- Seoánez C., M. 2002. Tratado de la contaminación atmosférica. Problemas, tratamiento y gestión. Colección Ingeniería del Medio Ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. España. 1111p.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2008. Historia del Servicio Meteorológico Nacional. [En línea] <<http://smn2.cna.gob.mx/SMN2/Default.aspx>> [Consultado el 26 de octubre de.2010].
- Sivakumar M. V. K., H. P. Das and O. Brunini. 2005. Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics. *In: Increasing climate variability and change.* Salinger J., M. V. K. Sivakumar and R. P. Motha (eds.). Springer. P. 31-72. U. S. A.
- Sojka R.E., H.A. Joseph and L.H. Stolzy. 1972. Wheat response to short-term heat stress and to soil oxygen stress at three stages of growth. *Agronomy Journal.* 64:450-452
- Solano V., N. 2006. Aprovechamiento de híbridos comerciales de maíz (*Zea mays* L.) en la formación de variedades sintéticas y cruza intervarietales para el municipio de Poncitlán, Jalisco. Tesis de Maestro en Ciencias. Universidad de Guadalajara. México.
- Solís M., E.; M. Hernández M.; A. Borodanenko; J.L. Aguilar A. y O.A. Grajeda C. 2004. Duración de la etapa reproductiva y el rendimiento de trigo. *Revista Fitotecnia Mexicana.* 27: 323-332.
- Stireman III J.O., L.A. Dyer, D.H. Janzen, M.S. Singer, J.T. Lill, R.J. Marquis, R.E. Ricklefs, G.L. Gentry, W. Hallwachs, P.D. Coley, J.A. Barone, H. Connahs, P. Barbosa, H.C. Morais and I.R. Diniz. 2005. Climatic unpredictability and parasitism of caterpillars: implications of global warming.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2006. *Plant physiology.* Fourth Edition. Sinauer Associates, Inc.

- U.S.A. 764 p.
- Tas S. and B. Tas. 2007. Some physiological responses of drought stress in wheat genotypes with different ploidity in Turkiye. *World Journal of Agricultural Sciences*.3:178-183
- Tejeda M. A. y L. Rodríguez V. 2007. Estado de la investigación de los aspectos físicos del cambio climático en México. *Investigaciones Geográficas*. Boletín 62: 31-43. México.
- Terrón U. 2001. *Tratado de fitotecnia general*. 2ª. Edición. Ediciones Mundi-Prensa. España. 900 p.
- Villalobos F.J., L. Mateos., F. Orgaz y E. Fereres. 2002. *Fitotecnia: Bases y tecnologías de la producción agrícola*. 1ª. Edición. Ediciones Mundi-Prensa. España. 500 p.
- Waghmare, A.G., M.C. Varshneya, S.V. Khandge, S.S. Thankur and A.S. Jadhav. 1995. Effects of meteorological parameters on the incidence of aphids on sorghum. *Journal of Maharashtra Agricultural Universities* 20: 307-308.
- Wang W., B. Vinocur and A. Altman. 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*. 218: 1-14.
- Wardlaw I.F. 2002. Interaction between drought and chronic high temperature during kernel filling in wheat in a controlled environment. *Annals of Botany*. 90: 469-476.
- Wheldon, T.E. 1988. *Mathematical models in Cancer research*. Bristol: Adam Hilger.
- Wijngaard, J.B.; A.M.G. Klein and G.P. Können. 2003. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *Int. J. Climatol*. 23: 679-692.
- Williams, M.A.J. and R.C. Balling Jr. 1996. *Interactions of desertification and climate*. World Meteorological Organization. United Nations Environmental Programme. Arnold Ed. 270 p. U.S.A.
- World Meteorological Organization (WMO). 1983. *Guide to climatological practices*. 2nd edition. Secretariat of the world meteorological organization. Switzerland.
- Wullschleger S.D., T.J. Tschaplinski and R.J. Norby. 2002. Plant water relations at elevated CO₂ – implications for water-limited environment. *Plant Cell Environ*. 25: 319-331.
- Yoon S.T., G. Hoogenboom, I. Flitcroft and M. Bannayan. 2009. Growth and development of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in response to CO₂ enrichment under two different temperature regimes. *Environ. Exp. Bot.*, 67: 178-187.

- Young, T.E., J. Ling, J. Geisler-Lee, R.L., C. Caldwell and D.R. Gallie. 2001. Developmental and thermal regulation of the maize heat shock protein Hsp101. *Plant Physiology*. 127: 777-791. American Society of Plant Biologists. U.S.A.
- Zhao Y., C. Wang., S. Wang., and L. V. Tibig. 2005. Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the humid and sub-humid tropics. *In: Increasing climate variability and change*. Salinger J., M. V. K. Sivakumar and R. P. Motha (eds.). Springer. P. 71-116. U. S. A.
- Ziska L.H. and J.A. Bunce. 2007. Predicting the impact of changing CO₂ on crop yields: some thoughts on food. *New Phytologist* 175: 607-618.

Anexo 1. Extracto del Protocolo de Kyoto, referente a los artículos que establecen el compromiso adquirido por los países miembros.

7. Por "Parte incluida en el anexo I" se entiende una Parte que figura en el anexo I de la Convención, con las enmiendas de que pueda ser objeto, o una Parte que ha hecho la notificación prevista en el inciso g) del párrafo 2 del artículo 4 de la Convención.

Artículo 2

1. Con el fin de promover el desarrollo sostenible, cada una de las Partes incluidas en el anexo I, al cumplir los compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones contraídos en virtud del artículo 3:

- a) Aplicará y/o seguirá elaborando políticas y medidas de conformidad con sus circunstancias nacionales, por ejemplo las siguientes:
 - i) fomento de la eficiencia energética en los sectores pertinentes de la economía nacional;
 - ii) protección y mejora de los sumideros y depósitos de los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal, teniendo en cuenta sus compromisos en virtud de los acuerdos internacionales pertinentes sobre el medio ambiente; promoción de prácticas sostenibles de gestión forestal, la forestación y la reforestación;
 - iii) promoción de modalidades agrícolas sostenibles a la luz de las consideraciones del cambio climático;
 - iv) investigación, promoción, desarrollo y aumento del uso de formas nuevas y renovables de energía, de tecnologías de secuestro del dióxido de carbono y de tecnologías avanzadas y novedosas que sean ecológicamente racionales;
 - v) reducción progresiva o eliminación gradual de las deficiencias del mercado, los incentivos fiscales, las exenciones tributarias y arancelarias y las subvenciones que sean contrarios al objetivo de la Convención en todos los sectores emisores de gases de efecto invernadero y aplicación de instrumentos de mercado;
 - vi) fomento de reformas apropiadas en los sectores pertinentes con el fin de promover unas políticas y medidas que limiten o reduzcan las emisiones de los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal;
 - vii) medidas para limitar y/o reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal en el sector del transporte;
 - viii) limitación y/o reducción de las emisiones de metano mediante su recuperación y utilización en la gestión de los desechos así como en la producción, el transporte y la distribución de energía;
- b) Cooperará con otras Partes del anexo I para fomentar la eficacia individual y global de las políticas y medidas que se adopten en virtud del presente artículo, de conformidad con el

apartado i) del inciso e) del párrafo 2 del artículo 4 de la Convención. Con este fin, estas Partes procurarán intercambiar experiencia e información sobre tales políticas y medidas, en particular concibiendo las formas de mejorar su comparabilidad, transparencia y eficacia. La Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo, en su primer período de sesiones o tan pronto como sea posible después de éste, examinará los medios de facilitar dicha cooperación, teniendo en cuenta toda la información pertinente.

2. Las Partes incluidas en el anexo I procurarán limitar o reducir las emisiones de gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal generadas por los combustibles del transporte aéreo y marítimo internacional trabajando por conducto de la Organización de Aviación Civil Internacional y la Organización Marítima Internacional, respectivamente.

3. Las Partes incluidas en el anexo I se empeñarán en aplicar las políticas y medidas a que se refiere el presente artículo de tal manera que se reduzcan al mínimo los efectos adversos, comprendidos los efectos adversos del cambio climático, efectos en el comercio internacional y repercusiones sociales, ambientales y económicas, para otras Partes, especialmente las Partes que son países en desarrollo y en particular las mencionadas en los párrafos 8 y 9 del artículo 4 de la Convención, teniendo en cuenta lo dispuesto en el artículo 3 de la Convención. La Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo podrá adoptar otras medidas, según corresponda, para promover el cumplimiento de lo dispuesto en este párrafo.

4. Si considera que convendría coordinar cualesquiera de las políticas y medidas señaladas en el inciso a) del párrafo 1 *supra*, la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo, teniendo en cuenta las diferentes circunstancias nacionales y los posibles efectos, examinará las formas y medios de organizar la coordinación de dichas políticas y medidas.

Artículo 3

1. Las Partes incluidas en el anexo I se asegurarán, individual o conjuntamente, de que sus emisiones antropógenas agregadas, expresadas en dióxido de carbono equivalente, de los gases de efecto invernadero enumerados en el anexo A no excedan de las cantidades atribuidas a ellas, calculadas en función de los compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones consignados para ellas en el anexo B y de conformidad con lo dispuesto en el presente artículo, con miras a reducir el total de sus emisiones de esos gases a un nivel inferior en no menos de 5% al de 1990 en el período de compromiso comprendido entre el año 2008 y el 2012.

2. Cada una de las Partes incluidas en el anexo I deberá poder demostrar para el año 2005 un avance concreto en el cumplimiento de sus compromisos contraídos en virtud del presente Protocolo.

3. Las variaciones netas de las emisiones por las fuentes y la absorción por los sumideros de gases de efecto invernadero que se deban a la actividad humana directamente relacionada con el cambio del uso de la tierra y la silvicultura, limitada a la forestación, reforestación y deforestación desde 1990, calculadas como variaciones verificables del carbono

almacenado en cada período de compromiso, serán utilizadas a los efectos de cumplir los compromisos de cada Parte incluida en el anexo I dimanantes del presente artículo. Se informará de las emisiones por las fuentes y la absorción por los sumideros de gases de efecto invernadero que guarden relación con esas actividades de una manera transparente y verificable y se las examinará de conformidad con lo dispuesto en los artículos 7 y 8.

4. Antes del primer período de sesiones de la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo, cada una de las Partes incluidas en el anexo I presentará al Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico y Tecnológico, para su examen, datos que permitan establecer el nivel del carbono almacenado correspondiente a 1990 y hacer una estimación de las variaciones de ese nivel en los años siguientes. En su primer período de sesiones o lo antes posible después de éste, la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo determinará las modalidades, normas y directrices sobre la forma de sumar o restar a las cantidades atribuidas a las Partes del anexo I actividades humanas adicionales relacionadas con las variaciones de las emisiones por las fuentes y la absorción por los sumideros de gases de efecto invernadero en las categorías de suelos agrícolas y de cambio del uso de la tierra y silvicultura y sobre las actividades que se hayan de sumar o restar, teniendo en cuenta las incertidumbres, la transparencia de la presentación de informes, la verificabilidad, la labor metodológica del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, el asesoramiento prestado por el Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico y Tecnológico de conformidad con el artículo 5 y las decisiones de la Conferencia de las Partes. Tal decisión se aplicará en los períodos de compromiso segundo y siguientes. Una Parte podrá optar por aplicar tal decisión sobre estas actividades humanas adicionales para su primer período de compromiso, siempre que estas actividades se hayan realizado desde 1990.

5. Las Partes incluidas en el anexo I que están en vías de transición a una economía de mercado y que hayan determinado su año o período de base con arreglo a la decisión 9/CP.2, adoptada por la Conferencia de las Partes en su segundo período de sesiones, utilizarán ese año o período de base para cumplir sus compromisos dimanantes del presente artículo. Toda otra Parte del anexo I que esté en transición a una economía de mercado y no haya presentado aún su primera comunicación nacional con arreglo al artículo 12 de la Convención podrá también notificar a la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo que tiene la intención de utilizar un año o período histórico de base distinto del año 1990 para cumplir sus compromisos dimanantes del presente artículo. La Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo se pronunciará sobre la aceptación de dicha notificación.

6. Teniendo en cuenta lo dispuesto en el párrafo 6 del artículo 4 de la Convención, la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo concederá un cierto grado de flexibilidad a las Partes del anexo I que están en transición a una economía de mercado para el cumplimiento de sus compromisos dimanantes del presente Protocolo, que no sean los previstos en este artículo.

7. En el primer período de compromiso cuantificado de limitación y reducción de las emisiones, del año 2008 al 2012, la cantidad atribuida a cada Parte incluida en el anexo I será igual al porcentaje consignado para ella en el anexo B de sus emisiones antropógenas agregadas.

expresadas en dióxido de carbono equivalente, de los gases de efecto invernadero enumerados en el anexo A correspondientes a 1990, o al año o período de base determinado con arreglo al párrafo 5 *supra*, multiplicado por cinco. Para calcular la cantidad que se les ha de atribuir, las Partes del anexo I para las cuales el cambio del uso de la tierra y la silvicultura constituían una fuente neta de emisiones de gases de efecto invernadero en 1990 incluirán en su año de base 1990 o período de base las emisiones antropógenas agregadas por las fuentes, expresadas en dióxido de carbono equivalente, menos la absorción por los sumideros en 1990 debida al cambio del uso de la tierra.

8. Toda Parte incluida en el anexo I podrá utilizar el año 1995 como su año de base para los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos y el hexafluoruro de azufre para hacer los cálculos a que se refiere el párrafo 7 *supra*.

9. Los compromisos de las Partes incluidas en el anexo I para los períodos siguientes se establecerán en enmiendas al anexo B del presente Protocolo que se adoptarán de conformidad con lo dispuesto en el párrafo 7 del artículo 21. La Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo comenzará a considerar esos compromisos al menos siete años antes del término del primer período de compromiso a que se refiere el párrafo 1 *supra*.

10. Toda unidad de reducción de emisiones, o toda fracción de una cantidad atribuida, que adquiriera una Parte de otra Parte con arreglo a lo dispuesto en el artículo 6 o el artículo 17 se sumará a la cantidad atribuida a la Parte que la adquiriera.

11. Toda unidad de reducción de emisiones, o toda fracción de una cantidad atribuida, que transfiera una Parte a otra Parte con arreglo a lo dispuesto en el artículo 6 o el artículo 17 se deducirá de la cantidad atribuida a la Parte que la transfiera.

12. Toda unidad de reducción certificada de emisiones que adquiriera una Parte de otra Parte con arreglo a lo dispuesto en el artículo 12 se agregará a la cantidad atribuida a la Parte que la adquiriera.

13. Si en un período de compromiso las emisiones de una Parte incluida en el anexo I son inferiores a la cantidad atribuida a ella en virtud del presente artículo, la diferencia se agregará, a petición de esa Parte, a la cantidad que se atribuya a esa Parte para futuros períodos de compromiso.

14. Cada Parte incluida en el anexo I se empeñará en cumplir los compromisos señalados en el párrafo 1 *supra* de manera que se reduzcan al mínimo las repercusiones sociales, ambientales y económicas adversas para las Partes que son países en desarrollo, en particular las mencionadas en los párrafos 8 y 9 del artículo 4 de la Convención. En consonancia con las decisiones pertinentes de la Conferencia de las Partes sobre la aplicación de esos párrafos, la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo estudiará en su primer período de sesiones las medidas que sea necesario tomar para reducir al mínimo los efectos adversos del cambio climático y o el impacto de la aplicación de medidas de respuesta

para las Partes mencionadas en esos párrafos. Entre otras, se estudiarán cuestiones como la financiación, los seguros y la transferencia de tecnología.

Artículo 4

1. Se considerará que las Partes incluidas en el anexo I que hayan llegado a un acuerdo para cumplir conjuntamente sus compromisos dimanantes del artículo 3 han dado cumplimiento a esos compromisos si la suma total de sus emisiones antropógenas agregadas, expresadas en dióxido de carbono equivalente, de los gases de efecto invernadero enumerados en el anexo A no excede de las cantidades atribuidas a ellas, calculadas en función de los compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones consignados para ellas en el anexo B y de conformidad con lo dispuesto en el artículo 3. En el acuerdo se consignará el nivel de emisión respectivo asignado a cada una de las Partes en el acuerdo.

2. Las Partes en todo acuerdo de este tipo notificarán a la secretaría el contenido del acuerdo en la fecha de depósito de sus instrumentos de ratificación, aceptación o aprobación del presente Protocolo o de adhesión a éste. La secretaría informará a su vez a las Partes y signatarios de la Convención el contenido del acuerdo.

3. Todo acuerdo de este tipo se mantendrá en vigor mientras dure el período de compromiso especificado en el párrafo 7 del artículo 3.

4. Si las Partes que actúan conjuntamente lo hacen en el marco de una organización regional de integración económica y junto con ella, toda modificación de la composición de la organización tras la aprobación del presente Protocolo no incidirá en los compromisos ya vigentes en virtud del presente Protocolo. Todo cambio en la composición de la organización se tendrá en cuenta únicamente a los efectos de los compromisos que en virtud del artículo 3 se contraigan después de esa modificación.

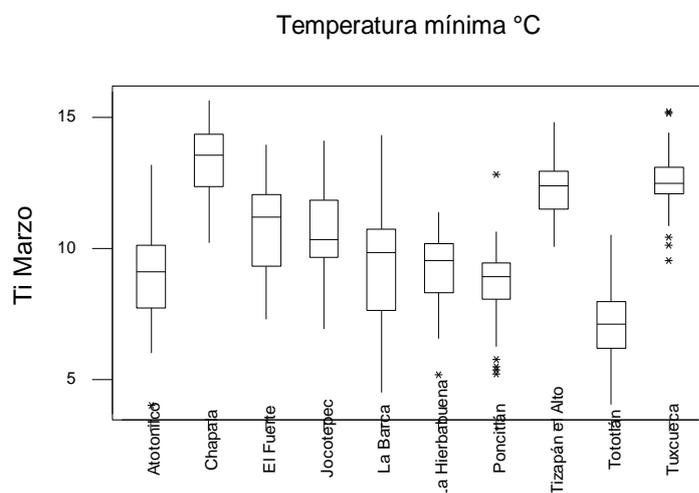
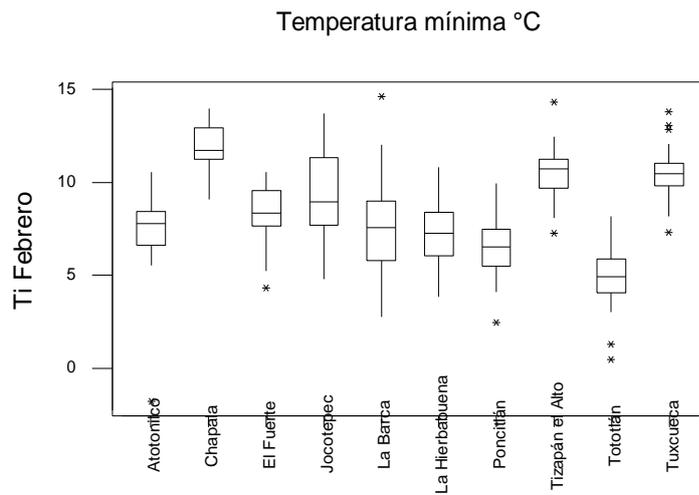
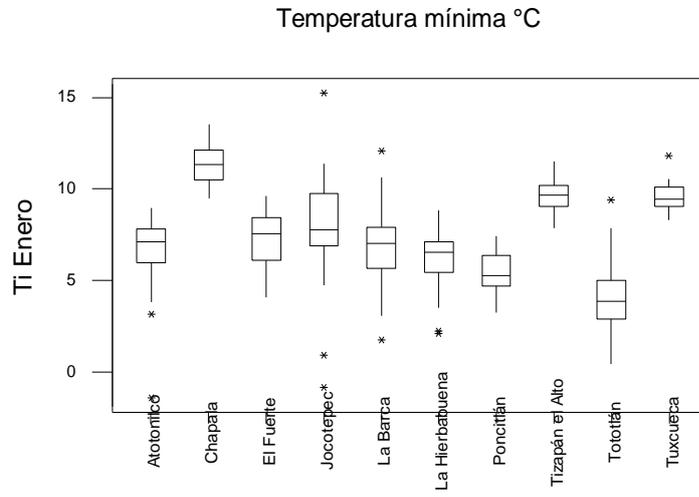
5. En caso de que las Partes en semejante acuerdo no logren el nivel total combinado de reducción de las emisiones fijado para ellas, cada una de las Partes en ese acuerdo será responsable del nivel de sus propias emisiones establecido en el acuerdo.

6. Si las Partes que actúan conjuntamente lo hacen en el marco de una organización regional de integración económica que es Parte en el presente Protocolo y junto con ella, cada Estado miembro de esa organización regional de integración económica, en forma individual y conjuntamente con la organización regional de integración económica, de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 24, será responsable, en caso de que no se logre el nivel total combinado de reducción de las emisiones, del nivel de sus propias emisiones notificado con arreglo al presente artículo.

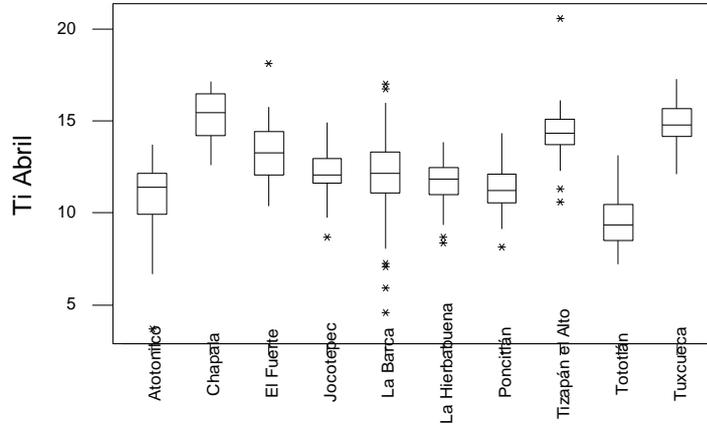
Artículo 5

1. Cada Parte incluida en el anexo I establecerá, a más tardar un año antes del comienzo del primer período de compromiso, un sistema nacional que permita la estimación de las emisiones antropógenas por las fuentes y de la absorción por los sumideros de todos los gases de

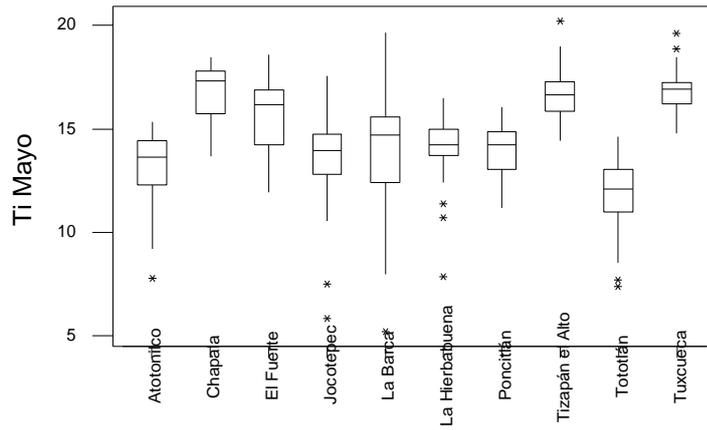
Anexo 2. Gráficas de caja para los parámetros climáticos Temperatura mínima, Temperatura máxima, Temperatura media y Precipitación acumulada, en las 10 estaciones estudiadas, en el período 1961-2006.



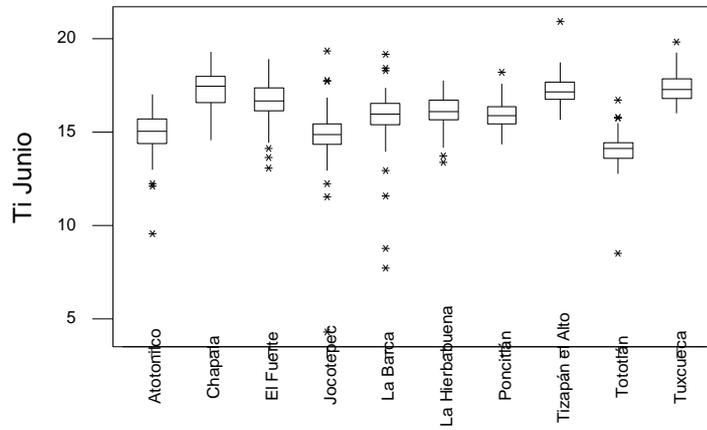
Temperatura mínima °C



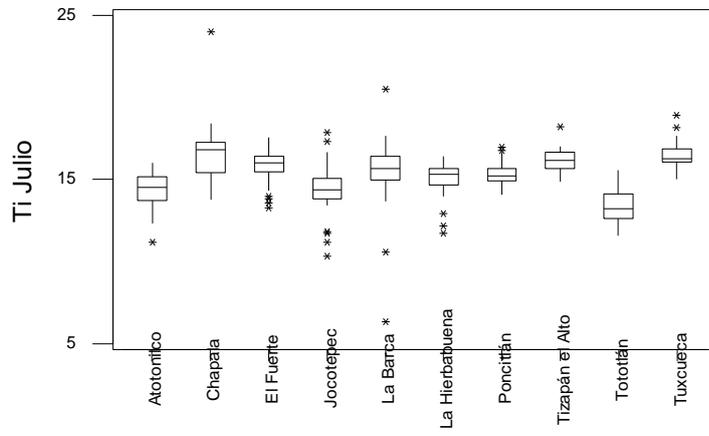
Temperatura mínima °C



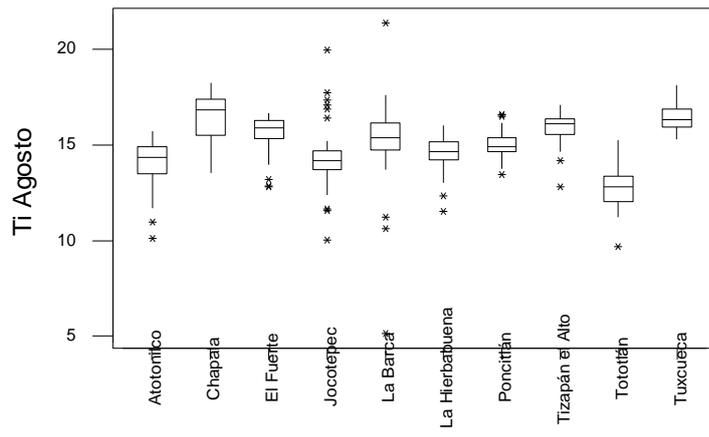
Temperatura mínima °C



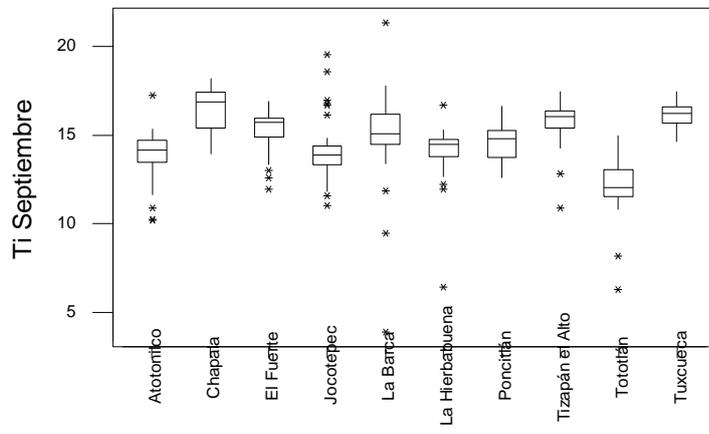
Temperatura mínima °C



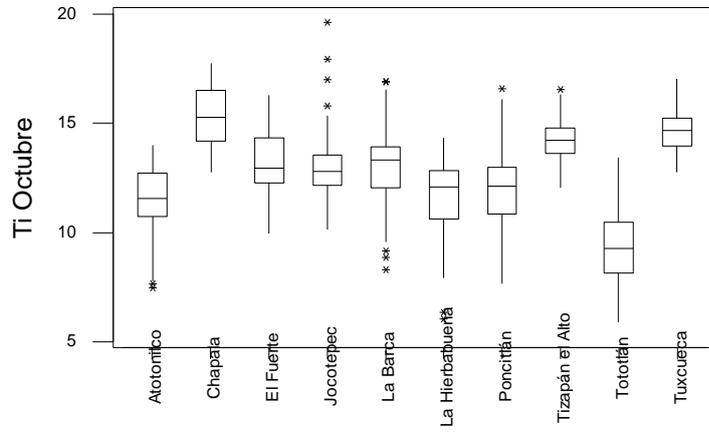
Temperatura mínima °C



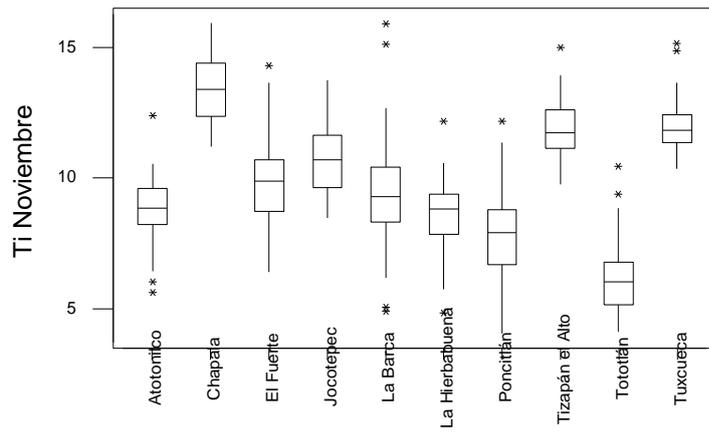
Temperatura mínima °C



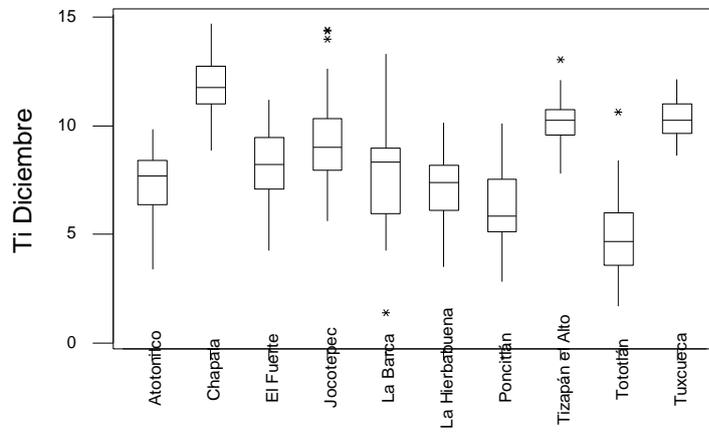
Temperatura mínima °C



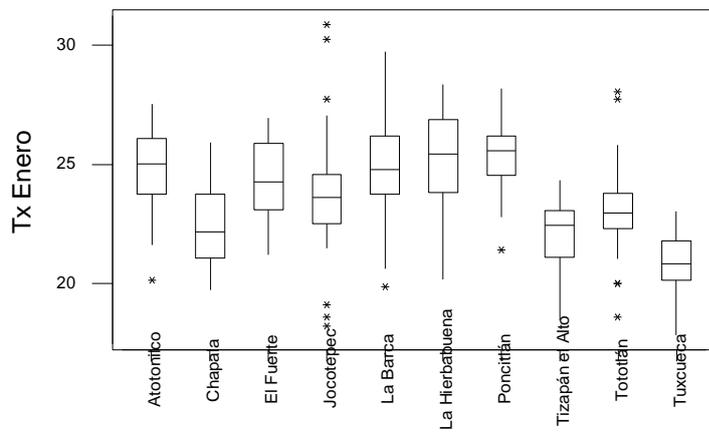
Temperatura mínima °C



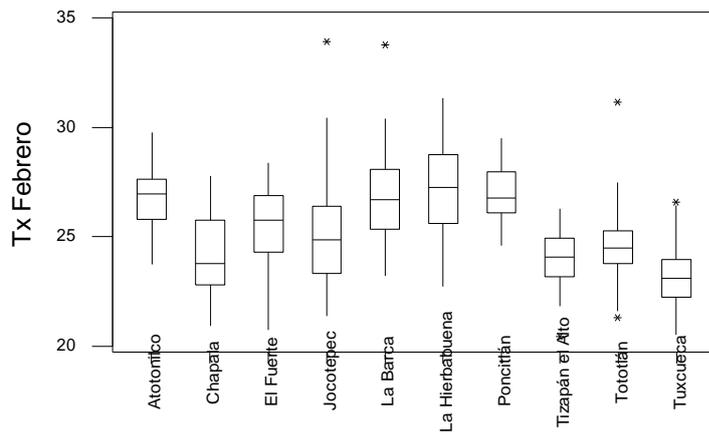
Temperatura mínima °C



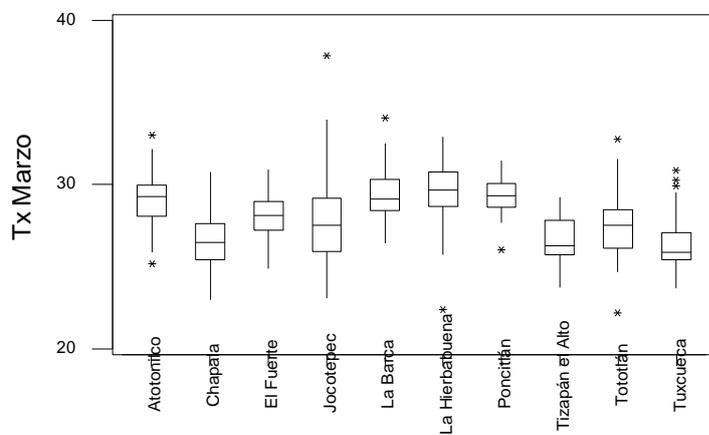
Temperatura máxima °C



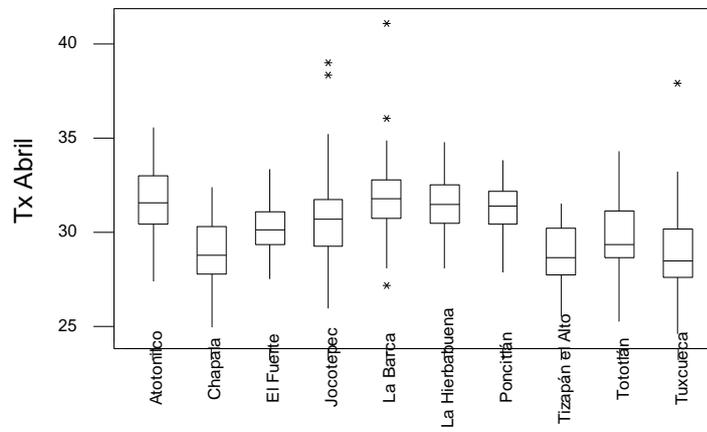
Temperatura máxima °C



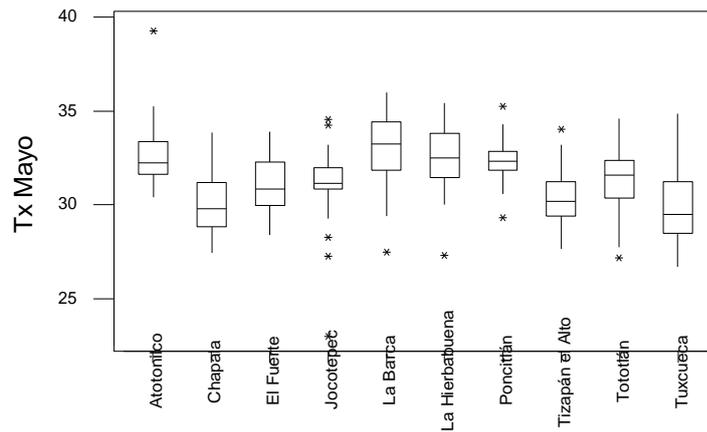
Temperatura máxima °C



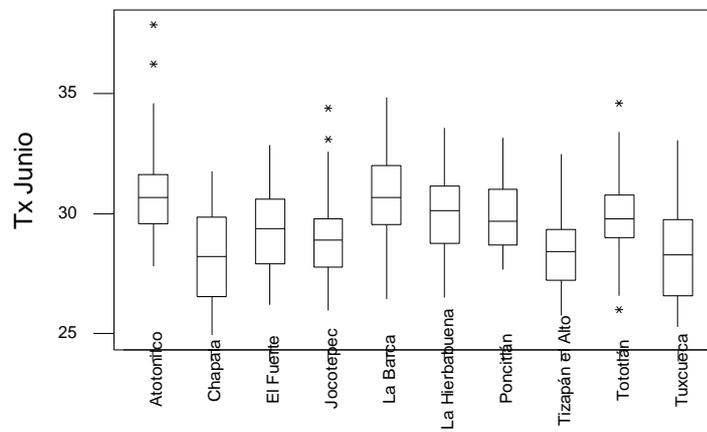
Temperatura máxima °C



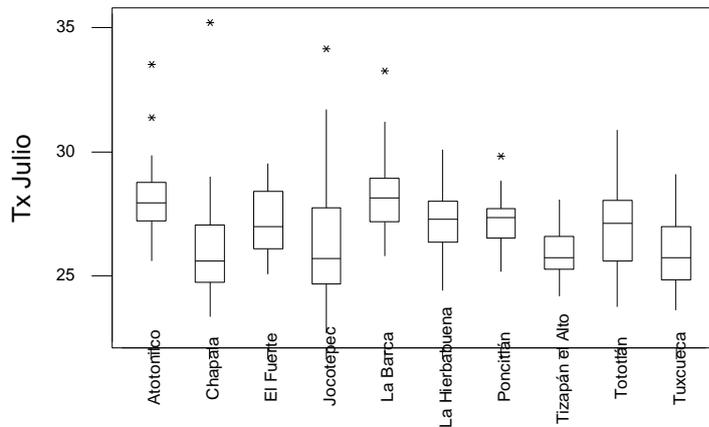
Temperatura máxima °C



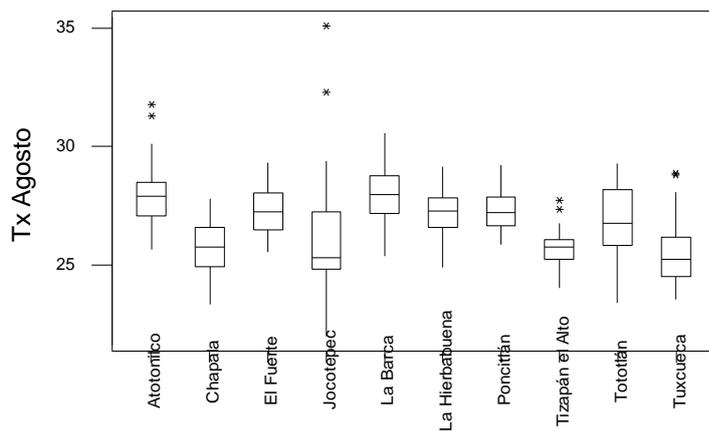
Temperatura máxima °C



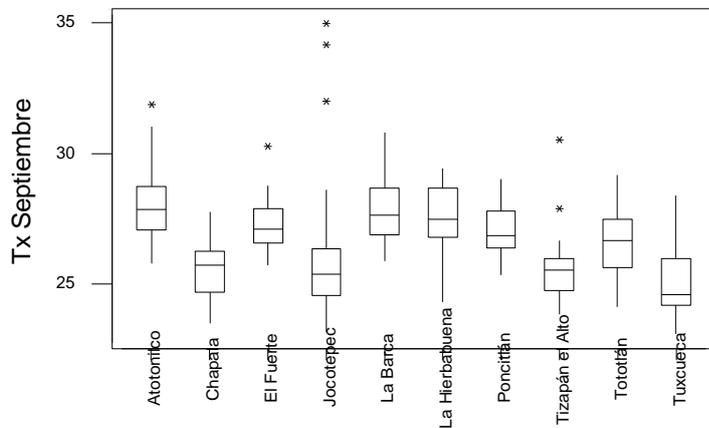
Temperatura máxima °C



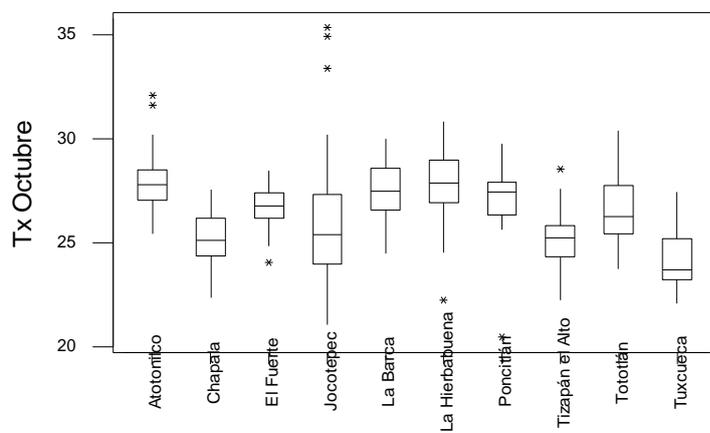
Temperatura máxima °C



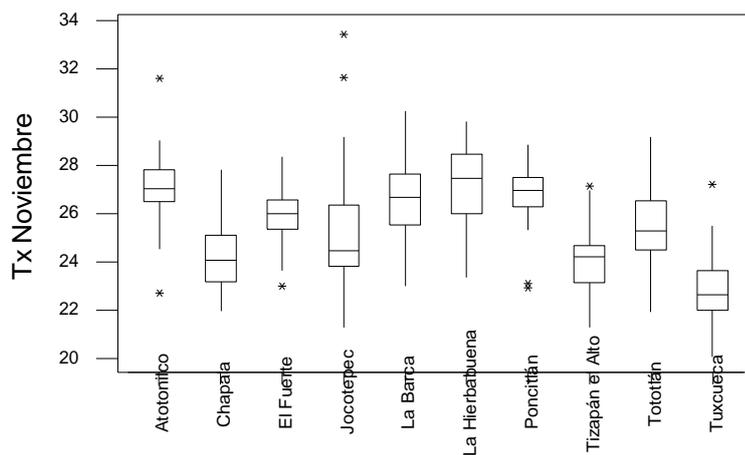
Temperatura máxima °C



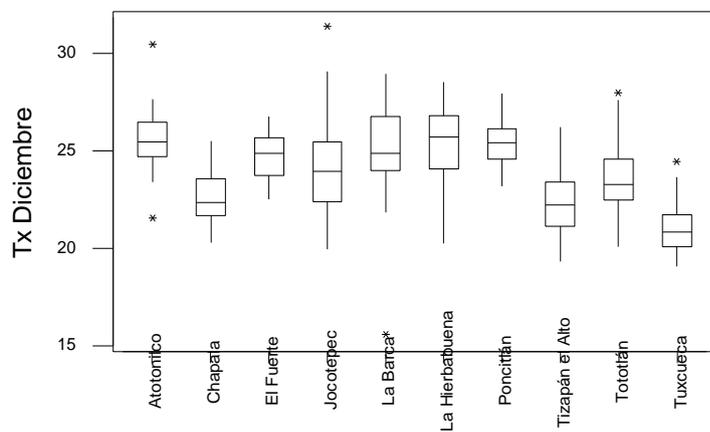
Temperatura máxima °C



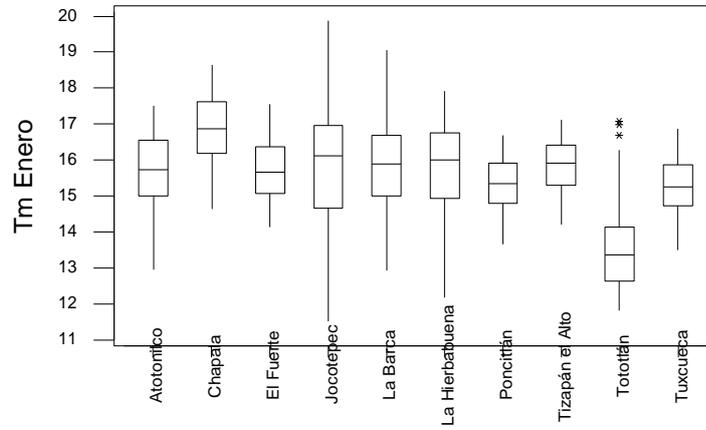
Temperatura máxima °C



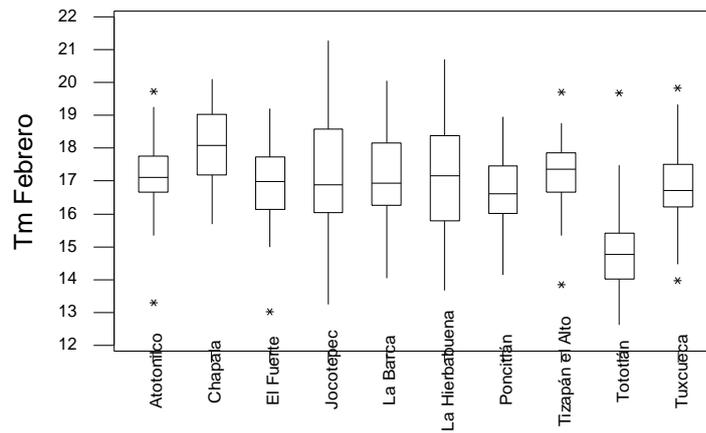
Temperatura máxima °C



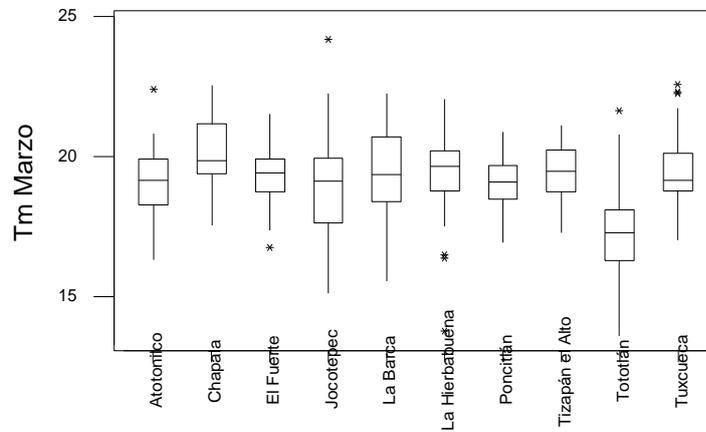
Temperatura media °C



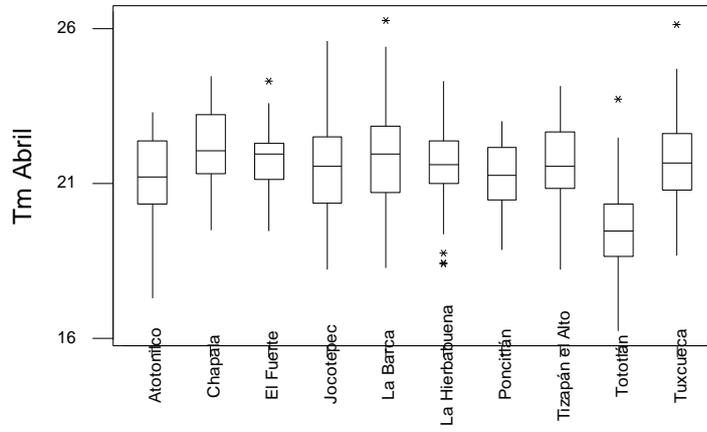
Temperatura media °C



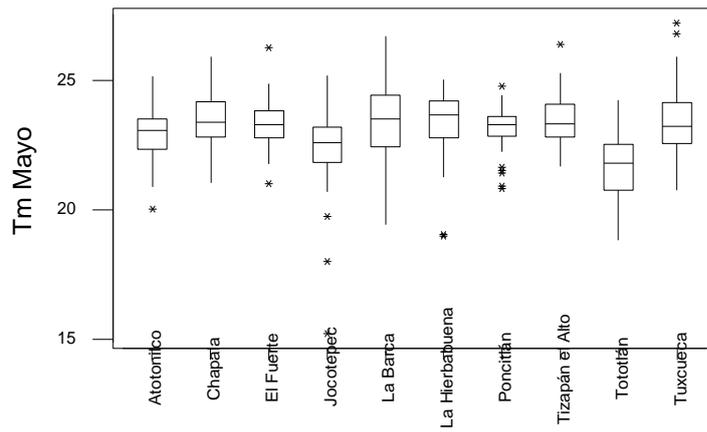
Temperatura media °C



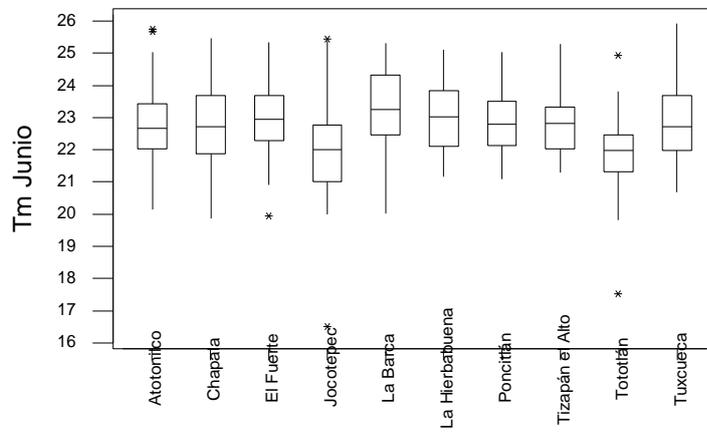
Temperatura media °C



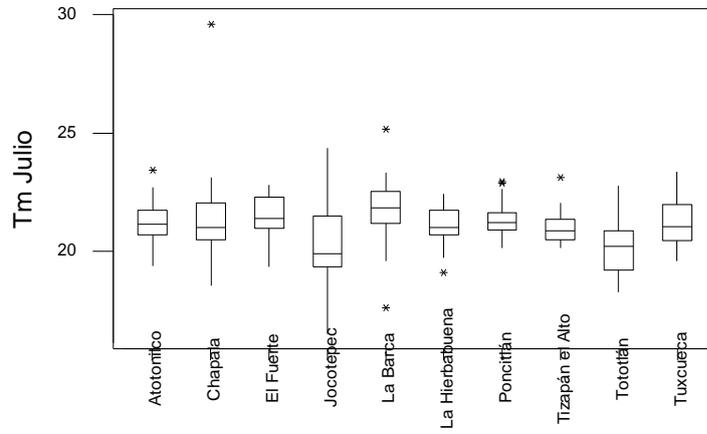
Temperatura media °C



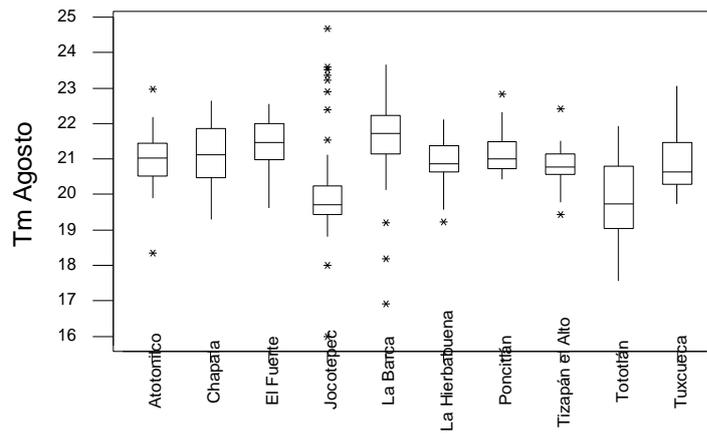
Temperatura media °C



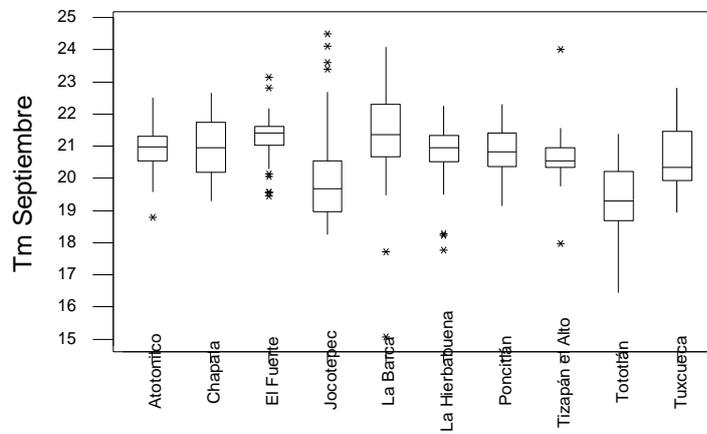
Temperatura media °C



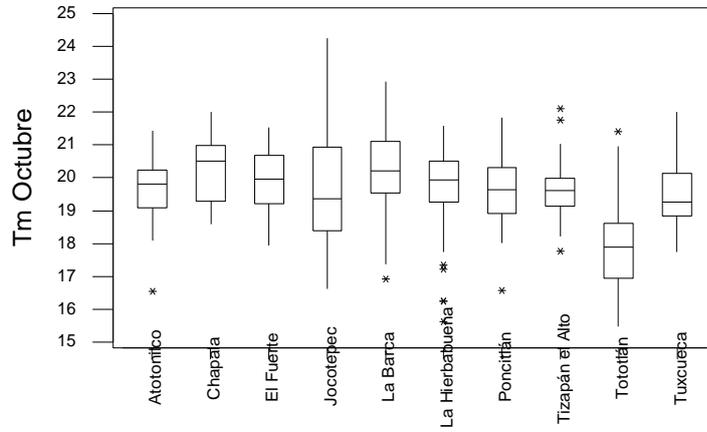
Temperatura media °C



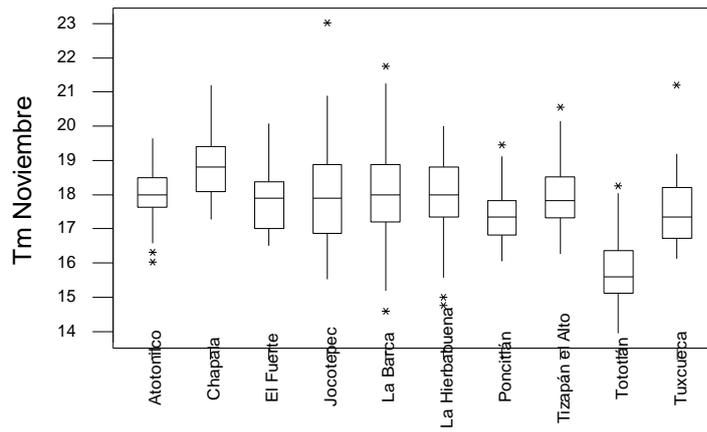
Temperatura media °C



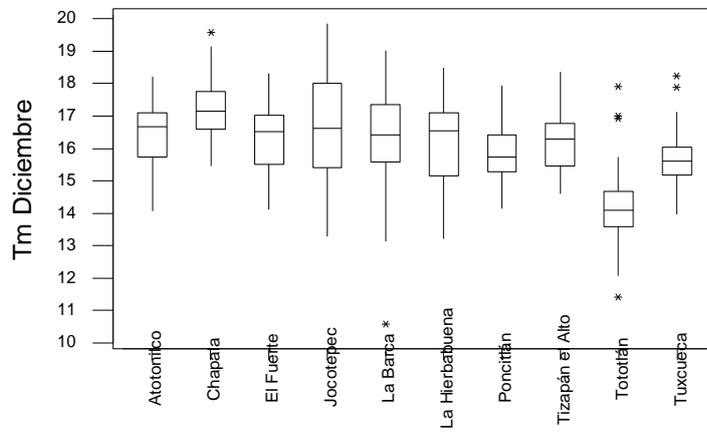
Temperatura media °C



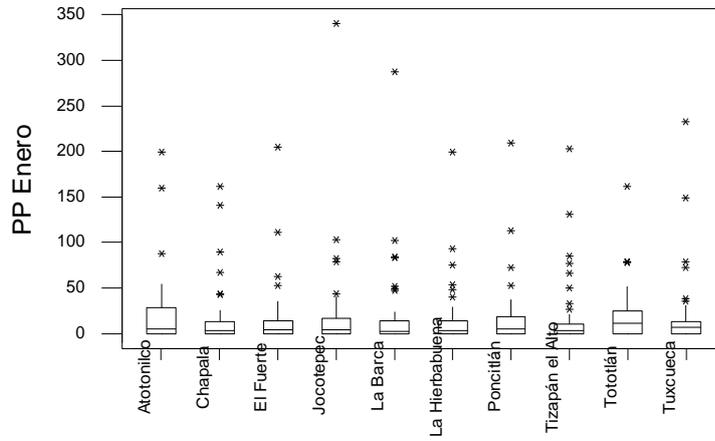
Temperatura media °C



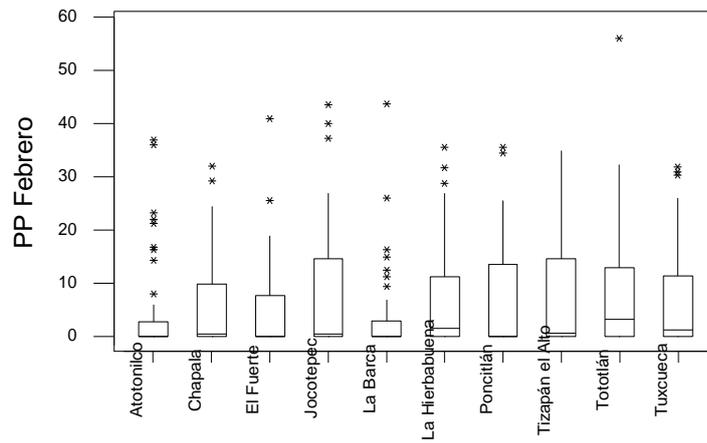
Temperatura media °C



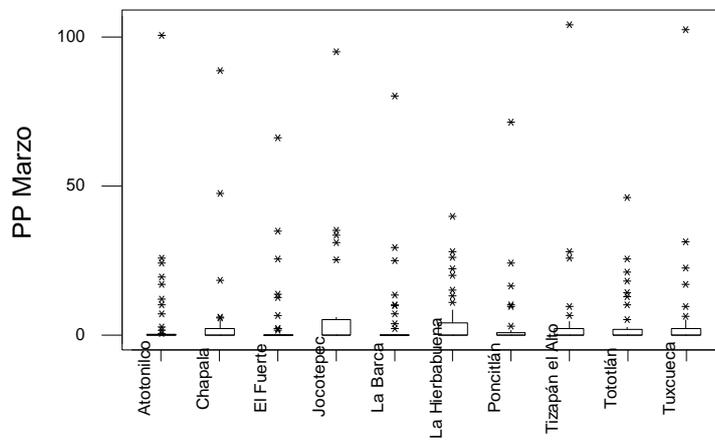
Precipitación pluvial acumulada mm



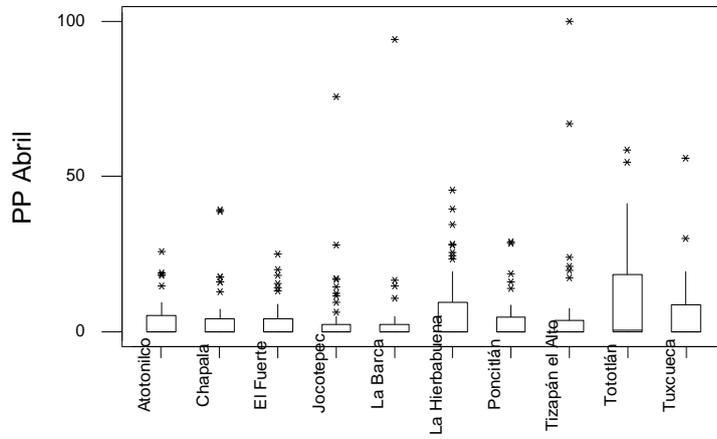
Precipitación pluvial acumulada mm



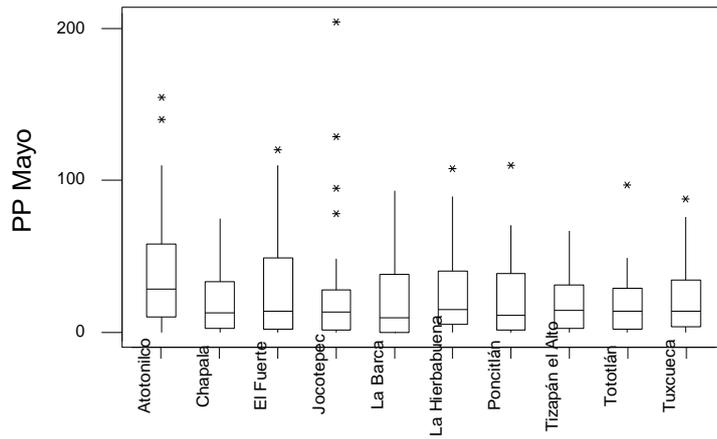
Precipitación pluvial acumulada mm



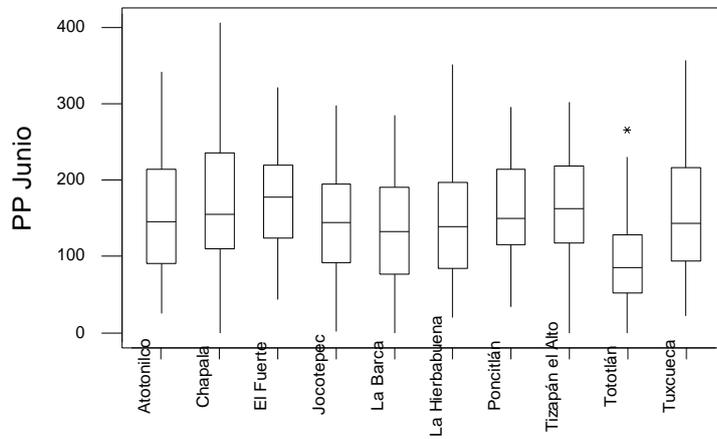
Precipitación pluvial acumulada mm



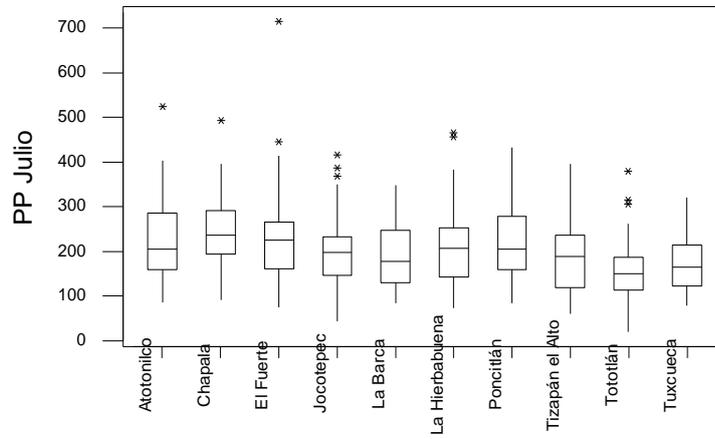
Precipitación pluvial acumulada mm



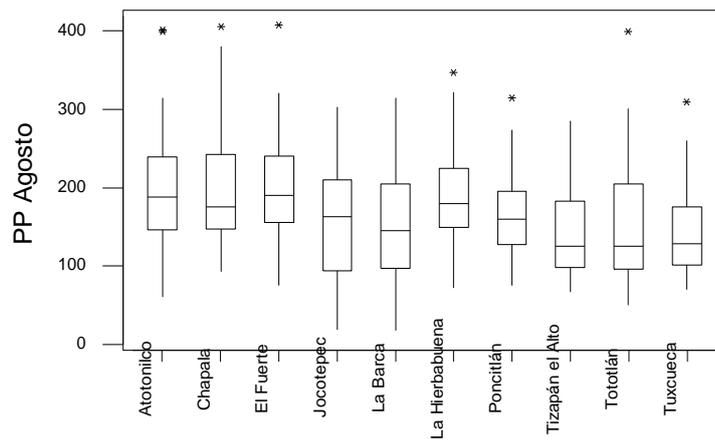
Precipitación pluvial acumulada mm



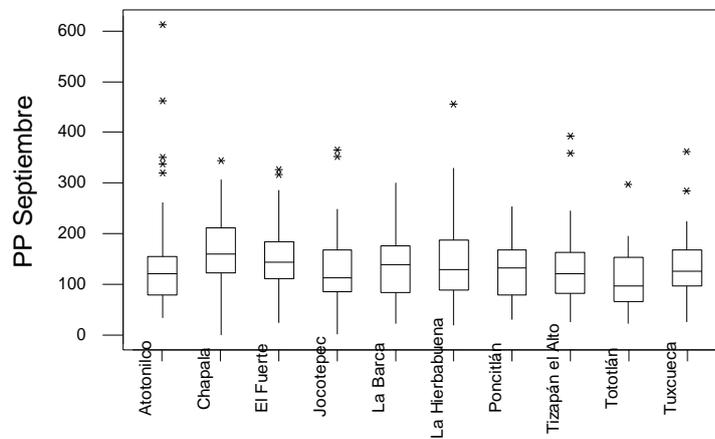
Precipitación pluvial acumulada mm



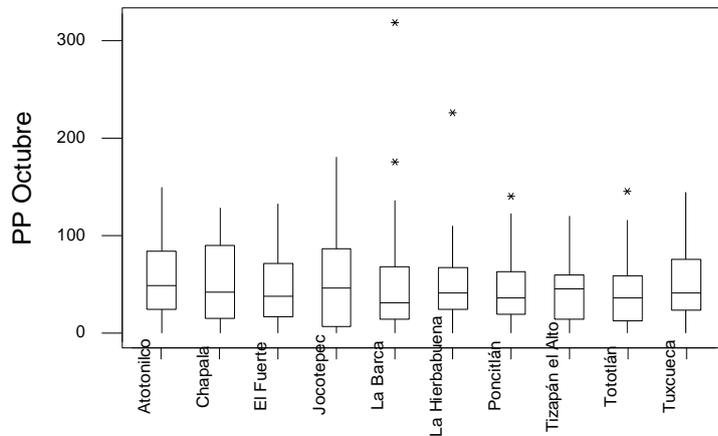
Precipitación pluvial acumulada mm



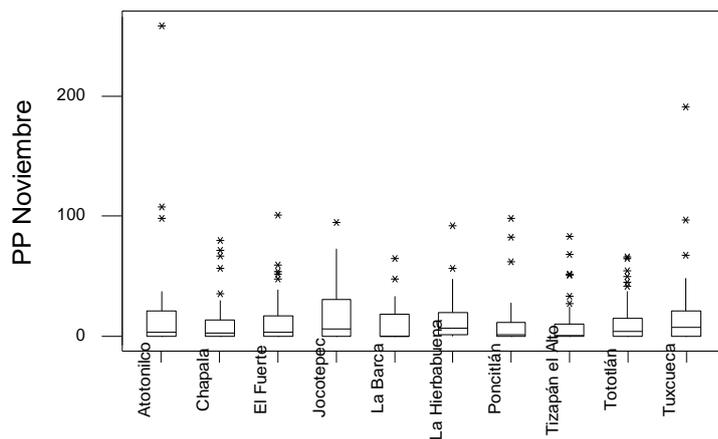
Precipitación pluvial acumulada mm



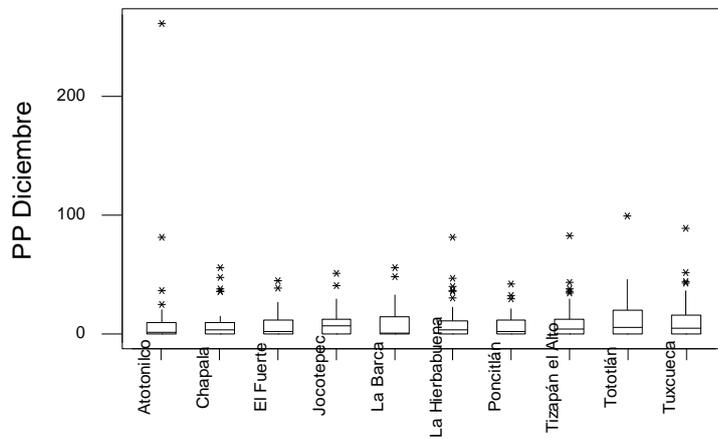
Precipitación pluvial acumulada mm



Precipitación pluvial acumulada mm



Precipitación pluvial acumulada mm



Anexo 3. Localización en carta topográfica de cada una de las estaciones climatológicas utilizadas en este estudio y su distancia más corta a la Ribera del Lago de Chapala calculada mediante el Método trigonométrico de Haversine.



Figura 1. Estación climatológica ATOTONILCO en el municipio de Atotonilco el Alto. Esta estación se encuentra a una distancia de 36.459 km a la Ribera del Lago de Chapala (distancia más corta).



Figura 2. Estación climatológica CHAPALA en el municipio de Chapala. Esta estación se encuentra a 0.679 km de la Ribera del Lago de Chapala.



Figura 3. Estación climatológica EL FUERTE en el municipio de Ocotlán. Esta estación se encuentra a 2.034 km de la Ribera del Lago de Chapala (distancia más corta).



Figura 4. Estación climatológica JOCOTEPEC en el municipio de Jocotepec. Esta estación se encuentra a una distancia de 2.353 km de la Ribera del Lago de Chapala (distancia más corta).

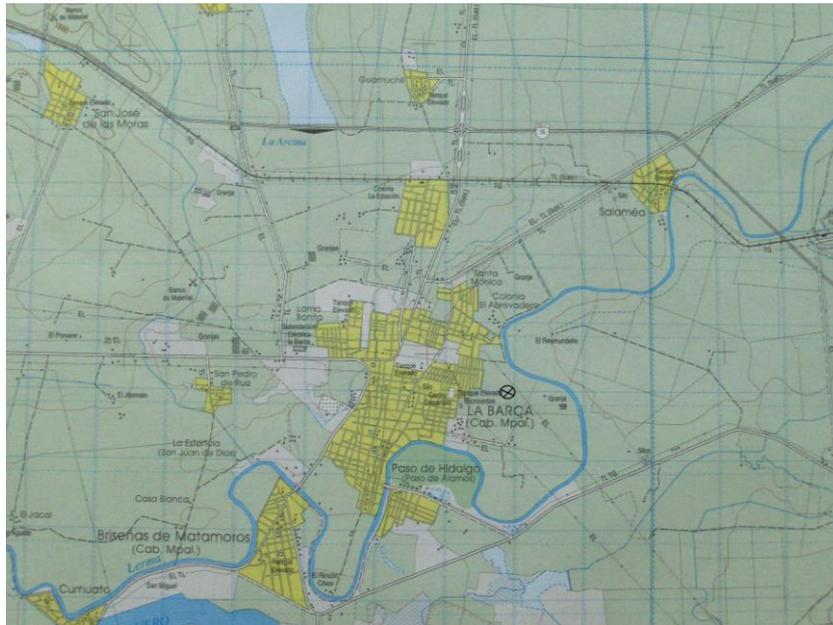


Figura 5. Estación climatológica LA BARCA en el municipio de La Barca. Esta estación se encuentra a una distancia de 18.850 km de la Ribera del Lago de Chapala (distancia más corta).

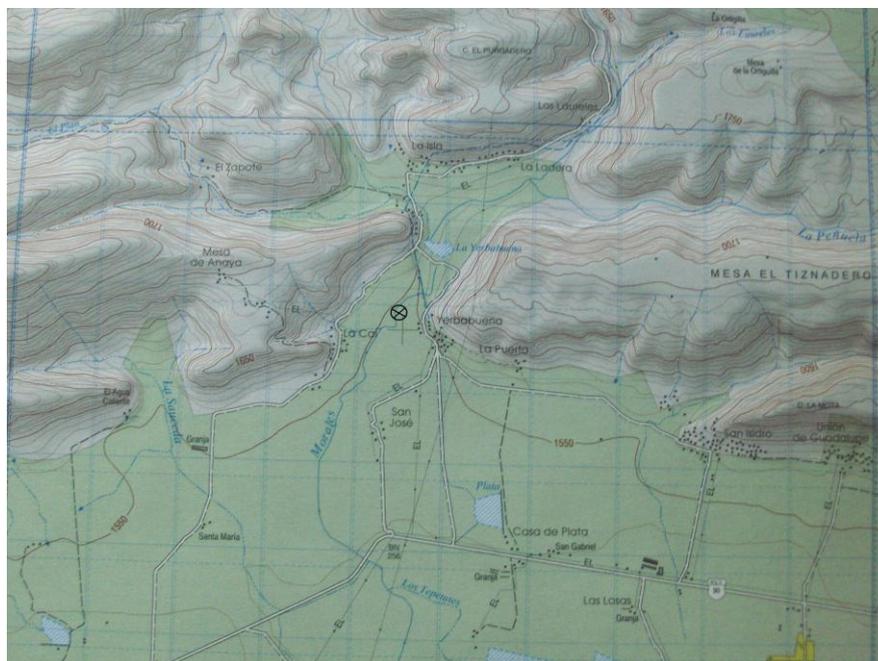


Figura 6. Estación climatológica LA HIERBABUENA en el municipio de Tototlán. Esta estación se encuentra a una distancia de 34.346 km de la Ribera del Lago de Chapala (distancia más corta).

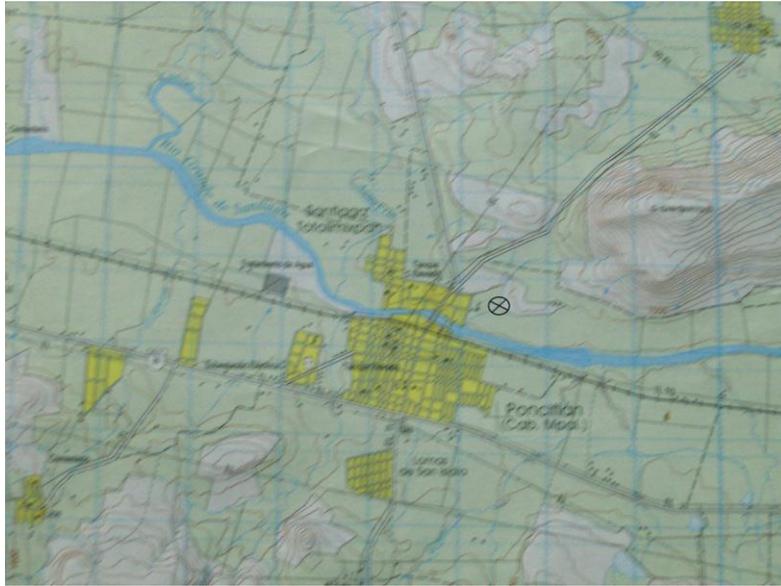


Figura 7. Estación climatológica PONCITLÁN en el municipio de Poncitlán. Esta estación se encuentra a una distancia de 17.435 km de la Ribera del Lago de Chapala (distancia más corta).



Figura 8. Estación climatológica TIZAPÁN EL ALTO en el municipio de Tizapán el Alto. Esta estación se encuentra a una distancia de 0.923 km de la Ribera del Lago de Chapala.



Figura 9. Estación climatológica TOTOTLÁN en el municipio de Tototlán. Esta estación se encuentra a una distancia de 27.605 km de la Ribera del Lago de Chapala (distancia más corta).



Figura 10. Estación climatológica TUXCUECA en el municipio de Tuxcueca. Esta estación se encuentra a una distancia de 0.519 km de la Ribera del Lago de Chapala.

Anexo 4. Climatología actualizada (1977-2006) para las estaciones climáticas analizadas de la Región Ciénega de Chapala.

PARÁMETROS Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA

Parámetros

Estación	Atotonilco
Clave	14017
Municipio	Atotonilco el Alto
Latitud (Norte)	20° 33'
Longitud (Oeste)	102° 31'
Altitud (msnm)	1606
Régimen de lluvia	Verano unimodal
Precipitación acumulada promedio de Enero (mm)	24.79
Precipitación acumulada promedio de Febrero (mm)	5.00
Precipitación acumulada promedio de Marzo (mm)	3.19
Precipitación acumulada promedio anual (P) (mm)	820.45
Porcentaje de lluvia invernal (%)	4.02
Valor del factor "r" (mm)	673.01
Mes más frío	Enero
Temperatura media del mes más frío (°C)	15.65
Temperatura media anual (°C)	19.65
Mes más cálido	Junio
Temperatura media del mes más cálido (°C)	22.75
Oscilación térmica anual (OT) (°C)	7.11
Cociente P/T	41.75
Meses húmedos	Julio, Agosto, Septiembre
Evaporación acumulada promedio anual (mm)	1942.98
Evapotranspiración potencial promedio anual (ETP) (mm)	1434.88
Cociente P/ETP	0.58

Clasificación climática

Tipo climático (Köppen-García)	(A)Ca(w0)(w)(e)
Tipo climático (INIFAP)	Subtrópico Semiárido Semicálido
Zona climática (UNEP)	Subhúmeda seca

PARÁMETROS Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA

Parámetros

Estación	Chapala
Clave	14040
Municipio	Chapala
Latitud (Norte)	20° 17'
Longitud (Oeste)	103° 12'
Altitud (msnm)	1527
Régimen de lluvia	Verano unimodal
Precipitación acumulada promedio de Enero (mm)	17.72
Precipitación acumulada promedio de Febrero (mm)	4.79
Precipitación acumulada promedio de Marzo (mm)	3.16
Precipitación acumulada promedio anual (P) (mm)	882.42
Porcentaje de lluvia invernal (%)	2.91
Valor del factor "r" (mm)	689.56
Mes más frío	Enero
Temperatura media del mes más frío (°C)	17.09
Temperatura media anual (°C)	20.48
Mes más cálido	Mayo
Temperatura media del mes más cálido (°C)	23.65
Oscilación térmica anual (OT) (°C)	6.56
Cociente P/T	43.09
Meses húmedos	Junio, Julio, Agosto, Septiembre
Evaporación acumulada promedio anual (mm)	1712.57
Evapotranspiración potencial promedio anual (ETP) (mm)	1229.17
Cociente P/ETP	0.72

Clasificación climática

Tipo climático (Köppen-García)	(A)Ca(w0)(w)(e)g
Tipo climático (INIFAP)	Subtrópico Subhúmedo Semicálido
Zona climática (UNEP)	Subhúmeda húmeda

PARÁMETROS Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA

Parámetros

Estación	El Fuerte
Clave	14047
Municipio	Ocotlán
Latitud (Norte)	20° 18'
Longitud (Oeste)	102° 46'
Altitud (msnm)	1551
Régimen de lluvia	Verano unimodal
Precipitación acumulada promedio de Enero (mm)	18.01
Precipitación acumulada promedio de Febrero (mm)	4.75
Precipitación acumulada promedio de Marzo (mm)	2.84
Precipitación acumulada promedio anual (P) (mm)	824.51
Porcentaje de lluvia invernal (%)	3.10
Valor del factor "r" (mm)	677.78
Mes más frío	Enero
Temperatura media del mes más frío (°C)	15.67
Temperatura media anual (°C)	19.89
Mes más cálido	Mayo
Temperatura media del mes más cálido (°C)	23.26
Oscilación térmica anual (OT) (°C)	7.59
Cociente P/T	41.46
Meses húmedos	Junio, Julio, Agosto, Septiembre
Evaporación acumulada promedio anual (mm)	1737.71
Evapotranspiración potencial promedio anual (ETP) (mm)	1355.96
Cociente P/ETP	0.61

Clasificación climática

Tipo climático (Köppen-García)	(A)Ca(w0)(w)(e)g
Tipo climático (INIFAP)	Subtrópico Subhúmedo Semicálido
Zona climática (UNEP)	Subhúmeda seca

PARÁMETROS Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA

Parámetros

Estación	Jocotepec
Clave	14077
Municipio	Jocotepec
Latitud (Norte)	20° 17'
Longitud (Oeste)	103° 26'
Altitud (msnm)	1548
Régimen de lluvia	Verano unimodal
Precipitación acumulada promedio de Enero (mm)	26.90
Precipitación acumulada promedio de Febrero (mm)	6.06
Precipitación acumulada promedio de Marzo (mm)	4.21
Precipitación acumulada promedio anual (P) (mm)	767.41
Porcentaje de lluvia invernal (%)	4.84
Valor del factor "r" (mm)	666.87
Mes más frío	Enero
Temperatura media del mes más frío (°C)	15.41
Temperatura media anual (°C)	19.34
Mes más cálido	Mayo
Temperatura media del mes más cálido (°C)	22.32
Oscilación térmica anual (OT) (°C)	6.91
Cociente P/T	39.67
Meses húmedos	Junio, Julio, Agosto, Septiembre
Evaporación acumulada promedio anual (mm)	1886.52
Evapotranspiración potencial promedio anual (ETP) (mm)	1310.98
Cociente P/ETP	0.59

Clasificación climática

Tipo climático (Köppen-García)	(A)Ca(w0)(w)(e)g
Tipo climático (INIFAP)	Subtrópico Subhúmedo Semicálido
Zona climática (UNEP)	Subhúmeda seca

PARÁMETROS Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA

Parámetros

Estación	La Hierbabuena
Clave	14090
Municipio	Tototlán
Latitud (Norte)	20° 35'
Longitud (Oeste)	102° 45'
Altitud (msnm)	1588
Régimen de lluvia	Verano unimodal
Precipitación acumulada promedio de Enero (mm)	16.98
Precipitación acumulada promedio de Febrero (mm)	6.07
Precipitación acumulada promedio de Marzo (mm)	3.70
Precipitación acumulada promedio anual (P) (mm)	855.49
Porcentaje de lluvia invernal (%)	3.13
Valor del factor "r" (mm)	682.29
Mes más frío	Enero
Temperatura media del mes más frío (°C)	16.19
Temperatura media anual (°C)	20.11
Mes más cálido	Mayo
Temperatura media del mes más cálido (°C)	23.77
Oscilación térmica anual (OT) (°C)	7.58
Cociente P/T	42.53
Meses húmedos	Junio, Julio, Agosto, Septiembre
Evaporación acumulada promedio anual (mm)	1765.56
Evapotranspiración potencial promedio anual (ETP) (mm)	1403.92
Cociente P/ETP	0.61

Clasificación climática

Tipo climático (Köppen-García)	(A)Ca(w0)(w)(e)g
Tipo climático (INIFAP)	Subtrópico Subhúmedo Semicálido
Zona climática (UNEP)	Subhúmeda seca

PARÁMETROS Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA

Parámetros

Estación	Poncitlán
Clave	14111
Municipio	Poncitlán
Latitud (Norte)	20° 23'
Longitud (Oeste)	102° 55'
Altitud (msnm)	1530
Régimen de lluvia	Verano unimodal
Precipitación acumulada promedio de Enero (mm)	19.23
Precipitación acumulada promedio de Febrero (mm)	6.12
Precipitación acumulada promedio de Marzo (mm)	2.21
Precipitación acumulada promedio anual (P) (mm)	758.61
Porcentaje de lluvia invernal (%)	3.63
Valor del factor "r" (mm)	670.80
Mes más frío	Enero
Temperatura media del mes más frío (°C)	15.22
Temperatura media anual (°C)	19.54
Mes más cálido	Mayo
Temperatura media del mes más cálido (°C)	23.05
Oscilación térmica anual (OT) (°C)	7.83
Cociente P/T	38.82
Meses húmedos	Junio, Julio, Agosto, Septiembre
Evaporación acumulada promedio anual (mm)	1899.84
Evapotranspiración potencial promedio anual (ETP) (mm)	1399.75
Cociente P/ETP	0.55

Clasificación climática

Tipo climático (Köppen-García)	(A)Ca(w0)(w)(e)g
Tipo climático (INIFAP)	Subtrópico Subhúmedo Semicálido
Zona climática (UNEP)	Subhúmeda seca

PARÁMETROS Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA

Parámetros

Estación	Tototlán
Clave	14154
Municipio	Tototlán
Latitud (Norte)	20° 32'
Longitud (Oeste)	102° 47'
Altitud (msnm)	1545
Régimen de lluvia	Verano unimodal
Precipitación acumulada promedio de Enero (mm)	23.88
Precipitación acumulada promedio de Febrero (mm)	7.55
Precipitación acumulada promedio de Marzo (mm)	2.25
Precipitación acumulada promedio anual (P) (mm)	650.86
Porcentaje de lluvia invernal (%)	5.17
Valor del factor "r" (mm)	640.94
Mes más frío	Enero
Temperatura media del mes más frío (°C)	13.37
Temperatura media anual (°C)	18.05
Mes más cálido	Junio
Temperatura media del mes más cálido (°C)	22.05
Oscilación térmica anual (OT) (°C)	8.68
Cociente P/T	36.06
Meses húmedos	Julio, Agosto, Septiembre
Evaporación acumulada promedio anual (mm)	1947.10
Evapotranspiración potencial promedio anual (ETP) (mm)	1385.07
Cociente P/ETP	0.47

Clasificación climática

Tipo climático (Köppen-García)	(A)Ca(w0)(w)(e)
Tipo climático (INIFAP)	Subtrópico Semiárido Semicálido
Zona climática (UNEP)	Semiárida

PARÁMETROS Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA

Parámetros

Estación	Tuxcueca
Clave	14156
Municipio	Tuxcueca
Latitud (Norte)	20° 10'
Longitud (Oeste)	103° 12'
Altitud (msnm)	1525
Régimen de lluvia	Verano unimodal
Precipitación acumulada promedio de Enero (mm)	21.35
Precipitación acumulada promedio de Febrero (mm)	5.84
Precipitación acumulada promedio de Marzo (mm)	3.16
Precipitación acumulada promedio anual (P) (mm)	717.73
Porcentaje de lluvia invernal (%)	4.23
Valor del factor "r" (mm)	676.21
Mes más frío	Enero
Temperatura media del mes más frío (°C)	15.33
Temperatura media anual (°C)	19.81
Mes más cálido	Mayo
Temperatura media del mes más cálido (°C)	23.64
Oscilación térmica anual (OT) (°C)	8.32
Cociente P/T	36.23
Meses húmedos	Junio, Julio, Agosto, Septiembre
Evaporación acumulada promedio anual (mm)	1720.08
Evapotranspiración potencial promedio anual (ETP) (mm)	1206.59
Cociente P/ETP	0.60

Clasificación climática

Tipo climático (Köppen-García)	(A)Ca(w0)(w)(e)g
Tipo climático (INIFAP)	Subtrópico Subhúmedo Semicálido
Zona climática (UNEP)	Subhúmeda seca

PARÁMETROS Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA

Parámetros

Estación	Tizapán El Alto
Clave	14189
Municipio	Tizapán El Alto
Latitud (Norte)	20° 10'
Longitud (Oeste)	103° 02'
Altitud (msnm)	1534
Régimen de lluvia	Verano unimodal
Precipitación acumulada promedio de Enero (mm)	19.32
Precipitación acumulada promedio de Febrero (mm)	6.84
Precipitación acumulada promedio de Marzo (mm)	1.71
Precipitación acumulada promedio anual (P) (mm)	706.96
Porcentaje de lluvia invernal (%)	3.94
Valor del factor "r" (mm)	677.04
Mes más frío	Enero
Temperatura media del mes más frío (°C)	15.92
Temperatura media anual (°C)	19.85
Mes más cálido	Mayo
Temperatura media del mes más cálido (°C)	23.70
Oscilación térmica anual (OT) (°C)	7.78
Cociente P/T	35.61
Meses húmedos	Junio, Julio, Agosto, Septiembre
Evaporación acumulada promedio anual (mm)	2006.11
Evapotranspiración potencial promedio anual (ETP) (mm)	1227.84
Cociente P/ETP	0.58

Clasificación climática

Tipo climático (Köppen-García)	(A)Ca(w0)(w)(e)g
Tipo climático (INIFAP)	Subtrópico Subhúmedo Semicálido
Zona climática (UNEP)	Subhúmeda seca

PARÁMETROS Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA

Parámetros

Estación	La Barca
Clave	14355
Municipio	La Barca
Latitud (Norte)	20° 17'
Longitud (Oeste)	102° 32'
Altitud (msnm)	1558
Régimen de lluvia	Verano unimodal
Precipitación acumulada promedio de Enero (mm)	23.08
Precipitación acumulada promedio de Febrero (mm)	4.85
Precipitación acumulada promedio de Marzo (mm)	3.15
Precipitación acumulada promedio anual (P) (mm)	798.67
Porcentaje de lluvia invernal (%)	3.89
Valor del factor "r" (mm)	681.67
Mes más frío	Enero
Temperatura media del mes más frío (°C)	15.75
Temperatura media anual (°C)	20.08
Mes más cálido	Mayo
Temperatura media del mes más cálido (°C)	23.62
Oscilación térmica anual (OT) (°C)	7.87
Cociente P/T	39.77
Meses húmedos	Junio, Julio, Agosto, Septiembre
Evaporación acumulada promedio anual (mm)	1532.17
Evapotranspiración potencial promedio anual (ETP) (mm)	1391.70
Cociente P/ETP	0.58

Clasificación climática

Tipo climático (Köppen-García)	(A)Ca(w0)(w)(e)g
Tipo climático (INIFAP)	Subtrópico Subhúmedo Semicálido
Zona climática (UNEP)	Subhúmeda seca

Anexo 5. Glosario de términos utilizados en el documento.

Adaptación. Iniciativas y medidas encaminadas a reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos ante los efectos reales o esperados de un cambio climático.

Aerosoles. Conjunto de partículas sólidas o líquidas presentes en el aire, de tamaño generalmente comprendido entre 0.01 y 10 micrómetros, que permanecen en la atmósfera durante varias horas o más. Pueden influir en el clima de varias maneras: directamente, dispersando y absorbiendo radiación, o indirectamente, actuando como núcleos de condensación de nube o modificando las propiedades ópticas y el período de vida de las nubes (IPCC, 2007).

Capa de los 500 mb de presión. Capa de la atmósfera por debajo de la cual el flujo de los vientos depende en gran medida de la orografía, mientras que por arriba de ella los vientos fluyen libremente (Otaola *et al.*, 1993)

Capa de ozono estratosférico. Esta capa absorbe la radiación solar ultravioleta dentro del rango de longitud de onda de 280 a 320 nm (UV-B), y su disminución conlleva a un incremento en el flujo de rayos UV-B a nivel del suelo.

Captura y almacenamiento de dióxido de carbono. Proceso consistente en la separación de dióxido de carbono de fuentes industriales y del sector de la energía, su transporte hasta un lugar de almacenamiento y su aislamiento respecto de la atmósfera durante largos períodos.

Efecto invernadero. Los gases de efecto invernadero absorben eficazmente la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera debido a esos mismos gases, y por las nubes. La radiación atmosférica es emitida en todas direcciones, en particular hacia la superficie de la Tierra. Por ello los gases de efecto invernadero, retienen calor en sistema superficie-tropósfera. Este fenómeno se denomina efecto invernadero. La radiación infrarroja térmica de la tropósfera está fuertemente acoplada a la temperatura de la atmósfera a la altitud en que se emite. En la tropósfera, la temperatura suele disminuir con la altura. De hecho, la radiación infrarroja emitida hacia el espacio proviene de una altitud cuya temperatura promedio es de -19°C , en equilibrio con la radiación solar entrante neta, mientras que en la superficie de la Tierra se mantiene a una temperatura mucho más alta, de $+14^{\circ}\text{C}$ en promedio. Un

aumento de la concentración de gases de efecto invernadero da lugar a una mayor opacidad infrarroja de la atmósfera y, por consiguiente, a una radiación efectiva hacia el espacio desde una altitud mayor a una temperatura menor. Ello origina un forzamiento radiativo que intensifica el efecto invernadero, suscitando así el denominado efecto invernadero intensificado.

Emisiones antropógenas. Emisiones de gases de efecto invernadero, de precursores de gases de efecto invernadero y de aerosoles aparejadas a actividades humanas, como la combustión de combustibles de origen fósil, la deforestación, los cambios de uso de la tierra, la ganadería, la fertilización, etc.

Escalas espaciales y temporales. El clima puede variar a escalas espaciales y temporales muy diversas. Las escalas espaciales abarcan desde extensiones locales (inferiores a 100,000 km²) hasta regionales (entre 100,000 y 10 millones de km²) o continentales (de 10 a 100 millones de km²). Las escalas temporales abarcan desde períodos estacionales (interanuales, decadales, etc.) hasta geológicos (de hasta centenares de millones de años)

Escenario climático. El concepto de escenario climático se utiliza para denotar un estado probable, normalmente simplificado, del sistema climático ante uno o más diferentes tipos de forzamientos. Un escenario de cambio climático es simplemente la diferencia entre un escenario climático y el clima actual o de una línea o estado base (Amador y Alfaro, 2009).

Escenario de emisión. Representación plausible de la evolución futura de las emisiones de sustancias que podrían ser radiativamente activas (por ejemplo, gases de efecto invernadero, aerosoles), basada en un conjunto coherente de los supuestos sobre las fuerzas que las determinan (por ejemplo, el desarrollo demográfico y socioeconómico, la evolución tecnológica) y las principales relaciones entre ellos.

Escenario. Descripción plausible y frecuentemente simplificada de un futuro verosímil, basada en un conjunto consistente y coherente de supuestos sobre las fuerzas originantes y sobre las relaciones más importantes. Los escenarios pueden estar basados en proyecciones, pero suelen basarse también en datos obtenidos de otras fuentes, acompañados en ocasiones de una descripción textual.

Estratósfera. Capa de la atmósfera que se encuentra de 15 a 50 km arriba de la superficie terrestre, con temperaturas que van desde -80° C hasta 60° C,

incremento debido a procesos de equilibrio de ozono O₃, los cuales liberan calor, la mezcla vertical es relativamente pequeña en esta capa por lo que el ingreso masivo de partículas derivadas de erupciones volcánicas, a menudo forma capas que persisten por varios períodos de tiempo (Otaola *et al.*, 1993).

Evaluación del impacto del cambio climático. Identificación y valoración, en términos monetarios y/o no monetarios, de los efectos del cambio climático sobre los sistemas naturales y humanos.

Exósfera. Capa de la atmósfera que se encuentra a una distancia de 500 km a 2000 km de la superficie terrestre, está formada por átomos de oxígeno, nitrógeno y helio (Otaola *et al.*, 1993).

Fenómeno meteorológico extremo o evento extremo. Fenómeno meteorológico raro en un lugar y época del año determinados. La rareza de un fenómeno meteorológico extremo sería normalmente igual o superior a la de los percentiles 10 ó 90 de la función de densidad de probabilidad observada. Un fenómeno meteorológico extremo no puede ser atribuido directamente a un cambio climático antropógeno, ya que hay siempre una probabilidad finita de que haya sucedido de manera natural.

Forzamiento externo. Agente de forzamiento ajeno al sistema climático que induce un cambio en éste. Son forzamientos externos las erupciones volcánicas, las variaciones solares, los cambios antropógenos de la composición de la atmósfera y los cambios de uso de la tierra (IPCC, 2007).

Forzamiento radiativo. Cambio de la radiación neta (la ascendente menos la descendente), expresado en vatios por metro cuadrado (W/m²), en la tropopausa por efecto del cambio de un factor externo del sistema climático (por ejemplo un cambio de la concentración del dióxido de carbono o de la energía emitida por el sol). El forzamiento radiativo se calcula manteniendo fijas todas las propiedades de la tropósfera y sus valores no perturbados, y permitiendo que las temperaturas de la estratósfera, una vez perturbadas se reajusten hasta alcanzar el equilibrio dinámico radiativo (IPCC, 2007).

GHCN. Base de datos de las anomalías en porcentaje, de precipitación desarrollada por de la Red Histórica de Climatología Global del *National Climatic Data Center* en Estados Unidos en una cuadrícula de 5° x 5° latitud/longitud. Las series de datos utilizadas abarcan el período 1901-2005.

HadCRUT3. Base de datos de las anomalías de temperatura superficial históricos, para cada mes desde Enero de 1859 en una cuadrícula de 5° x 5°, a nivel global. Elaborado por la colaboración del *Meteorological Office Hadley Centre* y el *Climatic Research Unit* de la *University of East Anglia* en el Reino Unido.

Halocarbonos. Término que designa colectivamente un grupo de especies orgánicas parcialmente halogenadas que abarca los clorofluorocarbonos (CFC), los hidroc fluorocarbonos (HCFC), los hidrof luorocarbonos (HFC), los halones, el cloruro de metilo, el bromuro de metilo, etc. Muchos de los halocarbonos tienen un potencial de calentamiento mundial elevado. Los halocarbonos que contienen cloro y bromo intervienen también en el agotamiento de la capa de ozono.

Halones. Los halones son compuestos formados por Bromo, Flúor y Carbono. Se caracterizan por ser sustancias con gran capacidad de dañar la capa de ozono ya que contienen bromo, que es el átomo más efectivo en la destrucción de ozono (PRTR-España, 2008).

Incertidumbre. Expresión del grado de desconocimiento de determinado valor, por ejemplo el estado futuro del sistema climático. Puede deberse a una falta de información o a un desacuerdo con respecto a lo que es conocido o incluso cognoscible. Puede reflejar diversos tipos de situaciones, desde la existencia de errores cuantificables en los datos, hasta una definición ambigua de un concepto o término.

Índice de severidad de sequía de Palmer. Este índice PDSI (por sus siglas en inglés), estima un valor de severidad de sequía considerando para ello la temperatura, precipitación y algunos valores locales como evapotranspiración y humedad del suelo. Valores negativos del índice indican incremento en la severidad de la sequía, valores positivos indican incremento en humedad. Este índice es más utilizado para climas semiáridos y subhúmedos secos, en los que la precipitación es la principal fuente de humedad (Heim, 2002).

Magnetósfera. Capa más alejada de la superficie terrestre, encontrándose más allá de los 2000 km de la superficie terrestre, en ella sólo hay electrones y protones, concentrados en los denominados «cinturones de radiación de Van Allen», los cuales sufren constante movimiento debido a perturbaciones solares y efectos de choques interplanetarios, lo cual tiene efectos en la termósfera como es el

caso de las auroras boreales y australes (Otaola *et al.*, 1993).

Mesósfera. Capa de la atmósfera que se encuentra entre los 50 a 85 km de la superficie terrestre, presenta temperaturas que van de los 60° C a -90° C debido a la disminución de O₃ (Otaola *et al.*, 1993).

Mitigación. Cambios y reemplazos tecnológicos que reducen el insumo de recursos y las emisiones por unidad de producción. Aunque hay varias políticas sociales, económicas y tecnológicas que reducirían las emisiones, la mitigación, referida al cambio climático, es la aplicación de políticas destinadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a potenciar los sumideros.

Modelo climático. Representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de retroalimentación, y que recoge todas o algunas de sus propiedades conocidas. El sistema climático se puede representar mediante modelos de diverso grado de complejidad; en otras palabras, para cada componente o conjunto de componentes es posible identificar un espectro o jerarquía de modelos que difieren en aspectos tales como el número de dimensiones espaciales, el grado en que aparecen representados los procesos físicos, químicos o biológicos, o el grado de utilización de parametrizaciones empíricas. Los modelos acoplados de circulación general (MACG) proporcionan una de las más completas representaciones del sistema climático actualmente disponibles.

Modelo Gompertz. Modelo matemático que determina una función sigmoidea utilizada en series de tiempo, donde se presenta un crecimiento más lento al inicio y al final del período de tiempo. Se representa como: $y(t) = ae^{-be^{-ct}}$ donde: t , es el tiempo o período; a , parte superior de la asíntota; b , desplazamiento en x ; c , tasa de crecimiento; e , base del logaritmo neperiano (2.718281...).

Protocolo de Kyoto. El Protocolo de Kyoto de la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de las Naciones Unidas, fue adoptado en el tercer período de sesiones de la Conferencia de las Partes (COP) en la CMCC, que se celebró en 1997 en Kyoto. Contiene compromisos jurídicamente vinculantes, además de los señalados en la CMCC. Los Países firmantes, acuerdan reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero antropógenos en un 5% como mínimo por debajo de los niveles de 1990 durante el período de compromiso de 2008 a

2012. México firmó el acuerdo del Protocolo de Kyoto a través del entonces Presidente de México, Lic. Ernesto Zedillo Ponce de León, el 4 de septiembre del año 2000 y fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 24 de noviembre del 2000.

Sumidero. Todo proceso, actividad o mecanismo que detrae de la atmósfera un gas de efecto invernadero, un aerosol, o alguno de sus precursores.

Termósfera o Ionósfera. Capa de la atmósfera a partir de los 85 km y hasta aproximadamente 300 km desde la superficie terrestre, con temperaturas que van de los -140° C hasta los 1600° C, su densidad atmosférica es próxima al vacío, en ella se desarrollan las auroras boreales y australes (Otaola *et al.*, 1993).

Tropósfera. Capa más interna, con una longitud aproximada de 10 a 12 km, presenta temperaturas que van de los 40° C a los -75° C, con una disminución de -0.64° C por cada 100 m de incremento en altitud, en ella se presenta un fuerte movimiento vertical de partículas y gases desde la superficie a la parte alta, contiene la mayor cantidad de vapor de agua de la atmósfera, nubes y precipitación (Otaola *et al.*, 1993).

Vulnerabilidad. Grado de susceptibilidad o de incapacidad de un sistema para afrontar los efectos adversos del cambio climático y, en particular, la variabilidad del clima y los fenómenos extremos. La variabilidad dependerá del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático a que esté expuesto un sistema, y de su sensibilidad y capacidad de adaptación.