



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

VULNERABILIDAD DEL MAÍZ Y DEL SORGO EN EL
VALLE DE CELAYA POR FENÓMENOS
METEOROLÓGICOS EXTREMOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTA:

EDGAR ORLANDO SOTELO NOGUEZ

ASESORA: M.E. ELVA MARTÍNEZ HOLGUÍN

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO.

2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE.

ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ
Jefa del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.



EXÁMENES PROFESIONALES

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos **La Tesis:**

"Vulnerabilidad del maíz y del sorgo en el Valle de Celaya por fenómenos meteorológicos extremos".

Que presenta el pasante: **EDGAR ORLANDO SOTELO NOGUEZ**
Con número de cuenta: **40706687-6** para obtener el Título de: **Ingeniero Agrícola**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 13 de Junio de 2013.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	M. en E. Elva Martínez Holguín	
VOCAL	Dr. Alejandro Espinosa Calderón	
SECRETARIO	M. en A. Julio César Corzo Sosa	
1er SUPLENTE	Dra. Gloria Herrera Vázquez	
2do SUPLENTE	Ing. Minerva Edith Téllez Ordaz	

NOTA: los sindicales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

HNA/vic

DEDICATORIAS

A mi madre Felicitas, que me ha dado todo, su cariño, comprensión y dedicación por el bienestar de mis hermanas y el mío, con su apoyo pude terminar todos mis estudios. Eternamente estaré agradecido por haberme dado la vida.

A mi padre Samuel, quién me inculcó el deber del estudio y la superación, gracias a esos libros que tenía me interesé en la naturaleza y las maravillas que guarda. Eternamente agradecido por todo el apoyo durante mis estudios y por darme la vida.

A mis hermanas Lilitiana, Vanessa y Sandra, que hemos compartido juegos, alegrías, tristezas, gracias por todos estos momentos, su apoyo y cariño.

A mis amigos, que con su compañía y amistad me han brindado momentos inolvidables, gracias por estar conmigo en esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, la máxima casa de estudios, que me brindó muchas cosas durante mi carrera y de la que me siento muy orgulloso de haber estado en sus aulas.

A mi asesora, la maestra Elva, quién aceptó dirigir esta investigación y que con sus atinadas observaciones y recomendaciones el trabajo tuvo un buen camino y conclusión. ¡En verdad muchas gracias maestra!

Al Servicio Meteorológico Nacional y en especial a las siguientes personas que laboran ahí, quienes me brindaron amablemente sus conocimientos y sugerencias para el uso del programa RclimDex y temas de meteorología y climatología:

M.C. Adelina Albanil Encarnación. Jefa de Departamento Técnico B.

L.C.A. Brenda Lilitiana Bello Jiménez. Jefa de Departamento.

Mat. Blanca Estela Osorio Ochoa. Jefa de Sistemas Administrativos.

Geóg. Minerva López Quiroz. Consultor externo.

Ing. Reynaldo Pascual Ramírez. Jefe de Proyecto de Climatología Aplicada.

A mi jurado, gracias a sus sugerencias y observaciones, enriquecieron la investigación.

ÍNDICE

	Página
Índice	i
Índice de gráficas	iii
Índice de cuadros	v
Índice de figuras	vi
Índice de imágenes	vi
Índice de tablas	vi
Introducción	1
Objetivo general	4
Objetivos particulares	4
I. Antecedentes	5
1.1. El cambio climático y la agricultura	5
1.1.1. El clima y el tiempo	5
1.1.2. Las bases científicas del cambio climático	8
1.1.3. Atención mundial al cambio climático	12
1.1.3.1. Informes de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).	17
1.2. Impactos en la agricultura	23
1.2.1. Plagas y enfermedades	26
1.2.2. Impactos a nivel fisiológico	26
1.2.3. Suelo	28
1.2.4. Agua	28
1.3. Vulnerabilidad y adaptación	30
1.3.1. Vulnerabilidad	30
1.3.2. Vulnerabilidad en el estado de Guanajuato	34
1.3.3. Adaptación	35
1.4. Fenómenos meteorológicos extremos	38
1.4.1. Afectación a las plantas por los fenómenos meteorológicos extremos	42
1.5. Fenómeno de El Niño	43
1.5.1. Impactos de El Niño en la agricultura	44
1.6. Importancia del maíz y del sorgo	45
1.6.1. El maíz	45
1.6.2. El sorgo	48
1.6.3. Producción de maíz y sorgo en el estado de Guanajuato	50
1.6.4. Maíz y sorgo en el Valle de Celaya	50
1.6.5. Requerimientos agroclimáticos del maíz	52
1.6.6. Requerimientos agroclimáticos del sorgo	53
1.6.7. Variedades y fechas de siembra de maíz y sorgo en la región del Bajío Guanajuatense	54
II. Materiales y métodos	56

2.1. Localización de la zona de estudio	56
2.2. Obtención de datos	58
2.3. Análisis de los datos	60
2.3.1. Programa RclimDex	60
2.3.2. Control de calidad de los datos	62
2.3.3. Incorporación de datos al programa	63
2.3.4. Cálculo de los índices de cambio climático	67
2.4. Estación de crecimiento	72
2.4.1. Cálculo de la evapotranspiración por el método de Thornthwaite	72
III. Resultados y discusión	75
3.1. Clima del Valle de Celaya	75
3.2. Análisis y control de calidad de los datos del Valle de Celaya	79
3.3. Índices de cambio climático	92
3.3.1 Análisis de las tendencias	96
3.3.1.1. Precipitación en las estaciones de la familia 1	104
3.3.1.2 Temperatura en las estaciones de la familia 1	107
3.3.1.3 Precipitación en las estaciones de la familia 2	110
3.3.1.4 Temperatura en las estaciones de la familia 2	112
3.4. Estación de crecimiento	118
IV. Conclusiones	122
V. Recomendaciones	126
VI. Bibliografía	129
VII. Anexos	134

Índice de gráficas

	Página
Gráfica 1. Variaciones de la temperatura de la superficie de la Tierra en los últimos 140 años	18
Gráfica 2. Concentraciones atmosféricas mundiales de bióxido de carbono, metano y óxido nitroso	18
Gráfica 3. Cambios en temperatura, nivel del mar y en la cubierta de nieve del Hemisferio Norte	20
Gráfica 4. Rendimiento del maíz de temporal y riego durante el período 1980-2011	47
Gráfica 5. Superficie sembrada, cosechada y siniestrada de maíz de temporal durante el período 1980-2011	48
Gráfica 6. Rendimiento del sorgo de temporal y riego durante el período 1980-2011	49
Gráfica 7. Superficie sembrada, cosechada y siniestrada de sorgo de temporal durante el período 1980-2011	49
Gráfica 8. Causas por las que no se sembró en el ciclo primavera-verano 2007 en el estado de Guanajuato	50
Gráfica 9. Superficie sembrada, cosechada y siniestrada de maíz de temporal en el Valle de Celaya, durante el período 2005-2011	51
Gráfica 10. Rendimiento de maíz de temporal en el Valle de Celaya. Período 2005-2011	51
Gráfica 11. Rendimiento de sorgo de temporal en el Valle de Celaya. Período 2005-2011	52
Gráfica 12. Superficie sembrada, cosechada y siniestrada de sorgo de temporal en el Valle de Celaya. Período 2005-2011	52
Gráfica 13. Precipitación mensual en mm en el Valle de Celaya, Gto.	75
Gráfica 14. Temperatura promedio mensual en el Valle de Celaya, Gto.	76
Gráfica 15. Temperatura máxima promedio mensual en el Valle de Celaya	77
Gráfica 16. Temperatura mínima promedio mensual en el Valle de Celaya	77
Gráfica 17. Rango diurno de temperatura en la estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.	81
Gráfica 18. Histograma de observaciones	82
Gráfica 19. Series de precipitación	83
Gráfica 20. Temperatura máxima (11105_tmaxPLOT.pdf) generado por RclimDex, estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto	84
Gráfica 21. Temperatura mínima (11105_tminPLOT.pdf) generado por RclimDex, estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.	85
Gráfica 22. Diagramas mensuales para precipitación, temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria y diferencia entre máxima y mínima. Estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.	88
Gráfica 23. Series anuales para precipitación, temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria y diferencia entre máxima y mínima. Estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.	89
Gráfica 24. Días secos consecutivos (CDD) para la estación Ameche,	93

Apaseo el Grande, Gto	
Gráfica 25. Días húmedos consecutivos para la estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto	94
Gráfica 26. Días frescos, estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto	94
Gráfica 27. Días calurosos, estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.	95
Gráfica 28. Días secos consecutivos (CDD)	105
Gráfica 29. Lluvia diaria mayor a 25 mm (R25mm)	105
Gráfica 30. Cantidad máxima de precipitación en un día (RX1Day)	106
Gráfica 31. Días húmedos consecutivos (CWD)	107
Gráfica 32. Temperatura mínima (TNn)	107
Gráfica 33. Valor mensual mínimo de temperatura máxima diaria (TXn)	108
Gráfica 34. Porcentaje de días frescos (TX10p)	108
Gráfica 35. Noches frías (TN10p)	109
Gráfica 36. Número de días en un año cuando $TN < 10^{\circ}\text{C}$	109
Gráfica 37. Número de días en un año en que la temperatura es $< 28^{\circ}\text{C}$ (ID28)	110
Gráfica 38. Precipitación anual total (PRCPTOT)	111
Gráfica 39. Días secos consecutivos (CDD)	111
Gráfica 40. Días con lluvia mayor a 20 mm (R20mm)	112
Gráfica 41. Noches cálidas (TN90p)	112
Gráfica 42. Días frescos (TX10p)	113
Gráfica 43. Días calurosos (TX90p)	113
Gráfica 44. Temperatura máxima más baja (TXn)	114
Gráfica 45. Temperatura máxima más alta (TXx)	114
Gráfica 46. Rango diurno de temperatura (DTR)	115
Gráfica 47. Número de días en un año cuando $TN < 10^{\circ}\text{C}$ (FD10)	115
Gráfica 48. Número de días en un año en que la temperatura es menor a 28°C (ID28)	116
Gráfica 49. Estación de crecimiento para el Valle de Celaya.	119

Índice de cuadros

	Página
Cuadro 1. Aportaciones de científicos sobre el cambio climático	13
Cuadro 2. Emisiones mundiales de gases de efecto invernadero antropógenos, 2004	20
Cuadro 3. Principales sectores fuentes de emisiones de GEI, 2004	21
Cuadro 4. Gases de efecto invernadero y sus características	22
Cuadro 5. Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura	25
Cuadro 6. Impactos del cambio climático en la agricultura	29
Cuadro 7. Función de riesgo	31
Cuadro 8. Clasificación del temporal de acuerdo a la precipitación acumulada	33
Cuadro 9. Fenómenos meteorológicos extremos y su probabilidad de ocurrencia	40
Cuadro 10. Producción de maíz grano. Año agrícola OI+PV 2011. Modalidad riego más temporal.	46
Cuadro 11. Requerimientos de temperatura durante el ciclo fenológico del maíz	53
Cuadro 12. Requerimientos de precipitación durante el ciclo fenológico del maíz	53
Cuadro 13. Variedades, fechas de siembra, cosecha, densidad de siembra y ciclo de cultivo de maíz y sorgo de temporal y riego de auxilio en el Bajío guanajuatense. Ciclo primavera-verano 2012.	54
Cuadro 14. Estaciones climatológicas dentro de la zona de estudio	57
Cuadro 15. Justificación de descarte de estaciones	59
Cuadro 16. Estaciones climatológicas utilizadas en el estudio	59
Cuadro 17. Resumen de los 27 índices básicos de cambio climático del ETCCDI	61
Cuadro 18. Índices de cambio climático usados para evaluación	70
Cuadro 19. Eventos extremos en el Valle de Celaya	78
Cuadro 20. Resultados del control de calidad de RclimDex para temperatura, estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.	86
Cuadro 21. Datos del archivo trend usado para el análisis de las tendencias, estación Ameche	97
Cuadro 22. Comparación entre los indicadores de cambio climático en tres estaciones del Valle de Celaya, Gto. (11005, Apaseo 11006, Apaseo el Alto y 11013, Cortazar).	98
Cuadro 23. Comparación entre los indicadores de cambio climático en dos estaciones del Valle de Celaya, Gto. (11105, Ameche y 11148, El Obraje).	99
Cuadro 24. Indicadores de cambio climático en la estación 11022, El Terrero.	100
Cuadro 25. Indicadores de cambio climático en la estación 11048, Neutla.	100
Cuadro 26. Indicadores de cambio climático en la estación 11070, Santa Julia.	101

Cuadro 27. Indicadores de cambio climático en la estación 11145, La .Gavia.	102
Cuadro 28. Agrupación de estaciones de la familia 1	117
Cuadro 29. Agrupación de estaciones de la familia 2	118

Índice de figuras

	Página
Figura 1. Efecto invernadero	10
Figura 2. Pantalla principal del ambiente R	63
Figura 3. Pantalla de la aplicación RclimDex	64
Figura 4. Pantalla de RclimDex para el cálculo de los índices de cambio climático	67
Figura 5. Ventana de parámetros definidos por el usuario	68
Figura 6. Ventana que muestra los 27 índices de cambio climático que calcula RclimDex	70
Figura 7. Mensaje que indica que el programa ha terminado los cálculos	71

Índice de imágenes

	Página
Imagen 1. Ubicación del Valle de Celaya	56
Imagen 2. Ubicación de las estaciones climatológicas en el Valle de Celaya, Guanajuato	58
Imagen 3. Agrupación de estaciones	96
Imagen 4. Agrupación de las estaciones en dos grandes familias	103
Imagen 5. Distribución de los tipos de suelo en Guanajuato	121

Índice de tablas

	Página
Tabla 1. Formato del archivo de texto	63
Tabla 2. Hoja de outliers de la estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.	90
Tabla 3. Outliers, hoja de resultados de la inspección en expedientes del SMN	91

INTRODUCCIÓN

La agricultura tanto de riego como de temporal, enfrenta diversos retos en relación al clima, no solo en el presente sino hacia el futuro, ya que en los últimos años se ha manejado el llamado cambio climático que, según informes de expertos científicos a nivel mundial se ha presentado de manera evidente en los últimos cincuenta años debido a las actividades humanas. Un cambio en el sistema climático afectaría de manera considerable no solo a la agricultura sino a otros sectores como la pesca, la industria, y a las actividades pecuarias.

El sector agrícola que es el que provee la materia prima para la alimentación de la humanidad se encuentra seriamente amenazado ante posibles cambios en el clima a futuro. Cuando se menciona a los agricultores que únicamente dependen del temporal se habla de una baja productividad resultado de irregularidades meteorológicas que se presentan durante el crecimiento y desarrollo de los cultivos, ante esto resulta necesario realizar investigaciones que tengan que ver con el clima y su aplicación en la agricultura, con el fin de dar certidumbre al agricultor de lo que puede suceder ante un posible cambio en el sistema climático y la forma en que puede enfrentar el problema y planear mejor sus actividades, apoyándose en las políticas que los gobiernos deberán aplicar para proteger a los agricultores para que puedan salir adelante con sus cosechas.

Para la presente investigación se seleccionaron los cultivos de maíz y sorgo de temporal para realizar un estudio en la zona del Valle de Celaya, ubicado en El Bajío guanajuatense, con la finalidad de evaluar su vulnerabilidad ante fenómenos meteorológicos extremos de temperatura y precipitación calculando índices de cambio climático mediante el programa RclimDex, que es usado a nivel mundial para este tipo de estudios, ya que permite un acercamiento a lo que ha estado sucediendo con estos fenómenos en los años que han sido evaluados así como sus tendencias.

A pesar de que esta zona es mayoritariamente de riego, se eligió estudiar a ambos cultivos que son los de mayor importancia, en la modalidad de temporal en el Valle

ya que se busca atender a los agricultores que dependen del régimen de lluvias para producir y que serán los más vulnerables ante cualquier cambio que se pueda dar en el sistema climático. La zona del Valle de Celaya ha sido, por muchos años, proveedora de grandes cosechas de maíz, sorgo y de otros cereales, además de hortalizas, por lo que entender los fenómenos climáticos y aplicar sus principios en la agricultura, puede ayudar a realizar una mejor planeación en las actividades agrícolas, no solo en esta zona, sino en las demás zonas agrícolas del país.

En el primer apartado se habla sobre los antecedentes del cambio climático y sus repercusiones en la agricultura; los conceptos básicos de clima y tiempo; la variabilidad climática natural; las bases científicas del cambio climático, y la atención que se le ha dado en los últimos años. Asimismo se aborda la cronología del descubrimiento del problema y las acciones que se están tomando para enfrentarlo.

También se abordan los impactos del cambio climático en la agricultura, en cuestión de plagas y enfermedades, agua, suelo y sus impactos a nivel de la fisiología de las plantas.

Se incluyen aspectos referentes a la vulnerabilidad de la agricultura ante el cambio climático, específicamente en el estado de Guanajuato así como del resultado de diversos estudios científicos que conducen a la adaptación de los cultivos ante estos cambios.

También se incluyen algunos aspectos de los fenómenos meteorológicos extremos como las sequías, los eventos de lluvias torrenciales en un corto tiempo y las ondas de calor y su posible recurrencia a futuro.

Un tema de relevancia es el fenómeno de El Niño, que repercute en las actividades agrícolas ya que altera de manera temporal las condiciones climáticas de ciertos sitios.

Asimismo se incluyen algunos aspectos acerca de la importancia del maíz y del sorgo en Guanajuato y en el Valle de Celaya, así como los requerimientos climáticos de ambos cultivos y las variedades sembradas en la zona de estudio.

Se indica la metodología utilizada para desarrollar la investigación, se muestran resultados y su análisis y finalmente las conclusiones y recomendaciones para poder obtener alternativas de solución a los productores maíz y sorgo de temporal en el Valle de Celaya. El presente trabajo pretende adentrarse en estudios específicos de cambio climático aplicados a la agricultura, analizar las condiciones locales de la zona de estudio aplicando índices de cambio climático, ya que en el país se han desarrollado pocos estudios al respecto. La mayoría de los trabajos se han enfocado a nivel regional, aquí se analizan los índices de cambio climático y sus tendencias a nivel local.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la vulnerabilidad del maíz y del sorgo de temporal ante condiciones de temperatura y precipitación extremas, en el Valle de Celaya, Guanajuato, usando índices de cambio climático

Objetivos particulares

1. Analizar el clima del Valle de Celaya para determinar los patrones cambiantes y su recurrencia.
2. Analizar y obtener índices de cambio climático en la zona de estudio.
3. Analizar las probabilidades de satisfacer los requerimientos hídricos del maíz y sorgo, elaborando una estación de crecimiento para la zona de estudio.

I. ANTECEDENTES

1.1 El cambio climático y la agricultura

Para poder comprender qué es el cambio climático y cómo repercute en la agricultura, se comenzará por exponer los conceptos básicos del clima, las bases científicas de los resultados de investigaciones que se han desarrollado en relación al tema y las repercusiones en la agricultura.

1.1.1. El clima y el tiempo

Una buena producción y rendimiento de un cultivo determinado depende de muchos factores y condiciones, pero uno de los factores que inciden en que un cultivo tenga buenos rendimientos, es el clima; a partir del mismo se determina qué sitios son factibles para la siembra de determinada planta, se selecciona la variedad que más se adapte a las condiciones de la zona, sobre todo cuando depende totalmente del temporal y el productor no cuenta con apoyos o los recursos para acceder a un sistema de riego. El éxito o fracaso dependerá, sin lugar a dudas, del clima y del conocimiento que se tenga de éste para realizar una buena planeación y aplicarlo durante el ciclo productivo del cultivo y así, obtener excelentes rendimientos.

Los términos clima y estado del tiempo son utilizados indistintamente por la mayoría de la gente, pero se debe aclarar que tiempo y clima son conceptos distintos, por lo que se comenzará definiendo cada uno de ellos.

El clima se define como el conjunto de los valores promedio de las condiciones atmosféricas que caracterizan a una zona, varía entre regiones y a través del tiempo (SEMARNT, 2009). El clima es producto de la constante y compleja interacción entre la atmósfera, los océanos, las capas de hielo y nieve, los continentes y la vida en la Tierra (Conde, 2006). Por ejemplo, la proximidad de algún lugar al mar influye en la cantidad de humedad y temperatura, a esto se le conoce como continentalidad y es un factor que influye en el clima. La latitud, otro factor del clima, determina la inclinación con la que llegan los rayos solares;

cuando se está cerca del ecuador los rayos caen con mayor intensidad todo el año, por lo tanto las temperaturas aquí serán mayores, mientras que en las zonas cercanas a los polos, los rayos solares caerán con mayor inclinación, se reduce su intensidad y las temperaturas serán menores. Así, por ejemplo, de los 0° a 23° N y S se considera una zona con clima tropical; de los 23° a los 66° N y S, están los climas subtropical, templados y mediterráneos; y más allá de los 66° N y S, los climas fríos (Rivas, 2010). Sin embargo en México, debido a su orografía accidentada, se tienen diversos climas por altitud.

El clima representa las condiciones ambientales que caracterizan un punto de la superficie terrestre, producto de las observaciones a lo largo del tiempo. Estas observaciones son sistematizadas por métodos estadísticos para su posterior interpretación. Así, por ejemplo, la ciudad de Toluca, en el estado de México, presenta un clima templado con régimen de lluvias en verano y un porcentaje de precipitación en invierno inferior al 10%, y su simbología es C(w₁)(w), según la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (Romero, *et. al.*, 2011) diferente a la ciudad de Campeche, cuyo clima es cálido subhúmedo, con lluvias en verano de menor humedad, representado con la simbología A (w₀)¹.

Esta información resulta de mucha utilidad, ya que a partir de la misma se puede decidir qué cultivo es el idóneo para desarrollarse, en buenas condiciones, en un sitio determinado en donde se satisfagan sus requerimientos de temperatura y precipitación.

Son tres los cambios o movimientos en la Tierra que han afectado temporalmente el clima, siendo éstos:

- Cada 41,000 años cambia la inclinación del eje de la Tierra sobre su órbita, de 21.5° a 24.5°. Actualmente el ángulo del planeta es de 23.5°. A este movimiento se le conoce como cambio en la oblicuidad.

¹ Enciclopedia de los municipios de México, Campeche, Campeche. Disponible en: <http://e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/campeche/Mpios/04002a.htm>. Consultado el 21 de mayo de 2012.

- Cada 25,800 años se realiza un movimiento de trompo conocido como precesión.
- Cada 100,000 años cambia la forma de la órbita terrestre de más a menos elíptica, a este movimiento se le conoce como cambio en la excentricidad (SEMARNAT, 2009).

Todos estos movimientos o cambios hacen que haya una reducción de la insolación que recibe la Tierra, por lo tanto, los hielos que se forman en el invierno no se derriten y se acumulan y esto da como resultado una glaciación.

Otro factor que afecta el clima temporalmente son las manchas solares, ya que cuando el Sol presenta una mayor cantidad de estas manchas, que es cada 11 años, se emite más energía y, por lo tanto, llega más a la Tierra. Los efectos de esta actividad solar son transitorios, por lo que no hay mayor afectación a largo plazo (SEMARNAT, 2009).

Los ejemplos antes mencionados corresponden a lo que se conoce como variabilidad climática natural, concepto que se tratará más adelante.

Cuando las variaciones en las condiciones atmosféricas son en lapsos de tiempo de minutos a días en alguna localidad, medidas en temperatura, humedad, nubosidad, visibilidad y precipitación, se habla de estado del tiempo (Amador y Alfaro, 2009). Algunos ejemplos de estado de tiempo son las tormentas, los tornados o los huracanes (Landa, et. al., 2008).

La aplicación del estado del tiempo en la agricultura sirve para poder calendarizar las actividades a lo largo del ciclo del cultivo, por ejemplo, el conocimiento del ciclo de vida de determinada plaga más la de estudios meteorológicos, ayuda a poder evitar que ésta dañe al cultivo, ya que se pueden adelantar o retrasar las fechas de siembra, dependiendo del tiempo en que la plaga afecta al cultivo y así evitar el daño, siendo éste un buen control sin la necesidad de utilizar insecticidas. El

estudio de la meteorología agrícola también ayuda a la predicción de heladas y así tomar medidas para combatirlas.

En la actualidad, debido a diversos fenómenos meteorológicos como la sequía, las heladas, el granizo y la precipitación excesiva en algunos sitios, han hecho que los productores estén más al pendiente de la información meteorológica, para que puedan afrontar estos problemas.

Un fenómeno que se presenta a nivel nacional es la migración de los campesinos a las grandes ciudades, o a los Estados Unidos, en busca de mejores opciones de trabajo, lo que se ha asociado a las pérdidas en los cultivos y a la baja disponibilidad de agua, relacionadas con eventos meteorológicos extremos, aunado a los bajos precios que se les paga por su producto o a la falta de un buen mercado (Landa, *et. al.*, 2008).

La migración, la hambruna y la falta de oportunidades asociadas directa o indirectamente al cambio en el sistema climático, hacen que México sea un país más vulnerable a estos cambios a diferencia de Estados Unidos, que es también vulnerable, al igual que muchos otros más en el mundo, pero con una diferencia, que es la de contar con los recursos y la infraestructura que le permiten hacer frente a los cambios y amenazas climáticas, en otras palabras, todos los países son vulnerables, pero los desarrollados cuentan con los recursos para afrontarlos, mientras que los países en vías de desarrollo presentan problemas para hacer frente a las condiciones extremas del clima, por su fragilidad en infraestructura y recursos, tanto económicos como humanos.

1.1.2. Las bases científicas del cambio climático

La vida en la Tierra no podría existir sin la delgada capa gaseosa que la cubre: la atmósfera. Esta es una mezcla de gases y aerosoles (partículas sólidas y líquidas en suspensión) en las que predomina el nitrógeno (78.1%), el oxígeno (20.9%) y en pequeñas cantidades el argón (0.93%). El pequeño porcentaje restante lo constituyen el vapor de agua, ozono, bióxido de carbono, hidrógeno, neón, helio y kriptón (SEMARNAT, 2009).

Sin la capa de la atmósfera la vida en la Tierra sería casi imposible ya que cumple con las funciones de controlar el filtro de las radiaciones ultravioleta que llegan a la superficie terrestre; destruye una gran cantidad de meteoritos que llegarían a impactarse, y regula la temperatura de la Tierra como si fuera un gran invernadero.

De ahí la importancia, o el peligro de los llamados gases de efecto invernadero, que permiten el paso de la energía de la radiación solar, pero que no la dejan escapar tan fácilmente, lo que provoca un calentamiento en la Tierra.

De acuerdo a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), por gases de efecto invernadero se entiende: aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y reemiten radiación infrarroja (CMNUCC, 1992).

Sin la presencia de estos gases la temperatura del planeta sería de unos 33°C más fría, el agua estaría congelada y la vida sería muy diferente a lo que es hoy, o podría no prosperar la presencia de los seres vivos. El promedio anual global de temperatura de la Tierra es de 15°C y sin la existencia de los gases de efecto invernadero (GEI), la temperatura del planeta sería de -18°C, en promedio global (Garduño, 2004).

Es en la troposfera donde están los GEI, dentro de los que se encuentran: el bióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4), ozono (O_3) y vapor de agua (SEMARNAT, 2009), además de los clorofluorocarbonos (CFC). Los más importantes son el bióxido de carbono y el vapor de agua, los demás gases se llaman gases traza, porque tienen una presencia mínima en la atmósfera (Garduño, 2004). Todos estos gases dejan pasar la luz del sol, ésta llega a la superficie terrestre y al océano y se transforma en calor (radiación infrarroja). Una parte de esta radiación se queda en la superficie continental y mares y otra se reemite hacia la atmósfera, es aquí donde los gases de efecto invernadero retienen parte de la radiación infrarroja y, por lo tanto, se incrementa la temperatura, pero no toda es atrapada por la atmósfera, ya que otra parte de esa

radiación se escapa al espacio (Garduño, 2004). Del total de energía que recibe la Tierra sólo el 70% pasa a través de la atmósfera y calienta la superficie del planeta y el otro 30% es reflejado al espacio (IEEG, 2008). Lo anteriormente expuesto se puede observar en el siguiente esquema (figura 1).



Figura 1. Efecto invernadero
Fuente: SEMARNAT, 2009.

En la figura 1 se observan valores expresados en watts por metro cuadrado (Wm^{-2}), que son la medida del cambio en el balance entre la radiación solar que entra y la radiación infrarroja que sale de la Tierra debido, por ejemplo, a una alteración en la concentración de bióxido de carbono en la atmósfera o a cambios en la energía solar que incide en el planeta, a esto se le conoce como forzamiento radiativo (Cuatecontzi y Gasca, 2004). Cualquier proceso que altere este balance se verá reflejado como cambio en el clima; por ejemplo, cuando un forzamiento radiativo es positivo se tiende a calentar la superficie de la Tierra y si el forzamiento es negativo producirá un enfriamiento (Magaña, 2004). Es aquí donde entran las actividades del hombre que hacen que haya cambios en los forzamientos radiativos y, por lo tanto, un incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero, principalmente de bióxido de carbono, al cual se le

considera como gas dominante por las altas concentraciones que se han presentado por actividades antropogénicas (Cuatecontzi y Gasca, 2004).

Ahora bien, cabe señalar cuáles son las principales fuentes naturales de emisión de gases de efecto invernadero, ya que, como se había mencionado en la definición de gases de efecto invernadero, el ser humano no es el único emisor de estos gases, éstos han sido emitidos desde hace miles de millones de años por actividades naturales que suceden en la Tierra como: la respiración de los animales; el vulcanismo que arroja grandes cantidades de CO₂ y vapor de agua; los océanos, y la descomposición microbiana de la materia orgánica (SEMARNAT, 2009).

Por ejemplo, el vulcanismo arroja a la estratosfera grandes cantidades de cenizas y gases que tienen un efecto en el albedo², por lo tanto existe una alteración en el clima (Lozano, 2004).

El carbono al unirse con el oxígeno forma el bióxido de carbono que, como ya se mencionó, resulta ser un gas muy importante que regula la temperatura de la Tierra, este gas ha estado presente en la atmósfera desde hace miles de millones de años como resultado de la intensa actividad volcánica (Jaramillo, 2004).

El carbono se encuentra en la atmósfera en forma de bióxido de carbono o metano, éste se produce por la descomposición de la materia orgánica, por actividad volcánica y por los organismos vivos (SEMARNAT, 2009). Por ejemplo, el ciclo del carbono se vincula con la acción de la fotosíntesis a través de la cual las plantas absorben bióxido de carbono aprovechando ese compuesto para sintetizar las moléculas orgánicas que constituirán sus estructuras, como son el tallo, las hojas, raíces, etc. Este gas puede estar por mucho tiempo en las plantas hasta que éstas mueren y comienza su descomposición, liberando el bióxido de carbono a la atmósfera. Lo mismo pasa con la respiración y digestión de los animales.

² Fracción de radiación solar reflejada por una superficie o un objeto. Por ejemplo, algunas superficies que se encuentran cubiertas de nieve tienen un albedo alto, las superficies cubiertas de vegetación y océanos son de albedo bajo (IPCC, 2001).

El metano es otro gas de efecto invernadero que, de manera natural, es producido por la fermentación de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, esto sucede, por ejemplo, en el aparato digestivo de los rumiantes, en los humedales y en los sedimentos lacustres. En la agricultura también se produce metano, por ejemplo en el cultivo del arroz, que se produce en condiciones de inundación y por la utilización de algunos fertilizantes químicos (SEMARNAT, 2008).

Como ya se había mencionado, existen gases de efecto invernadero que son generados por el hombre producidos por su actividad industrial, como los llamados halocarburos, que son compuestos de carbono que contienen cloro, fluor, bromo o yodo. Dentro de estas sustancias químicas se encuentran los clorofluorocarbonos (CFC_s), que van acabando con la capa de ozono de la estratosfera (Cuatecontzi y Gasca, 2004). Estas sustancias se encuentran dentro del listado de sustancias generadas por el hombre y controladas por el protocolo de Montreal.³

1.1.3. Atención mundial al cambio climático

En el año de 1988 la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones para el Medio Ambiente (PNUMA), constituyeron el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), cuya misión es evaluar información científica, técnica y socioeconómica sobre el cambio climático a nivel mundial, además de evaluar las opciones para mitigar el cambio climático y la adaptación al mismo (IPCC, 2001).

¿Por qué se comenzó a hablar de cambio climático?

Haciendo un poco de historia, estudios de grandes científicos dieron las bases para el entendimiento del cambio climático. Estos autores y sus aportaciones se describen en el cuadro 1.

³ Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono. 2000. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/internacional/Documents/SAT/Montreal-Protocol-Booklet-sp.pdf> Consultado el 2 de junio de 2012.

Cuadro 1. Aportaciones de científicos sobre el cambio climático

Científico	Aportación	Año
John Tyndall	Descubre que algunos gases bloquean la radiación infrarroja. Sugiere que los cambios en la concentración de gases en la atmósfera podrían alterar el clima	1859
Svante A. Arrhenius	Calculó por primera vez el calentamiento global que se produciría por cambios en las concentraciones atmosféricas de CO ₂ .	1896
Thomas Chamberlain	Agregó a los cálculos del calentamiento el efecto de los volcanes, océanos y la degradación de los minerales.	1897
Guy S. Callendar	Fue el primero en vincular empíricamente el aumento del CO ₂ atmosférico con el incremento de la temperatura en las primeras cuatro décadas del siglo XX.	1938
Gilbert N. Plass	Calculó que la temperatura superficial podría aumentar en 3.6°C si se duplicara la concentración atmosférica de CO ₂ .	1956
Roger R. Revelle	Fue pionero en los estudios sobre el balance de CO ₂ en los océanos y su efecto en el cambio climático	1957
Charles D. Keeling	Inició en el laboratorio del Mauna Loa, en Hawai el registro continuo de la concentración de CO ₂ en la atmósfera.	1958
Edward Lorenz	Introdujo la noción del caos en la meteorología y sugirió la posibilidad de cambios abruptos o no graduales en el clima.	1968
Wallace S. Broecker	Sugiere que la reorganización de la circulación oceánica del Atlántico Norte podría cambiar radicalmente el clima.	1985

Fuente: SEMARNAT, 2009

¿Cómo se descubrió el problema?

A pesar de que estos científicos realizaron estudios y presentaron algunas pruebas de que podría existir un cambio en el clima global, no se le daba mucha importancia y no fue sino hasta principios de los años setenta que el tema comenzó a cobrar importancia y a llamar la atención de científicos y gobiernos de diferentes países, ya que era evidente el incremento en las concentraciones de CO₂ y, por lo tanto, el incremento de la temperatura también. A la década de 1980 se le conoció como la década del invernadero, ya que se registraron altas temperaturas a nivel global y algunas condiciones climáticas inusuales, como sequías, inundaciones, ciclones, huracanes (Avalos, 2004). Fue a partir de 1988 que el IPCC comenzó a realizar investigaciones, evaluaciones y medidas de cómo afrontar el cambio climático y sus efectos. De sus investigaciones, los responsables de las políticas públicas de los gobiernos deben tomar acciones y servir de referencia para aquellos que estén interesados en el cambio climático.

¿En qué se basa el IPCC para determinar que hay un cambio climático y qué lo provoca?

El IPCC contribuye con informes de evaluación, informes especiales, documentos técnicos y guías metodológicas⁴.

El IPCC ha generado cuatro informes de evaluación: el primero en 1990 que dio pauta para que, en 1992, se adoptara la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), cuyo objetivo fue lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera.⁵; el segundo, en 1995; el tercero en 2001, y el cuarto informe en 2007. Actualmente el grupo está trabajando en el quinto informe de evaluación, el cual estará terminado en el año 2014.

Los conceptos de cambio climático planteados tanto por el IPCC como por la CMNUCC se mencionan a continuación.

La CMNUCC (1992) define al cambio climático como:

“Un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”.

El IPCC (2001) a su vez, define cambio climático como:

“Una variación estadísticamente significativa, ya sea de las condiciones climáticas medias, o de su variabilidad, que se mantiene durante un período prolongado (generalmente durante decenios o por más tiempo). El cambio del clima puede deberse a procesos naturales internos o a un forzamiento externo, o a cambios antropógenos duraderos en la composición de la atmósfera o en el uso de la tierra.

⁴ Pueden ser consultadas en la dirección electrónica <http://www.ipcc.ch/>.

⁵ CMNUCC, 1992.

En las dos definiciones se encuentra un común denominador, el ser humano, al que se le está atribuyendo una parte de ese cambio climático, pero la CMNUCC, menciona que este cambio climático se suma a la variabilidad climática natural, es decir, a los sucesos naturales que ocurren en la Tierra y que alteran de alguna manera el clima. En la definición del IPCC se menciona que puede ser una variación por tiempos prolongados por su variabilidad climática, pero indica que, por acciones humanas, estas variaciones pueden ser duraderas, debido a la intensa actividad del hombre. Luego entonces ¿cómo saber que existe un cambio climático? y que, tal vez, se trata de la variabilidad climática natural lo que se experimenta, por ejemplo, con sequías prolongadas, huracanes más intensos, inviernos más fríos que los anteriores, etc. Por lo tanto, cabe señalar entonces la diferencia entre cambio climático y variabilidad climática y buscar el sustento que permita saber que existe un cambio climático a raíz de la actividad del hombre.

La variabilidad climática se refiere a las *“variaciones en las condiciones climáticas medias y otras estadísticas del clima (como desviaciones típicas, fenómenos extremos) en todas las escalas temporales y espaciales que se extienden más allá de la escala de un fenómeno meteorológico en particular”* (IPCC, 2001).

Como se había mencionado en el apartado que habla sobre el clima, éste ha tenido fluctuaciones naturales a lo largo de millones de años, estas variaciones pueden ser desde interanuales hasta en tiempos de millones de años (Lozano, 2004). Entre las causas de esas variaciones se encuentran tres de los movimientos de la Tierra: excentricidad, oblicuidad y precesión, que han hecho que el sistema climático haya tenido condiciones de glaciación. A partir de estas glaciaciones se han estudiado núcleos del fondo oceánico, que son considerados como archivos naturales, lo que ha permitido deducir las variaciones del volumen de hielo que han existido en el planeta en los últimos 450,000 años (Lozano, 2004), pues bien, se ha encontrado que existe una alta correlación de estos movimientos de la Tierra (que han sido modelados) con los valores de temperatura de esos núcleos, es decir, se han encontrado datos sobre variaciones de la temperatura.

Las variaciones en la actividad solar también hacen que el clima cambie, pero estos cambios son en periodos más cortos. El aporte de gases de efecto invernadero generados por la actividad humana, también provocan un cambio en el sistema climático.

A las variaciones en el clima provocadas por las causas anteriores se les conoce como mecanismos generadores de cambio climático externos (Bradley, 1999 citado por Lozano, 2004).

Los mecanismos generadores de cambio climático internos se relacionan con los procesos de interacción entre la atmósfera, la hidrósfera y la criósfera, propios del sistema climático (Vázquez, 2010).

Por lo tanto, el clima resulta ser un sistema dinámico y no estático, ya que presenta variaciones en el tiempo y espacio (Teutsch, 2006) que, como se expuso anteriormente, pueden ser de años, siglos o hasta de miles de años.

Anteriormente hablaba de las variaciones interanuales del clima, la más conocida está relacionada con el llamado fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), este fenómeno altera los patrones climáticos globales con períodos de dos a siete años (Magaña, *et. al.*, 2004), tema que se desarrollará más adelante, ya que es un factor muy importante que tiene repercusiones en la agricultura.

De modo que la variabilidad climática ocurre por procesos naturales, ya sean externos o internos, y el cambio climático se sobrepone con ésta por la acción del hombre que, en los últimos años, se ha acentuado, descubriéndose un incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero, que provocan un calentamiento del planeta y que desencadenarían un cambio climático global.

1.1.3.1 Informes de evaluación del IPCC

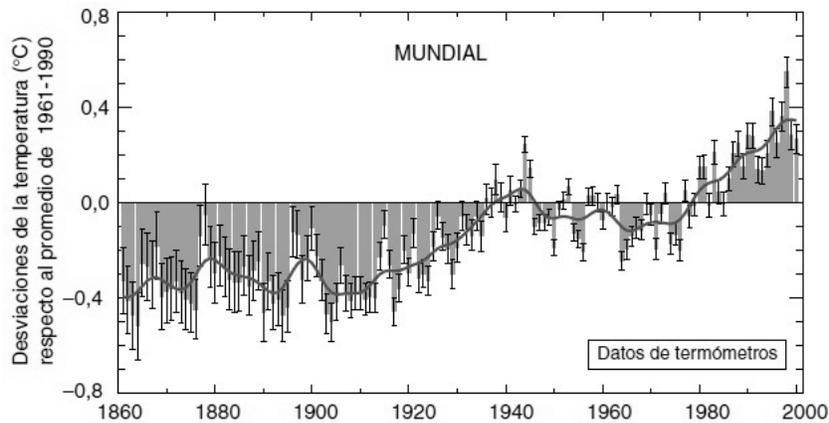
Los resultados de los informes de evaluación del IPCC muestran que la temperatura del planeta se ha incrementado en los últimos años, demostrando así las evidencias del cambio climático.

En el primer informe (1990) se anunció que el planeta se había calentado y que, en el futuro, seguiría ese calentamiento (SEMARNAT, 2009).

En el segundo informe (1995) se mencionó que las concentraciones de gases de efecto invernadero, desde la época preindustrial (1750 aproximadamente) y hasta 1992, habían provocado un forzamiento radiativo positivo del clima, es decir, un calentamiento de la superficie. En este informe de evaluación se mencionaba que, con respecto a las concentraciones de 1750, indicadas en ppm, las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero habían aumentado: en 30% las de CO₂ (280 ppm de CO₂); las de metano en 145% (700 ppm), y el óxido nitroso en 15% (270 ppm). El incremento de concentraciones de estos gases se atribuyó a las actividades humanas; al uso de combustibles fósiles; al cambio en el ordenamiento de las tierras, y a la agricultura (IPCC, 1995).

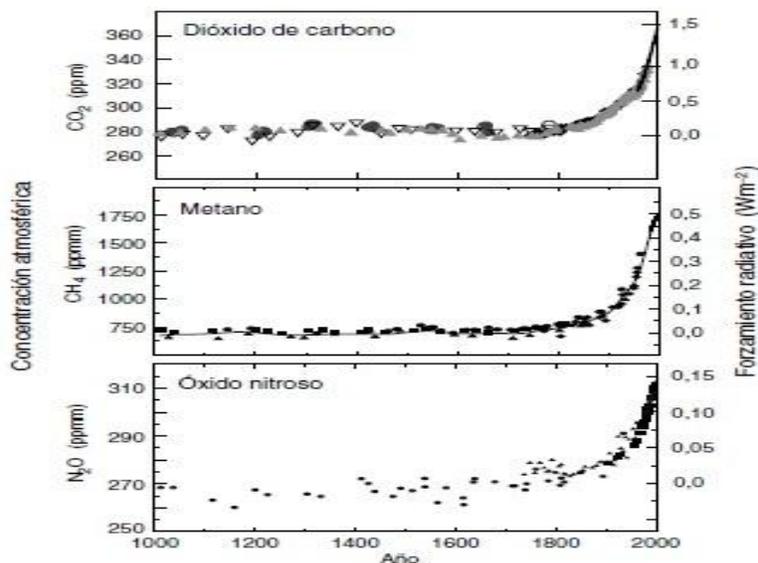
Sin embargo, si se dejaran de emitir las emisiones de, por ejemplo, bióxido de carbono, los efectos de éste durarían por lo menos un siglo más, además, muchos de los cambios en los ecosistemas serían irreversibles (Sarukhán, 2010).

En el tercer informe (2001) se menciona que la temperatura media global ha aumentado 0.6°C, ± 2°C desde finales del siglo XIX (gráfica 1). En lo que respecta a la precipitación, se menciona que ésta ha aumentado en las latitudes medias y altas del hemisferio norte (muy probablemente de 0.5 a 1% por decenio). Sin embargo en los subtrópicos, de los 10 a los 30° N, las precipitaciones han disminuido (0.3% por decenio) (IPCC, 2001).



Gráfica 1. Variaciones de la temperatura de la superficie de la Tierra en los últimos 140 años
Fuente: IPCC, 2001

El incremento en las concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O de los últimos veinte años ha sido notorio debido a la quema de combustibles fósiles, a los cambios en uso de suelo y a la deforestación. La concentración de metano ha aumentado 151% desde 1750 (1060 ppmm) y la de óxido nitroso en un 17% desde el mismo año (gráfica 2) (IPCC, 2001).

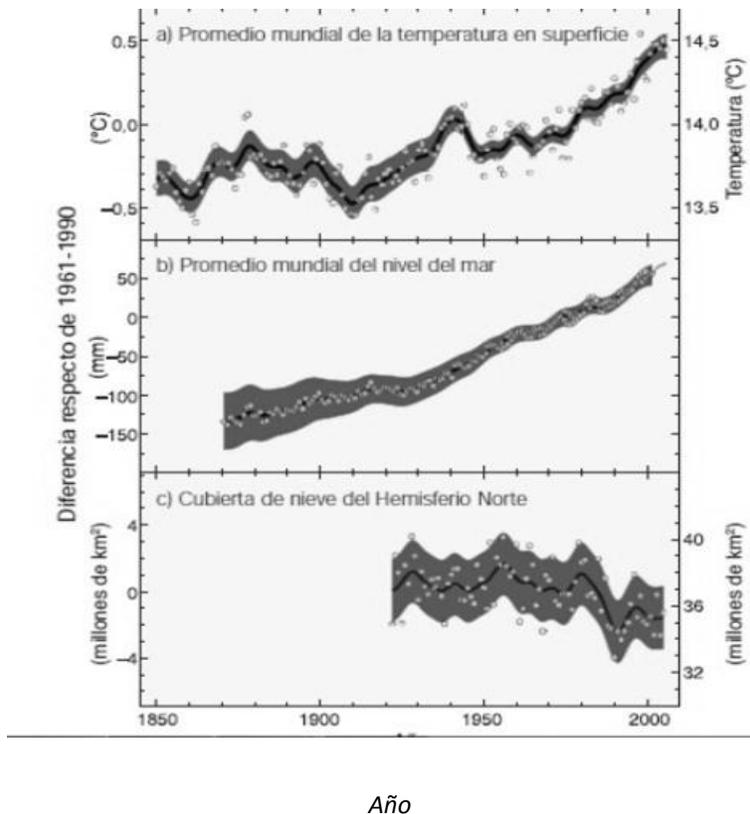


Gráfica 2. Concentraciones atmosféricas mundiales de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso.
Fuente: IPCC, 2001.

La gráfica 2 muestra los resultados de un estudio realizado en muestras de hielo y de nevizas⁶ de la Antártida y Groenlandia que abarca un milenio (del año 1000 al 2000), (IPCC, 2001). Como se puede observar, a partir de la era industrial se han incrementado las concentraciones de estos gases en la atmósfera, provocando un forzamiento radiativo positivo, es decir, un calentamiento. Por lo tanto el IPCC menciona que en los últimos 50 años el calentamiento observado se atribuye a la acción humana.

En el cuarto informe (2007) conocido como AR4, el IPCC reporta que el calentamiento del sistema climático es inequívoco, por la evidencia del aumento observado de la temperatura del aire y del océano, del deshielo y el aumento del promedio mundial del nivel del mar (gráfica 3). Se menciona que a causa de las actividades humanas (muy probablemente, con un 90% de confianza), se han incrementado las emisiones de gases de efecto invernadero desde la era preindustrial en un 70% (IPCC, 2007). En el cuadro 2 se resumen los GEI que son emitidos por la actividad humana.

⁶ Se caracteriza por un estado intermedio en la transformación de la nieve a hielo. Se constituye por los granos agrupados con densidad cercana a 600 Kg m^{-3} , de textura granular, aún con burbujas de aire y color más traslúcido que la nieve. Disponible en <http://www.glaciologia.cl/glaciar.htm>. Consultado el 20 de junio de 2012.



Gráfica 3. Cambios en temperatura, nivel del mar y en la cubierta de nieve del Hemisferio Norte.
Fuente: IPCC, 2007

Se ha encontrado que estos cambios influyen en: aumentos en la intensidad de los ciclones tropicales; en ondas de calor; intensidad y frecuencia de eventos extremos como lluvias torrenciales, y sequías más largas e intensas desde 1970, particularmente en trópicos y subtrópicos (Gay, 2012).

Cuadro 2. Emisiones mundiales de gases de efecto invernadero antropógenos, 2004.

Gases	Participación (%)
CO ₂ por uso de combustibles fósiles.	56.6
CO ₂ por deforestación, degradación de biomasa, etc.	17.3
CH ₄	14.3
N ₂ O	7.9
CO ₂ (otros)	2.8
Halocarbonos	1.1

Fuente: IPCC, 2007

La quema de combustibles fósiles hace que se emita más CO₂ a la atmósfera, aportando este gas el 77% de las emisiones totales de GEI de origen antropógeno. En cuanto a las emisiones de N₂O, la principal fuente se debe a la actividad agrícola (IPCC, 2007). En el cuadro 3 se muestran los principales sectores participantes como fuentes de emisiones de GEI.

Cuadro 3. Principales sectores fuentes de emisiones de GEI, 2004

Sector	Participación (%)
Energía	25.9
Industria	19.4
Silvicultura	17.4
Agricultura	13.5
Transporte	13.1
Edificios residenciales y comerciales	7.9
Desechos y agua de desecho	2.8

Fuente: IPCC, 2007

La actividad agropecuaria en México a través de la quema *in situ* de los residuos agrícolas, del cultivo de arroz, del manejo del estiércol y de la fermentación entérica, genera bióxido de carbono y óxido nitroso. Los cambios del uso del suelo de tierras forestales a agrícolas o de forestales a praderas, hace que se emitan grandes cantidades de carbono debido a la combustión y descomposición de la biomasa removida de los bosques, además, al no realizar un manejo sustentable en la explotación de los bosques se produce un aumento de GEI (INE-SEMARNAT, 2009).

Para finales de este siglo la concentración de CO₂ aumentaría de entre 540 y 970 ppm, actualmente la concentración de este gas es de 385 ppm, lo que ocasionaría un aumento de la temperatura, según el IPCC, de entre 1.8 y 4°C, para el año 2100 (SEMARNAT, 2009). Este aumento debe tomarse muy en serio, ya que significa que el promedio global de la temperatura sería de entre 1.8 y 4°C más que en la actualidad, lo que conllevaría a grandes cambios en la vida del planeta que, sin duda, afectaría a los diversos sectores de la economía entre los que se encuentra la agricultura. Hace aproximadamente 11,500 años ocurrió la última

glaciación en casi toda Europa, Asia y Norteamérica por una diferencia de 5°C menos que en la actualidad, por lo que es de preocuparse si la temperatura llegara a aumentar en 4°C. Las actividades del hombre han provocado que la temperatura de la Tierra vaya aumentando poco a poco, sin embargo, no significa necesariamente que este aumento vayan a ocurrir, estos son escenarios generados por el IPCC, en los que se plantea que, si el ser humano sigue contribuyendo con las emisiones de GEI al ritmo que se generan en la actualidad, se podría llegar a esos escenarios. Sin embargo, el problema ahí está y, como lo menciona el último reporte del IPCC, el calentamiento del sistema climático es inequívoco.

En el cuadro 4 se hace un resumen de los principales gases de efecto invernadero, así como de sus características y de su concentración en la atmósfera en el año de 1750 y para el año 2007, de acuerdo al cuarto informe de evaluación del IPCC.

Cuadro 4. Gases de efecto invernadero y sus características

Variable	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFC-23	CF ₄	SF ₆
Concentración periodo previo a la industrialización (1750)	280 Ppm ⁷	700 Ppmm	270 Ppmm	0 Ppb	40 Ppb	0 Ppb
Concentración en 2005	379 Ppm	1774 Ppmm	319 Ppmm	14 Ppb	80 Ppb	4.2 Ppb
Tasa de cambio en concentración	1.9 ppm/año	7.0 ppmm/año	0.8 ppmm/año	0.55 ppb/año	1 ppb/año	0.24 ppb/año
Tiempo de vida en la atmósfera (años)	5-200	12	114	260	>50,000	3,600
Forzamiento radiativo (W.m ⁻²)	1.46	0.48	0.15	0.002	0.003	0.002
Potencial de calentamiento global (PCG) ⁸	1	23	296	12,000	5,700	22,200

Fuente: IPCC, 2007

Como se puede observar en el cuadro anterior, es a partir de 1750 cuando se inician las etapas preindustrial e industrial, de la llamada revolución industrial, que fue cuando inició la utilización de combustibles fósiles iniciando con ello el aumento de las emisiones de GEI, principalmente de bióxido de carbono. Este año

⁷ La abundancia de gases traza en la atmósfera se indica aquí como la fracción molar (proporción de mezcla molar) del gas en relación con el aire seco (ppm, partes por millón= 10⁻⁶; ppmm, partes por mil millones= 10⁻⁹; ppb, partes por billón= 10⁻¹²).

⁸ El potencial de calentamiento global define el efecto de calentamiento integrado a los largo del tiempo que produce una liberación instantánea hoy de 1 Kg. de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por el CO₂. Disponible en: http://cambio_climatico.ine.gob.mx/glosario.html Consultado el 25 de mayo de 2012.

lo establecen arbitrariamente los científicos en el Cuarto Informe de Evaluación, del IPCC (IPCC, 2007).

En cuanto al forzamiento radiativo, se encuentra que el valor más alto corresponde al CO₂, lo que indica que las emisiones de este gas han sido mayores en comparación con los demás GEI. En el cuadro 4 también se puede observar que la concentración de los llamados halocarburos⁹ ha aumentado en niveles casi nulos con respecto a la era preindustrial.

1.2. Impactos en la agricultura

La agricultura es muy importante para el desarrollo de cualquier país, con esta actividad se asegura que la población cubra su necesidad básica que es la alimentación, para ello es necesario asegurar la producción agrícola y, para que un sistema agrícola funcione se deben tener en cuenta factores físicos, biológicos, climáticos y químicos así como los socioeconómicos e institucionales, con todo esto se deben planear y ejecutar los programas acordes a la problemática que se tiene en determinado lugar.

Cualquier variación en el clima repercute, sin lugar a dudas, en la producción de los cultivos, por ejemplo los productores que dependen del temporal son los mayormente preocupados ante la incertidumbre de cómo se comportarán las lluvias para éste o para el siguiente ciclo agrícola ya que, sin una precipitación adecuada sería casi imposible que su producción sea favorable. El gran problema que resulta de no poder obtener buenas cosechas debido a condiciones climáticas no favorables y a la falta de apoyos de programas para hacer frente a estas condiciones adversas, es la migración hacia las grandes ciudades, e inclusive, hacia Estados Unidos, un fenómeno que ocasiona el abandono total de tierras, esto es una de las consecuencias que traería consigo el cambio climático, ya que

⁹ Término que designa colectivamente un grupo de especies orgánicas parcialmente halogenadas, que abarca los clorofluorocarbonos (CFC), Los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), los hidrofluorocarbonos (HFC), los halones, el cloruro de metilo, el bromuro de metilo, etc. Los halocarbonos que contienen cloro y bromo intervienen en el agotamiento de la capa de ozono. IPCC, 2007.

habría impactos negativos sobre pequeños propietarios y agricultores (IPCC, 2007).

Para México se han planteado escenarios de cambio climático en los que se prevén incrementos en sequías, especialmente en el noroeste del país; en cuanto a las precipitaciones, se dice que habrá mayores precipitaciones en el centro y sur del país, presentándose la mayor concentración en tiempo y espacio, causando con ello daños a la agricultura (Mayorga, 2009). En general, se plantea un escenario en donde el clima en México será más seco y más caliente (Hernández y Valdez, 2004).

La temperatura de la superficie del mar Caribe, el Golfo de México y el Pacífico podría aumentar entre 1 y 2°C, lo que conlleva a que los ciclones tropicales alcancen categorías superiores a lo normal (Altamirano, 2010), esto significa que los desastres que dejen estos superciclones, serían muy perjudiciales, no solo para el sector agrícola, en el que prácticamente acabarían con la producción de los cultivos en zonas cercanas al mar, sino también para la población, la infraestructura, el turismo, etc.

Las sequías más prolongadas, las heladas y las oscilaciones extremas en la humedad de suelos acarrearían impactos negativos para la agricultura. Al aumentar la temperatura disminuirá la humedad de los suelos requiriendo por ende mayor cantidad de agua y, si no se cuenta con este recurso a través del riego, esto traerá consigo una baja en la productividad retrasando el desarrollo socioeconómico de la zona que está siendo afectada.

Los estudios realizados bajo escenarios de cambio climático regionalizados para México al 2020, mencionan que: la superficie apta para maíz de temporal se reducirá y se incrementará la superficie no apta en un 4.2%; la canícula será de mayor frecuencia; habrá reducción de rendimientos en algunas regiones del país, y que, de seguir con la tendencia actual de cambios observados del clima, para el año 2050 se reducirá en un 25% el área cultivable del país (Altamirano, 2010). Es aquí en este punto donde se resalta la importancia de realizar investigaciones

enfocadas a estudios sobre los impactos y la vulnerabilidad de la agricultura por el cambio climático a una escala local, ya que, como se había mencionado anteriormente, los estudios han sido a escala global, y la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación varían según la región, por lo que falta mucho por investigar a escala local. Detectar un posible cambio climático en una determinada zona ayudaría a realizar programas de adaptación y a que los gobiernos federal, estatal y municipal apliquen políticas de apoyo y de asesoría a los productores.

El IPCC (2007) menciona que los impactos del cambio climático pueden ser positivos, ya que, según proyecciones del 2000-2030, la productividad de algunos cultivos aumentará ligeramente en latitudes medias a altas por aumentos de la temperatura media de hasta 1-3°C pero también negativos sobre todo en las regiones secas y tropicales en donde la productividad de los cultivos disminuirá por aumentos de entre 1 y 2°C en las temperaturas locales (cuadro 5).

Cuadro 5. Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura.

Impactos positivos	Impactos negativos
Mayor período para el desarrollo de los cultivos. Mayor producción por bióxido de carbono. Aceleración de la maduración. Reducción en la severidad y duración de heladas. Más cosechas por año. Posibilidad de nuevos cultivos.	Mayor incidencia de plagas y enfermedades. Menor diversidad de cultivos. Daños a cultivos por calor extremo. Ciclones más intensos e inundaciones. Menor eficacia de plaguicidas y herbicidas Predicciones menos confiables. Menor producción por acortamiento del ciclo. Mayor estrés hídrico y térmico. Problemas con el cumplimiento de horas frío. Incremento en la demanda pico de riego.

Fuente: Altamirano, 2010.

1.2.1. Plagas y enfermedades.

En el cuadro 5 se explica que, al aumentar la temperatura, habrá climas más calientes, por lo tanto las plagas agrícolas se multiplicarán, ya que se propician condiciones favorables. Por ejemplo, si la estación de crecimiento se alarga, permitirá a diversas especies de plagas completar más generaciones por año y, si las temperaturas en el invierno son más elevadas, éstas pueden sobrevivir. En general, a medida que vaya aumentando la temperatura, esto ocasionará que las plagas sean más abundantes, lo que conllevará a que la extensión de su distribución sea mayor y haya mayor desarrollo de poblaciones (Altieri y Nicholls, 2008).

En cuanto a las enfermedades que afectan a los cultivos, éstas podrían ocasionar pérdidas de cosechas, por ejemplo, un cambio en el patrón del viento puede cambiar la dispersión de hongos y bacterias, por lo tanto, habría diseminación de enfermedades foliares y también ello podría ocasionar el cambio en la distribución geográfica de las enfermedades. En general se menciona que, debido al aumento de la temperatura y la humedad, diversos patógenos aumentarían sus severidad (Altieri y Nicholls, 2008). La literatura enfocada al estudio del cambio climático y las plagas y enfermedades que afectan la agricultura es muy poca, por lo que resulta de mucha importancia hacer énfasis en investigaciones de este tipo, que permitan hacer frente a la problemática de índole fitosanitario.

1.2.2. Impactos a nivel fisiológico.

En cuanto al CO₂, éste es muy importante para la fotosíntesis, ya que cierta cantidad de CO₂ se fija y se convierte en carbohidratos, a esto se le conoce como producción primaria bruta, que se incorpora en los tejidos vegetales como hojas, raíces y tejido leñoso y otra cantidad de esta producción primaria bruta regresa a la atmósfera en forma de CO₂ debido a la respiración autotrófica¹⁰ (Jaramillo, 2004). De acuerdo a los estudios del IPCC (2007) al incrementarse las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, se reduce la transpiración, ya que los

¹⁰ Respiración de los tejidos vegetales, R_a

estomas no necesitan abrirse tanto para absorber la misma cantidad de CO₂ que requieren para la fotosíntesis. Al mismo tiempo, al haber mayor concentración de este gas se estimula el crecimiento de las plantas, desarrollando éstas una mayor superficie foliar y, por ende, aumentando la superficie de transpiración. Estos efectos variarán dependiendo el tipo de planta, de la disponibilidad de nutrientes, de agua y de los efectos en los cambios de temperatura (Sánchez *et al.*, 2011).

De acuerdo a estudios realizados, al incrementar la concentración de CO₂ a 0.10% en un sistema cerrado, ya sea un invernadero o una cámara de plástico acrílico, se duplica la tasa fotosintética de algunos cultivos como el trigo, arroz, soya algunos vegetales y frutales. (Lira, 2007). Este aumento en la concentración de CO₂ es bajo condiciones controladas, por lo que se debe estudiar a profundidad si en verdad habría un efecto positivo en la productividad de los cultivos con el aumento de bióxido de carbono en la atmósfera, ya que podría haber más crecimiento de tallos y hojas en lugar de frutos y semillas (Mayorga, 2009). En general, se podría decir que la productividad de los cultivos aumentaría, sin embargo, también lo harían las malezas, lo que se traduce en una competencia con los cultivos y, por consiguiente, se debe hacer un control de malezas, y éste debería realizarse de manera cultural y utilizar, en última instancia, el control químico, esto claro, para ser congruente con la conservación del recurso suelo, agua y medio ambiente.

En cuanto a una disminución de la temperatura, la actividad respiratoria es pequeña y por el contrario, al aumentar la temperatura, la planta pasa más rápidamente por las diferentes fases de su desarrollo, por lo que su ciclo de vida se acorta y la producción será baja (Urbano, 1991).

Estos cambios en el sistema climático pueden provocar que haya posibilidad de establecer nuevos cultivos en zonas donde no se podían producir, ya que algunos cultivos se podrían beneficiar con el aumento de las temperaturas en zonas frías.

1.2.3. Suelo

Cuando un suelo está seco, las condiciones para el crecimiento de las raíces y la descomposición de la materia orgánica se reducen fuertemente, la cobertura del suelo disminuye y éste es más vulnerable a la erosión provocada por el viento (Altieri y Nicholls, 2008). Las altas temperaturas hacen que se pierda una gran cantidad de humedad y la transpiración de la planta por la misma causa provocan que la planta se encuentre en un gran estrés hídrico lo que, por consiguiente, conduce a una baja en la productividad.

1.2.4. Agua

Queda claro que sin el recurso agua un terreno agrícola, o para el fin que sea, no tiene ningún valor, el agua es indispensable para todos los seres vivos entre los que se incluyen los humanos las plantas y los animales. Escenarios de cambio climático regionalizados para México indican que la precipitación en muchas regiones del país podría disminuir, lo que llevaría a sequías más prolongadas. El incremento en las temperaturas haría que las tasas de evapotranspiración fueran más elevadas.

El sector agropecuario es el que más demanda agua (77%), por lo que se debe poner énfasis en mejorar la infraestructura y las formas de riego que permitan un ahorro del vital líquido. Por su parte, la agricultura de temporal es la más vulnerable a los impactos del cambio climático ya que, al disminuir las precipitaciones, no se asegura la producción de alimentos por la pérdida de cultivos, lo que ocasionaría hambruna y migración.

Para la zona norte del país, los estudios muestran un aumento significativo del estrés hídrico para el año 2100, además se verá mayormente afectada por el aumento de las temperaturas (Sánchez *et al.*, 2011). En esta zona del país se practica, en una gran superficie, la agricultura bajo riego, sin embargo, también es vulnerable a la variabilidad climática, ya que existe una baja disponibilidad del agua por sobreexplotación de los mantos acuíferos, aunado a las prolongadas sequías. Como ya se mencionó, actualmente se vive un grave problema por el

agua y aún sin las tendencias de cambio climático podría haber un gran desabasto, ya que el rápido crecimiento de la población demanda la producción de más alimentos, que en la actualidad se ha traducido en una mayor demanda de agua por parte de la agricultura, lo que ha provocado que poco a poco su disponibilidad sea menor.

En el cuadro 6, se resumen los impactos del cambio climático en la agricultura y sus consecuencias socioeconómicas a nivel global.

Cuadro 6. Impactos del cambio climático en la agricultura.

Impacto biofísico	Nivel de incertidumbre	Intensidad esperada de efectos negativos	Capacidad adaptativa	Impactos socioeconómicos y otros secundarios
Cambios en las condiciones de crecimiento de los cultivos	Mediano	Alta para algunos cultivos y regiones	Moderada a alta	Cambios en sistemas de producción óptimos; reubicación de la industria procesadora de productos agrícolas; aumento del riesgo económico; pérdida de los ingresos rurales;
Cambios en la precipitación y la disponibilidad de recursos hídricos	Mediano a bajo	Alta para países en desarrollo	Moderada	Aumento de la demanda de riego; disminución del rendimiento de cultivos; aumento del riesgo de salinización de suelos; aumento de la escasez de agua; pérdida de ingresos rurales.
Cambios en plagas agrícolas	Alto a muy alto	Mediana	Moderada a alta	Contaminación por el aumento del uso de pesticidas; disminución del rendimiento y la calidad de los cultivos; aumento del riesgo económico; pérdida de ingresos rurales.
Cambios en la fertilidad del suelo y erosión	Mediano	Alta para países en desarrollo	Moderada	Contaminación por percolación de nutrientes; disminución de la productividad de cultivos; abandono de tierras; mayor riesgo de desertificación; pérdida de ingresos rurales

Fuente: CMNUCC¹¹

El IPCC (2001) menciona que el rendimiento de las cosechas como respuesta al cambio climático es variable, y que va a depender de: las especies y los cultivos; del suelo y sus características; de la nutrición; de la temperatura del aire; de las

¹¹ Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Manual sobre evaluaciones de Vulnerabilidad y Adaptación. Disponible en: http://unfccc.int/resource/cd_roms/na1/v_and_a/Spanish/index.htm Consultado el 9 de julio de 2012.

plagas y enfermedades, y de los efectos directos del CO₂, que, aunque estimule el crecimiento en las plantas, no podrá contrarrestar los efectos negativos de una sequía.

La agricultura es un sector vulnerable a los cambios en el clima, en general se presenta un panorama grave para la seguridad alimentaria de los países en desarrollo, que son los más vulnerables a una crisis climática, por lo que deben tener una estabilidad que les permita la disponibilidad y el acceso a la alimentación. En el sector agrícola lo anterior se lograría detectando el problema, realizando la investigación y planteando su solución, asimismo generando políticas y programas gubernamentales y transfiriendo la tecnología a los productores, todo ello con el fin de que puedan adaptarse a los cambios que se están presentando en el sistema climático. Asimismo se debe generar una conciencia de conservación de los recursos y practicar una agricultura de manera sustentable. Los anteriores son los retos que deben enfrentar los científicos, los responsables de las políticas y los agricultores ya que con ello será posible asegurar la alimentación de la población, que cada vez crece más.

1.3. Vulnerabilidad y Adaptación.

1.3.1 Vulnerabilidad

Un sistema agrícola que depende únicamente del temporal es altamente vulnerable a la variabilidad climática, existe el riesgo de que, debido a la ocurrencia de ciertos fenómenos meteorológicos extremos como: sequías más prolongadas; altas o bajas temperaturas; ciclones tropicales, y eventos relacionados con el fenómeno de El Niño, la producción agrícola sea de muy baja calidad o que se pierdan totalmente las cosechas. Además el sistema es más vulnerable si se toman en cuenta otros factores como: la migración; el envejecimiento de los campesinos; el apoyo insuficiente a los mismos por parte de los gobiernos; la falta de información climática o su poco aprovechamiento; el alto costo de los insumos, y la falta de mercados.

Existe el riesgo de que, debido a fenómenos meteorológicos extremos, más la vulnerabilidad, ya sea física, económica o ambiental, un sistema se encuentre afectado seriamente por esta combinación. Así entonces, el riesgo es una función de una amenaza y de la vulnerabilidad del sistema, como se muestra en el cuadro 7 (Bando, 2010).

Cuadro 7. Función de riesgo.

Riesgo= función de	Amenaza o peligro	Vulnerabilidad
Probabilidad combinada entre amenaza y peligro	Probabilidad de que ocurra un evento en espacio y tiempo determinados, con suficiente intensidad como para producir daños.	Probabilidad de que, debido a la intensidad del evento y a la fragilidad de los elementos expuestos, ocurran daños en la economía, la vida humana y el ambiente.
Su materialización resulta en desastre	Cambio climático	Pérdida de suelos, mal manejo del agua, roza-tumba-quema y pérdida de humedales, entre otros.

Fuente: Altamirano, 2010.

Existen diferentes definiciones para el término vulnerabilidad, algunas de las cuales se indican a continuación:

- El 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 vulnerabilidad dependerá del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático a que esté expuesto un sistema y de su sensibilidad y capacidad de adaptación (IPCC, 2007).
- El grado al que un ser humano o sistema ambiental, están o son propensos a experimentar daño debido a una perturbación o estrés (Luers, 2003, citado por Monterroso, 2012).
- La vulnerabilidad de un sistema (a cualquier escala) es el reflejo (o función de) la exposición y sensibilidad del sistema a alguna condición de daño y la capacidad, habilidad o resiliencia del sistema para enfrentar, adaptar o recobrase de los efectos de esas condiciones (Smit, 2006, citado por Monterroso, 2012).

En los tres conceptos antes citados hay un común denominador, la experimentación de algún daño y los efectos negativos por condiciones adversas.

Por ejemplo, al bajar demasiado la temperatura podría provocar que el cultivo se vea afectado al presentarse una helada; el granizo provoca daños a la planta y son vulnerables si no se tienen las medidas necesarias para afrontar estos fenómenos.

Por lo tanto, la vulnerabilidad no solamente se mide o evalúa desde un punto de vista físico, sino también socioeconómico y éstos pueden ser evaluados independientes o en conjunto.

En uno de los términos se menciona la resiliencia y ésta se define como: la capacidad de un sistema social o ecológico para absorber una alteración sin perder su estructura básica o sus modelos de funcionamiento, su capacidad de autoorganización, ni su capacidad de adaptación al estrés y al cambio (IPCC, 2007). Por lo tanto, un sistema puede tener la capacidad de recuperarse de alguna situación perturbadora, sin que sea afectada de manera grave e irreversible.

La vulnerabilidad es una función de tres componentes: la exposición (E), la sensibilidad (S) y la capacidad de adaptación (CA) (Martínez y Patiño, 2010).

- Exposición: Posibilidad de un sistema de quedar expuesto a un cambio ante una posible situación de desestabilización positiva o negativa.
- Sensibilidad: Grado en que un sistema resulta afectado, positiva o negativamente, por la variabilidad o el cambio climático.
- Capacidad de adaptación: Capacidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluso a la variabilidad del clima y a los fenómenos extremos) a modo de mitigar posibles daños, aprovechar las oportunidades o afrontar las consecuencias (IPCC, 2001)

La vulnerabilidad de un sistema al cambio climático se expresa a través de los componentes de los impactos (I), éstos representan la magnitud del daño natural esperado, y la capacidad de adaptación (CA) que representa la habilidad del

sistema para soportar los impactos, recuperarse o adaptarse al cambio. Por lo tanto, la vulnerabilidad es función (f) de impactos y capacidad de adaptación. A su vez, el impacto es función de la exposición y la sensibilidad, esto se expresa mediante la siguiente ecuación (Martínez y Patiño, 2010):

$$V = f(I-CA) = f(E+S-CA)$$

De acuerdo con esta ecuación, a mayor impacto mayor es la vulnerabilidad y, a su vez, a mayor capacidad de adaptación menor es la vulnerabilidad.

Para el caso de la agricultura, la vulnerabilidad implica los impactos biofísicos, la población, precios y mercados de los cultivos, luego entonces, se tiene vulnerabilidad tanto en producción como económica. La vulnerabilidad en producción se encuentra definida por: la temperatura; el régimen de precipitación; la disponibilidad de agua; la ocurrencia de fenómenos extremos; la respuesta a la concentración de CO₂; los cambios en plagas y enfermedades; la fertilidad de los suelos, y las fechas de siembra, elementos que afectan, por lo tanto, la productividad de los cultivos.

México cuenta con una superficie de 31 millones de hectáreas de tierra de labor, de las cuales 24.7 corresponden a la modalidad de temporal (79.67%) y 6.3 son de riego (20.32%)¹². Algunas zonas del país pueden ser aptas o no para cultivos de temporal, por ejemplo, se ha clasificado el temporal de acuerdo al rango de precipitación (cuadro 8).

Cuadro 8. Clasificación del temporal de acuerdo a la precipitación acumulada.

Temporal	Precipitación (mm)
Muy deficiente	< 350
Deficiente	350 -500
Favorable	500-1000
Muy favorable	>1000

Fuente: Flores, 1986, citado por Crevenna et al., 2006

¹² Turrent, F. A. ¿Cambio Climático y última opción para el campo? Disponible en: <http://www.jornada.unam.mx/2012/02/25/opinion/022a2pol> Consultado el 9 de julio de 2012.

Las zonas menos aptas para la agricultura de temporal se concentran en la parte norte del país (es por ello que ahí se practica la agricultura en su modalidad bajo riego) y las favorables a muy favorables se encuentran en el centro y sur de la República Mexicana. Sin embargo, existen contrastes en la producción, por ejemplo en la zona norte del país se obtienen los mejores rendimientos de maíz en comparación con los del sur, debido a que se cuenta con una mejor infraestructura. Sin embargo, en las zonas de riego a escala nacional, la eficiencia en el uso del agua no supera el 46%, existiendo además sobreexplotación de los mantos acuíferos. Es prioritario atender las carencias de agua y mejorar la infraestructura del riego, haciéndolo más eficiente y así poder ahorrar agua.

Aún sin incrementarse las temperaturas bajo los escenarios de cambio climático planteados, las tierras de labor son muy vulnerables a la sequía y la erosión, pero al haber un cambio en el clima, se estima que un 96.98% del país es susceptible a afectaciones por algunos de los procesos de degradación de tierras y, de éstos, el 48.93% es de vulnerabilidad moderada y el 48.05% de vulnerabilidad alta (IEEG, 2008). Sin duda, estos datos son muy alarmantes, ya que está en riesgo la producción de alimentos por lo que es necesario hacer una planeación considerando los cambios que se presenten en el clima, además se debe prestar más atención en el manejo que se le da a las tierras de labor, ya que la fertilidad de las mismas se irá perdiendo.

1.3.2 Vulnerabilidad en el estado de Guanajuato.

Los estudios realizados para Guanajuato mencionan que las posibles eventualidades del cambio climático van a variar en las diferentes zonas climáticas del estado. Los escenarios han arrojado que habrá cambios en los patrones de lluvia, tendencia a temperaturas más altas y una mayor evaporación, lo que se traduce en una mayor demanda de agua para el sector agrícola, sector que en el estado consume el 87% del agua disponible (IEE, 2011).

Los escenarios para el estado, generados para el año 2030, están basados en un el modelo de Abasto y Uso de Agua (MUA), el cual simula el proceso lluvia-

escurrimiento de manera continua en el tiempo, bajo el fundamento del principio causa-efecto, por lo que determina los efectos que la humedad tendrá en el resto de los procesos naturales y antropogénicos de la cuenca. Los estudios mencionan que la producción agrícola se verá afectada en los rendimientos y siniestros por sequía en la cuenca Laja-Peñuelitas, Laguna Seca y en el distrito de riego 011, que incluye la cuenca Lerma-Solís y Lerma-Yuriria. La demanda de agua crecerá en un 5% (IEE, 2011). La zona de estudio de la presente investigación se ubica en la cuenca Laja-Allende para la cual se dice que: habrá una reducción de agua para uso doméstico y agropecuario; se reducirá la producción agrícola, y que aumentará el riesgo de avance de la desertificación en el norte de la cuenca. Por lo mencionado anteriormente, se tiene la premisa de hacer investigaciones más específicas, por ejemplo, evaluar si un cultivo determinado puede cumplir con sus requerimientos hídricos y térmicos, ante cambios en el clima y establecer medidas de adaptación, que permitan a los productores que tienen cultivos de temporal (los más vulnerables), sacar adelante su producción sin que se vean en la necesidad de migrar por falta de alimento.

1.3.3. Adaptación.

Un sistema puede ser menos vulnerable a los cambios climáticos si se realizan medidas de adaptación, esto con el fin de poder mitigar los efectos adversos. El IPCC (2001) define la adaptación como: un ajuste en sistemas naturales o humanos en respuesta a estímulos climáticos actuales o esperados, o sus efectos, que moderan el daño y aprovechan las oportunidades benéficas. Se pueden distinguir varios tipos de adaptación, incluyendo adaptación anticipatoria o reactiva, privada o pública y autónoma o planeada.

Surgen entonces dos formas de plantear la vulnerabilidad en materia climática:

- La que se entiende como el “punto final” en términos de la cantidad de daño causado a un sistema por un acontecimiento climático, es el impacto neto del cambio climático. Para ésta se maneja el tipo de adaptación reactiva,

que se refiere a una adaptación después de haberse observado los impactos del cambio climático.

- La que considera a la vulnerabilidad como “punto de inicio”, es decir, el sistema visto antes de que se presente el fenómeno (Monterroso, 2012). Para este caso, están las medidas de adaptación anticipadora, que son las que se producen antes de que se observen impactos del cambio climático (Buenfil, 2009).

Para cualquier tipo de adaptación ésta debe ser vista como un proyecto que beneficiará al sector afectado, en este caso el agrícola, por lo tanto será necesario que los productores se organicen y que haya inversión no sólo del sector sino de los diferentes niveles de gobierno.

De acuerdo a Landa, *et. al.* (2008), algunas prácticas de adaptación que pueden ser aprovechadas para hacer frente a los cambios en el clima son:

- La construcción de obras para el riego de auxilio o para la captación del agua de lluvia.
- La protección a los mantos freáticos de los contaminantes reduciendo la utilización de agroquímicos.
- La reforestación.
- Las prácticas para la conservación del suelo.
- El uso de invernaderos.
- La asociación de cultivos.
- La hidroponía.

Las prácticas anteriores ayudarían al agricultor que produce en condiciones de temporal a poder adaptarse a las condiciones cambiantes del clima.

Otros aspectos a considerar son:

- Hacer una mayor difusión de la información agroclimática.

- Orientar la investigación hacia el mejoramiento genético de las plantas para su resistencia a las altas o bajas temperaturas.
- Saber qué cultivos o especies forestales son los idóneos para realizar el secuestro de carbono, haciendo su siembra extensiva y así mitigar el efecto de invernadero.

Asimismo es importante conservar el material genético en los bancos de germoplasma para presentes y futuras investigaciones. Entre los recursos genéticos que tienen una gran importancia económica, social y cultural se encuentra el maíz, especie cuyo centro de origen es México. La biodiversidad de maíces, o las razas nativas, sumada a la biodiversidad que se encuentra en los bancos de germoplasma, permitirá desarrollar nuevas tecnologías que ayuden a enfrentar las amenazas del cambio climático.

Como se había mencionado, la agricultura es un sector que participa en la emisión de gases de efecto invernadero, ya sea por la quema que se practica en algunos cultivos, la deforestación para introducir tierras de cultivo y la aplicación inadecuada de fertilizantes que deriva en la degradación y volatilización de óxidos de nitrógeno, entre otros, por lo que existen algunas prácticas enfocadas a mitigar el efecto de invernadero de este sector, entre las que se encuentran: el uso controlado de fuego¹³; la labranza de conservación; el fomento de los sistemas agrosilvopastoriles; el uso de biofertilizantes, y la agricultura orgánica.

Cabe hacer un balance de lo que resultaría más eficiente: seguir emitiendo gases de efecto invernadero que produzcan un cambio en el sistema climático y, en consecuencia, tener que realizar medidas de adaptación, o realizar medidas de mitigación que eviten que se arrojen mayores cantidades de gases de efecto invernadero a la atmósfera y así poder reducir el cambio climático y que sus impactos no sean tan severos en la agricultura. Si se comparan las medidas de adaptación y las de mitigación resulta mucho más eficiente mitigar que adaptarse,

¹³ La SAGARPA ha establecido un programa de cosecha en verde de la caña de azúcar, y según datos de esa dependencia, con los apoyos otorgados en maquinaria hubo una disminución de caña quemada de entre 70 y 90% y se evitó la emisión de 5.4 toneladas de CO₂ por hectárea. Mayorga, 2009.

así lo confirma el Informe Galindo, que menciona que es más eficiente actuar que dejar el problema para las generaciones futuras (Galindo, 2009). Sin embargo, la adaptación y la mitigación pueden complementarse entre sí pudiendo reducir el riesgo del cambio climático.

México ha dado un paso muy importante en la atención de la problemática que el cambio climático trae consigo, ya que el 6 de junio de 2012 se decretó la Ley General de Cambio Climático, en la cual se establece el compromiso de realizar investigación, plantear medidas de mitigación y adaptación y aportar financiamiento involucrando a los tres niveles de gobierno. Además, se menciona que el tema del cambio climático debe ser abordado en todos los niveles de educación con la finalidad de generar conciencia en la sociedad. Con esta ley se cuenta con un marco legal que es fundamental para un desarrollo sustentable del medio ambiente que, sin duda alguna, es un gran paso.

1.4. Fenómenos meteorológicos extremos

Los agricultores que producen en condiciones de temporal se basan en sus conocimientos empíricos sobre el clima para poder establecer sus cultivos en las fechas adecuadas; sin embargo, las condiciones climáticas extremas han propiciado que sus prácticas tradicionales no sigan siendo las adecuadas, provocando una gran incertidumbre en ellos. Por lo tanto deben realizar modificaciones a sus prácticas para poder adaptarse a las condiciones dominantes de la actualidad, demandando entre otros aspectos, mayor información acerca del comportamiento del clima.

El IPCC (2012) menciona que hay evidencia de que algunos fenómenos meteorológicos extremos han cambiado como resultado de la influencia del hombre. Es “muy probable” que la participación del hombre haya dado lugar al aumento de las temperaturas diarias mínimas y máximas extremas a escala mundial y existe un “nivel de medio de confianza” de que la influencia antropógena ha contribuido a intensificar las precipitaciones extremas a nivel mundial.

El IPCC (2007) define un fenómeno meteorológico extremo como raro en un lugar y época del año determinados. Un evento meteorológico extremo raro se encuentra normalmente igual o por encima de los percentiles 10 ó 90 de la distribución particular de una variable atmosférica, ya sea precipitación, temperatura o velocidad del viento.

Los fenómenos meteorológicos extremos son aquellos acontecimientos que están más alejados de la media o la mediana y también son definidos como la máxima o la mínima distribución de una variable durante un cierto periodo (Lozano, 2009).

Los fenómenos meteorológicos extremos se pueden cuantificar como sigue (Beniston, 2004 citado por Lozano, 2009):

- Qué tan raros son: Se analiza la frecuencia con que ocurren.
- Qué tan intensos son: Se establece un umbral y se estudian los eventos que lo sobrepasan.
- Cómo impactan: Se analizan los efectos que producen sobre el ambiente o en sectores económicos, en términos de costos o daños.
- Cuánto duran: Se analizan días consecutivos de precipitación y temperatura.

El IPCC (2007) menciona que es “muy probable” que los días fríos, las noches frías y las escarchas sean ahora menos frecuentes en la mayoría de las áreas terrestres y, por otra parte, los días y noches cálidas serán más frecuentes, por lo tanto, es posible que si se emite más energía térmica al sistema climático, la frecuencia e intensidad de los eventos extremos se incrementen, por ejemplo, de temperatura y precipitación, esto es potencialmente probable en sistemas con una atmósfera más cálida (cuadro 9) (Houghton, 1994 citado por Lozano, 2009).

Cuadro 9. Fenómenos meteorológicos extremos y su probabilidad de ocurrencia.

Fenómenos y tendencia	Probabilidad de que la tendencia ocurrió en el siglo XX (después de 1960)	Probabilidad de contribución humana a la tendencia observada	Probabilidad de tendencias futuras basadas en proyecciones
Días cálidos, menos días y noches fríos	90%	66%	99%
Días y noches cálidos más frecuentes	90%	66% (Noches)	99%
Incremento en la frecuencia de ondas de calor	66%	50%	90%
Eventos de precipitación fuerte, incremento de la frecuencia en todas las áreas	66%	50%	90%
Áreas afectadas por incremento en sequías	66% desde 1970	50%	66%
Incremento en la intensidad y actividad de ciclones tropicales	66% desde 1970	50%	66%

Fuente: Lozano, 2009

La ocurrencia de eventos extremos varía de una región a otra; por ejemplo, en relación a los días cálidos más frecuentes, es probable que éstos se hayan producido a escala continental en América del Norte, Europa y Australia (IPCC, 2012). El cambio climático implica cambios en la circulación general de la atmósfera, por lo tanto, habrá variaciones en los sistemas meteorológicos, pero el impacto de éste aún es incierto en ciertas regiones y localidades de México. Los resultados de las investigaciones que se realicen a nivel local pueden diferir con los presentados a nivel global, ya que no necesariamente deben corresponder, es por ello que es muy importante realizar investigaciones en áreas específicas (Vázquez, 2010).

Ante eventos extremos, existe un riesgo de que aumenten los daños a cultivos disminuyendo los rendimientos y, por ende, la productividad agrícola, debido a sequías o inundaciones; o bien que, en algunos cultivos, disminuyan esos daños (Bando, 2010),

Los fenómenos meteorológicos extremos son ocasionados por una gran combinación de factores y ocurren en un clima normal, es decir, un clima sin cambios, por lo que la atribución de éstos a la variabilidad natural del clima o al cambio climático es muy difícil de determinar; por lo tanto, para la detección de

cambios en los eventos meteorológicos extremos se requiere de observaciones en la escala temporal diaria (Bando, 2010).

Para esto, el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI por sus siglas en inglés) que es coordinado por la Comisión de Climatología de la Organización Meteorológica Mundial (CCI/OMM), el proyecto sobre Predictibilidad y Variabilidad Climática (CLIVAR), y la Comisión Técnica de Oceanografía y Meteorología Marítima (JCOMM), han formulado índices de cambio climático para detectar y monitorear las modificaciones en el comportamiento de los extremos del clima. El cálculo de estos índices se realiza de la misma manera a nivel internacional, con el fin de integrar los índices de diferentes regiones del mundo. Los índices se calculan a partir de series de datos observados de temperatura y precipitación.

En México se han realizado estudios sobre eventos extremos de precipitación y temperatura y en ninguno de ellos se ha demostrado que los cambios y las tendencias observadas estén directamente relacionados con el cambio climático; sin embargo, se sabe que están parcialmente relacionados con el fenómeno de El Niño y la Oscilación Decadal del Pacífico, pero tampoco se puede descartar que se deban al calentamiento global (Sánchez *et. al.*, 2011).

En el estado de Guanajuato se han presentado una serie de eventos extremos a lo largo de los años. Por mencionar algunos: en el año de 1888 se desbordó el río Lerma e inundó prácticamente todo el Bajío, esto trajo consigo pérdidas humanas y daños materiales; en 1997 cae una nevada en varias zonas del estado, incluyendo algunas ciudades en donde nunca se había presentado este fenómeno; en el 2003, ocurren lluvias extraordinarias que afectaron a prácticamente todo el estado, hubo desbordamientos en las zonas aledañas a los ríos Lerma, Turbio, Laja y Guanajuato; en el 2005 hubo una sequía que se prolongó hasta el 2006, afectando a los cultivos de ese ciclo agrícola; en el 2009 se vuelve a presentar otra sequía, ésta asociada con el comportamiento del fenómeno de El Niño; en 2010 se presentan lluvias atípicas en el mes de febrero,

lo que hizo que las presas estuvieran llenas, poniendo en riesgo de inundación a las comunidades cercanas (IEE, 2011).

1.4.1 Afectación a las plantas por los fenómenos meteorológicos extremos.

Los eventos extremos de temperatura provocan que, en las plantas, se reduzca la tasa de crecimiento, se inhiba la fotosíntesis y la respiración y se active la senescencia (Ortolá, 2000).

Dependiendo de la especie, la variedad, el estado de desarrollo y el estado fitosanitario de la planta será su resistencia a los cambios en las temperaturas y, por lo tanto, el daño que provoquen los extremos variarán (Castillo y Castellví, 2001).

Existen, para las distintas especies, temperaturas letales, umbrales y óptimas.

- Letales: son aquellas en donde la planta soporta el máximo, ya sean temperaturas extremadamente altas o bajas; por ejemplo, para muchas plantas superiores el límite letal superior se encuentra en una temperatura máxima diaria de unos 51°C y el inferior de una mínima de 0°C.
- Umbrales: son aquellas que están por encima o debajo de las cuales el desarrollo de la planta resulta afectado. La resistencia de las plantas a estas temperaturas umbrales dependerá, como se indicó, de la especie y la variedad.
- Óptimas: Cada especie y variedad de planta requiere de temperaturas óptimas, bajo las cuales se puede desarrollar de buena manera y resulta muy difícil generalizar en una temperatura estándar para todas las plantas.

1.5. Fenómeno de El Niño

El fenómeno de El Niño afecta la producción agrícola que se desarrolla en condiciones de temporal en México, ya que cuando éste se presenta, por ejemplo, en el invierno, las precipitaciones aumentan en el norte del país y en verano disminuyen en el centro y sur, lo que se traduce en falta de agua para los cultivos del ciclo primavera-verano (Lozano, 2009).

Este fenómeno se presenta cuando hay un calentamiento recurrente de la superficie del océano en el Pacífico del Este, es decir, condiciones anómalas en la temperatura. El viento sobre la superficie del mar tiene una dirección contraria a lo normal y se presenta durante el verano del hemisferio sur. Se presenta de manera cíclica aproximadamente cada 3 o 4 años, con una duración de entre 12 a 18 meses en promedio, e inicia en junio o julio de un año y se maximiza en el invierno, aunque se ha visto que la periodicidad de este fenómeno no es regular (Sánchez, *et. al.*, 2011). Se ha encontrado que en las últimas 3 décadas, la variabilidad interanual del clima ha estado relacionada con el fenómeno de El Niño (Crevenna, *et. al.*, 2006).

Como se mencionó, este fenómeno se relaciona con cambios en la temperatura y se presenta cuando la temperatura del océano se incrementa en 0.5°C por encima de la media por al menos 5 meses consecutivos, en la región conocida como “Niño 3” (4°N-4°S, 150°W-90°W) (Magaña, 2004).

Los eventos más fuertes de El Niño se presentaron en los años de 1982 a 1983 y de 1997 a 1998, en estos últimos hubo una gran sequía que inclusive ocasionó la ocurrencia de incendios forestales.

Por otro lado, La Niña se presenta cuando la temperatura del océano baja -0.5 °C de su temperatura normal y, de igual manera, se debe presentar por lo menos 5 meses consecutivos. La Niña genera lluvias excesivas en el centro y sur del país siendo variable en el norte, ya que puede haber zonas con sequía y lluvias normales y presentarse en el invierno una marcada ausencia de lluvia.

Durante el fenómeno de El Niño, a nivel global, las presiones más altas de lo normal generan que haya condiciones de sequía en Australia, Indonesia, suroeste de Asia y Filipinas y hasta en zonas distantes. Por otro lado hay precipitaciones excesivas sobre el Pacífico oriental y central, así como en las costas y en el interior de América del Sur y el sur de Estados Unidos.

1.5.1. Impactos de El Niño en la agricultura.

Las lluvias en prácticamente todo México se presentan con mayor intensidad en el verano, comenzando generalmente entre mayo y julio y terminando entre septiembre y octubre; en el invierno las precipitaciones son pocas, lo que ocasiona condiciones secas en la mayor parte del país, a excepción del noroeste y la vertiente del Golfo de México. Por lo tanto, debido a que en la mayor parte del territorio las lluvias se presentan en el verano y en el invierno prevalecen condiciones secas, se habla de que el país presenta un clima monzónico. Durante la temporada de lluvias se presenta una baja relativa de la precipitación en los meses de julio y agosto, a lo que se le conoce como sequía intraestival o canícula (Magaña, 2004).

Cuando se presenta el fenómeno de El Niño, en México los patrones de las lluvias cambian, ocasionando afectaciones en la agricultura, ya que como se había mencionado, las lluvias en el centro y sur del país disminuyen y en el invierno se intensifican en el noroeste, aunque esta última zona se puede ver beneficiada con la presencia de más precipitaciones al recargarse presas y mantos acuíferos. Cabe señalar que las lluvias en el invierno no siempre se presentan de la misma manera, por ejemplo, El Niño de 1986-1987, presentó poca precipitación en comparación con el de los años 1982-1983, en donde las lluvias se presentaron por arriba de lo normal y para el año de 1997 sólo afectó la parte norte de Baja California (Magaña, 2004).

Si las lluvias en el verano disminuyen, ello provoca sequías, algunas severas como las ocurridas en los años noventa, en donde gran parte de los estados del norte fueron declarados zonas de desastre. Por ejemplo, El Niño en 1997 provocó

la pérdida de más de 2 mil millones de toneladas de granos básicos resultando afectadas cerca de 2 millones de hectáreas sembradas con diversos granos básicos, provocando que las importaciones de maíz y sorgo alcanzaran 4,716 millones de toneladas provocando la migración de mucha gente (Magaña *et. al.* 2004).

La agricultura desarrollada en condiciones de temporal en México es sensible a cualquier alteración en las lluvias, ya sea por retraso o por irregularidad, provocando la pérdida de algunos cultivos. Además se debe tener en cuenta que esta modalidad es más vulnerable si se consideran: el lugar y sus características; las condiciones económicas; culturales, y políticas que permitirán o no prevenir y/o adaptarse a los impactos de cualquier variación en el clima.

Por lo anterior, para hacer una buena planeación que permita que la producción de un determinado cultivo sea exitosa, se deben tomar en cuenta tanto la adaptación del cultivo, como la información de las condiciones de una determinada zona como serían: la distribución de las lluvias a lo largo de su ciclo agrícola; los rangos de temperatura máxima y mínima; la pendiente del terreno, y el tipo de suelo.

1.6. Importancia del maíz y del sorgo

1.6.1 El maíz

El maíz representa para los mexicanos el alimento principal y la materia prima para la elaboración de diversos productos como tamales, atole, tortilla y frituras, entre otros. Se considera, junto con el frijol, el alimento básico para millones de mexicanos, por lo que su producción debe estar asegurada ya que una escasez grave de cualquiera de estos dos productos traería consigo hambruna y migración. Cuando se han presentado problemas de baja producción de maíz, el gobierno ha recurrido a la importación de este grano, pero la solución a estos problemas no es importar millones de toneladas de este grano, sino poner mucho más énfasis en su producción nacional, apoyando más a productores tanto de temporal como de

riego en cuestión de: infraestructura, insumos, asesoría técnica, etc., para evitar migraciones masivas y el posterior abandono de las tierras.

El maíz se cultiva a nivel nacional tanto en condiciones de temporal como de riego, y es en la primera modalidad en donde se obtienen los más bajos rendimientos, lo que se atribuye a diversas causas como la falta de infraestructura y de apoyos económicos, así como a los fenómenos meteorológicos extremos, como son las heladas, lluvias torrenciales y altas temperaturas. Estas situaciones hacen muy vulnerable no sólo a este cultivo, sino a otras gramíneas como el sorgo de temporal.

Los estados que concentran el 82% de la producción nacional de maíz son: Chiapas, Chihuahua, Jalisco, Estado de México, Guerrero, Oaxaca, Puebla, Veracruz, Michoacán, Guanajuato y Sinaloa (Cuadro 10), y equivalen a 4.7 millones de hectáreas de superficie cosechada.¹⁴

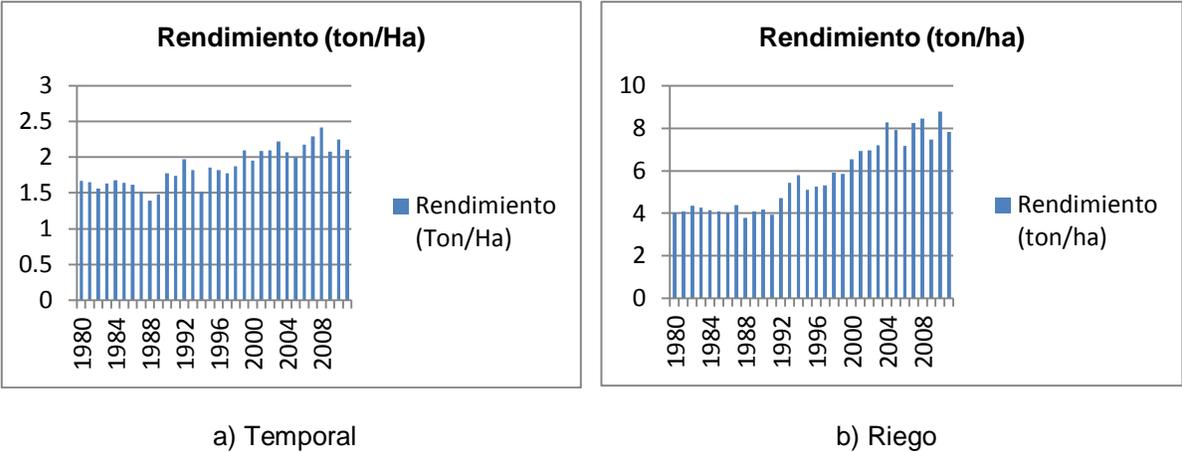
Cuadro 10. Producción de maíz grano. Año agrícola OI+PV 2011. Modalidad riego más temporal.

Estado	Producción	Rendimiento
	(Ton)	(Ton/Ha)
CAMPECHE	457,009.46	2.74
CHIAPAS	1,554,367.90	2.2
CHIHUAHUA	851,208.39	7.18
GUANAJUATO	1,015,660.45	4.89
GUERRERO	1,309,067.84	2.82
HIDALGO	454,945.24	2.32
JALISCO	2,519,275.73	4.84
MEXICO	649,178.69	2.01
MICHOACAN	1,386,363.47	3.26
NAYARIT	188,045.76	4.33
OAXACA	694,553.65	1.22
PUEBLA	611,805.06	1.32
SINALOA	2,929,179.50	6.96
TAMAULIPAS	489,380.19	3.93
VERACRUZ	1,039,846.30	1.94
ZACATECAS	210,067.25	2.42

Fuente: SIAP, SAGARPA, 2012.

¹⁴ INIFAP. 2008. <http://www.inifap.gob.mx>. Consultado el 15 de julio de 2012.

El rendimiento del maíz de temporal en el ciclo primavera-verano en el mismo periodo fue en promedio de 1.87 ton/ha, el cual es bajo, en comparación con el de riego que fue de 5.76 ton/ha, durante el mismo periodo¹⁵. (Gráfica 4).

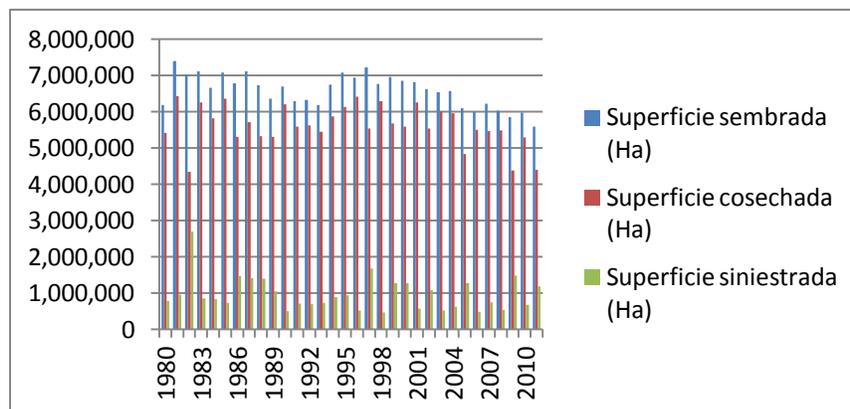


Gráfica 4. Rendimiento del maíz de temporal y riego durante el periodo de 1980-2011
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SIACON.

El rendimiento del maíz en condiciones de temporal no ha variado mucho, sin embargo, en los últimos años se ha dado un ligero aumento en los rendimientos, pero aún siguen siendo insuficientes para un productor que aspira a obtener buenas ganancias.

La superficie sembrada de maíz en condiciones de temporal, a nivel nacional, ha tenido diversas fluctuaciones en los últimos 30 años, sin embargo en recientes años, la tendencia de la siembra de este cultivo ha ido a la baja (gráfica 5), pudiendo atribuirse a diversas causas, entre otras: la falta de apoyo económico; un mal temporal, o que no haya gente que pudiera haberlo sembrado.

¹⁵ Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. SIAP, SAGARPA.



Gráfica 5. Superficie sembrada, cosechada y siniestrada de maíz de temporal, durante el periodo de 1980-2011.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SIACON¹⁶

A lo largo del periodo que se muestra en la gráfica, se observa que la superficie siniestrada ha variado, sin embargo, en el año de 1982 hubo una superficie siniestrada de 2'692,257 ha y, para el año de 1997 fue de 1'678,759 ha, las más altas en comparación con los demás años, habiendo sido, precisamente en esos años, cuando se presentó el fenómeno de El Niño más intenso (1981-1982 y 1997-1998 respectivamente).

1.6.2 El sorgo

El sorgo es considerado como el alimento por excelencia en el sector pecuario, es uno de los granos básicos en la producción agrícola mexicana y es el quinto cereal en importancia a nivel mundial, después del arroz, el maíz, el trigo y la cebada¹⁷. Se utiliza para preparar alimentos balanceados; como alimento directo para aves, cerdos y bovinos; es fuente de materia prima para la obtención de harina y aceites, y se puede obtener almidón, alcohol y glucosa para la industria de la extracción.

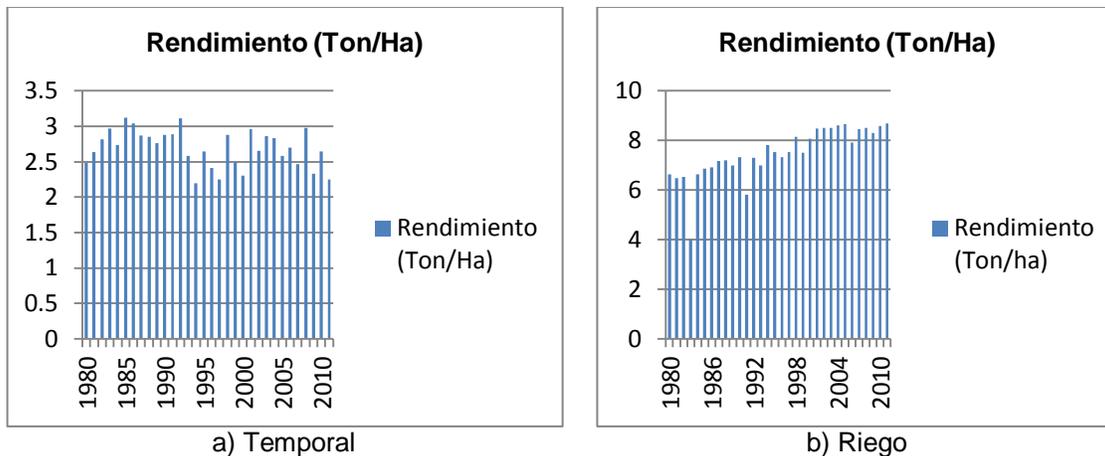
El sorgo se cultiva principalmente en los estados de Tamaulipas, Guanajuato, Michoacán, Jalisco y Sinaloa. El volumen de producción del sorgo de temporal es

¹⁶ SIACON. SIAP, SAGARPA.

¹⁷ INIFAP, 2008. Disponible en: <http://www.agromapas.inifap.gob.mx/potencialproductivo/sorgo.html> Consultado el 4 de septiembre de 2012.

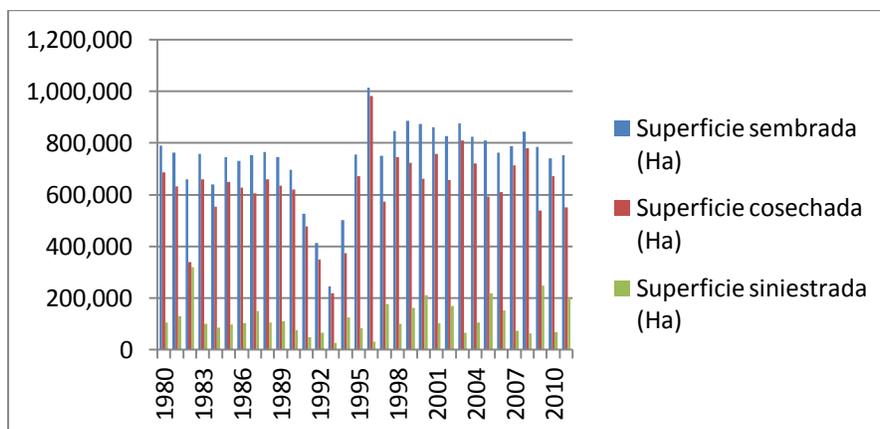
de 265,277 toneladas, muy por debajo en comparación con el de riego que es de 1'022,634 toneladas.

En cuanto al rendimiento del sorgo de temporal, en el período de 1980 a 2011 fue en promedio de 2.69 ton/ha, en comparación con el de la modalidad de riego que fue de 7.49 ton/ha (gráfica 6).



Gráfica 6. Rendimiento del sorgo de temporal y riego durante el periodo de 1980-2011.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SIACON.

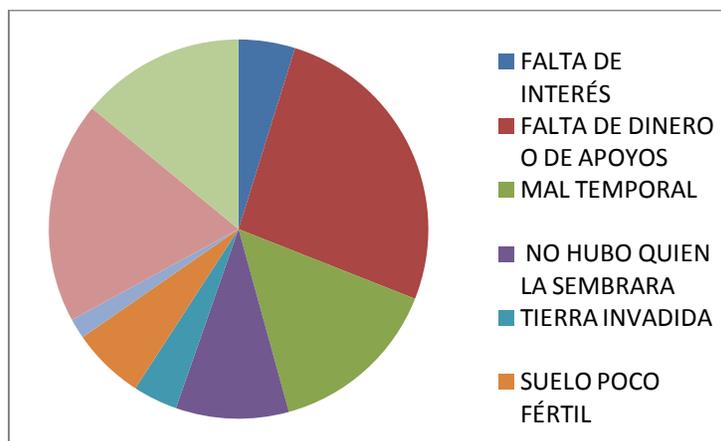
La superficie sembrada en el periodo 1980-2011, se mantuvo sin oscilaciones considerables, a excepción de 1993, año en el que sólo se sembraron 245,403 ha y de 1996 en el que se presentó un pico máximo de 1'013,379 ha a nivel nacional (gráfica 7).



Gráfica 7. Superficie sembrada, cosechada y siniestrada de sorgo de temporal, durante el periodo de 1980-2011.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SIACON

1.6.3 Producción de maíz y sorgo en el estado de Guanajuato

En el estado de Guanajuato existen 341,954 hectáreas dedicadas a cultivos bajo riego y 688,775 hectáreas de temporal. Para el ciclo primavera-verano de 2007 no hubo siembra lo que se atribuyó a diversas causas: en primer lugar la falta de apoyo; en segundo lugar que los productores dejaron descansar sus tierras y, en tercer lugar, que hubo un mal temporal (gráfica 8).



Gráfica 8. Causas por la que no se sembró en el ciclo primavera-verano 2007 en el estado de Guanajuato

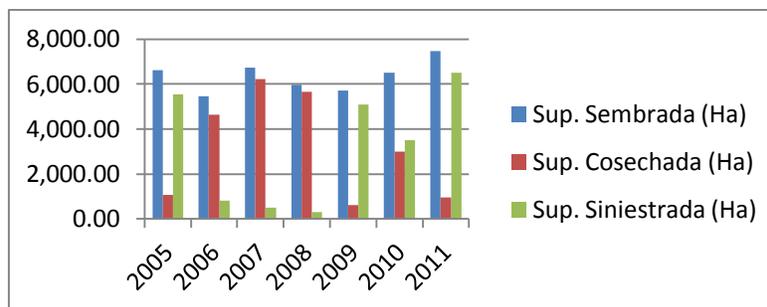
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INEGI, 2007.

1.6.4 Maíz y sorgo en el Valle de Celaya

En el Valle de Celaya la superficie dedicada a la modalidad de temporal es de 78,614 ha, y a la de riego es de 38,606 ha (INEGI, 2007), superficie distribuida en seis municipios: Apaseo el Alto, Apaseo el Grande, Celaya, Comonfort, Cortázar y Santa Cruz de Juventino Rosas.

A. Maíz

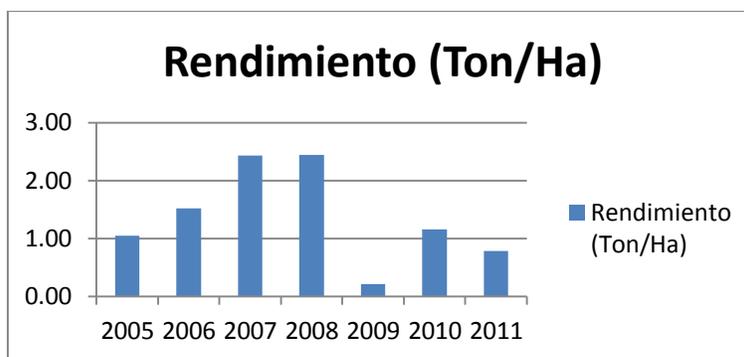
De 2005 a 2011, en el Valle de Celaya se sembraron, en promedio, 6,350 hectáreas de maíz de temporal, de las cuales 3,179 se siniestraron, es decir, se perdió el 50%. (gráfica 9).



Gráfica 9. Superficie sembrada, cosechada y siniestrada de maíz de temporal en el Valle de Celaya, durante el periodo 2005-2011.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SIAP¹⁸

En cuanto al volumen de producción el promedio fue de 6,109 toneladas, dentro del periodo mencionado.

El rendimiento del maíz en esta zona se mantuvo casi igual al promedio a nivel nacional, ya que en el Valle es de 1.37 ton/ha, aunque en el año 2009 tuvo una baja muy significativa (gráfica 10).

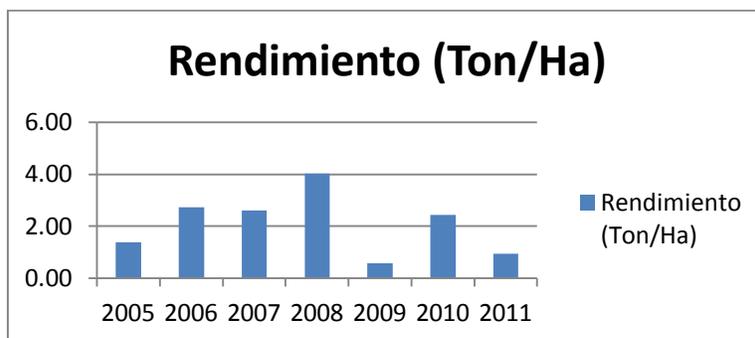


Gráfica 10. Rendimiento del maíz de temporal en el Valle de Celaya. Periodo 2005-2011.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SIAP.

B. Sorgo

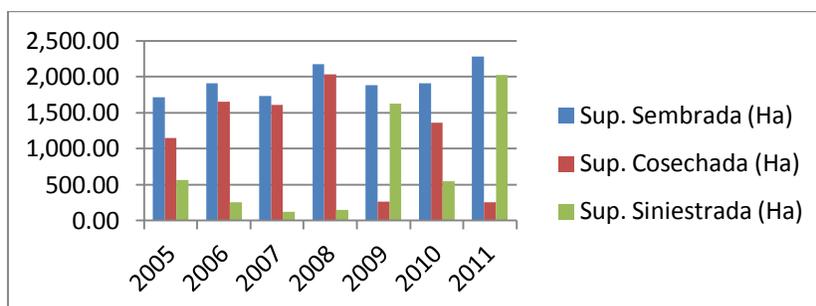
El promedio de rendimiento del sorgo en el Valle de Celaya para el período 2005-2011 fue de 2.10 ton/ha, habiéndose mantenido casi igual en comparación con el nacional que fue de 2.69 ton/ha. (gráfica 11).

¹⁸ Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA.



Gráfica 11. Rendimiento de sorgo de temporal en el Valle de Celaya. Período 2005-2011.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SIAP

De la misma forma que en el maíz, en el año 2009 el rendimiento del sorgo fue muy bajo. La superficie siniestrada fue casi total para ese mismo año (gráfica 12).



Gráfica 12. Superficie sembrada, cosechada y siniestrada de sorgo de temporal en el Valle de Celaya. Período 2005-2011.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SIAP

El promedio del volumen de producción de sorgo para el periodo 2005-2011 fue de 3,933 toneladas.

1.6.5 Requerimientos agroclimáticos del maíz.

El cultivo de maíz a lo largo de su desarrollo fenológico tiene requerimientos específicos de temperaturas y de agua. En cuanto a la temperatura este cultivo se desarrolla en valores óptimo, mínimo y máximo. Estos valores pueden variar dependiendo del subperíodo fenológico. A grandes rasgos, los requerimientos óptimos de temperatura son de 20 a 30°C; los mínimos se encuentran dentro del

rango de 10 y 20°C, y los máximos entre 30 y 40°C. En el cuadro 11 se muestran los valores de temperatura adecuados para cada fase fenológica.

Cuadro 11. Requerimientos de temperatura durante el ciclo fenológico del maíz.

Fase fenológica	Requerimientos térmicos (grados centígrados)		
	Mínimo	Óptimo	Máximo
Germinación	10	20-25	40
Crecimiento vegetativo	15	20-30	40
Floración	20	20-30	30
Formación de fruto: estado lechoso y masoso	20	20-30	30
Madurez	20	20-30	30

Fuente: Flores, *et. al.*, 2006.

En cuanto a los requerimientos de agua, el rango de precipitación en el que se desarrolla el maíz oscila entre los 500 a 1000 milímetros en total para su ciclo vegetativo (cuadro 12). Los períodos críticos de requerimiento de agua son en general el espigamiento, la formación de la mazorca y el llenado de grano (Barandas, 1994 citado por Ruiz *et. al.* 1999).

Cuadro 12. Requerimiento de precipitación durante el ciclo fenológico del maíz

Fase fenológica	Requerimientos hídricos (milímetros)		
	Mínimo	Óptimo	Máximo
Total ciclo vegetativo	400-500	500-1000	>1000
Germinación	-	45	-
Crecimiento vegetativo	-	170	-
Floración	-	220	-
Formación de fruto: estado lechoso y masoso	-	215	-
Madurez	-	90	-

Fuente: Flores, *et. al.*, 2006

1.6.6 Requerimientos agroclimáticos del sorgo

En cuanto a los requerimientos de temperatura para el sorgo, la estación de crecimiento comienza y se mantiene mientras la temperatura media sea igual o superior a 18°C. La temperatura umbral mínima para germinación es de 10°C; la óptima para el crecimiento está entre 26.7 y 29.4°C; la mínima para crecimiento es de 15.6°C, mientras que las temperaturas por arriba de los 38°C son dañinas. La

temperatura base para la etapa siembra - floración está entre 12.7 y 15.2°C para los genotipos de clima templado (Ruiz *et. al.*, 1999).

Respecto de sus requerimientos hídricos, el sorgo necesita de 450-600 mm/ciclo, siendo la etapa más crítica la de embuche a llenado de grano. Este cultivo presenta una alta tolerancia a la sequía, ya que tiene la capacidad de parar su crecimiento cuando ésta se presenta y lo reanuda cuando la sequía ha pasado (Barandas, 1994 citado por Ruiz *et. al.* 1999).

1.6.7 Variedades y fechas de siembra de maíz y sorgo en la región del Bajío Guanajuatense

De acuerdo con información del Fondo de Aseguramiento Agrícola “Servicios de Aseguramiento” de la Asociación Nacional de Empresas Comercializadoras de Productores del Campo (ANEC)¹⁹, en la región del bajío guanajuatense se siembran las variedades de sorgo y maíz grano de temporal y riego de auxilio mostradas en el cuadro 13, así como también se muestran las fechas de siembra y cosecha, ciclo de cultivo y densidad de siembra de los mismos en el ciclo primavera-verano 2012.

Cuadro 13. Variedades, fechas de siembra, cosecha, densidad de siembra y ciclo de cultivo de maíz y sorgo de temporal y riego de auxilio en el Bajío guanajuatense. Ciclo primavera-verano 2012.

Especie	Variedad	Modalidad	Ciclo de cultivo (días)	Densidad de siembra (Kg/Ha)	Fecha de siembra	Fecha de cosecha
Maíz	Cafime	Temporal	110	25	Inicio de temporal a 31 de julio	1 de octubre a 30 de noviembre
	VS-201					
	A7545		150-160			
	A7573		150-160		Inicio de temporal. a 30 de junio	1 de octubre a 30 de diciembre.
	A7597		150-160			
	H-220		120-125			
	HV-313		140-145			

Cuadro 13 continua...

¹⁹Fondo de aseguramiento ANEC. <http://www.anec.org.mx/seguoanec/documentos-fondo-de-aseguramiento-anec/guanajuato-fechas-siembra-p-v-2012/view>. Consultado el 2 de febrero de 2013.

Cuadro 13 continuación

	30R39	Riego de auxilio	150-160	30	15 de marzo a 30 de abril.	1 de noviembre. a 30 de noviembre.
	A791					
	AN-447					
	D-867					
	H-220					
	H-311					
	H-358					
	H-359					
	HV-313		120-125			
			145-150			
			150-160			
			450-160			
			140-145			
Sorgo	8133	Temporal	155-175	15-17	Inicio de temporal. a 15 de julio	15 de octubre a 31 de diciembre.
	8171					
	Asgrow Jade					
	Cuarzo					
	CS-747					
	Esmeralda					
	INIA Purépecha					
	INIA RB-3006					
	Júpiter					
	Marte 85					
	Master 911					
	Master Gold					
	Sedelgo 8080					
	TE GMA					
	TE-Total					
	Wac-692					
	Wac-694					
	Wac-696-R					

Fuente: Fondo de Aseguramiento ANEC. 2012.

Estas variedades son recomendadas para la zona del Bajío guanajuatense, información que resulta importante para los productores de maíz y sorgo ya que, como se mencionó, corresponden a la modalidad de temporal y algunas variedades de temporal con un riego de auxilio y, de acuerdo a la estación de crecimiento en el Valle de Celaya y a un posible cambio en el sistema climático, se determinarán nuevas fechas de siembra acordes a este posible cambio.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Localización de la zona de estudio

La zona de estudio se localizó en el Valle de Celaya mismo que se encuentra ubicado en la parte centro-oriental del estado de Guanajuato. Limita al oriente con el estado de Querétaro; al norte con los acuíferos del río Laja y San Miguel de Allende; al poniente con el acuífero de Irapuato, y al sur con los acuíferos de Salvatierra y la Cueva. Su extensión es de 3143 km². Los municipios que comprenden el Valle de Celaya son: Cortazar, Santa Cruz de Juventino Rosas, Celaya, Apaseo el Alto, Apaseo el Grande y Comonfort (CNA, 2002) (imagen 1).

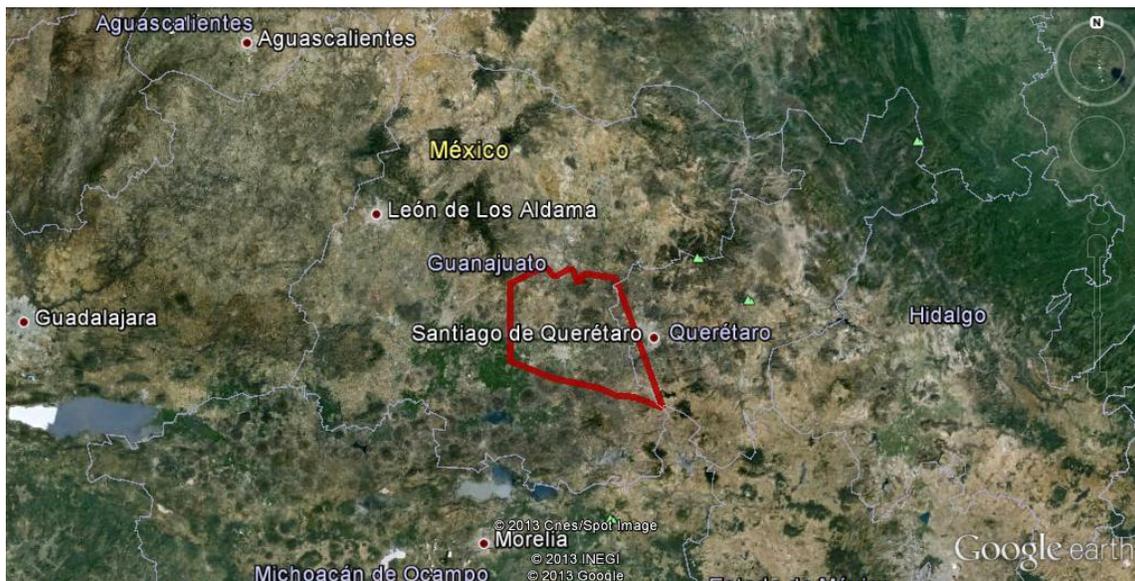


Imagen1. Ubicación del Valle de Celaya

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, el Valle de Celaya tiene un clima semiseco, semicálido con lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor de 5%. Alrededor del Valle existen diversas elevaciones topográficas que se clasifican como de clima templado subhúmedo, con lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor de 5% (CEAG, 2000). La

precipitación media anual es de 600 mm y la temperatura que predomina oscila entre 18 y 20 °C (CNA, 2002).

En la zona de estudio y sus alrededores existen 17 estaciones climatológicas, cuyas características se indican en el cuadro 14.

Cuadro 14. Estaciones climatológicas dentro de la zona de estudio

Clave	Nombre de estación	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Periodo de datos
11005	Apaseo	Apaseo el Grande	20° 32' 34"	100° 41' 19"	1771	1961-2011
11006	Apaseo el Alto	Apaseo el Alto	20° 27' 20"	100° 37' 18"	1850	1961-2011
11013	Cortazar	Cortazar	20° 29' 05"	100° 57' 43"	1730	1961-2011
11022	El Terrero	Apaseo el Alto	20° 22' 05"	100° 33' 15"	2022	1963-2011
11032	Santa Cruz Juventino Rosas	Juventino Rosas	20° 38' 37"	100° 59' 42"	1697	1986-2011
11044	Mandujano	Juventino Rosas	20° 44' 24"	101° 02' 58"	2066	1964-2011
11048	Nuetla	Comonfort	20° 42' 21"	100° 50' 10"	1825	1963-2011
11056	Planta R. Millán	Villagrán	20° 30' 36"	100° 56' 58"	1730	1969-2011
11070	Santa Julia	Jaral del Progreso	20° 23' 55"	101° 01' 15"	1723	1954-2011
11084	Celaya	Celaya	20° 32' 05"	100° 48' 49"	1752	1960-1973
11100	Roque	Celaya	20° 34' 40"	100° 49' 37"	1722	1972-2011
11105	Ameche	Apaseo el Grande	20° 33' 53"	100° 34' 53"	1790	1974-2011
11113	Comonfort	Comonfort	20° 43' 11"	100° 45' 48"	1790	1969-2011
11136	La Joyita	Salamanca	20° 45' 18"	101° 09' 40"	1830	1977-2011
11145	La Gavia	Cortazar	20° 23' 38"	100° 52' 48"	2330	1979-2011
11148	El Obraje	Apaseo el Grande	20° 40' 06"	100° 36' 29"	2010	1979-2011
11169	Tres Guerras	Celaya	20° 37' 56"	100° 46' 30"	1368	1993-2011

De las estaciones indicadas en el cuadro 14, para la presente investigación se eligieron 9, por los motivos que se exponen más adelante. Las estaciones que se ubican en municipios que se encuentran dentro del Valle de Celaya se muestran en la imagen 2.

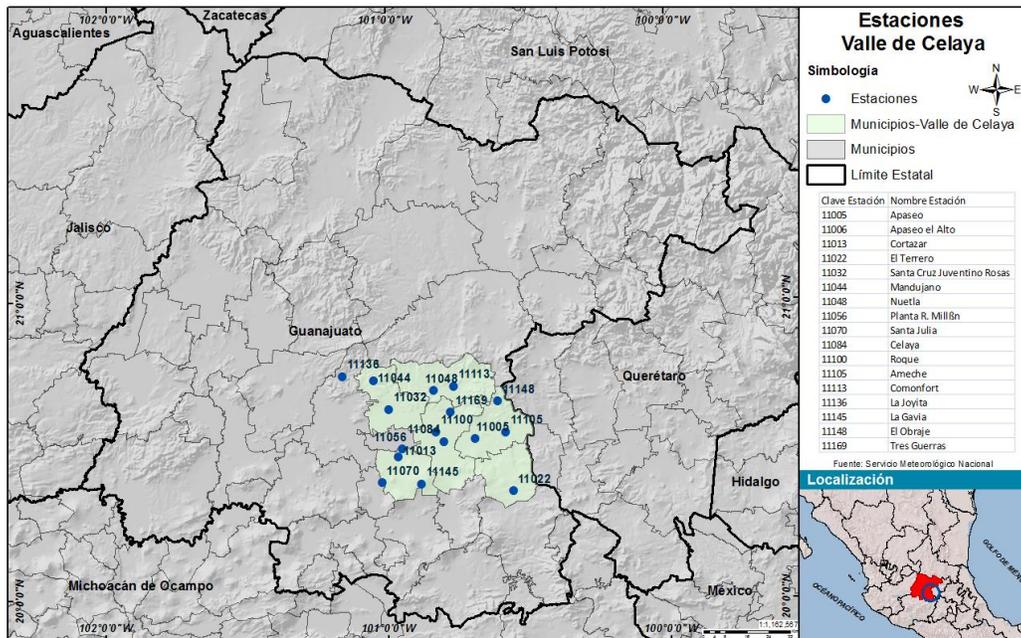


Imagen 2. Ubicación de las estaciones climatológicas en el Valle de Celaya, Guanajuato
Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, 2012.

2.2. Obtención de datos

Los datos aquí utilizados fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) habiéndose recopilado, para cada estación, la información diaria de precipitación y temperatura, para un periodo de toma de datos de 1954 a 2011, aunque en algunas de ellas los registros comienzan a partir de 1961.

Se realizó un descarte de estaciones ya que en algunas el periodo de la toma de datos era insuficiente para poder realizar un análisis y en otras la toma de datos era inconsistente, es decir, demasiados años consecutivos sin toma de datos (cuadro 15).

Cuadro 15. Justificación de descarte de estaciones

Clave	Estación	Municipio	Justificación
11032	Santa Cruz Juventino Rosas	Juventino Rosas	La toma de datos comienza en 1986 al 2011, por lo que el periodo es muy corto para realizar un análisis.
11044	Mandujano	Juventino Rosas	Existen demasiados años sin toma de datos.
11056	Planta R. Millán	Villagrán	Existen demasiados años sin toma de datos.
11084	Celaya	Celaya	Solo hay 13 años de toma de datos
11100	Roque	Celaya	Existen demasiados años sin toma de datos.
11113	Comonfort	Comonfort	Existen demasiados años sin toma de datos.
11136	La Joyita	Salamanca	La estación se encuentra fuera del área de estudio
11169	Tres Guerras	Celaya	La toma de datos comienza en 1993 a 2011, por lo que el periodo es muy corto para realizar un análisis

Por los motivos expuestos en el cuadro 15, de las 17 estaciones meteorológicas al final quedaron 9, que cumplieron con la característica de contar con una toma de datos continua (cuadro 16).

Cuadro 16. Estaciones climatológicas utilizadas en el estudio.

	Clave	Nombre de estación	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud	Periodo de datos
1	11005	Apaseo	Apaseo el Grande	20° 32' 34"	100° 41' 19"	1771	1961-2011
2	11006	Apaseo el Alto	Apaseo el Alto	20° 27' 20"	100° 37' 18"	1850	1961-2011
3	11013	Cortazar	Cortazar	20° 29' 05"	100° 57' 43"	1730	1961-2011
4	11022	El Terrero	Apaseo el Alto	20° 22' 05"	100° 33' 15"	2022	1963-2011
5	11048	Nuetla	Comonfort	20° 42' 21"	100° 50' 10"	1825	1963-2011
6	11070	Santa Julia	Jaral del Progreso	20° 23' 55"	101° 01' 15"	1723	1954-2011
7	11105	Ameche	Apaseo el Grande	20° 33' 53"	100° 34' 53"	1790	1974-2011
8	11145	La Gavia	Cortazar	20° 23' 38"	100° 52' 48"	2330	1979-2011
9	11148	El Obraje	Apaseo el Grande	20° 40' 06"	100° 36' 29"	2010	1979-2011

Para generar el clima base del valle de Celaya se recopilaron las normales climatológicas de cada estación de la zona de estudio, las cuales comprenden el período de 1981-2010. Estos datos fueron extraídos de la página de internet del Servicio Meteorológico Nacional. Se generó este clima en la cual se observó el comportamiento de las temperaturas máximas, mínimas y la precipitación a lo

largo del período mencionado, el cual resulta importante para planear la siembra y cosecha de los cultivos evaluados y que obviamente dependen de las condiciones de temporal.

2.3 Análisis de los datos.

Para que el cálculo de los índices de cambio climático fuera exitoso, los datos de temperatura y precipitación debieron pasar por un análisis y control de calidad, con el fin de eliminar algunos datos dudosos, aquellos datos faltantes o que no se reportaron.

Se utilizó el software RclimDex, con el fin de detectar valores poco comunes, ya fuera que en verdad hubiera sucedido un evento extremo o fueran errores de toma de datos, digitalización o anotación. Por ejemplo, en una toma de temperatura, se anotó 113 cuando en realidad fue 11.3 por lo que estos datos debieron ser sujetos a validación. Los errores en los datos también se pueden deber a: la mala calibración o mal emplazamiento de los instrumentos de medición; a que hayan sido cambiados de la estación de observación, o al cambio del personal que realiza las observaciones, sin embargo, como se había mencionado, también pueden ser registros reales de algún evento extremo.

El control de calidad consiste en someter a las series climáticas a tests estadísticos simples y a inspección visual, mediante gráficos específicos.

2.3.1 Programa RclimDex

El software RclimDex²⁰ fue desarrollado por Xuebin Zhang y Feng Yang (2004) del Departamento de Investigación Climática del Servicio Meteorológico de Canadá. El programa Climdex proporciona un paquete computacional para realizar el cálculo de índices de extremos climáticos para monitorear y detectar cambio

²⁰ Software libre disponible en: <http://ccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>

climático. Junto con el programa Climdex, utilizaron el software R²¹, el cual fue desarrollado para el uso de la estadística y creación de gráficas.

El programa RclimDex calcula los 27 índices básicos recomendados por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDMI, por sus siglas en inglés) (Cuadro 17). Estos índices son calculados a partir de las series de datos observados de temperatura y precipitación. El cálculo de los índices en cualquier punto puede ser agregado posteriormente a diferentes series regionales del mundo, para comparar o integrar los resultados. En el anexo 1 se enlistan cada uno de los índices de cambio climático con sus respectivas unidades y en el anexo 2 se define cada uno de los índices.

Cuadro 17. Resumen de los 27 índices básicos de cambio climático del ETCCDI

Índice	Descripción del índice	Índice	Descripción del índice
CDD	Días secos consecutivos	RX5da y	Precipitación máxima en 5 días
CSDI	Duración de los periodos fríos	SDII	Índice simple de intensidad diaria
CWD	Días húmedos consecutivos	SU	Días de verano
DTR	Rango diurno de temperatura	TN10p	Noches frías
FD	Días con helada	TN90p	Noches cálidas
GSL	Estación de crecimiento	TNn	Temperatura mínima extrema
ID	Días con hielo	TNx	Temperatura mínima más alta
PRCPTOT	Precipitación total anual	TR	Noches tropicales
R10mm	Días con lluvia mayor a 10 mm	TX10p	Días frescos
R20mm	Días con lluvia mayor a 20 mm	TX90p	Días calurosos
R95p	Días muy húmedos	TXn	Temperatura máxima más baja
R99p	Días extremadamente húmedos	TXx	Temperatura máxima extrema
Rnnmm	Días con lluvia mayor a nn	WSDI	Duración de los periodos cálidos
RX1day	Precipitación máxima en 1 día		

Fuente: Zhang y Yang, 2004.

²¹En este enlace se puede descargar el lenguaje R: <http://www.r-project.org/>. R es un programa para cómputo estadístico y gráficos desarrollado originalmente por el Departamento de Estadística de la Universidad de Auckland, Nueva Zelanda.

2.3.2. Control de calidad de los datos

Los datos de las estaciones meteorológicas fueron sometidos a un control de calidad con el RclimDex que se lleva a cabo de la siguiente manera:

Los datos de temperatura y precipitación proporcionados por el SMN se encuentran en archivos en Excel y para poder utilizarlos con el programa RclimDex se llevó a cabo lo siguiente:

El primer paso que se siguió fue sustituir valores que tenían marcado el número -99999, con el valor -99.9 (código de valor perdido), esto con el fin eliminar ese valor, ya que indicaría una temperatura o una precipitación errónea, al tomar ese dato como cierto.

Posteriormente el archivo fue guardado como texto delimitado por tabulaciones, ya que solamente en este formato el programa RclimDex acepta los archivos (tabla1). Así el archivo tiene 6 columnas con el siguiente orden:

1. Año (AAAA)
2. Mes (MM)
3. Día (DD)
4. Precipitación diaria (Pp diaria)
5. Temperatura máxima diaria (TM diaria)
6. Temperatura mínima diaria (Tm diaria)

Tabla1. Formato del archivo de texto

1974	4	10	0	32	13
1974	4	11	0	26	7
1974	4	12	0	28	10
1974	4	13	0	29	8
1974	4	14	0	30	11
1974	4	15	3	28.5	15
1974	4	16	3.5	24	13.5
1974	4	17	1	27	11
1974	4	18	0	27	11
1974	4	19	0	28	10
1974	4	20	0	31	10
1974	4	21	0	31	10.5
1974	4	22	0	33	8.5
1974	4	23	0	28	14
1974	4	24	0	30	14
1974	4	25	0	29	11
1974	4	26	0	31	11
1974	4	27	0	30.5	13
1974	4	28	6	28	13.5
1974	4	29	0	32	10.5
1974	4	30	0	32	13
1974	5	1	0	25	15
1974	5	2	0	31	14
1974	5	3	0	30	11
1974	5	4	0	30	11
1974	5	5	0	30	9
1974	5	6	0	31	9.5
1974	5	7	0	31	11
Año	Mes	Día	Pp diaria	TM diaria	Tm diaria

Finalmente se decidió ubicar las 9 estaciones a evaluar en una carpeta para hacer más fácil su acceso dentro del equipo de cómputo.

2.3.3 Incorporación de datos en el programa.

Se procedió a abrir el ambiente (R) (figura 2), el cual pide interpretar el código “R”, que es el lenguaje con el que trabaja el software y que fue descargado previamente del enlace <http://www.r-project.org/>.

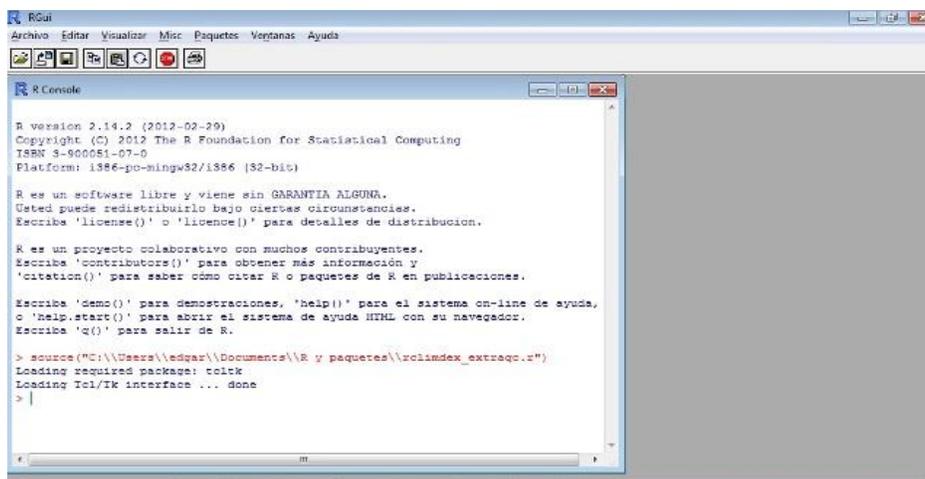


Figura 2. Pantalla principal del ambiente R.

Al interpretar el código R, se abre automáticamente la ventana de RclimDex, en donde se encuentran cada uno de los puntos a trabajar desde la carga de los datos hasta el cálculo de los índices de cambio climático (figura 3).

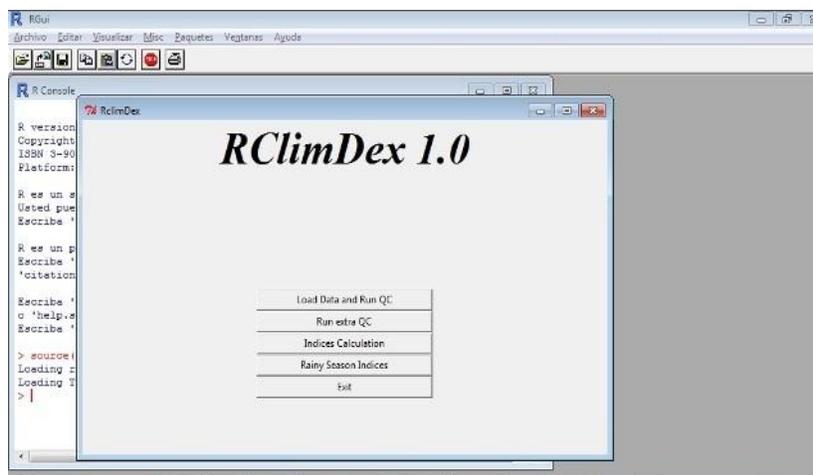


Figura 3. Pantalla de la aplicación RclimDex.

Utilizando el programa se procedió a realizar el control de calidad de cada una de las estaciones climatológicas que fueron seleccionadas para su análisis en esta investigación.

En la pantalla de RclimDex (figura 3) se encuentra la opción para cargar y correr el control de calidad, se procedió a cargar los datos de cada estación (el análisis se realizó estación por estación climatológica) con el formato guardado anteriormente como texto delimitado por tabulaciones.

Se genera un archivo en formato txt con el nombre de “outliers”. Es a partir de este archivo en donde se realizó la inspección de los valores sospechosos o fuera de límites.

La inspección y comparación de los datos sospechosos se realizó en el SMN, en donde se obtuvieron los archivos históricos de cada una de las 9 estaciones climatológicas, realizando la inspección dato por dato y variable por variable (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima). El chequeo de datos consistió en determinar si el valor obtenido en los “outliers” correspondía al valor

que se encontraba en archivo o si resultó ser un valor erróneo que necesitó corrección. Para poder determinar si el valor sospechoso es un dato erróneo, o un extremo que en verdad haya sucedido fue necesario hacer un análisis de tipo lógico, histórico, meteorológico y climatológico. El control de calidad de manera visual de estos datos se hizo de la siguiente manera:

1. Se imprimieron los archivos “outliers” de las 9 estaciones climatológicas.
2. El archivo agrupa la información en 7 categorías distintas: pc up (precipitación alta); tx up (temperatura máxima alta); tx low (temperatura máxima baja); tn up (temperatura mínima alta); tn low (temperatura mínima baja); tr up (diferencia de temperatura diurna alta); tr low (diferencia de temperatura diurna baja). Cada una de estas categorías fueron comprobadas una a una, estación por estación.
3. El archivo agrupa 7 columnas, en donde se indica en el siguiente orden: año, mes, día, precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y la oscilación térmica.
4. Se utilizó una clave proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional para marcar los datos y determinar su validación o corrección. Las claves utilizadas fueron las siguientes:
 - A. Dato de precipitación validado en expediente
 - H. Temperaturas checadas contra expediente
 - T. Precipitaciones traza o inapreciables.
 - E. Valor estimado.
 - B. Precipitaciones checadas contra estaciones vecinas
 - F. Temperaturas checadas contra estaciones vecinas
 - * corrección de dato
5. Cuando se encontraron precipitaciones con la clave T se anotaba esta clave y delante de ella se colocó el signo igual (=) y los días en que se presentó ese evento, separando con comas (,) cada día. Además al final de cada validación o corrección se anotaba un punto y coma (;) y se digitó en seguida si hubo precipitaciones mayores de 35 mm, que son tomadas en

cuenta como considerables, se citó el valor de la precipitación y entre paréntesis el día en que ocurrió.

6. La inspección se realizó haciendo un análisis lógico de los archivos, con ayuda del personal del SMN, el cual fue de vital importancia para entender la climatología de la zona de estudio y la meteorología de los valores. Al momento de checar cada dato dudoso se tuvieron que visualizar los demás días, tanto anteriores como posteriores, de cada dato para poder observar el comportamiento ya fuera de las lluvias o de las temperaturas: checar si en verdad el día estuvo nublado; cuándo había una precipitación alta, además se observó en los archivos históricos la velocidad del viento, si hubo tormentas eléctricas o no, y se corroboró el comportamiento de las temperaturas en días pasados y subsecuentes. Cuando se encontró un dato valido se anotó delante de cada año la clave descrita anteriormente.
7. En los expedientes se encontraron valores dudosos o algunos inapreciables por lo que se procedió a observar el comportamiento de los demás datos dentro del mismo archivo, si la duda persistía se procedía a checar con estaciones vecinas para poder determinar si en esas estaciones también se presentó determinada precipitación o temperatura. Cuando se encontraba ese valor se colocaban las claves B o F, dependiendo de la variable a cotejar. Si no se encontraba en estaciones vecinas, como tercera opción se procedía a realizar un cálculo estimado del valor de la siguiente manera: se tomaban 3 datos anteriores al valor inapreciable o dudoso y 3 después, la suma de estos datos se dividía entre 6 y así se obtenía el valor, colocando delante del año analizado la clave E.
8. Los datos que se encontraron en outliers y que no concordaban con los de expediente fueron corregidos anotando en la hoja de outliers y delante del año analizado, un asterisco y enseguida el valor correcto que se encuentra en expediente.
9. Los datos que no pudieron ser checados contra expediente, por falta de información de los mismos, se cotejaron con el CLICOM (Clima

Computarizado) del SMN, el cual consistió en realizar las mismas inspecciones descritas en los pasos anteriores.

El CLICOM es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa Climate Computing Project. Contiene una base de datos de estaciones climáticas superficiales de México. Cada estación contiene diferentes periodos de información, se pueden encontrar datos desde 1950 a 2008.

Al concluir con este procedimiento de inspección visual de datos con expedientes del SMN, se procedió a calcular los índices de cambio climático.

2.3.4 Cálculo de los índices de cambio climático

Después de haber hecho el control de calidad tanto en el RclimDex como de manera visual en expedientes, se prosiguió a realizar el cálculo de los índices de cambio climático con la misma plataforma RclimDex, el cual se hizo de la siguiente manera:

Se abre de nueva cuenta el programa RclimDex y se selecciona la opción cálculo de índices (figura 4).



Figura 4. Pantalla de RclimDex para el cálculo de los índices de cambio climático

Al seleccionar esta opción se abre una nueva ventana (figura 5) en donde se indican los parámetros a utilizar, en este caso son valores definidos por el usuario, por lo que para fines de la presente investigación se digitaron valores de acuerdo

a las necesidades del maíz y del sorgo y con base en el clima del Valle de Celaya, es decir, se seleccionaron rangos que se encontraran dentro de los rangos de temperaturas máximas y mínimas y de precipitación en la zona, los cuales se describirán más adelante.

Parameter	Value
First year of base period	1975
Last year of base period	2004
Latitude of this station location	0
Longitude of this station location	0
User defined upper threshold of daily maximum temperature	35
User defined lower threshold of daily maximum temperature	28
User defined upper threshold of daily minimum temperature	20
User defined lower threshold of daily minimum temperature	10
User defined daily precipitation threshold	25

Figura 5. Ventana de parámetros definidos por el usuario

La ventana de la figura 5 muestra los parámetros definidos por el usuario para poder proceder a realizar el cálculo de los índices. Cabe recordar que cada uno de los pasos hasta ahora descritos fueron aplicados para cada una de las 9 estaciones climatológicas seleccionadas.

- El primer parámetro que el programa pide introducir es el período base de estudio, en donde se indicó el año inicial y final del período. Para cada estación climatológica se determinó su propio período base, ya que como se mostró en el cuadro 16, cada estación tiene un año de inicio de toma de datos. Para todas las 9 estaciones se tomó un periodo de 30 años.
- Los siguientes valores a introducir fueron la latitud y longitud de la estación, sin embargo, no fue necesario digitarlos, ya que los datos provienen de estaciones perfectamente ubicadas.
- A continuación se pide digitar un valor en donde se calcula el número de días cuando la temperatura máxima diaria excede un determinado umbral, el dato seleccionado fue de 35°C, este valor fue definido, en primer lugar, porque la zona del Valle de Celaya ha tenido ciertos días con temperaturas mayores a este valor, por lo que se conservó este parámetro. Como

segundo criterio, se utilizaron los valores máximos que pueden tolerar los cultivos de maíz y sorgo, por encima de estas temperaturas los cultivos se ven afectados, por lo que resulta interesante determinar los días en que se excede este valor.

- Posteriormente se pide introducir un valor cuando la temperatura máxima diaria está debajo de este valor. Para fines de la presente investigación se determinó usar el valor de 28°C, ya que por debajo de esta temperatura, se encuentra el óptimo para el buen desarrollo tanto del maíz como del sorgo.
- El siguiente valor es para el número de días cuando la temperatura mínima diaria ha excedido ese umbral, por lo que se tomó el valor de 20°C, ya que por encima de esta temperatura existen óptimas condiciones para el desarrollo del maíz y del sorgo. El rango óptimo de temperaturas en que ambos cultivos se pueden desarrollar es de 20 a 30°C, por lo que es importante determinar el número de días que presentaron buenas condiciones térmicas para el desarrollo de los dos cultivos aquí analizados.
- Otro valor a determinar es el número de días en que la temperatura mínima diaria se encuentra por debajo de un valor, por lo que se utilizó el de 10°C, ya que por debajo de esta temperatura, el maíz y el sorgo se ven afectados, siempre y cuando sean varios días consecutivos, por lo que hay que determinar los días en que hay temperaturas por debajo de este umbral.
- El último valor introducido fue el número de días en que la precipitación diaria excedió cierto umbral, lo cual se utilizó el valor de 25 mm. A partir de este umbral se considera una precipitación que beneficia a los cultivos de maíz y sorgo ya que, habiendo precipitaciones mayores a este valor puede haber suficiente humedad en el suelo que posteriormente aprovechará la planta.

Una vez introducidos estos valores se procedió a realizar el cálculo de los índices, para lo cual RclimDex despliega, en una nueva ventana, la lista de los 27 índices de cambio climático (figura 6).

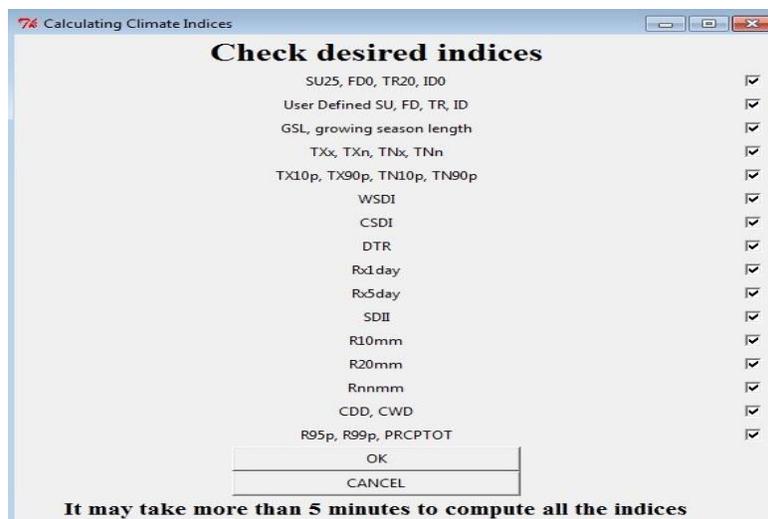


Figura 6. Ventana que muestra los 27 índices de cambio climático que calcula RclimDex.

El programa selecciona automáticamente todos los índices para su cálculo, sin embargo, se pueden seleccionar sólo aquellos que sean de interés.

A partir de la lista de índices del cuadro 17, se eligieron 20 que aplican de acuerdo a las características de la zona de estudio y a las necesidades de temperatura y precipitación del maíz y del sorgo. Se descartaron, por ejemplo, los índices que mencionan noches tropicales, la duración de los periodos cálidos y los días con hielo, debido a que el Valle de Celaya presenta un tipo de clima muy diferente a lo que estos índices evalúan. Los índices de cambio climático definitivos que fueron elegidos para su posterior evaluación se enlistan en el cuadro 18.

Cuadro 18. Índices de cambio climático usados para evaluación

Índice	Descripción
PRECIPITACIÓN	
CDD	Días secos consecutivos
CWD	Días húmedos consecutivos
GSL	Estación de crecimiento
PRCPTOT	Precipitación total anual
R10mm	Días con lluvia mayor a 10 mm
R20mm	Días con lluvia mayor a 20 mm
R25mm (Definido por usuario)	Días con lluvia mayor a 25 mm
RX1day	Precipitación máxima en 1 día
RX5day	Precipitación máxima en 5 días

Cuadro 18 continua...

Cuadro 18 continuación

TEMPERATURA	
TN10p	Noches frías
TN90p	Noches cálidas
TNn	Temperatura mínima extrema
TNx	Temperatura mínima más alta
TX10p	Días frescos
TX90p	Días calurosos
TXn	Temperatura máxima más baja
TXx	Temperatura máxima extrema
DTR	Rango diurno de temperatura
FD	Días con helada
CSDI	Duración de los períodos fríos
FD 10 (Definido por usuario)	Temperatura diurna <10 °C
ID 28 (Definido por usuario)	Temperatura diurna < 28 °C
SU 35 (Definido por usuario)	Días al año con Tmx >35 °C
TR 20	Días al año con Tmn >20 °C

Después de haber seleccionado los índices que servirían para el análisis de las tendencias de cambio climático para la zona de estudio, se da aceptar en el programa y éste tarda algunos minutos en realizar el trabajo, cuando termina de hacer los cálculos se muestra un mensaje (figura 7) que indica que el programa ha completado el cálculo de los índices y se han guardado en la carpeta de la estación en la que se esté trabajando.

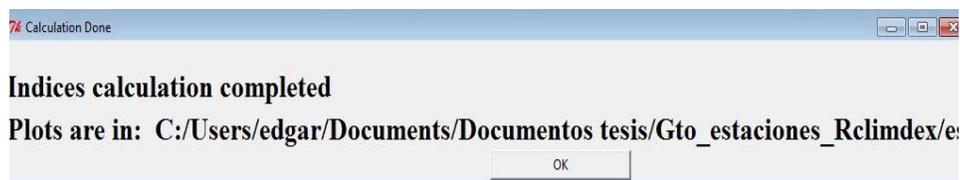


Figura 7. Mensaje que indica que el programa ha terminado los cálculos

Al finalizar el cálculo, el programa ha generado información en varias carpetas (*índices, plots y trend*) las cuales fueron analizadas para interpretar los datos y poder determinar las tendencias climáticas de la zona de estudio.

2.4 Estación de crecimiento

Se realizó la estación de crecimiento de la zona de estudio para determinar los días en el año en que los cultivos de maíz y sorgo dispondrían de los elementos favorables para su desarrollo y crecimiento. A fin de establecer una estación de crecimiento acorde a las tendencias que podría generar un cambio en el clima, se utilizaron los datos de temperatura y precipitación arrojados en el análisis de las tendencias de cambio climático calculadas anteriormente con el RclimDex y así poder establecer las fechas de siembra y de cosecha de acuerdo con estas tendencias y, dependiendo de la variedad utilizada y del número de días para completar su desarrollo.

2.4.1 Cálculo de la evapotranspiración por el método de Thornthwaite.

Se realizó el cálculo de la evapotranspiración, la cual es fundamental para determinar las necesidades hídricas de los cultivos evaluados. El suelo pierde agua por diversos procesos físicos, el agua pasa de un estado líquido a gaseoso, lo que se conoce como evaporación. Por otro lado, la planta pierde agua también, lo que se conoce como transpiración. Por lo tanto, la evapotranspiración es la tasa de pérdida de agua de la planta por transpiración más la evaporada del suelo y ésta es medida en milímetros por día, semana, mes, etc.²²

La evapotranspiración se ve afectada por diversos factores, entre los cuales se encuentran los climáticos como: la temperatura, la humedad relativa, velocidad del viento e intensidad de la radiación solar. Por otro lado también depende del manejo que se dé al suelo y el riego.

Para la presente investigación se determinó la evapotranspiración usando el método de Thornthwaite, utilizando los datos de temperatura y precipitación arrojados en el análisis de los índices de cambio climático. En un principio se había optado por usar el método de Penman-Monteith, sin embargo, éste requería de datos como radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa, los cuales

²² Curso Agroclimatología operativa. 2011. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM.

no son generados por las estaciones climatológicas ni calculados por el RclimDex, además de que la utilización de este método resulta complejo. .

La evapotranspiración, calculada por el método de Thornthwaite, está en función de la temperatura media, con una corrección en función de la duración astronómica del día y del número de días del mes.

La ecuación para el cálculo de la evapotranspiración según Thornthwaite es la siguiente:

$$e = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot t}{I} \right)^a$$

Donde:

e = evapotranspiración mensual sin ajustar en mm (mm/mes).

t = temperatura media mensual en °C.

I = Índice de calor anual

“I” se calcula a partir del índice de calor mensual (i), como suma de los 12 índices de calor mensuales:

$$I = \sum i; 1,2,\dots,12.$$

Calculándose “i” con la siguiente fórmula.

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

“a” es un parámetro que se calcula en función de “I” según la expresión:

$$a = 0.000000675 (I^3) - 0.0000771 (I^2) + 0.01792 (I) + 0.49239$$

Para calcular la ETP de cada mes se debe corregir la ETP sin ajustar “e” mediante un coeficiente que tenga en cuenta el número de días del mes y horas luz de cada día, en función de la latitud, para lo cual se introduce el índice de iluminación

mensual en unidades de 12 horas, que se multiplica a la ETP sin ajustar, para obtener la ETP según Thornthwaite en mm/mes.

$$ETP = e * L$$

Donde:

e = evapotranspiración mensual sin ajustar en mm

L = factor de corrección del número de días del mes (Nd) y la duración astronómica del día N (horas sol).

$$L = \frac{Nd}{30} \times \frac{N}{12}$$

En el anexo 3 se encuentra la tabla para la obtención del coeficiente de corrección para "L".

Se extrajeron de la carpeta *Índices* los datos de temperatura y precipitación de cada una de las estaciones evaluadas de la zona de estudio. Para el caso de la temperatura, el programa arrojó temperaturas máximas y mínimas medias, por lo que se realizó el cálculo para obtener las temperaturas medias de cada estación y por cada mes. En cuanto a la precipitación, de igual forma se promediaron los datos de cada estación para obtener un valor por cada mes. Posteriormente se realizó el cálculo de la ETP mediante la ecuación de Thornthwaite.

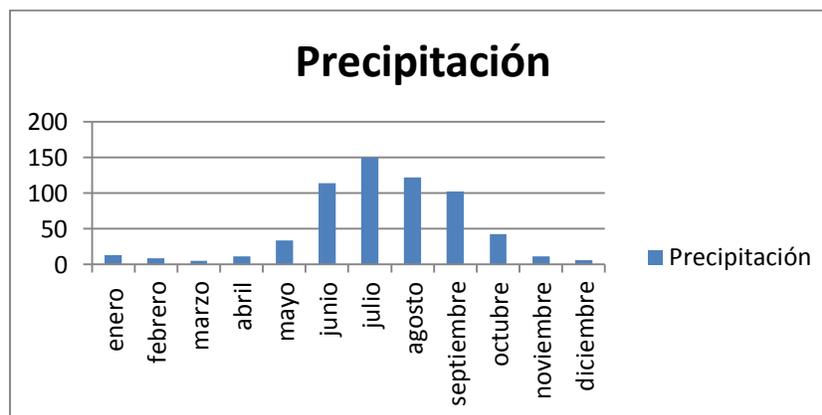
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Clima del Valle de Celaya

A partir de las normales climatológicas de temperatura máxima y mínima y precipitación por cada estación de la zona de estudio se analizó el clima del Valle de Celaya y se realizaron gráficas por cada variable.

El Valle de Celaya de acuerdo a la clasificación climática de Kôppen, tiene un clima semiseco, semicálido con lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor de 5%. Es importante tener esto en cuenta ya que a partir de esta información se determina qué tan factible puede ser la implementación de algún cultivo en una determinada zona.

En la gráfica 13 se muestra el comportamiento de la precipitación por cada mes de la zona de estudio. Los datos de las 9 estaciones se promediaron para obtener una gráfica general para la precipitación, en el mismo caso se encuentran las gráficas de temperatura media, máxima y mínima.



Gráfica 13. Precipitación mensual en mm en el Valle de Celaya, Gto.

La precipitación media anual para la zona de estudio fue de 620 mm durante el periodo de 1981-2010, alcanzando un máximo de lluvias durante los meses de junio a septiembre, tiempo en el que transcurre la mayor parte de la etapa de

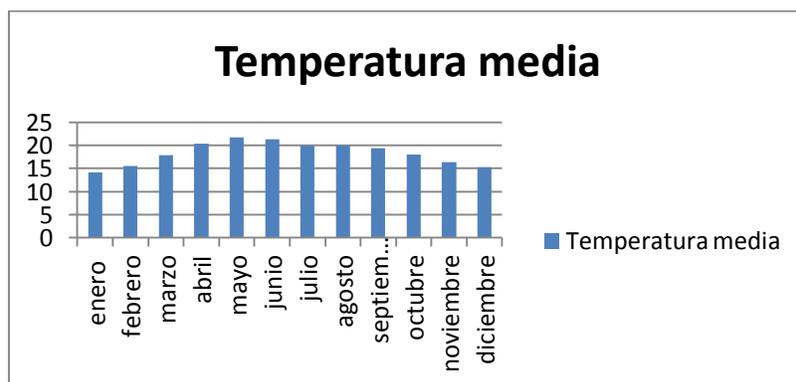
crecimiento de los cultivos de maíz y sorgo. La precipitación acumulada durante estos 4 meses de mayores lluvias fue de 487 mm.

El cultivo de maíz requiere de 500 a 1000 mm durante todo su ciclo, con un mínimo de 400 mm, por lo que la precipitación en estos meses satisface al mínimo las necesidades hídricas del cultivo.

En cuanto al sorgo éste requiere de 450-600 mm durante su ciclo, por lo que sus requerimientos de agua son cubiertos por completo. En los otros meses del año se presentan pocas lluvias, teniendo un mínimo en el mes de febrero.

De manera general, se puede establecer que las lluvias para la zona del Valle de Celaya han presentado un comportamiento normal de 1981 a 2010.

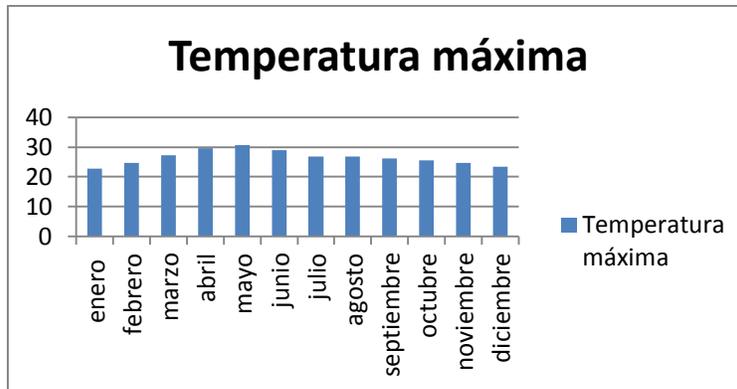
En cuanto a la temperatura media de la zona de estudio su comportamiento para el mismo período se muestra en la gráfica 14.



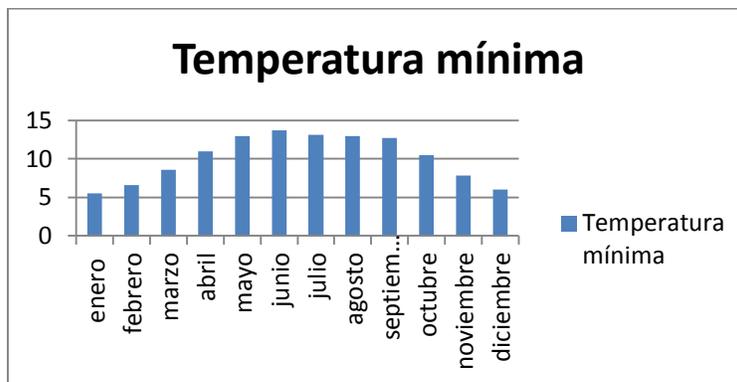
Gráfica 14. Temperatura promedio mensual en °C en el Valle de Celaya, Gto.

La temperatura media anual es de 18.3 °C, teniendo valores que van desde 14.2°C para el mes más frío, que es enero, y de 21.8°C en mayo. La temperatura promedio durante los meses de mayo a septiembre, tiempo de siembra-cosecha de ambos cultivos, se encuentra en 20.4 °C, oscilando entre 19 y 21 °C, por lo que se considera óptimo para los cultivos.

Las temperaturas máximas y mínimas en el Valle de Celaya han presentado el siguiente comportamiento (gráficas 15 y 16):



Gráfica 15. Temperatura máxima promedio mensual en el Valle de Celaya



Gráfica 16. Temperatura mínima promedio mensual en el Valle de Celaya

La temperatura máxima promedio anual es de 26.4°C, alcanzando un máximo en el mes de mayo con 30.6°C. El maíz y el sorgo son afectados con temperaturas mayores a 38 °C, por lo que las temperaturas máximas de la zona de estudio no han sido perjudiciales para ambos cultivos. En cuanto a las temperaturas mínimas, el promedio anual para la zona de estudio es de 10.1°C, en donde enero presenta la temperatura mínima más baja con 5.5°C alcanzando una mayor temperatura mínima en el mes de junio con 13.7°C. Estas temperaturas no han representado problemas para el maíz y sorgo, por ejemplo, para ambos cultivos la temperatura mínima para la germinación es de 10 °C, por lo que las necesidades térmicas en esta fase fenológica se cubren perfectamente de acuerdo a lo que ha mostrado el comportamiento de las temperaturas mínimas en el mes de mayo, que es cuando se realizan las siembras de ambos cultivos en esta zona.

No obstante lo anterior, de acuerdo con información del SMN, en la zona de estudio se han presentado diversos eventos extremos en ciertas fechas, que se han repetido mostrándose en el cuadro 19, algunos valores extremos para cada una de las estaciones climatológicas acotándose si se han presentado de nuevo o no.

Cuadro 19. Eventos extremos en el Valle de Celaya

Estación	Variable	Mes	inicio	Fin	Num. de años	Valor	Fecha	Se ha repetido
Apaseo	TM	May	1961	2010	47	42 °C	1961-05-21	NO
		Jun	1961	2010	48	39 °C	1961-06-07	SI
		Sep	1961	2010	48	38.5 °C	1961-09-01	SI
	Tm	Sep	1961	2010	48	4 °C	1975-09-25	SI
		Oct	1961	2010	48	3 °C	1965-10-23	SI
A. el Alto	TM.	Jun	1961	2010	47	38 °C	1962-06-10	SI
	Tm.	Sep	1961	2010	47	6 °C	1975-09-25	SI
	Pp	Ago	1961	2010	47	78 mm	1964-08-23	SI
Cortazar	TM	May	1961	2009	44	37.5 °C	1983-05-06	SI
	Tm	Jun	1961	2009	45	1 °C	2004-06-27	NO
El Terrero	Tm	Ago	1963	2010	48	4 °C	1977-08-26	SI
	Pp	May	1963	2010	48	130 mm	1973-05-16	NO
Ameche	TM	May	1974	2010	33	39.5 °C	1993-05-19	SI
	Tm	May	1974	2010	33	5 °C	1998-05-01	SI
Neutla	TM	May	1963	2010	44	38.5 °C	1971-05-04	SI
	Tm	Jul	1963	2010	45	9 °C	2008-07-22	SI
	Pp	Sep	1963	2010	46	101 mm	2010-09-07	NO
La Gavia	Tm	Sep	1979	2010	32	6 °C	1989-09-29	SI
	Pp	Ago	1979	2010	31	93 mm	1995-08-22	NO
El Obraje	Tm	Jun	1980	2010	31	4 °C	2001-06-08	SI
	Pp	Ago	1980	2010	31	60 mm	1994-08-07	SI

Nota: TM – temperatura máxima; Tm – temperatura mínima

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SMN

Los eventos extremos de temperaturas, tanto máximas como mínimas, se han repetido en la mayoría de las estaciones. Las temperaturas máximas oscilan entre 37 y 39 °C y las mínimas entre 1 y 9 °C. En el cuadro 19 se registraron los datos correspondientes a los meses de mayo a octubre, período en el que se desarrollan los cultivos de maíz y sorgo y que podrían ser afectados en su desarrollo por algún evento extremo, dependiendo de la duración del mismo y de la etapa en la que se encuentre el cultivo. Los extremos en precipitación han variado, en algunos casos como en la estación de Apaseo el Alto, el día 23 de agosto de 1964 se

registró una precipitación de 78 mm. En comparación con los extremos de temperatura, la precipitación difiere ya que los extremos en las lluvias no se han repetido; por lo tanto, en cuestión de temperaturas tanto máximas como mínimas se puede pensar que algo ha estado sucediendo para que estos extremos se repitan. No obstante, estos eventos pueden deberse a ondas de calor o frentes fríos que se hayan presentado en las fechas descritas. Con el cálculo de los índices de cambio climático para la zona de estudio, se da un panorama de cuál sería la tendencia de estos eventos extremos.

3.2 Análisis y control de calidad de los datos del Valle de Celaya.

Como se describió en el capítulo anterior, al correr el control de calidad en el programa RclimDex, se generaron carpetas, la que fue nombrada como “log” contiene archivos que se analizaron como primer medida del control de calidad de los datos. Se realizó una inspección visual de cada grafico para detectar aquellos valores extremos que requirieron de corrección o validación, estas gráficas dieron una primera visualización del contenido de los posibles errores de las variables evaluadas. Esta inspección se hizo para cada estación meteorológica.

Sólo la carpeta “log” contiene archivos, en las demás carpetas se fue presentado información hasta haber calculado los índices de cambio climático.

En la carpeta *log* se encontraron los siguientes archivos:

- *clave_estación_prpQC.csv*: Se encuentra en formato csv de Excel que indica valores imposibles de precipitación, por ejemplo, valores negativos o demasiado altos.
- *clave_estación_tempQC.csv*: Indica valores imposibles de temperatura.
- *_tepstdQC.csv*: Contiene datos de temperatura más allá de los límites indicados. Este archivo marca los valores anómalos de la serie de acuerdo al criterio de desviación estándar establecido. Indica las fechas en que aquellos valores ocurrieron.

- `clave_estación_prcpPLOT.pdf`: Se encuentran dos gráficas, una de frecuencia y otra de la serie de precipitación señalando los espacios donde no hay datos.
- `clave_estación_dtrPLOT.pdf`: Es una gráfica que señala la diferencia entre temperatura máxima y mínima diaria.
- `clave_estación_tmaxPLOT.pdf`: Gráfica de la serie para la temperatura máxima.
- `clave_estación_tminPLOT.pdf`: Gráfica de la serie para la temperatura mínima.
- `clave_estación_tepstdQC.csv`: Datos que determinan valores extremos en la serie de tiempo.

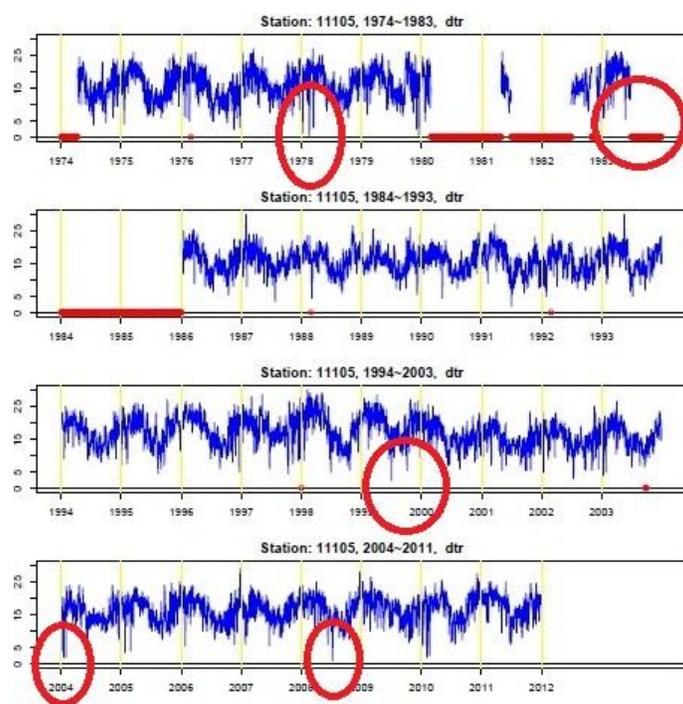
Las gráficas de temperaturas máximas y mínimas fueron las de mayor importancia, ya que fue en donde se pudo observar la periodicidad de los datos y ver, de forma gráfica, su variación; dicho en otras palabras, se observaron los datos sospechosos que pudieron generarse por un error de digitalización en la toma de datos o bien que en verdad hubiera sucedido un extremo en la temperatura en el año en donde se encuentra ese valor, por lo tanto, estos valores debieron ser analizados.

El programa también generó un archivo llamado `claveestación_indcal.csv` el cual fue creado a partir del archivo guardado en formato `txt` y que contenía las correcciones a los datos en el control de calidad hecho por RclimDex. A partir de este archivo se calcularon los índices de cambio climático. Este archivo puede ser modificado de acuerdo al resultado del control de calidad hecho en expedientes, es decir, se hacen las correcciones pertinentes para proceder al cálculo de los índices.

En esta parte solamente se presentan, a manera de ejemplo, los resultados gráficos obtenidos para una estación, la 11105, Ameche de Apaseo el Grande, ya que se trata del primer paso que es el control de calidad de los datos proporcionados por el SMN.

Como se indicó, estas gráficas son representaciones de los “outliers”, documentos vitales analizados para el control de calidad en expedientes del SMN, fueron analizadas de manera visual y solo dieron un primer acercamiento a los posibles extremos que fueron corregidos o aceptados.

La gráfica 17 indica la diferencia entre la temperatura máxima y la mínima y sus respectivos extremos. La gráfica que RclimDex realizó automáticamente en el control de calidad indica el año en que ocurrió un posible evento extremo. El período de la serie de observaciones para esta estación fue de 1974-2011, ya que el período de cada estación depende del año de inicio de toma de datos de cada una de ella, como se describió en el cuadro 16.



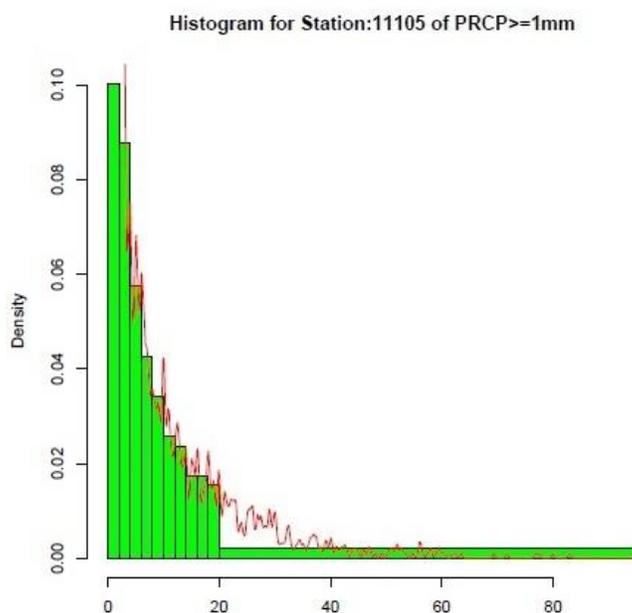
Gráfica 17. Rango diario de temperatura de la estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.

Cabe señalar que esta gráfica no muestra en forma especial los valores que requieren verificación, por lo que, como se había mencionado, sólo dan una idea general del comportamiento de la diferencia entre la temperatura máxima y la mínima. Los valores faltantes están marcados con una línea en el eje horizontal y,

encerrados en círculo se muestran aquellos posibles eventos extremos o errores que requieren de una corrección, no siendo los únicos ya que, observando detenidamente la gráfica existen más que fueron corregidos o aceptados como verdaderos en los archivos “outliers”.

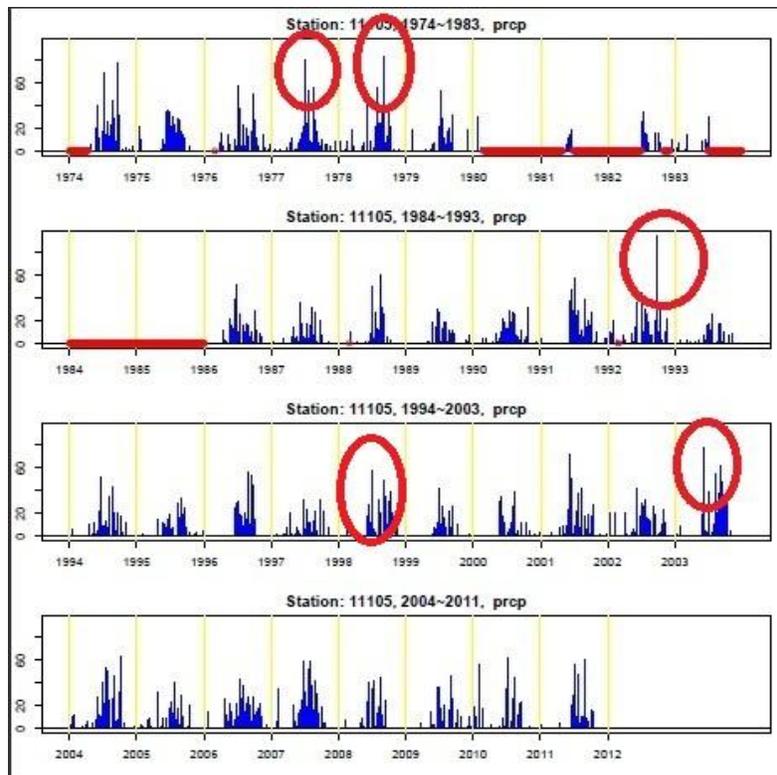
Para la precipitación el programa generó dos gráficas que se encuentran en la carpeta *log* en el archivo *clave_estación_prctpLOT.pdf*: un histograma de las observaciones y otra de las series de precipitación. En las gráficas 18 y 19 se muestran los dos tipos de gráficas generadas por RclimDex de la estación Ameche.

En el histograma de observaciones de la gráfica 18 se muestra que la mayor cantidad de precipitaciones, a lo largo de los años observados, se encontró entre 1 y 20 milímetros, presentándose una baja cantidad en precipitaciones mayores.



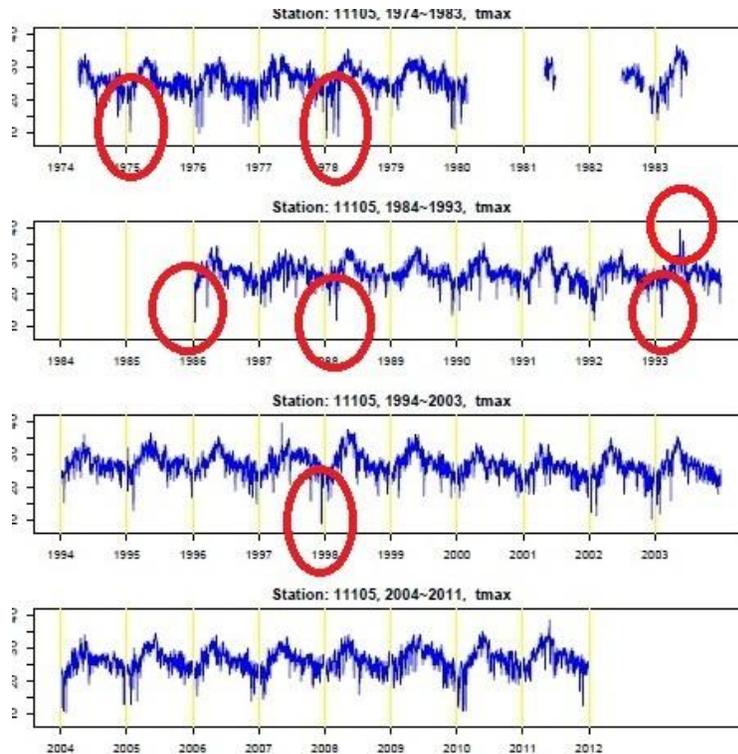
Gráfica 18. Histograma de observaciones

En la gráfica 19 se muestran las series de la precipitación, encerrados en círculo se encuentran aquellos valores extremos que, de igual manera que la gráfica anterior fueron corregidos o validados de acuerdo a los “outliers”.



Gráfica 19. Series de precipitación

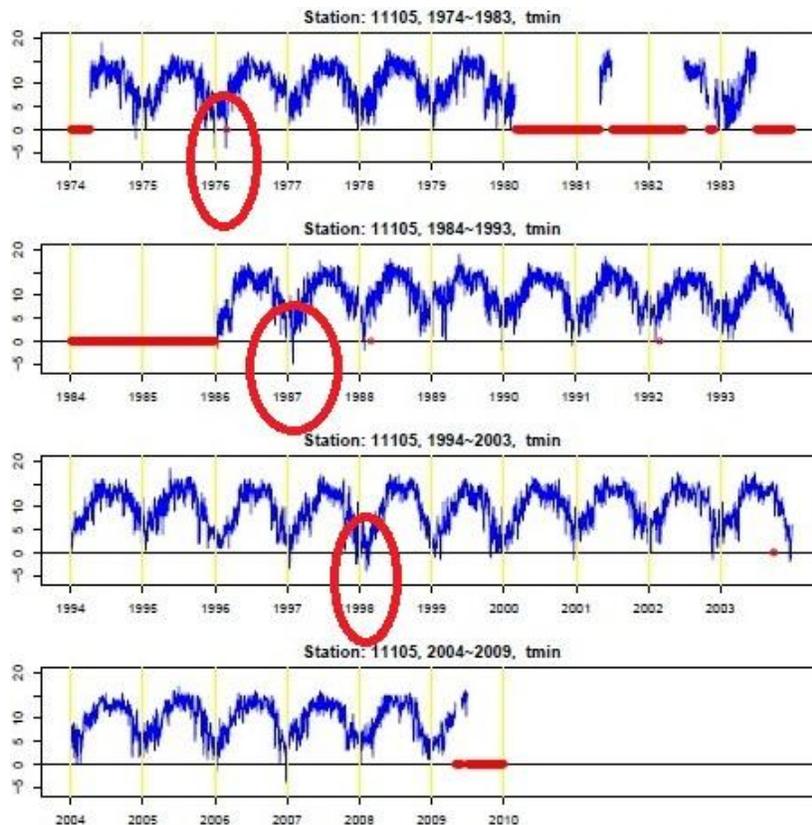
Las gráficas más importantes para el análisis fueron las de temperatura máxima y mínima que se encuentran dentro de la carpeta *log*, ya que en éstas se visualizó de mejor manera el comportamiento de las temperaturas. En la gráfica 20 se muestra la serie de observaciones de la estación Ameche para la temperatura máxima, así como sus posibles eventos extremos.



Gráfica 20. Temperatura máxima (11105_tmaxPLOT.pdf) generado por RclimDex, estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.

Como se puede observar en la gráfica 20, lo que se encuentra encerrado en círculo son algunos valores que fueron analizados en primera instancia por el programa RclimDex y que indican extremos, que fueron analizados en los archivos “outliers”. El comportamiento de estas temperaturas puede considerarse como normal, ya que si se observa un año, por ejemplo, 1989-1990, las temperaturas máximas se presentan en el verano y posteriormente en el invierno estas temperaturas disminuyen (dando la forma de una campana de Gauss). Si la gráfica hubiera mostrado líneas continuas, evidentemente hubiera existido un error enorme en los datos.

De igual forma, en la gráfica 21 de temperatura mínima se detectaron algunos valores extremos o dudosos.



Gráfica 21. Temperatura mínima (11105_tminPLOT.pdf) generado por RclimDex, estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.

Los círculos en rojo marcan los extremos en temperatura, en este caso para la temperatura mínima de la estación 11105. Las líneas rojas marcan ausencia de información. El comportamiento de las temperaturas mínimas puede considerarse como normal a excepción, claro, de los valores marcados en círculo.

La observación de las gráficas de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima permitió un primer acercamiento o una idea de cómo se ha comportado el clima en el período de datos de cada estación meteorológica. Como se observó en las gráficas anteriores, existen valores extremos que se corroboraron o desecharon usando los “outliers” del control extra de calidad. Se realizó la inspección visual a cada una de las gráficas de las 9 estaciones, encontrando los mismos resultados que en las anteriores, es decir, se presentaron de manera gráfica algunos posibles eventos extremos.

Otro archivo importante que se revisó fue el nombrado clave_estación_tepstdQC.csv, el cual sirvió para determinar si cualquier valor marcado como extremo es, en realidad, un valor extremo. En el cuadro 20 se muestra el resultado del control de calidad que realizó el programa, que muestra el año, mes y día de los posibles valores extremos en temperatura diaria, tanto máxima como mínima.

Cuadro 20. Resultados del control de calidad de RclimDex para temperatura, estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.

Año	Mes	Día	tmaxlow	Tmax	Tmaxup	tminlow	Tmin	tminup
1976	12	23	14	14	33.39	-7.69	11	17.05
1978	2	19	11.52	10.1	39.15	-4.09	9.5	15.88
1978	2	21	13.91	13	36.73	-3.8	7	15.14
1978	3	17	11.35	9.5	42.43	-2.09	6.5	17.34
1978	3	18	11.91	9	42.69	-3.65	1	18.69
1979	12	3	12.21	12	35.12	-2.09	9.5	14.88
1990	5	7	18.72	18	43.67	4.04	11.5	19.46
1997	12	13	9.66	9	36.25	-5.6	0.5	17.81
2002	2	11	12.24	11.5	36.18	-4.13	2.5	16.37
2003	3	30	16.38	16	39.65	-0.31	5.5	17.39
2004	1	30	10.83	10.5	36.86	-3.03	8.5	15.06
2010	2	17	13.88	13	36.6	-6.38	8	17.72
2010	2	18	12.05	11	38.31	-4.66	8.5	16.6

tmaxlow = temperatura maxima más baja
Tmax = temperatura máxima
Tmaxup = temperatura maxima más alta
Tminlow= temperatura mínima más baja
Tmin= temperatura mínima
Tminup= temperatura mínima más alta

En el cuadro 20, al analizar los años en que se presentaron los posibles valores extremos, se observa que el comportamiento de las temperaturas ha sido normal y no existen datos que requieran de una mayor verificación o que los datos hayan presentado alguna incongruencia; por ejemplo, el valor de la temperatura máxima (Tmax), es menor que el umbral superior especificado (Tmaxup), por lo tanto existe lógica en esos valores, ya que si hubiera sido lo contrario ($Tmax > Tmaxup$) evidentemente hubiese sido un error que hubiera requerido de verificación. Lo mismo pasa con los valores de temperatura mínima, los cuales fueron congruentes.

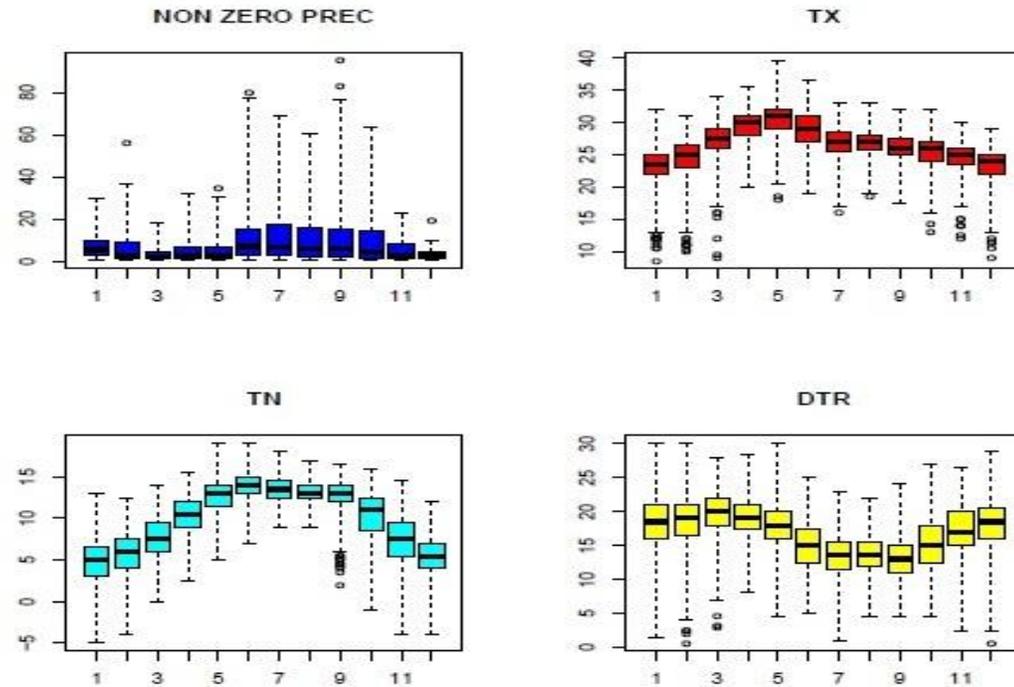
Este análisis se realizó en cada estación meteorológica y al haber realizado las observaciones a cada una de ellas, se encontraron los mismos resultados, es decir, no se encontraron incongruencias en los datos.

Se realizó un control extra de calidad de los datos con el RclimDex, el cual generó una nueva carpeta llamada *extraqc*.

Dentro de esta carpeta se encuentran tres archivos con gráficos:

1. *_boxes.pdf*., que contiene diagramas mensuales para el conjunto de la serie para precipitación por encima de 0 mm, temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria y diferencia entre máxima y mínima.
2. *_boxseries.pdf*., que muestra diagramas de caja para las mismas variables, pero se encuentran graficados como series anuales.
3. *_rounding.pdf*, que contiene diagramas de frecuencia de los 10 valores posibles del punto decimal. En precipitación se omiten los valores 0 y permite comprobar si las series están redondeadas.

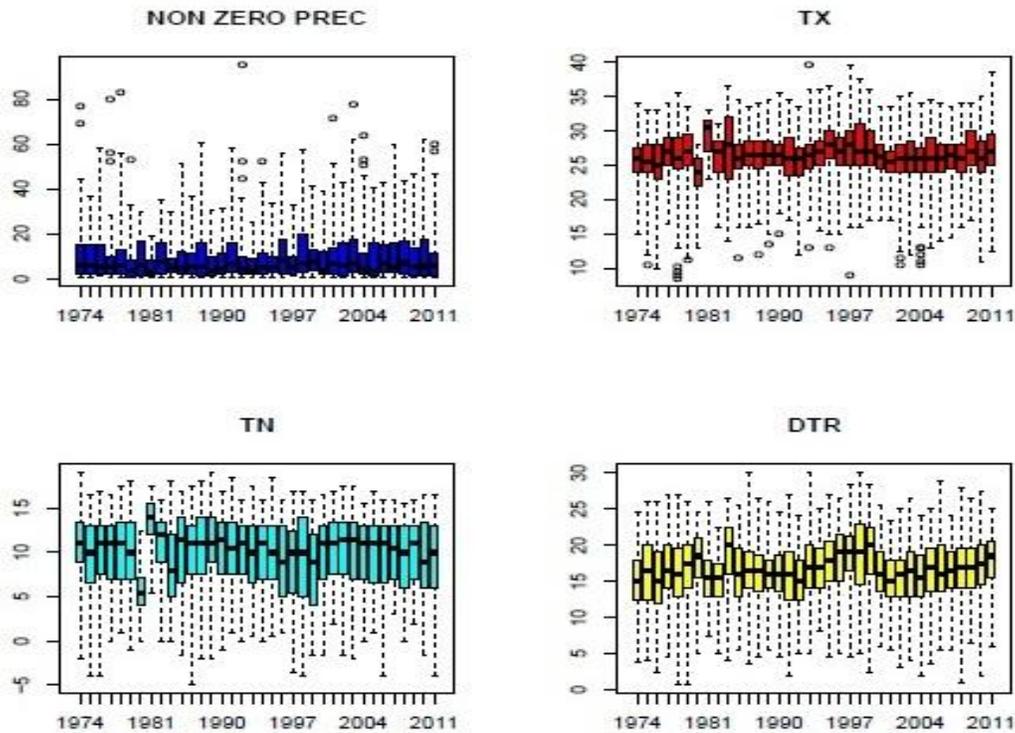
En la gráfica 22 se muestran los diagramas que generó el control extra de calidad para la precipitación, temperatura máxima y mínima diaria, así como su diferencia.



Gráfica 22. Diagramas mensuales para precipitación, temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria y diferencia entre máxima y mínima. Estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.

Como se puede observar en la gráfica 22, los pequeños círculos representan los valores fuera de límite u outliers, que requieren de verificación en archivos. En relación a la precipitación (non zero prec) se puede observar que existe una precipitación mayor a 80 mm, por lo que se debe checar este dato. En cuanto a temperatura máxima (TX) existen varios datos que de igual forma requieren verificación; para la temperatura mínima (TN) hubo solo un valor que requiere ser checado, y la diferencia entre temperatura máxima y mínima de igual forma presentó algunos outliers.

En el archivo llamado `_boxseries.pdf`, se presentan las mismas variables descritas en los diagramas anteriores, sólo que en este caso se presentan de forma anual. En la gráfica 23 se muestran los diagramas anuales para la estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.



Gráfica 23. Series anuales para precipitación, temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria y diferencia entre máxima y mínima. Estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.

En estos diagramas se reitera la presencia de los valores extremos mostrados en los diagramas de la gráfica 22, solo que en este caso los ubican en su año de ocurrencia, así en conjunto, en estas dos gráficas (22 y 23) se muestran el mes y el año en que un valor presentó un evento extremo o que pueda ser algún error de digitación o calibración del instrumental meteorológico, por lo que deben ser validados o corregidos con los outliers.

Los gráficos expuestos son los más importantes dentro de la carpeta *extraqc*, en este caso, al haber realizado el control extra de calidad se muestra el mes y año de los posibles valores extremos. Después de haber hecho la inspección visual de cada una de las estaciones y sus respectivas gráficas se procedió a corroborar esta información en los expedientes del Servicio Meteorológico Nacional.

El proceso de control de calidad de los datos continuó con los outliers, archivos generados al correr el control extra de calidad con el RclimDex. Como se describió en la metodología, cada estación meteorológica fue cotejada con expedientes del SMN, realizando un análisis lógico, histórico, climatológico y meteorológico de cada uno de los datos generados por el archivo. El proceso fue arduo y cuidadoso, ya que no podía quedar ningún dato sin verificar. En la tabla 2 se muestran los datos del expediente de la estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.

Tabla 2. Hoja de outliers de la estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.

pc up
2010 2 3 56 11 9 2
2000 5 29 34.3 28 13.5 14.5
1977 6 29 80 27 13 14
1978 9 8 83 26 14 12
1992 9 27 95 25 15 10
1979 12 3 19 12 9.5 2.5
tx up
tx low
1975 1 19 22.5 12 8 4
1975 1 20 10 10.5 6 4.5
1976 1 20 0 12.5 2.5 10
1976 1 21 0 12 5.5 6.5
1978 1 9 8.7 8.5 7 1.5
1986 1 13 0 11.5 -0.5 12
1992 1 29 20.5 12 7 5
2002 1 13 20.9 12.5 7.5 5
2003 1 27 8.5 12 7 5
2004 1 10 0 12 8 4
2004 1 16 9 11 9 2
2004 1 30 11.3 10.5 8.5 2
2010 1 8 19 12 6.5 5.5
1976 2 5 0 10 4 6
1976 2 22 0 12 7 5
1976 2 23 0 12 0 12
1978 2 19 8.5 10.1 9.5 0.6
2002 2 11 19.7 11.5 2.5 9
2010 2 1 10.5 11 5 6

En la tabla 2 se observa el registro de los datos que a lo largo de los años el SMN ha hecho con su propio personal y con gente externa que apoya a dicha institución, ya que algunas de las estaciones se encuentran en terrenos de propiedad privada, proporcionándoles a los propietarios un pequeño incentivo económico. De aquí, posiblemente es de donde deriva la inconsistencia en los datos, ya que quienes toman las lecturas de los instrumentos cometen errores o bien, en ocasiones, las personas encargadas de hacer la toma de datos se ausentan y para ese día ya no hubo registro o cambian de domicilio dejando la estación climatológica abandonada por lo que se procede a suspenderla.

En la tabla 3 se observa el resultado de la inspección visual dato por dato y, delante de cada año analizado, la clave empleada para validar dichos valores.

Tabla 3. Outliers, hoja de resultados de la inspección en expedientes del SMN

Station	Year	pc up	freq	ix	in	Annotations
-1978	3	17	18.5	9.5	6.5	3 A
2000	5	29	34.3	28	13.5	14.5
-1977	6	29	80	27	13	14 A
-2003	6	4	77.6	29.5	12.5	17 ** < 3.8
-1978	9	8	83	26	14	12 A, T=12,23
1992	9	27	95	25	15	10
tx up						
tx low						
-1975	1	19	22.5	12	8	4 H
-1975	1	20	10	10.5	6	4.5 H
-1976	1	20	0	12.5	2.5	10 H
-1976	1	21	0	12	5.5	6.5 H
-1978	1	9	8.7	8.5	7	1.5 H
-1986	1	13	0	11.5	-0.5	12 H
1992	1	29	20.5	12	7	5
2002	1	13	20.9	12.5	7.5	5
2003	1	27	8.5	12	7	5 ** 20
2004	1	10	0	12	8	4
2004	1	16	9	11	9	2
2004	1	30	11.3	10.5	8.5	2
-1976	2	5	0	10	4	6 H
-1976	2	22	0	12	7	5 H
-1976	2	23	0	12	0	12 H
-1978	2	19	8.5	10.1	9.5	0.6 H
2002	2	11	19.7	11.5	2.5	9
-1978	3	16	0	15.1	12	3.1 H
-1978	3	17	18.5	9.5	6.5	3 H
-1978	3	18	2	9	1	8 H
-1986	3	21	0	16	7	9 H
-1988	3	5	10.2	12	7.5	4.5 ** 28
-2003	3	30	0	16	5.5	10.5 ** 26
-1990	5	7	5.7	18	11.5	6.5 ** 19, T=6,29,30
-1990	5	8	9.5	18.5	14	4.5 ** 27.5, T=6,29,30
2008	7	8	42	16	15	1
-2003	9	25	0	-99.99	13.5	-113.49
2003	9	29	0	-99.99	14	-113.99
2003	9	30	0	-99.99	-99.99	0
-1976	10	8	27	14.1	9	5.1 H
-1976	10	9	0	13	8.5	4.5 H
-1974	11	12	0	15	9	6 H
-1976	11	4	0	12	4	8 H
-1976	11	5	0	14	5	9 H

Como se observa en la tabla 3, delante de cada dato analizado se encuentra anotada la clave descrita en la metodología, por ejemplo, la hoja corresponde a la estación Ameche, se observa para el año 1978 en la parte de precipitación (pc up) anotada la clave A, T=12, 23, que significa dato de precipitación validado en expediente con lluvias trazas (lluvias apenas perceptibles) los días 12 y 13 del día 8 de septiembre.

El resultado del análisis de los datos contra expedientes del SMN arrojó que la mayor parte de los datos de las 9 estaciones fueron validados, con sólo unos cuantos valores estimados y otros pocos corregidos, lo que indica la aceptación de eventos extremos en el periodo de años analizados para cada estación. La

corrección de datos se debió a una mala digitalización en los mismos, por lo que no influyó como representación de algún evento extremo.

Los datos estimados y corregidos fueron capturados en el archivo llamado *_indcal.csv*, generado durante el control de calidad, habiéndose realizado, como ya se indicó, la corrección para cada estación, ya que fue a partir de este archivo y de sus respectivas correcciones de donde se realizó el cálculo de los índices de cambio climático.

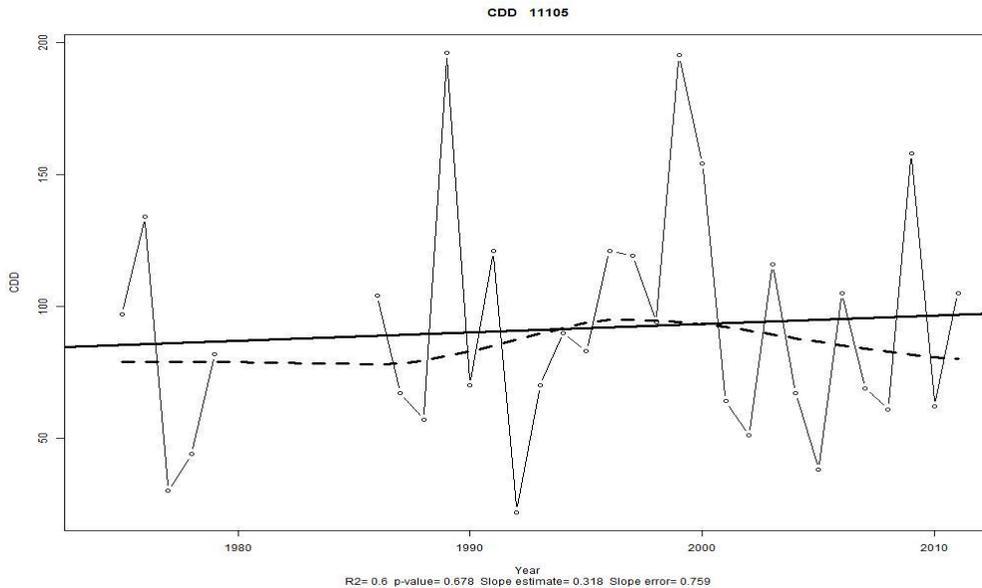
3.3 Índices de cambio climático

Después de haber realizado el cálculo de los índices de cambio climático con el programa RclimDex, se prosiguió a hacer el análisis de los datos obtenidos.

Como resultado del trabajo realizado por RclimDex, en la carpeta *índices* se almacenó la serie de índices resultantes, es decir, los datos de cada índice evaluado, en formato Excel. En la carpeta *plots* se generaron gráficas en formato JPEG para propósito de visualización de los índices, cada gráfica está nombrada de acuerdo al nombre del índice que representa. En la carpeta *trend* se ha almacenado un archivo en formato Excel llamado *claveestación_trend.csv* el cual almacena las tendencias lineales para el mismo período para el que fueron calculados los índices. Este archivo contiene: índice evaluado, año inicial, año final, pendiente, desviación estándar de la pendiente y valor de la pendiente. El contenido de los archivos de estas carpetas fue utilizado para el análisis de las tendencias de los índices de cambio climático.

A continuación se muestran las gráficas generadas por el programa, en las que se observan, de forma general para la estación de Ameche, que es con la que se están explicando los resultados, las tendencias de un determinado índice evaluado. Se evaluaron 20 índices de las 9 estaciones lo que dio un total de 180 gráficas, que fueron analizadas, pero no se incluyen físicamente en los resultados.

Uno de los índices evaluados fue para determinar el número máximo de días secos consecutivos (Consecutive dry days, CDD), es decir, cuando la precipitación fuera menor a 1 mm (gráfica 24)

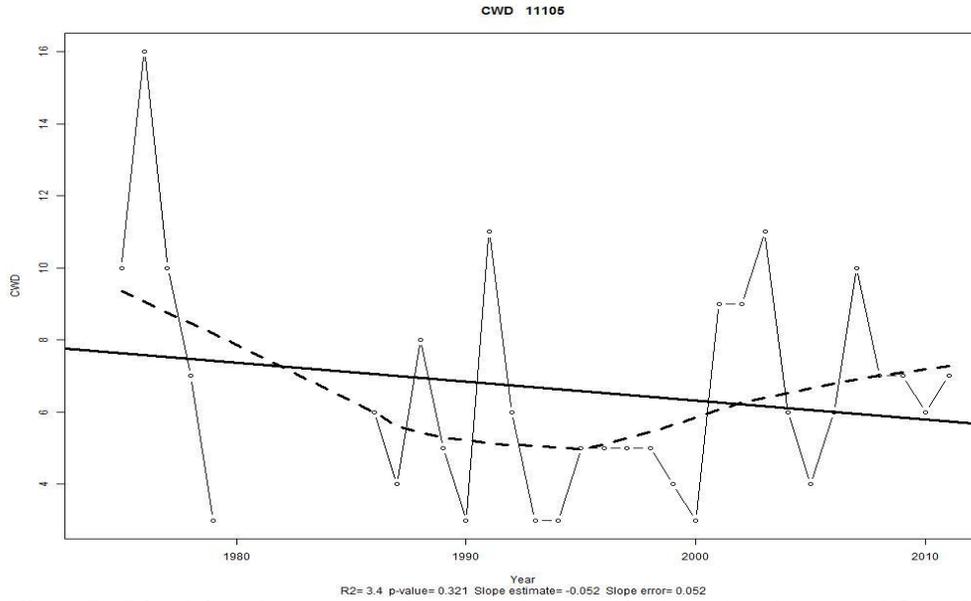


Gráfica 24. Días secos consecutivos (CDD) para la estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.

La línea unida por pequeños círculos corresponde al índice anual de días secos, la línea recta continua es un ajuste de tendencia por mínimos cuadrados y la línea punteada un ajuste de regresión lineal localmente ponderada.

Se puede observar, para el índice evaluado, que existe una tendencia a un aumento en los días secos.

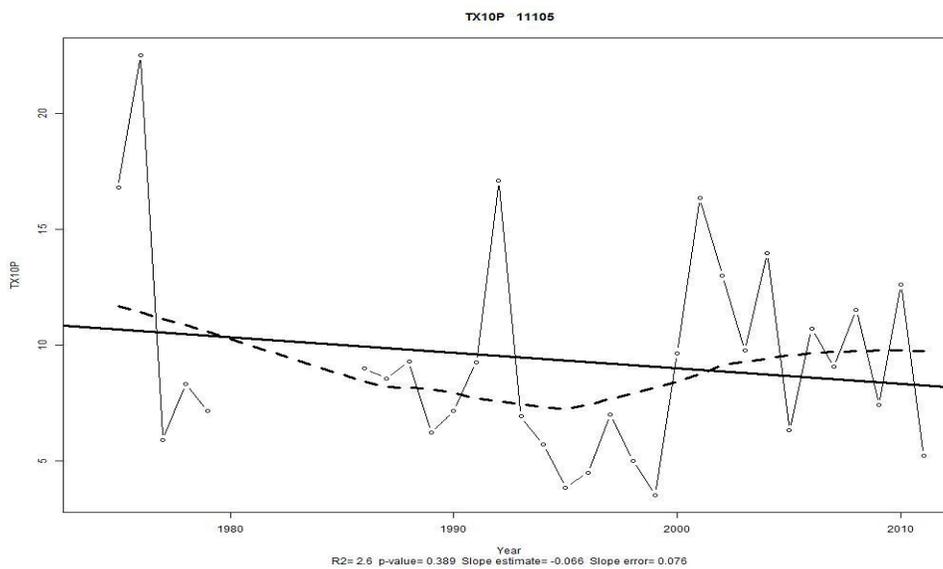
Los resultados de los días húmedos consecutivos (Consecutive wet days, CWD), cuando la precipitación fue mayor a 1 mm, se presentan en la gráfica 25.



Gráfica 25. Días húmedos consecutivos para la estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.

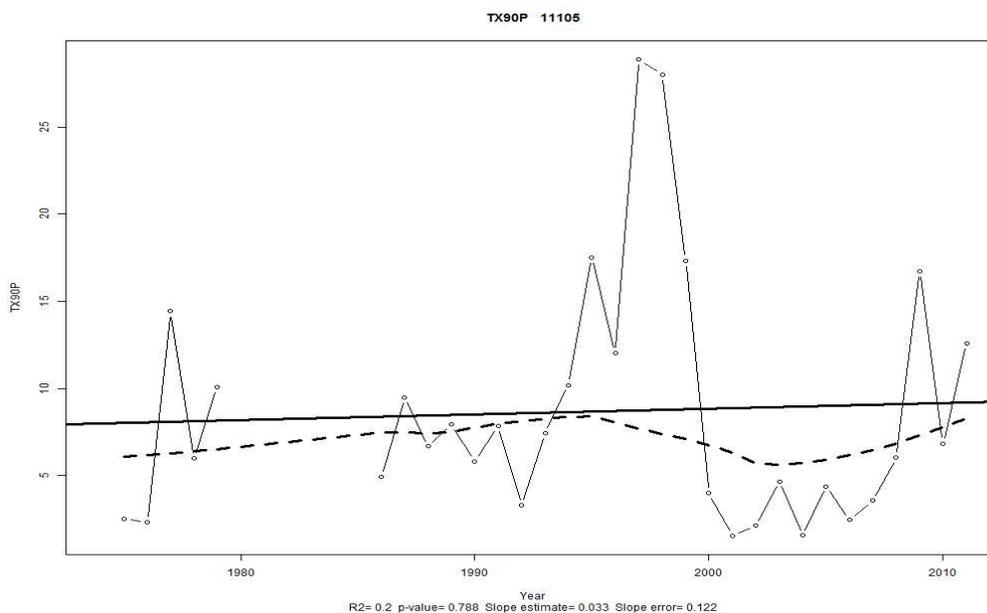
Existe una tendencia a que disminuyan los días húmedos, por lo tanto. Resulta lógico el resultado que muestran las dos gráficas anteriores, ya que existe una tendencia a presentarse días más secos para la estación Ameche.

En cuanto a las temperaturas, en la gráfica 26 se muestran los resultados del cálculo de los días frescos (cuando la temperatura máxima es menor al percentil 10).



Gráfica 26. Días frescos, estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.

La gráfica muestra que existe una tendencia a que los días frescos disminuyan y, para corroborar esto, en la gráfica 27 se muestra lo opuesto, es decir, los días calurosos (cuando la temperatura máxima es mayor al percentil 90).



Gráfica 27. Días calurosos, estación Ameche, Apaseo el Grande, Gto.

En la gráfica se puede observar que hay una tendencia a que los días calurosos aumenten, por lo tanto, junto con el índice de días frescos, la tendencia indica un aumento en los extremos de las temperaturas máximas, lo que se traduce en días más calurosos.

Las gráficas anteriormente mostradas son el reflejo de los resultados de algunos índices evaluados por el programa RclimDex para la estación Ameche, por lo que para facilitar el análisis e integración de los datos y gráficas generadas por el programa se determinó agrupar las estaciones climatológicas, utilizando como criterio conjuntar aquellas estaciones que presentaran las mismas condiciones en cuanto a relieve. De esta forma se integraron los resultados y se pudo realizar un análisis de las tendencias, en forma general, para la zona del Valle de Celaya. Las estaciones ya agrupadas se muestran en la imagen 3.

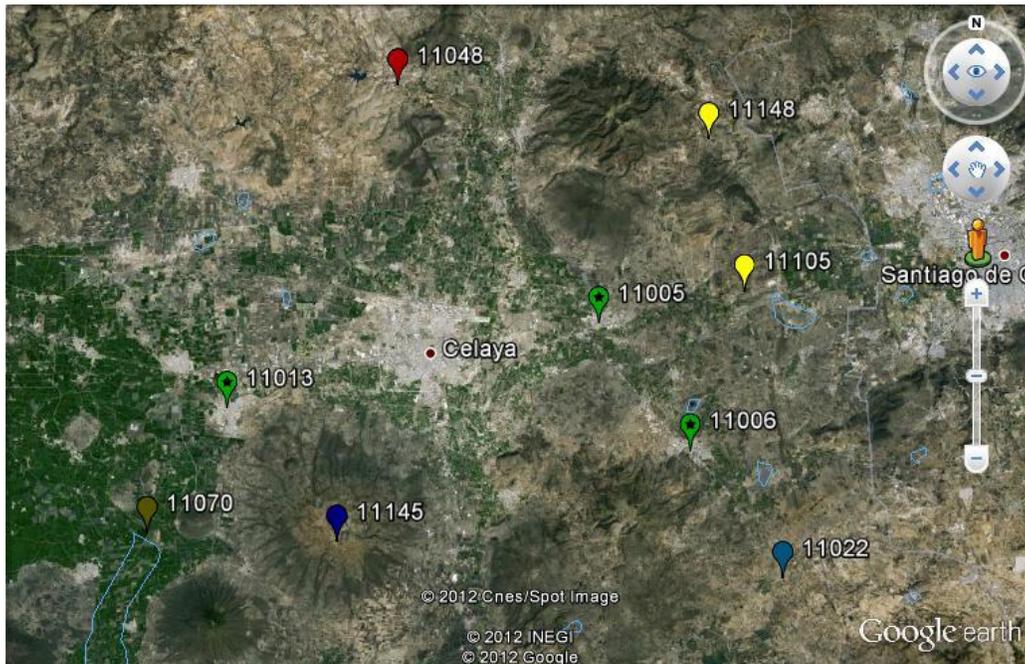


Imagen 3. Agrupación de estaciones

Nota: las estaciones que tienen el mismo color pertenecen al mismo grupo, las demás son estaciones independientes para evaluación.

3.3.1 Análisis de las tendencias.

Como se ha mencionado, RclimDex calcula tendencias lineales para el mismo periodo para el que los índices fueron calculados. Los resultados del cálculo de los índices de cambio climático se guardaron en el archivo llamado claveestación_trend.csv y a partir de este archivo se utilizaron los datos de la pendiente y el p-value de cada índice evaluado, por cada estación meteorológica, y se establecieron las siguientes reglas de análisis de las tendencias:

- Si p-value < 0.05 es significativo (S).
- Si p-value > 0.05 no es significativo (N).
- Usando el valor de la pendiente (slope) se determina la tendencia (T), siendo esta positiva (+) o negativa (-).

En el cuadro 21 se muestra un extracto del contenido de los datos del archivo *trend* de la estación 11105, Ameche.

Cuadro 21. Datos del archivo *trend* usados para el análisis de tendencias, estación Ameche.

Índice	Año inicial	Año final	Pendiente (Slope)	Desviación estándar de la pendiente (STD of slope)	p-value
Temperatura máxima extrema (TXx)	1974	2011	0.037	0.03	0.224
Temperatura máxima más baja (TXn)	1974	2011	0.064	0.044	0.157
Temperatura mínima más alta (TNx)	1974	2011	-0.034	0.014	0.023
Temperatura mínima extrema (TNn)	1974	2011	0.039	0.036	0.283
Días frescos (TX10p)	1974	2011	-0.066	0.076	0.389

Como se mencionó, los datos que se usaron fueron la pendiente y el p-value; por ejemplo, para el índice temperatura máxima más baja (TXn) el valor de la pendiente fue de 0.064, por lo tanto su tendencia es positiva (+). El p-value para el mismo índice fue de 0.157, este valor es mayor a 0.05, por lo tanto, no es significativo. El índice de temperatura mínima más alta (TNx) tuvo un valor de pendiente de -0.034, por lo tanto su tendencia es negativa (-). El p-value es de 0.023, siendo un valor menor a 0.05, por lo tanto es significativo. De esta manera se realizó el análisis para los 20 índices usados en la presente investigación, por cada estación climatológica.

Teniendo definidas las reglas para el análisis de las tendencias se procedió a elaborar cuadros de comparaciones o cuadros de contingencia entre los índices de las diferentes estaciones, ya fuera en grupo o solitarias como se mostró en la imagen 3 y así buscar la congruencia o incongruencia en los resultados.

La contingencia de las estaciones agrupadas se muestra en los cuadros 22, 23, 24. 25. 26 Y 27.

En el cuadro 22 se observa una tendencia positiva de días secos consecutivos (CDD) en las tres estaciones evaluadas mientras que los días húmedos consecutivos (CWD) tienen una tendencia negativa, por lo que hay una tendencia a que disminuyan las precipitaciones.

Cuadro 22. Comparación entre los indicadores de cambio climático en tres estaciones del Valle de Celaya, Gto. (11005, Apaseo; 11006, Apaseo el Alto y 11013, Cortazar).

Índice	Descripción	11005		11006		11013	
		S	T	S	T	S	T
CDD	Días secos consecutivos	N	+	N	+	N	+
CSDI	Duración de los períodos fríos	S	-	S	-	N	+
CWD	Días húmedos consecutivos	N	-	N	-	N	-
FD	Días con helada	N	+	N	-	N	-
GSL	Estación de crecimiento	N	+	N	+	N	+
PRCPTOT	Precipitación total anual	N	+	N	-	N	-
R10mm	Días con lluvia mayor a 10 mm	N	+	N	-	N	-
R20mm	Días con lluvia mayor a 20 mm	N	+	N	-	N	+
R25mm	Días con lluvia mayor a 25	N	+	N	+	N	+
TN10p	Noches frías	S	-	S	-	N	-
TN90p	Noches cálidas	S	+	N	-	S	+
TNn	Temperatura mínima extrema	N	+	S	+	N	+
TNx	Temperatura mínima más alta	N	+	N	+	N	+
TX10p	Días frescos	N	-	N	-	S	-
TX90p	Días calurosos	N	-	S	-	N	+
TXn	Temperatura máxima más baja	N	+	N	+	N	+
TXx	Temperatura máxima extrema	S	-	N	-	N	+
DTR	Rango diurno de temperatura	S	-	N	-	N	-

Nomenclatura:
S/N: Representa si el análisis de la serie es estadísticamente significativa (S) o no significativa (N).
T: Representa si la tendencia de la serie es positiva (+) o negativa (-).

En el cuadro 23 se observa que la precipitación total anual (PRCPTOT) tiene una tendencia positiva en las dos estaciones. Los días frescos (TX10p) tienen una tendencia negativa y los días calurosos (TX90p) presentan tendencia positiva en las dos estaciones. Las temperaturas máximas extremas (TXx) presentan tendencia positiva.

Cuadro 23. Comparación entre los indicadores de cambio climático en dos estaciones del Valle de Celaya, Gto. (11105, Ameche y 11148, El Obraje).

Índice	Descripción	11105		11148	
		S	T	S	T
CDD	Días secos consecutivos	N	+	N	+
CSDI	Duración de los períodos fríos	N	+	N	+
CWD	Días húmedos consecutivos	N	-	N	+
FD	Días con helada	N	+	S	+
GSL	Estación de crecimiento	N	NT	N	+
PRCPTOT	Precipitación total anual	N	+	N	+
R10mm	Días con lluvia mayor a 10 mm	N	+	N	+
R20mm	Días con lluvia mayor a 20 mm	N	+	N	+
R25mm	Días con lluvia mayor a 25	N	+	N	+
TN10p	Noches frías	N	+	S	+
TN90p	Noches cálidas	S	-	S	-
TNn	Temperatura mínima extrema	N	+	N	+
TNx	Temperatura mínima más alta	S	-	S	-
TX10p	Días frescos	N	-	N	-
TX90p	Días calurosos	N	+	S	+
TXn	Temperatura máxima más baja	N	+	N	+
TXx	Temperatura máxima extrema	N	+	S	+
DTR	Rango diario de temperatura	N	+	S	+
Nomenclatura: S/N: Representa si el análisis de la serie es estadísticamente significativa (S) o no significativa (N). T: Representa si la tendencia de la serie es positiva (+) o negativa (-). NT: Ninguna tendencia					

Para la estación 11022, El Terrero (cuadro 24) la tendencia de días secos consecutivos (CDD) es positiva, debido a un posible decremento en las precipitaciones, los días calurosos (TX90p) de igual forma presentan tendencia positiva. En cuanto a los días húmedos consecutivos (CWD) tienen tendencia negativa, es decir, podrían disminuir.

Cuadro 24. Indicadores de cambio climático en la estación 11022, El Terrero.

Índice	Descripción	11022	
		S	T
CDD	Días secos consecutivos	S	+
CSDI	Duración de los períodos fríos	N	-
CWD	Días húmedos consecutivos	N	-
FD	Días con helada	N	+
GSL	Estación de crecimiento	N	+
PRCPTOT	Precipitación total anual	N	+
R10mm	Días con lluvia mayor a 10 mm	N	-
R20mm	Días con lluvia mayor a 20 mm	N	+
R25mm	Días con lluvia mayor a 25	N	+
TN10p	Noches frías	N	-
TN90p	Noches cálidas	N	-
TNn	Temperatura mínima extrema	S	+
TNx	Temperatura mínima más alta	N	+
TX10p	Días frescos	N	-
TX90p	Días calurosos	N	+
TXn	Temperatura máxima más baja	N	+
TXx	Temperatura máxima extrema	N	+
DTR	Rango diurno de temperatura	N	+
Nomenclatura: S/N: Representa si el análisis de la serie es estadísticamente significativa (S) o no significativa (N). T: Representa si la tendencia de la serie es positiva (+) o negativa (-).			

En la estación Neutla (cuadro 25) se observa una tendencia negativa en las temperaturas máximas extremas (TXx). Los días con lluvias mayores a 25 mm tienen una tendencia a disminuir al igual que la precipitación total anual.

Cuadro 25. Indicadores de cambio climático en la estación 11048, Neutla.

Índice	Descripción	11048	
		S	T
CDD	Días secos consecutivos	S	+
CSDI	Duración de los períodos fríos	N	-
CWD	Días húmedos consecutivos	N	-
FD	Días con helada	N	+
GSL	Estación de crecimiento	N	-
PRCPTOT	Precipitación total anual	N	-
R10mm	Días con lluvia mayor a 10 mm	N	+
R20mm	Días con lluvia mayor a 20 mm	N	-
R25mm	Días con lluvia mayor a 25	N	-
TN10p	Noches frías	N	+
TN90p	Noches cálidas	N	-
TNn	Temperatura mínima extrema	N	+
TNx	Temperatura mínima más alta	S	-

Cuadro 25 continua...

Cuadro 25 continuación

TX10p	Días frescos	S	+
TX90p	Días calurosos	S	-
TXn	Temperatura máxima más baja	N	-
TXx	Temperatura máxima extrema	S	-
DTR	Rango diurno de temperatura	S	-
Nomenclatura: S/N: Representa si el análisis de la serie es estadísticamente significativa (S) o no significativa (N). T: Representa si la tendencia de la serie es positiva (+) o negativa (-).			

Para la estación Santa Julia (cuadro 26) se observa que las precipitaciones en general tienen una tendencia positiva. Los días calurosos podrían aumentar y de igual forma que las anteriores estaciones la tendencia de días secos consecutivos es positiva.

Cuadro 26. Indicadores de cambio climático en la estación 11070, Santa Julia.

Índice	Descripción	11070	
		S	T
CDD	Días secos consecutivos	S	+
CSDI	Duración de los períodos fríos	N	+
CWD	Días húmedos consecutivos	N	-
FD	Días con helada	N	-
GSL	Estación de crecimiento	N	-
PRCPTOT	Precipitación total anual	N	+
R10mm	Días con lluvia mayor a 10 mm	N	-
R20mm	Días con lluvia mayor a 20 mm	N	+
R25mm	Días con lluvia mayor a 25	S	+
TN10p	Noches frías	N	-
TN90p	Noches cálidas	N	+
TNn	Temperatura mínima extrema	S	+
TNx	Temperatura mínima más alta	S	-
TX10p	Días frescos	N	-
TX90p	Días calurosos	N	+
TXn	Temperatura máxima más baja	N	+
TXx	Temperatura máxima extrema	N	-
DTR	Rango diurno de temperatura	N	+
Nomenclatura: S/N: Representa si el análisis de la serie es estadísticamente significativa (S) o no significativa (N). T: Representa si la tendencia de la serie es positiva (+) o negativa (-).			

En la estación de La Gavia (cuadro 27) los días calurosos muestran una tendencia positiva, por lo tanto, los días frescos disminuyen. Las lluvias en general tienen una tendencia positiva.

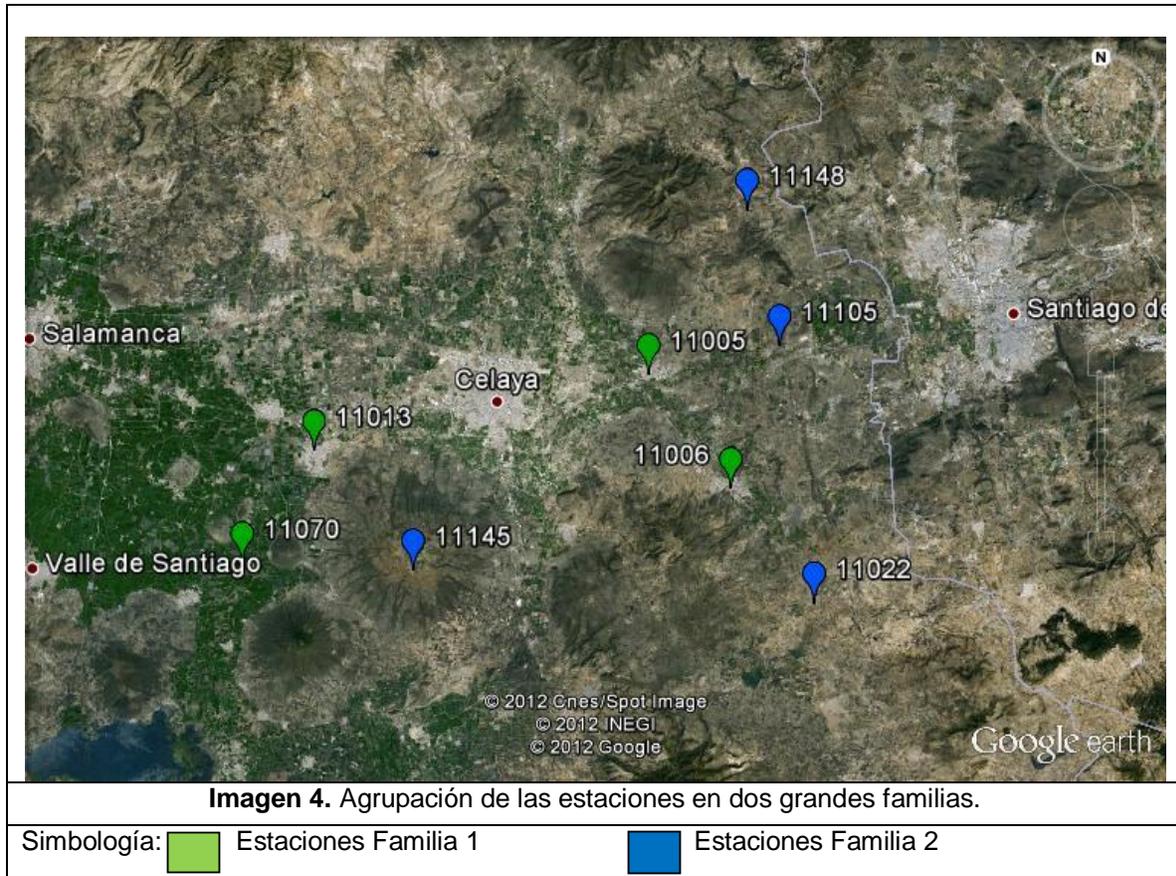
Cuadro 27. Indicadores de cambio climático en la estación 11145, La Gavia.

Índice	Descripción	11145	
		S	T
CDD	Días secos consecutivos	S	+
CSDI	Duración de los períodos fríos	N	+
CWD	Días húmedos consecutivos	N	-
FD	Días con helada	S	+
GSL	Estación de crecimiento	N	-
PRCPTOT	Precipitación total anual	N	+
R10mm	Días con lluvia mayor a 10 mm	N	+
R20mm	Días con lluvia mayor a 20 mm	N	+
R25mm	Días con lluvia mayor a 25	N	-
TN10p	Noches frías	S	+
TN90p	Noches cálidas	S	-
TNn	Temperatura mínima extrema	N	-
TNx	Temperatura mínima más alta	N	-
TX10p	Días frescos	S	-
TX90p	Días calurosos	S	+
TXn	Temperatura máxima más baja	N	+
TXx	Temperatura máxima extrema	S	+
DTR	Rango diurno de temperatura	S	+

Nomenclatura:
 S/N: Representa si el análisis de la serie es estadísticamente significativa (S) o no significativa (N).
 T: Representa si la tendencia de la serie es positiva (+) o negativa (-).

Una vez que se obtuvo el resultado del análisis de las tendencias de los cuadros de contingencia, se agruparon los índices que tuvieron la misma tendencia en cada grupo de estaciones, desechando aquellos que presentaron una tendencia diferente. Además de hacer esta agrupación se hizo una comparación de tendencias entre los grupos de 2 y 3 estaciones con aquellas estaciones que fueron evaluadas de manera individual (11022, 11048, 11070 y 11145) para determinar si se podían agrupar en estos grupos y así hacer mucho más homogéneo el análisis.

Como resultado de esta comparación de tendencias se logró obtener dos grandes familias de estaciones, junto con sus respectivas tendencias igualitarias (imagen 4).



En la familia 1, con 4 estaciones, se muestran los índices con las mismas tendencias tanto positivas como negativas, agrupadas en las variables de precipitación y temperatura. Resalta en las estaciones que los días secos consecutivos tienen una tendencia positiva y los días húmedos negativa. En cuanto a la temperatura, la máxima más baja tiene tendencia a aumentar.

En la familia 2 se observan tendencias positivas de días secos consecutivos; sin embargo, la precipitación total anual tiene tendencia positiva, por lo que podría haber lluvias fuertes en un corto periodo de tiempo. Los días calurosos tienen tendencia a aumentar al igual que la temperatura máxima extrema.

La estación 11048, Neutla, Comonfort, quedó fuera de los dos grandes grupos de familias de estaciones al no presentar las mismas tendencias, por lo que quedó totalmente descartada para su análisis.

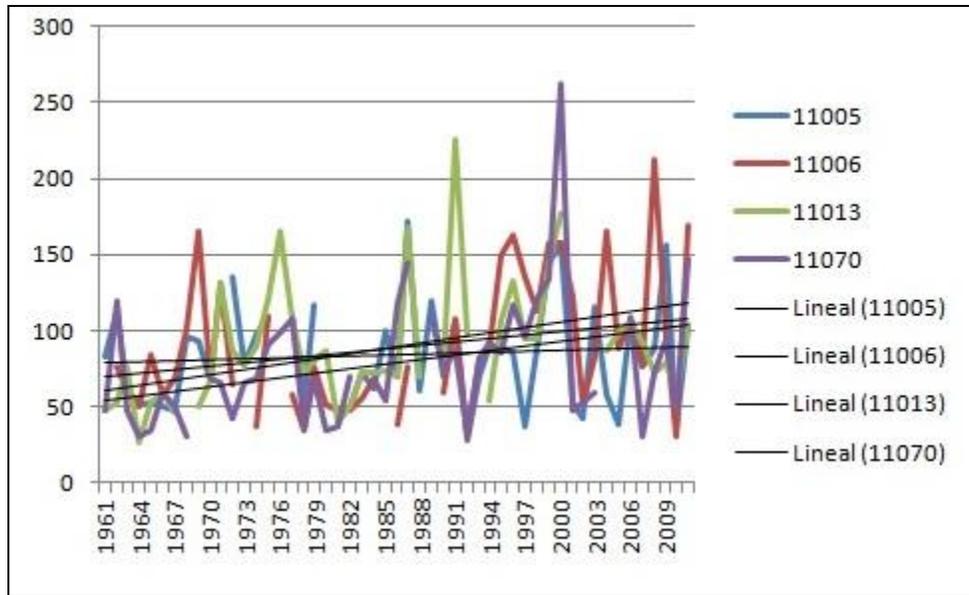
Para las estaciones de la familia 1 se tomó el período de 1961-2011 y para las de la familia 2 el periodo de 1979-2011, esto con el fin de establecer un período base de estudio, por lo que los datos que se utilizaron para generar las gráficas de tendencias comienzan en dichos años.

Con estos índices finales y sus tendencias y por cada una de las estaciones, se procedió a graficar cada índice, extrayendo los datos de la carpeta *índices*, obtenida en el cálculo de los índices de cambio climático, para así poder obtener un resultado que indicara de forma general lo que sucede en el Valle de Celaya.

A continuación se muestran las gráficas de las tendencias de cada uno de los índices para cada una de las variables y familia de estaciones.

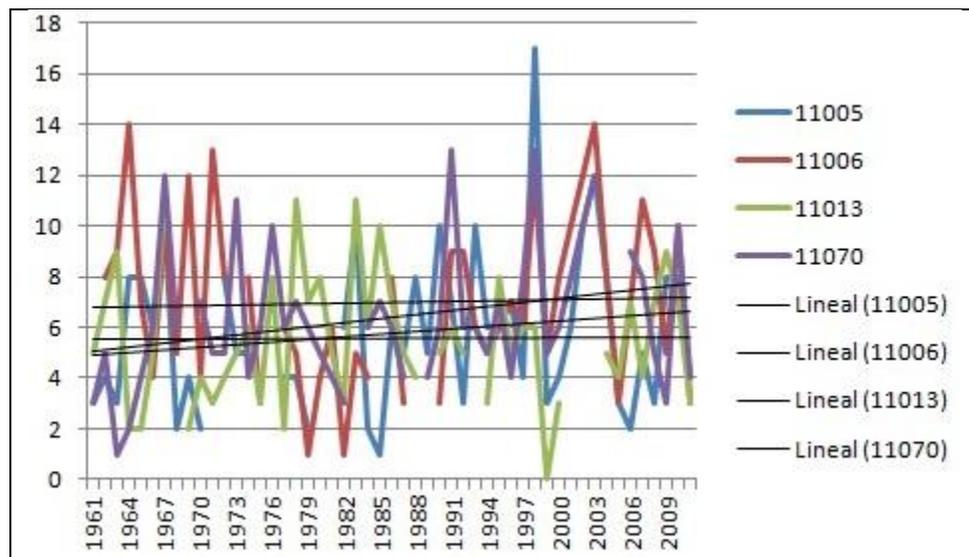
3.3.1.1. Precipitación en las estaciones de la familia 1

En la gráfica 28 se observa que, a partir de 1990, han aumentado los días secos, alcanzando un máximo en el año 2000 con 262 días consecutivos sin reporte de lluvias. Existe una tendencia a que haya más días secos, Por lo tanto, el rendimiento del maíz y sorgo sería menor por la escasez de agua.



Gráfica 28. Días secos consecutivos (CDD)

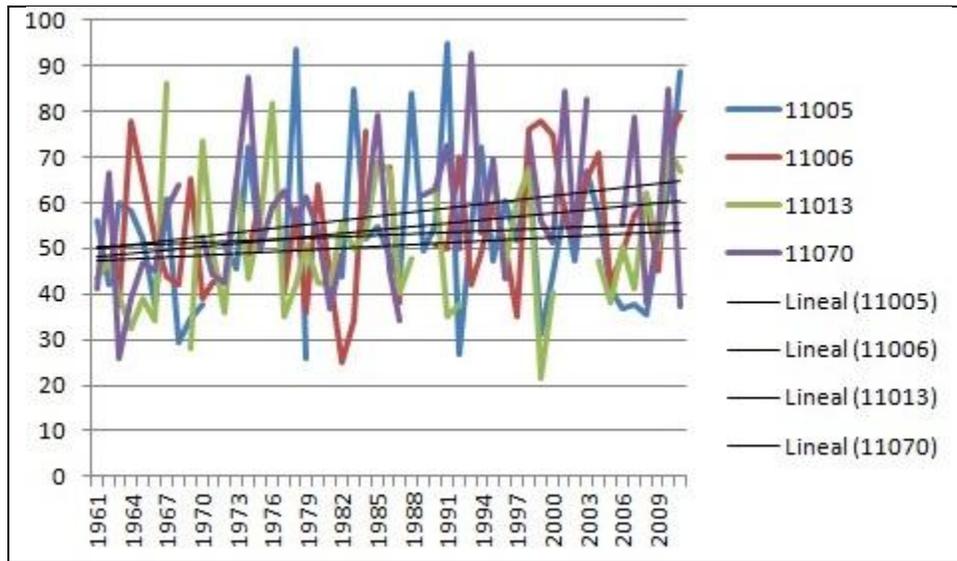
Por otro lado, existe una ligera tendencia a un aumento en número de días con precipitación mayor a 25 mm. El número de días con lluvias por arriba de este umbral ha oscilado entre 0 y 17 días al año, de acuerdo a este estudio, con información desde 1961 (gráfica 29)



Gráfica 29. Lluvia diaria mayor a 25 mm (R25mm)

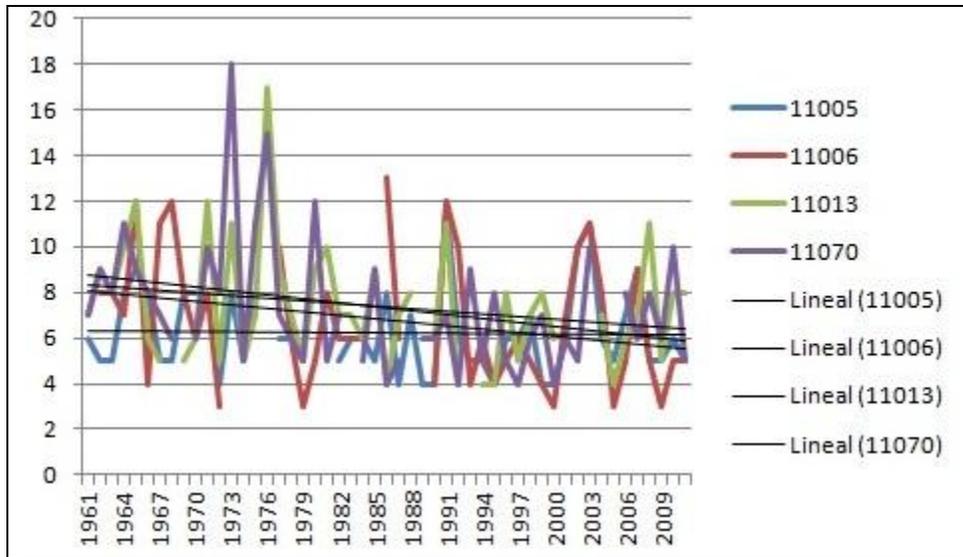
La lluvia máxima en 24 horas para este conjunto de estaciones se estableció en 1991 con 95 mm/día. La cantidad de lluvia máxima por día se ha mantenido en un

rango de entre 30 y 95 mm, pero la tendencia es hacia el aumento de lluvias torrenciales. Estas lluvias afectarían a los cultivos por el exceso de agua, habría erosión del suelo y el anegamiento de los suelos afectaría para poder cultivar (gráfica 30).



Gráfica 30. Cantidad máxima de precipitación en un día (RX1Day)

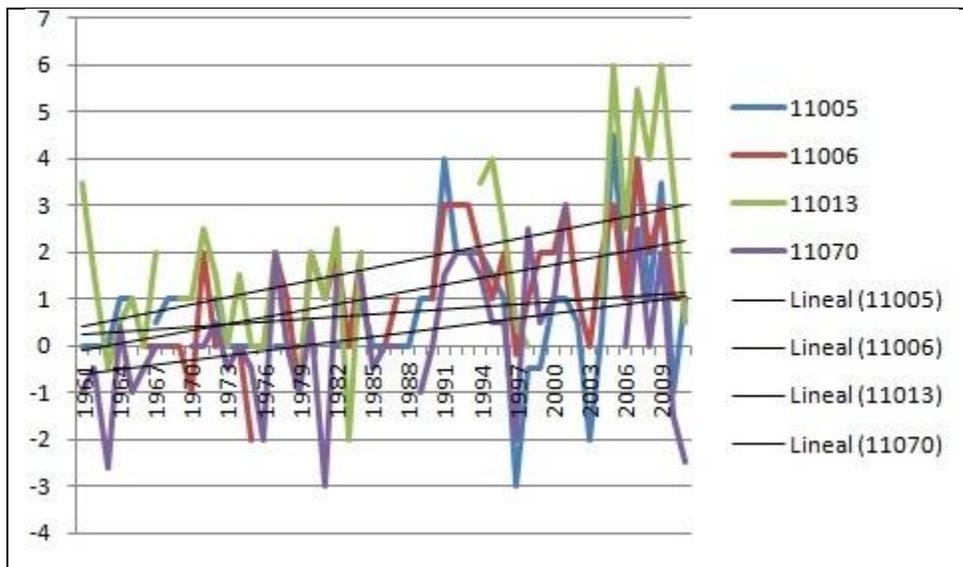
En la gráfica 31 se observa una disminución en el número de días húmedos consecutivos a partir de 1980. La tendencia es muy clara y es inversamente proporcional entre la disminución de números de días húmedos consecutivos (CWD) con el aumento de los días secos consecutivos (CDD).



Gráfica 31. Días húmedos consecutivos (CWD)

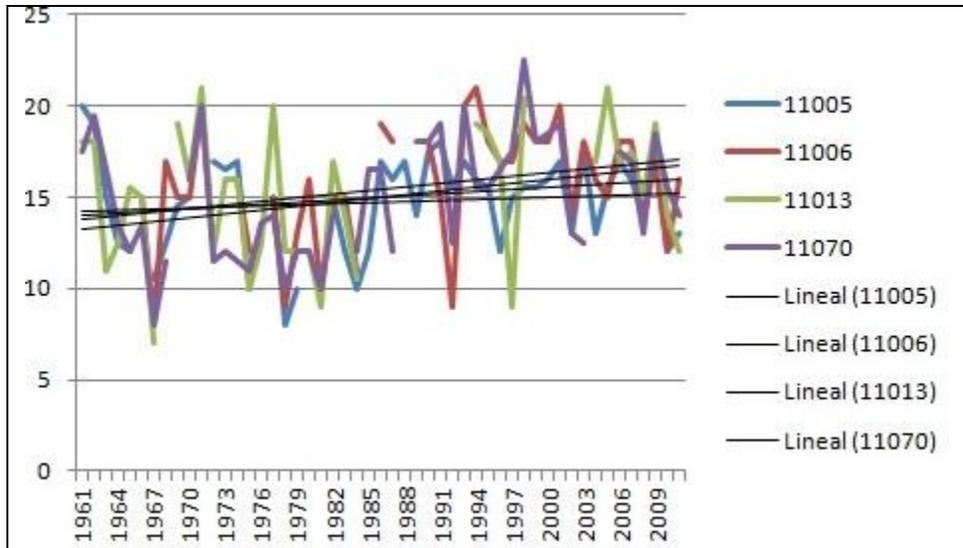
3.3.1.2 Temperatura en las estaciones de la familia 1

Se ha observado el incremento de las temperaturas mínimas diarias a partir del año 2005, como se observa en la gráfica 32.



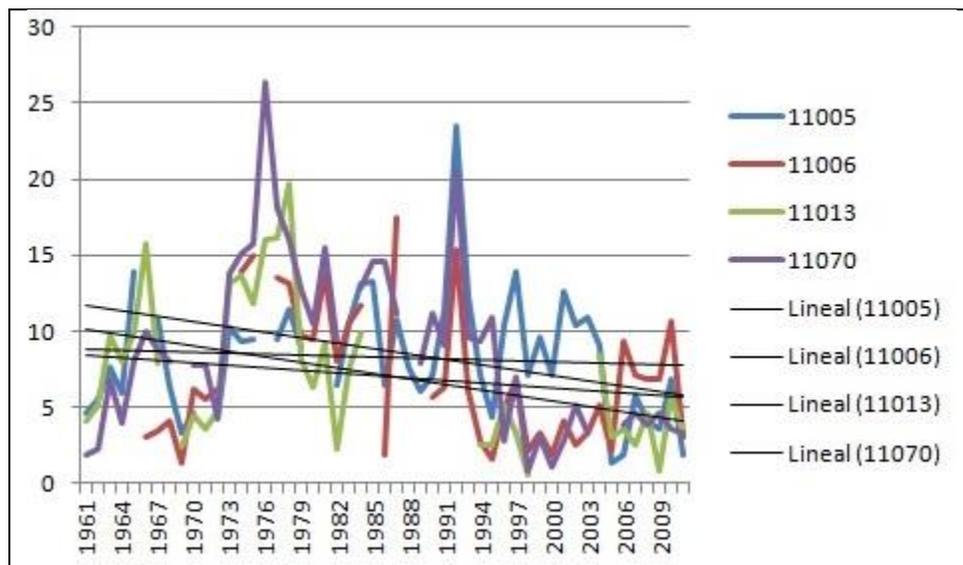
Gráfica 32. Temperatura mínima (TNn)

Asimismo, en la gráfica 33 se observa la tendencia al aumento de las temperaturas mínimas máximas, lo que se traduce en mañanas más calurosas.



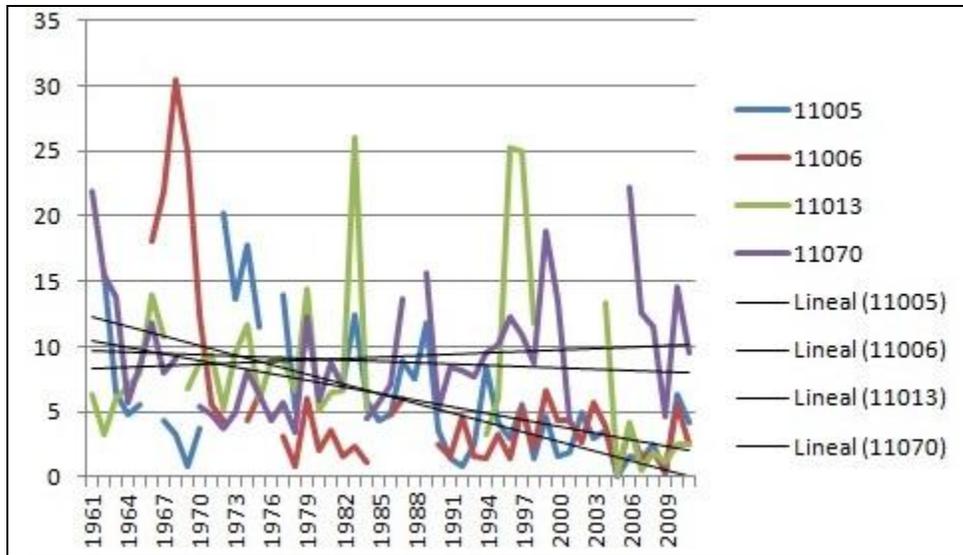
Gráfica 33. Valor mensual mínimo de temperatura máxima diaria (TXn)

En la gráfica 34 se observa que el porcentaje de días frescos tiende a disminuir, esto se ha registrado desde principios de los 90s.



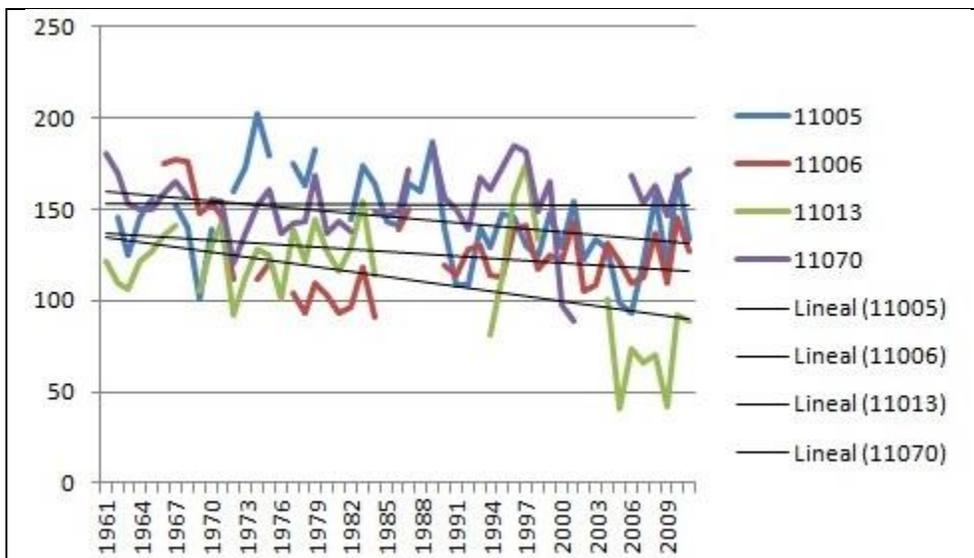
Gráfica 34. Porcentaje de días frescos (TX10p)

En la gráfica 35 se observa que los extremos de noches frías tienen una ligera tendencia a disminuir.



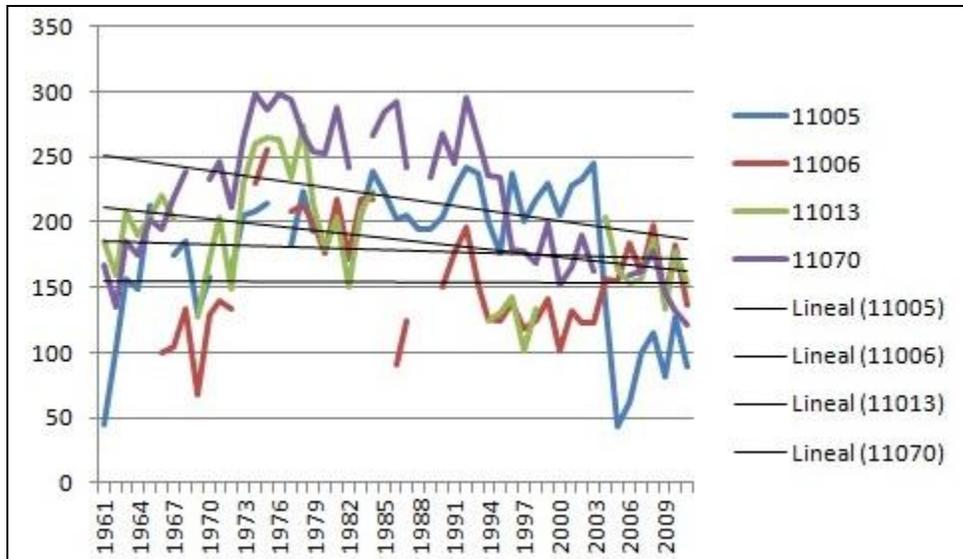
Gráfica 35. Noches frías (TN10p)

Existe una tendencia a que haya menos días con temperaturas menores a 10 °C, por lo tanto, puede haber menos días fríos (gráfica 36)



Gráfica 36. Número de días en un año cuando TN < 10°C)

La gráfica 37 muestra una tendencia a que disminuyan los días en donde la temperatura es menor a 28 °C. Por ejemplo, en 1976 hubo 298 días, mientras que para el año 2011 hubo 89 días.

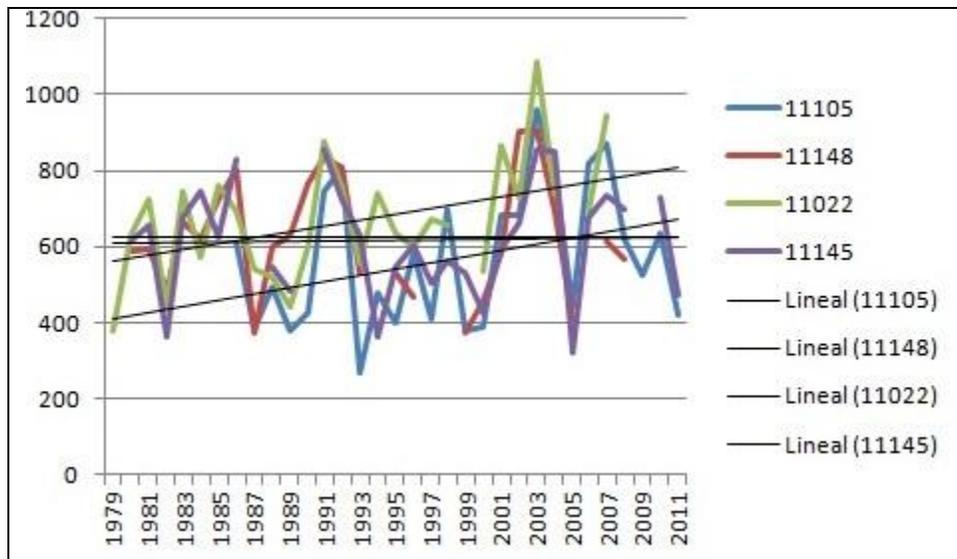


Gráfica 37. Número de días en un año en que la temperatura es <28°C (ID28)

Los índices anteriores de temperaturas (gráficas 32-37), muestran una tendencia de aumento de temperaturas mínimas y de noches y días más cálidos, y de menos noches frías. En lugares con entornos fríos podría haber mejores cosechas, no así en lugares con climas cálidos; las plagas de insectos más frecuentes (IPCC, 2007). El aumento de las temperaturas para la zona de estudio del Valle de Celaya afectaría a los cultivos, ya que un cambio de pocos grados propicia un cambio significativo en la tasa de crecimiento.

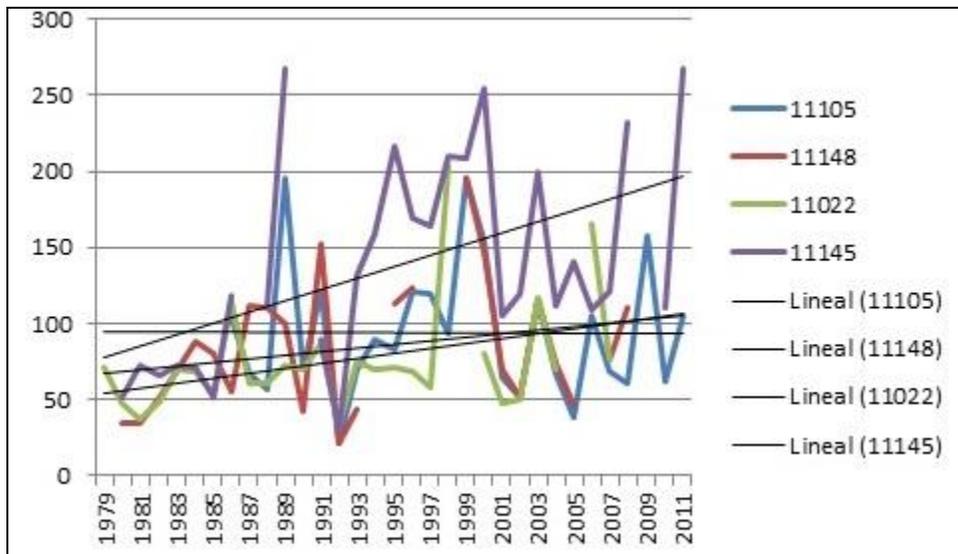
3.3.1.3 Precipitación en las estaciones de la familia 2

En la gráfica 38 se observa que existe una tendencia a un ligero aumento en la precipitación la cual tiene un promedio de 600 mm anuales.



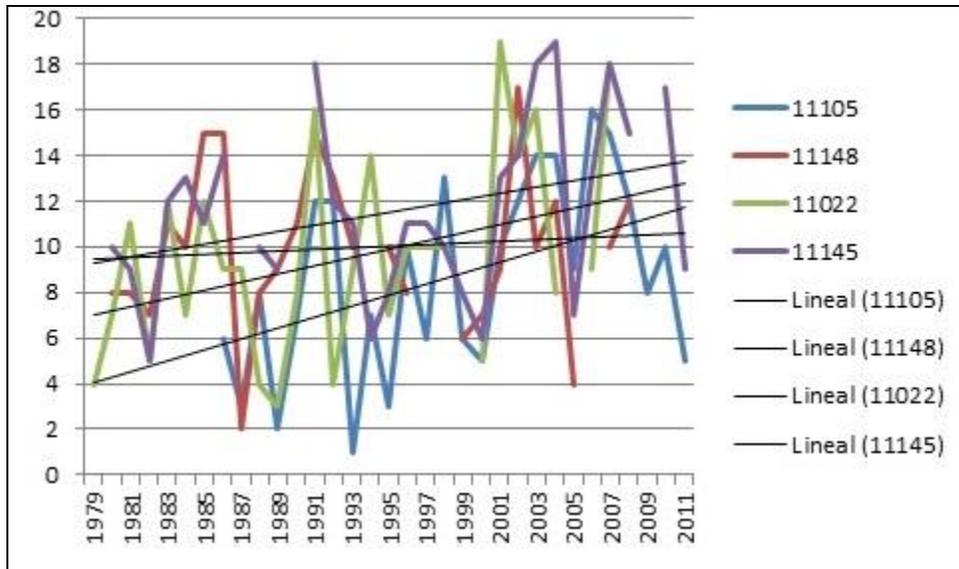
Gráfica 38. Precipitación anual total (PRCPTOT)

No obstante lo que se presenta en la gráfica 38, existe una tendencia más marcada a que aumenten los días secos consecutivos. La deficiencia de humedad provoca reducción en el rendimiento de grano en función de la etapa de desarrollo (gráfica 39).



Gráfica 39. Días secos consecutivos (CDD)

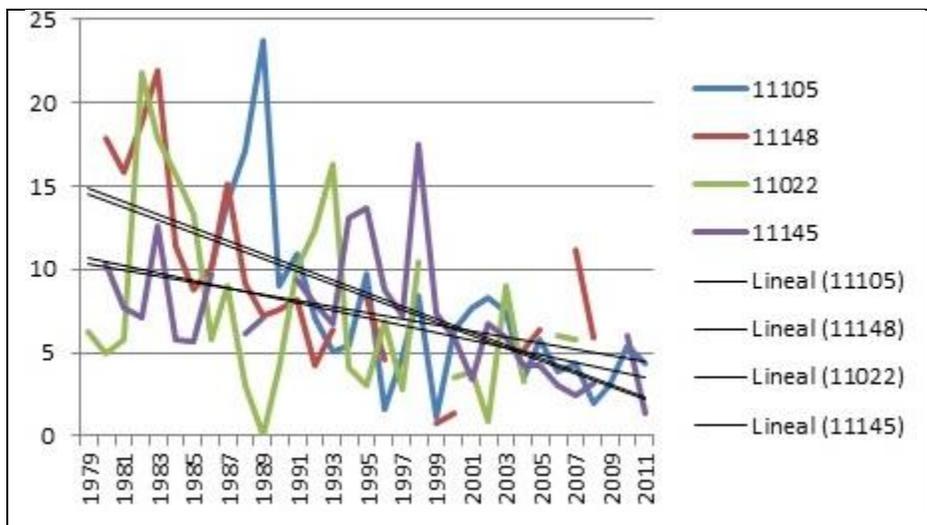
Los días con precipitaciones mayores a 20 mm tienden a aumentar, como se muestra en la gráfica 40, por lo tanto, la tendencia marca a que las lluvias podrían ser erráticas y torrenciales.



Gráfica 40. Días con lluvia mayor a 20 mm (R20mm)

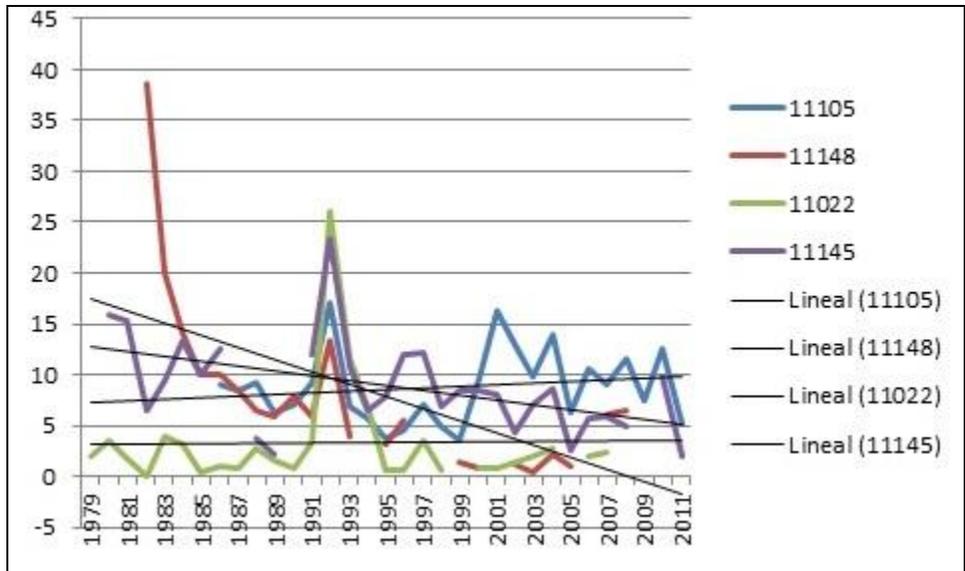
3.3.1.4. Temperatura en las estaciones de la familia 2.

Los extremos de la temperatura mínima diaria tienden a disminuir, es decir, puede haber menos noches cálidas, como se presenta en la gráfica 41.



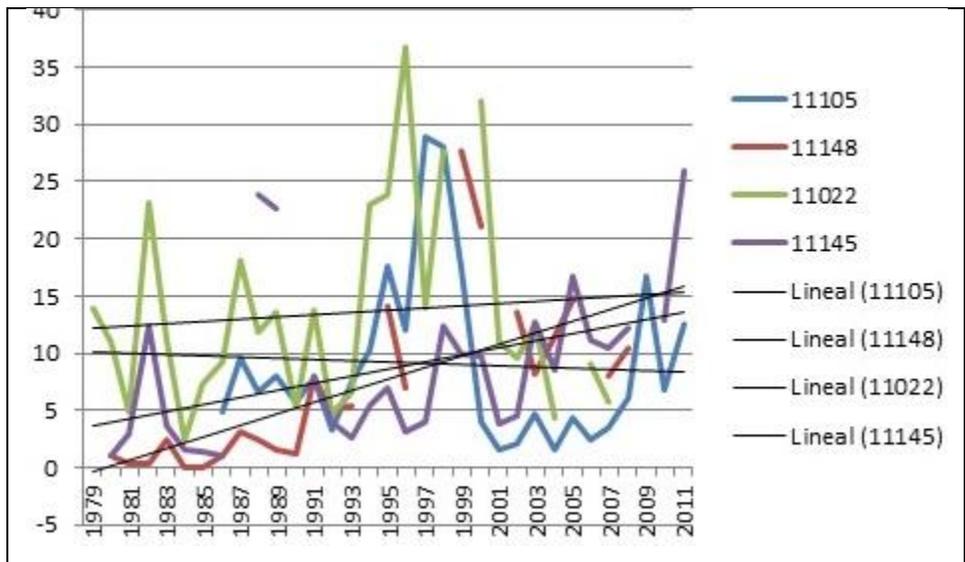
Gráfica 41. Noches cálidas (TN90p)

En la gráfica 42 se observa que existe una ligera tendencia a que los extremos en las temperaturas máximas diarias disminuyan.



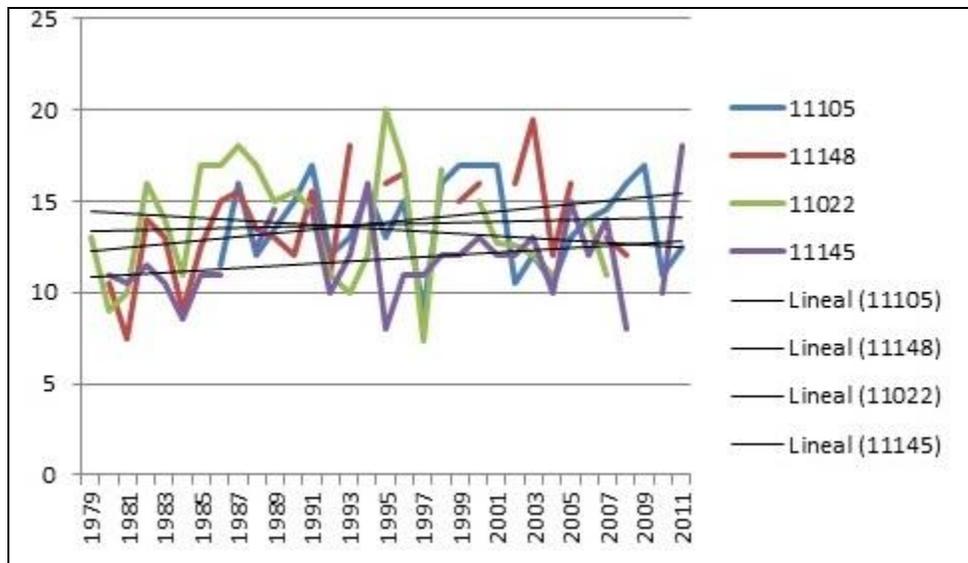
Gráfica 42. Días frescos (TX10p)

El porcentaje de extremos en días calurosos tiene una tendencia a aumentar, como puede observarse en la gráfica 43. La combinación de temperaturas por arriba de 38 °C más estrés hídrico durante la formación de mazorca y el espigamiento impiden la formación de grano de ambos cultivos (Barandas, 1994 citado por Ruíz *et. al.* 1999).



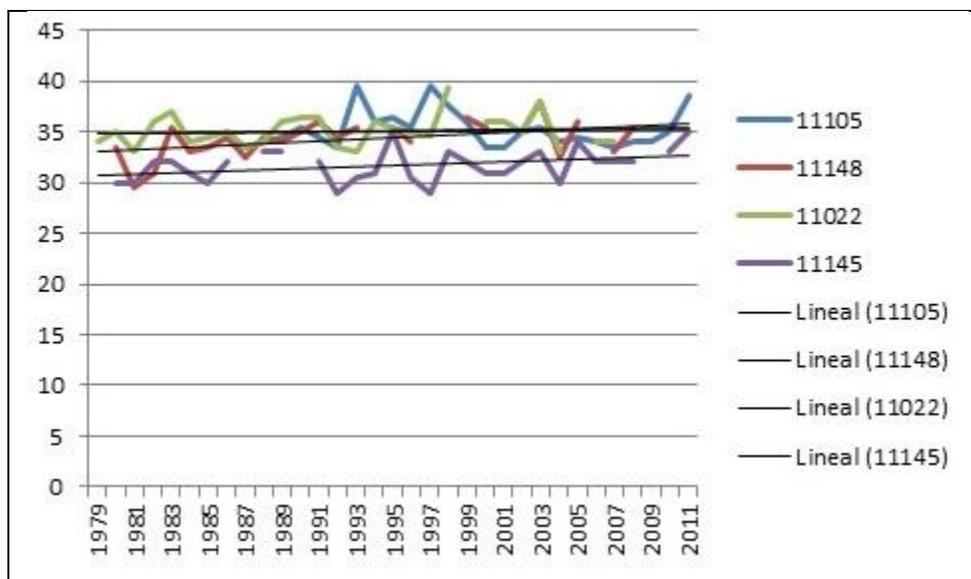
Gráfica 43. Días calurosos (TX90p)

Existe una ligera tendencia a que aumenten las temperaturas máximas más bajas, lo que se indica en la gráfica 44.



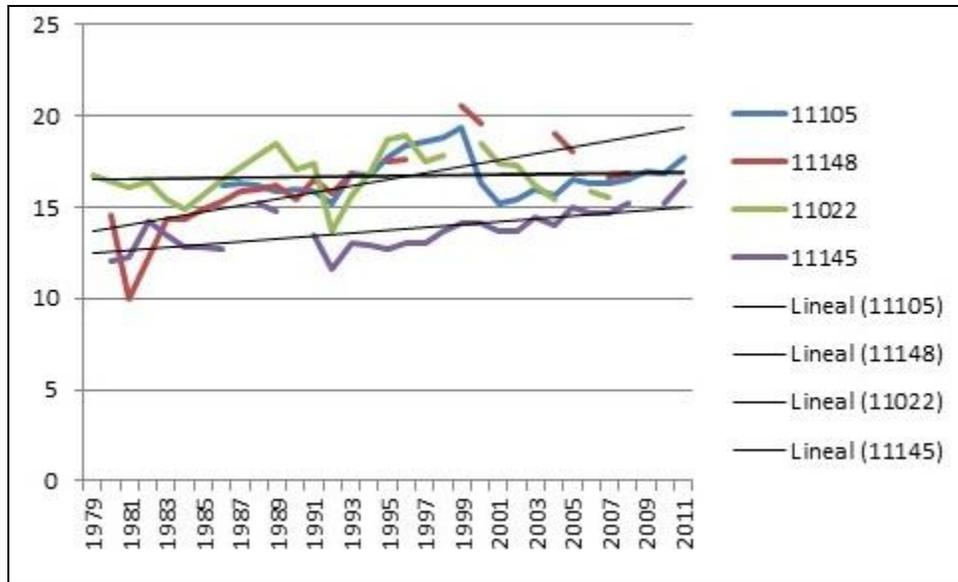
Gráfica 44. Temperatura máxima más baja (TXn)

En la gráfica 45 se muestra que hay una ligera tendencia a que las temperaturas máximas más altas aumenten, por lo tanto, los valores en los extremos de las temperaturas máximas y mínimas van en aumento.



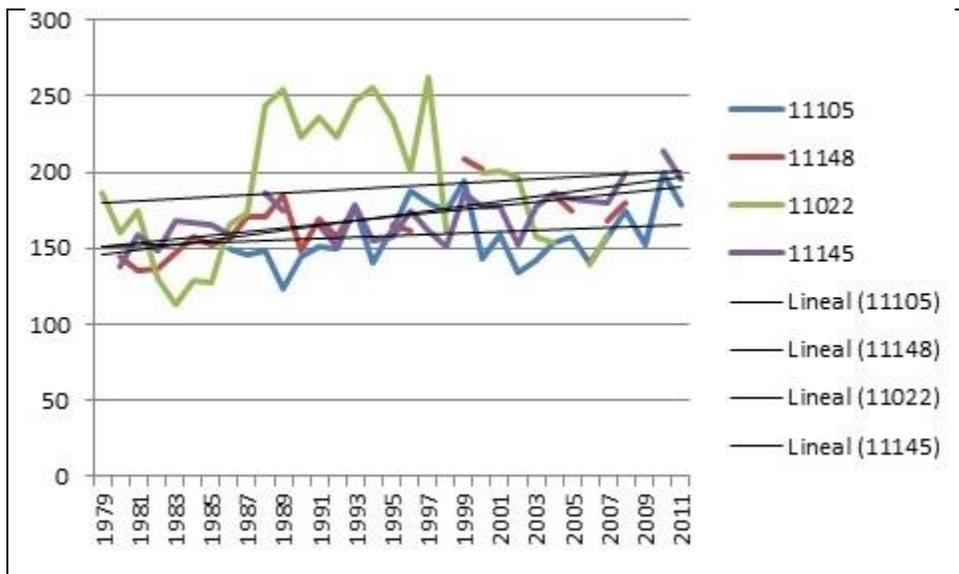
Gráfica 45. Temperatura máxima más alta (TXx)

La amplitud térmica entre la temperatura máxima y mínima diaria tiene una tendencia a aumentar (gráfica 46)



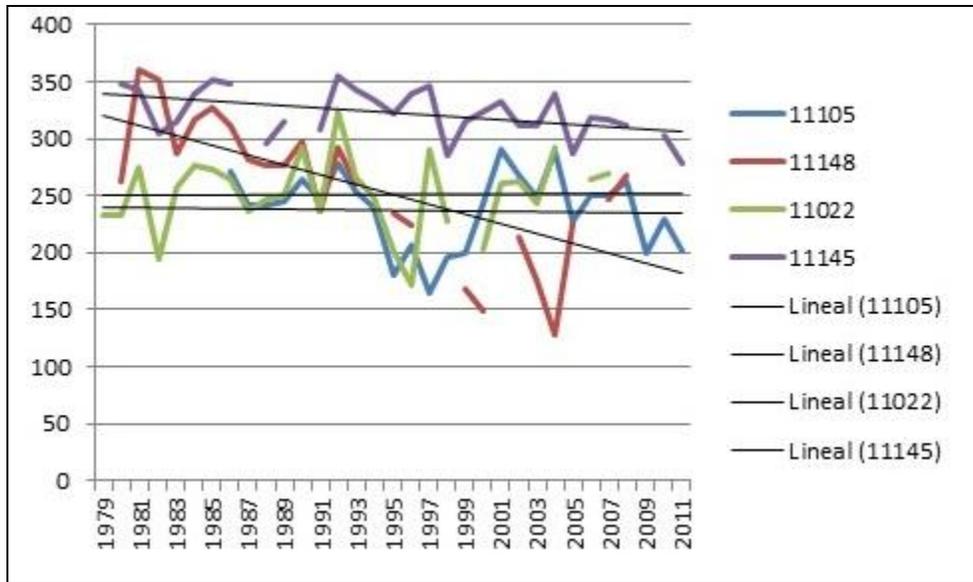
Gráfica 46. Rango diario de temperatura (DTR)

Existe una tendencia a que se incrementen los días con temperaturas menores a 10 °C, lo que se observa en la gráfica 47. Temperaturas menores a 15 °C retrasan significativamente la floración y madurez del maíz y sorgo (Barandas, 1994 citado por Ruíz *et. al.* 1999).



Gráfica 47. Número de días en un año cuando TN < 10°C (FD10)

En la gráfica 48 se muestra que existe una tendencia de disminución de días con temperaturas menores a 28 °C.



Gráfica 48. Número de días en un año en que la temperatura es menor a 28°C (ID28)

El análisis de las tendencias de los índices de cambio climático y su respectiva comparación entre estaciones climatológicas, dio como resultados los que se muestran en los cuadros 28 y 29 (las dos grandes familias resultantes de dicho análisis), quedando los siguientes umbrales establecidos y mencionados anteriormente:

En las estaciones de la familia 1 (cuadro 28) el valor de 25 mm presentó una tendencia positiva, es decir, que a lo largo de los años evaluados han aumentado los días con precipitaciones mayores a este dato, lo que se traduce en beneficio para el maíz y sorgo.

En la variable temperatura, el primer valor resultante fue el de 10°C con una tendencia negativa, es decir, que han aumentado las temperaturas, por lo que, el riesgo a daño por bajas temperaturas puede disminuir. El segundo valor fue de 28°C con una tendencia negativa, por lo que se ha reducido el número de días en que la temperatura está por debajo de este umbral, explicando un posible aumento de temperatura.

Cuadro 28. Agrupación de estaciones de la familia 1

Índice	Descripción	11005		11006		11013		11070	
		S	T	S	T	S	T	S	T
CDD	Días secos consecutivos	N	+	N	+	N	+	S	+
R25mm	Días con lluvia mayor a 25 mm	N	+	N	+	N	+	S	+
RX1day	Precipitación máxima en 1 día	N	+	N	+	N	+	S	+
CWD	Días húmedos consecutivos	N	-	N	-	N	-	N	-
TEMPERATURA									
TNn	Temperatura mínima extrema	N	+	S	+	N	+	S	+
TXn	Temperatura máxima más baja	N	+	N	+	N	+	N	+
TX10p	Días frescos	N	-	N	-	S	-	N	-
TN10p	Noches frías	S	-	S	-	N	-	N	-
FD 10	Temperatura diurna <10 °C	S	-	N	-	S	-	N	-
ID 28	Temperatura diurna < 28 °C	N	-	N	-	S	-	N	-
Nomenclatura: S/N: Representa si el análisis de la serie es estadísticamente significativa (S) o no significativa (N). T: Representa si la tendencia de la serie es positiva (+) o negativa (-).									

En las estaciones de la familia 2 (cuadro 29) dentro de la variable temperatura quedó el valor de 28°C presentando la misma situación que en las estaciones de la familia 1. El valor de 10°C presenta una tendencia a incrementar los días con temperaturas menores a este dato, a diferencia de las estaciones de la familia 1, que presenta una tendencia a disminuir, por lo que en esta parte de la zona de estudio se han presentado un mayor número de días con temperaturas bajas, que implica para los cultivos de maíz y sorgo la reducción de la tasa de crecimiento.

Los valores de 20 y 35°C fueron descartados al no presentar tendencias significativas en el análisis de las mismas.

Cuadro 29. Agrupación de estaciones de la familia 2.

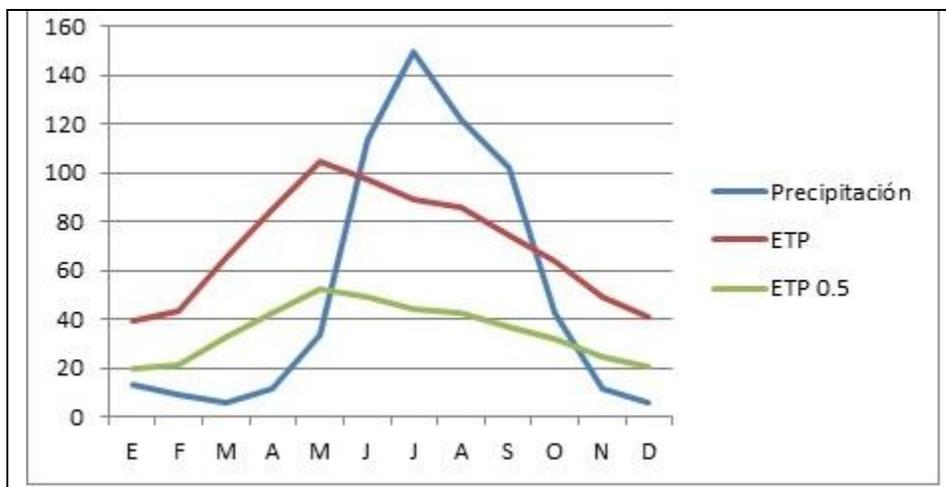
Índice	Descripción	11105		11148		11022		11145	
		S	T	S	T	S	T	S	T
PRECIPITACIÓN									
CDD	Días secos consecutivos	N	+	N	+	S	+	S	+
PRCPTOT	Precipitación total anual	N	+	N	+	N	+	N	+
R20mm	Días con lluvia mayor a 20 mm	N	+	N	+	N	+	N	+
TEMPERATURA									
TN90p	Noches cálidas	S	-	S	-	N	-	S	-
TX10p	Días frescos	N	-	N	-	N	-	S	-
ID 28	Temperatura diurna < 28 °C	N	-	N	-	N	-	S	-
TX90p	Días calurosos	N	+	S	+	N	+	S	+
TXn	Temperatura máxima más baja	N	+	N	+	N	+	N	+
TXx	Temperatura máxima extrema	N	+	S	+	N	+	S	+
DTR	Rango diurno de temperatura	N	+	S	+	N	+	S	+
FD 10	Temperatura diurna <10 °C	N	+	N	+	N	+	N	+
Nomenclatura: S/N: Representa si el análisis de la serie es estadísticamente significativa (S) o no significativa (N). T: Representa si la tendencia de la serie es positiva (+) o negativa (-).									

3.4 Estación de crecimiento

Se elaboró la estación de crecimiento de la zona de estudio utilizando las tendencias arrojadas por el programa RclimDex, en este caso los datos de temperatura y precipitación ya que, de acuerdo a Ojeda et. al. (1987) citado por Corzo (1991), la estación de crecimiento se define como el número de días del año durante los cuales existe disponibilidad de agua y temperatura favorables para el desarrollo de un cultivo.

De acuerdo a las tendencias del cálculo de los índices de cambio climático, se realizó la estación de crecimiento con el fin de obtener un acercamiento a los posibles cambios en fechas de siembra y cosecha para los cultivos de maíz y sorgo de temporal en el Valle de Celaya.

En la gráfica 49 se presenta la estación de crecimiento para la zona del Valle de Celaya.



Gráfica 49. Estación de crecimiento para el Valle de Celaya.

De acuerdo con la gráfica 49 el comienzo del período de crecimiento se da cuando la precipitación es igual o mayor a la mitad de la evapotranspiración ($P \geq ETP\ 0.5$), en este caso el inicio del período de crecimiento se da a mediados del mes de mayo y comienzos de junio.

El período húmedo inicia cuando las precipitaciones son mayores a la evapotranspiración potencial ($P > ETP$), comenzando para la zona de estudio en el mes de junio. Este período finaliza cuando la precipitación es menor a la evapotranspiración potencial ($P < ETP$), terminando en el mes de octubre en este caso.

El final de las lluvias se da después del período húmedo y sucede cuando las precipitaciones son iguales o menores a la mitad de la evapotranspiración potencial ($P \leq ETP\ 0.5$), en la gráfica se muestra que esto sucede a finales de octubre y principios de noviembre. El fin del período de crecimiento se da en el mes de noviembre.

Por lo anterior se establece que en la zona de estudio se tiene una estación de crecimiento con una duración de 5 meses, tomando como inicio los primeros días de junio y hasta finales de octubre, dando un total de 153 días durante los cuales

se deben desarrollar los cultivos de maíz y sorgo de variedades de ciclo intermedio y hasta largo con un riego de auxilio. En este período de tiempo hay una precipitación acumulada de 530 mm que cubre perfectamente las necesidades hídricas de ambos cultivos, ya que el maíz necesita de 500-1000 mm/ciclo y el sorgo de 400-600 mm/ciclo.

A partir de esta información se determinó que las variedades idóneas para producción de maíz de temporal que pueden desarrollarse en la estación de crecimiento de la zona son:

- Cafime con un ciclo de cultivo de 110 días
- VS-201, mismos número de días que Cafime.
- H-220 con un ciclo de cultivo de 120-125 días
- HV-313 de 140-145 días
- A7545 de 150-160 días de ciclo del cultivo. Para esta variedad se recomienda un riego de auxilio para asegurar el buen establecimiento del cultivo para que obtenga mayores rendimientos.

Las variedades idóneas para la zona para sorgo de temporal son todas las que se indican en el cuadro 13, aunque el número de días del ciclo de cultivo va de 155 a 175 días, se debe dar un riego de auxilio para asegurar el buen establecimiento del cultivo, además, por la humedad que guarda el suelo después de la época de lluvias, ya que puede ser aprovechada por la planta en su última fase fenológica.

Para el caso del suelo, en Guanajuato se reconocen 10 unidades diferentes de suelo, donde los feozem (45% de la superficie del estado) y vertisoles (38% de la superficie del estado) son los dominantes (Carranza, 2001). La zona del Valle de Celaya se encuentra ubicado en su mayor parte dentro del tipo de suelo vertisol (imagen 5), los cuales son suelos con abundante materia orgánica, altamente fértiles y muy arcillosos por lo que retienen más el agua, y a la vez tienen problemas de drenaje causando anegamiento, es por ello que lluvias torrenciales inundarían los cultivos si la tasa de infiltración es muy lenta, además de la cantidad de agua presente en el suelo en el momento de la lluvia.

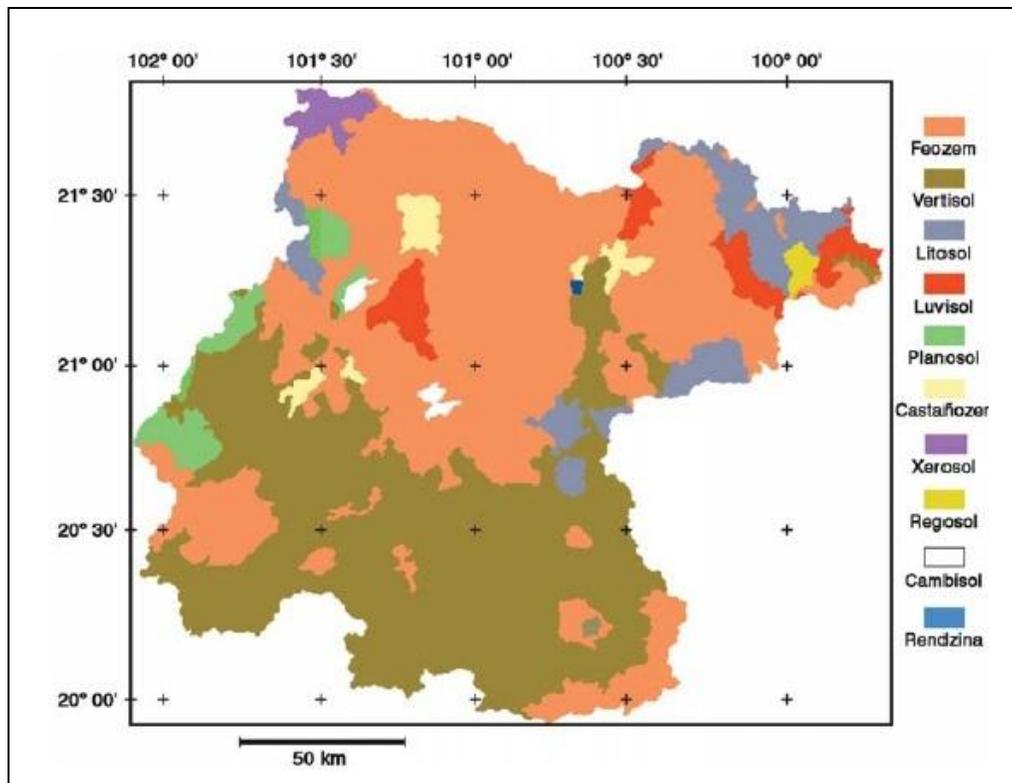


Imagen 5. Distribución de los tipos de suelo en Guanajuato.

Fuente: Carranza, 2001.

IV. CONCLUSIONES

1. A partir del análisis del clima del Valle de Celaya durante el periodo 1981-2010, se determinaron los patrones cambiantes y su recurrencia, encontrando que la zona de estudio ha presentado eventos extremos tanto de temperatura como de precipitación. Por lo tanto, se justificó el uso de los índices de cambio climático para determinar la tendencia de los eventos extremos en el Valle de Celaya.

2. De acuerdo a los resultados de las gráficas 28 a 48 se estableció que los índices de cambio climático en la zona de estudio presentaron las siguientes tendencias:
 - En la parte central de la zona de estudio, hay tendencias a una disminución en la precipitación y, por lo tanto, menor disponibilidad de agua para la agricultura, lo que afecta el rendimiento de los cultivos que actualmente son sembrados bajo la modalidad de temporal, principalmente el maíz y sorgo de esta zona de estudio. De acuerdo a la textura del suelo del Valle de Celaya (arcilloso) se puede aprovechar el agua almacenada en el suelo, sin embargo, también dependerá de la profundidad, el contenido de materia orgánica y la actividad biológica del mismo.

 - Por otro lado, se han presentado lluvias considerables en un tiempo corto, es decir, lluvias torrenciales en un día, por lo tanto, hay una alteración en la precipitación que afecta el rendimiento de los cultivos al haber exceso de agua en un lapso de tiempo muy corto e impide que el cultivo tenga una buena distribución de agua durante su ciclo productivo. Sin embargo, esta situación se puede aprovechar para captar y optimizar el agua de lluvia mediante obras de captación de agua. Por otro lado lluvias excesivas erosionan el

suelo, por lo que, construir obras físicas como zanjas de desviación, barreras de piedra, para disminuir la escorrentía en los suelos.

- Las tendencias en general para esta parte de la zona de estudio, indican un aumento en las temperaturas, por lo que, los cultivos podrían entrar en estrés, cabe señalar que esto va a depender de los requerimientos de temperatura de cada etapa fenológica requerida por el maíz y sorgo. Habría un cambio en la tasa de crecimiento, una mayor transpiración. Además, las plagas agrícolas se multiplicarían, ya que, si la estación de crecimiento se alarga, permitirá a diversas especies de plagas completar más generaciones por año. Por lo tanto, resulta indispensable conocer el ciclo de vida de las plagas que afectan a los cultivos de maíz y sorgo y conocer en qué fase de la planta se presentan, y así utilizar la estación de crecimiento para adelantar o retrasar las fechas de siembra y evitar el daño de las plagas en las fases más críticas de la planta. Con esto, se evita el uso de insecticidas, lo cual conlleva un ahorro económico para el productor y ayuda a la conservación de suelos y la calidad del agua subterránea, evitando su contaminación.

- Por otro lado, en la parte sur y oriente de la zona de estudio hay una tendencia a mayores precipitaciones, sin embargo, los días secos también aumentarán. Esto se puede explicar en lluvias fuertes en un día, como fue el caso de las otras estaciones evaluadas.

- En esta parte del Valle de Celaya las tendencias indican un aumento en las temperaturas, tanto mínimas como máximas. Este aumento de temperaturas ha provocado que haya días más calurosos. En su mayoría, el aumento de días secos consecutivos y

las tendencias de incremento en las temperaturas, se han presentado en los últimos 20 años. Lo anterior tendrá un efecto negativo en los cultivos estudiados, por lo que, utilizar variedades de ciclo largo ayuda a que el rendimiento no se vea afectado, ya que al haber altas temperaturas, se aceleran las fases fenológicas de las plantas y se acortaría el ciclo.

- En general la zona del Valle de Celaya presenta una tendencia hacia un clima más seco, con días cálidos y eventos de lluvias intensas en un corto periodo de tiempo. Con esta situación, como medidas de adaptación a los cambios en el clima, se proponen acciones de manejo que se mencionan en el apartado de recomendaciones.

3. A partir de la estación de crecimiento se determinó que los requerimientos hídricos son óptimos para el desarrollo del maíz y del sorgo, utilizando las variedades recomendadas para la zona de estudio, a excepción de la variedad A7545 de maíz y todas las variedades de sorgo quienes requieren de un riego de auxilio para asegurar el buen establecimiento de los cultivos. De acuerdo a la estación de crecimiento la fecha de siembra se debe realizar para ambos cultivos, a principios o mediados del mes de junio, que es cuando comienza el período húmedo. Como se observó en las gráficas de rendimiento de maíz y sorgo, existen mejores rendimientos en los cultivos bajo la modalidad de riego en comparación con los de temporal, sin embargo, como muestra la gráfica de la estación de crecimiento el agua no es limitante en esta zona para explicar los bajos rendimientos, por lo que, siendo el maíz y sorgo sistemas agrícolas se debe tener en consideración otros factores como: el manejo que le da el agricultor al cultivo, ya sea la aplicación eficiente de fertilizantes, control de malezas, control de plagas y enfermedades, el manejo del suelo y la fertilidad del mismo, etc.; si recibe asistencia técnica proporcionada por alguna institución gubernamental o

que el mismo la pueda contratar; si el productor recibe apoyos para la compra de insumos, todos estos factores deben ser considerados para mejorar el rendimiento de estos cultivos.

Sin embargo, de acuerdo al resultado de las tendencias de los índices de cambio climático, las condiciones idóneas para su desarrollo podrían cambiar si estas continuaran así.

4. De acuerdo al objetivo general, si existe vulnerabilidad del maíz y del sorgo de temporal ante condiciones de temperatura y precipitación extrema por los resultados arrojados de las tendencias de los índices de cambio climático en el Valle de Celaya, ya que indican de manera general un aumento de temperaturas y disminución de las lluvias. Un cambio en las temperaturas y precipitación deja la posibilidad de poder introducir nuevos cultivos que requieran menor cantidad de agua y sean tolerantes a altas temperaturas, por lo que se deja a consideración del productor hacer el cambio de cultivo, obviamente tendrá que ser igual o más rentable que el cultivo anterior y se debe dar un buen manejo que asegure excelentes resultados.

V. RECOMENDACIONES

1. En la zona de estudio existe tendencia a disminución de la precipitación y aumento de temperaturas, por lo que se recomienda:
 - El uso de variedades de ciclo intermedio y largo, para que puedan satisfacer necesidades en cada fase fenológica.
 - Uso de variedades resistentes a la sequía.
 - Aplicar riego de auxilio
 - Utilizar la estación de crecimiento para hacer coincidir la etapa fenológica de mayor demanda de agua con las fechas de mayor disponibilidad de agua de lluvia.
 - Realizar un manejo de conservación y mejoramiento del suelo para retención de humedad y conservación de su fertilidad. Para mantener el contenido de humedad del suelo se debe usar la labranza de conservación, ya que, la labranza excesiva destruye los espacios de poros en el suelo, acelera la pérdida de materia orgánica y pulveriza el suelo y las partículas pequeñas pueden ser fácilmente arrastradas por la escorrentía durante las lluvias. Además se deben utilizar los residuos de los cultivos, ya que se reduce la evaporación del suelo, porque la cubierta le da sombra, mejora la estructura, por lo tanto se incrementa la capacidad de retención de agua. Por otro lado, se recomienda utilizar abonos orgánicos para evitar el uso excesivo de fertilizantes químicos los cuales aportan óxido nitroso (N_2O), el cual es un gas de efecto invernadero, por lo que reducir su utilización es una forma de mitigar los efectos de la agricultura al cambio en el clima. También se pueden usar el estiércol del ganado y realizar un manejo adecuado del mismo, así se evitará la producción de metano, otro gas de efecto invernadero. Se pueden utilizar abonos verdes, ya que aportan nutrimentos, carbono orgánico y mejoran las propiedades de los suelos, los desechos de cultivos anteriores pueden ser usados como abono, con

esta práctica también se evita la emisión de metano. Hacer labranza de conservación para evitar la pérdida de materia orgánica y usar lo menos posible la maquinaria agrícola para evitar la compactación del suelo. Se deben realizar programas de conservación del suelo, ya que al haber erosión del mismo por lluvia o prácticas agrícolas hace que se emita bióxido de carbono a la atmósfera por pérdida de carbono en suelos.

2. Para el caso que indica aumento de lluvias en un tiempo corto, se recomienda poner en práctica esquemas de captación de agua de lluvia; para su posterior aprovechamiento en el riego de los cultivos.
3. Hacer una mayor difusión de la información climática mediante sistemas de información, además de instruir a productores sobre temas básicos de agrometeorología que les permita tomar decisiones. Recurrir a los seguros agrícolas, ya que el aseguramiento es una opción de protección a los productores más vulnerables por los fenómenos meteorológicos extremos.
4. Se sugiere realizar rotación de cultivos, ya que así se evita la pérdida de fertilidad del suelo, se reduce la incidencia de malezas, plagas y enfermedades en los cultivos, se mantiene el contenido de materia orgánica, se incrementa el rendimiento de los cultivos. En este caso, el maíz puede ser rotado con el frijol, ya que el frijol al ser una leguminosa aporta una buena cantidad de nitrógeno que posteriormente es usado por el maíz. El sorgo de igual forma puede ser usado para rotación con alguna leguminosa. Con esto se hace una práctica sustentable que reduce la vulnerabilidad, además de que se evita el uso indiscriminado de agroquímicos, que contaminan el agua de los mantos freáticos y va acabando con la fertilidad del suelo, a su vez se favorece la salud de los productores al eliminar los riesgos asociados por el uso de agroquímicos.

5. También se recomienda realizar mejoramiento genético y la conservación de los bancos de germoplasma, ya que así se pueden obtener variedades que sean más tolerantes a altas temperaturas, la sequía y se adapten mejor a las condiciones climáticas presentes.
6. Resulta muy importante conocer a fondo la información fenológica de los cultivos, ya que, las temperaturas y precipitaciones extremas afectan a los cultivos en cada fase fenológica, por lo tanto, los datos fenológicos son muy importantes para entender las interacciones entre la atmósfera y la biosfera, que son importantes para estudios de cambio climático.
7. Del presente trabajo se pueden derivar proyectos de investigación como: las plagas y enfermedades y su comportamiento ante un cambio en el clima; la optimización del recurso hídrico, manejo de los sistemas agrícolas por fenómenos meteorológicos extremos.
8. Se recomienda continuar esta investigación abordando la aplicación de escenarios de cambio climático que representen el cambio climático en los próximos años para el Valle de Celaya.

VI. BIBLIOGRAFÍA

Altamirano, del C. M. A. (2010). Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Diplomado en cambio climático y agricultura sustentable. INE-SEMARNAT. México. 73 p.

Altieri, M. A. Nicholls, C. I. (2008). Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas. Universidad de Murcia. España. 17 p.

Avalos, G. M. (2004). Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, PICC. Cambio Climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 125-141 pp.

Bando, M. U. (2010). Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Diplomado en cambio climático y agricultura sustentable. INE-SEMARNAT. México. 41 p.

Buenfil, F. J. (Editor). (2009). Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México (Volumen 1). INE-SEMARNAT. México. 163-174 pp.

Carranza, G. E. (2001). Contribución al conocimiento de las plantas del género *Ipomoea* L. (Convolvulaceae) en el estado de Guanajuato, México. Instituto de Ecología, A.C. Centro Regional del Bajío. México. 8 y 9 pp.

Castillo, E. F. Castellví, S. F. (2001). Agrometeorología. Mundi-Prensa, 2º edición. España. 206-208 pp.

CMNUCC. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Naciones Unidas.

Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG). (2000). Seguimiento del estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Celaya, Guanajuato. México. 3-4 pp.

Comisión Nacional del Agua. (2002). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Celaya, Estado de Guanajuato. México. 3-5 pp.

Conde, C. A. (2006). México y el cambio climático global. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. México. 26 p.

Corzo, S. J. C. (1991). Estación de crecimiento y potencial térmico para cultivos básicos en el Estado de México. Tesis Ingeniería Agrícola. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. México. 26-102 pp.

Crevenna, R. A. B. Sierra, O. R. Torres, R. V. Márquez, G. A. Z. Ramírez, V. J. D. Uribe, N. S. Castillo, H. F. Lagunas, G. R. Suárez, T. J. F. Sotelo, P. N. Velasco, V. B. Monsalvo, J. C. B. (2006). Análisis de la vulnerabilidad y capacidad de

adaptación al cambio climático en los sectores más relevantes del Estado de Morelos. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México. 71 y 114-116 pp.

Cuatecontzi, D. H. Gasca, J. (2004). Los gases regulados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Cambio Climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 88 pp.

Curso Agroclimatología operativa. (2011). Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM.

Flores, M. Araujo, R. Betancourt, E. (2006). Vulnerabilidad de las zonas potencialmente aptas para maíz de temporal en México ante el cambio climático. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. México. 82-83 pp.

Galindo, L. M. (2009). La economía del Cambio Climático en México. SHCP-SEMARNAT. México. 7 pp.

Garduño, R. (2004). ¿Qué es el efecto invernadero?. Cambio Climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 30 pp.

Gay, G. C. (2012). Seminario permanente de cambio climático. Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

Hernández, C. M. E. Valdez, M. G. (2004). Sequía meteorológica. Cambio Climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 315-325 pp.

IEEG. (2008). Hacia una estrategia estatal de cambio climático en Guanajuato.. Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato. México. 81 p.

IEE. (2011). Diagnóstico climatológico y prospectiva sobre vulnerabilidad al cambio climático en el Estado de Guanajuato. México. 31-37 pp.

INEGI. (2007). Censo Agropecuario 2007. México.

INE-SEMARNAT. (2009). México, Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

IPCC. (1995). Segunda Evaluación Cambio Climático. 1995.

IPCC. (2001). Cambio climático 2001: Impactos, adaptación y vulnerabilidad.

IPCC. (2001). Tercer Informe de Evaluación Cambio Climático 2001. La base científica.

IPCC. (2007). Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza. 104 p.

IPCC. (2012). Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. Resumen para responsables de políticas.

Jaramillo, V. J. (2004). El ciclo global del carbono. Cambio Climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 77 pp.

Landa, R., Magaña, V. y Neri, C. (2008). Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 133 p.

Lira, S. R. H. (2007). Fisiología vegetal. Ed. Trillas. México. 237 p

Lozano, G. M. S. (2004). Evidencia de cambio climático: cambios en el paisaje. Cambio Climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 65-75 pp.

Lozano, J. M. A. (2009). Eventos extremos de precipitación: estudio de caso en Apizaco, Tlaxcala. Tesis de Maestría. UNAM. México. 121 p.

Magaña, R. V. (Editor). (2004). Los impactos de El Niño en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México-Secretaría de Gobernación. México. 25 pp.

Magaña, R. V. O. (2004). El cambio climático global: comprender el problema. Cambio Climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 19 pp.

Magaña, V. Matías, M. J. Morales, R. Millán, C. (2004). Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México. Cambio Climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 204 pp.

Martínez, A. P. F. Patiño, G. C. Coord. (2010). Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen III. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. 115-142 pp.

Mayorga, C. F. J. (2009). El cambio climático y el desarrollo regional y agropecuario. 5° Foro Internacional de Desarrollo Sustentable. SAGARPA. México.

Monterroso, A. (2012). Vulnerabilidad del sector agropecuario y forestal ante el cambio climático. CONAGUA. México.

Ortolá, G. A. (2000). Apuntes básicos de fisiología vegetal. Universidad Politécnica de Valencia. España. 166 pp.

Rivas, M. S. (2010). Sinopsis bioclimática de la Tierra y mapas bioclimáticos de Suramérica. Instituto de España, Real Academia Nacional de Farmacia. Madrid, España. 19 pp.

Romero, D. S., Morales, M. C. y Némiga, X. A. (2011). Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México. Revista de Climatología. Vol. 11:1-10. 3 pp

Ruiz, C. J. A. Medina, G. Z. Ortiz, T. I. J. González, A. H. E. Flores, R. L. A. Martínez, P. Byerly, M. (1999). Requerimientos agroecológicos de cultivos. Libro técnico Núm. 3. CIRPAC, INIFAP. Ed. Conexión gráfica. Guadalajara, Jalisco. México. 163-165 pp.

Sánchez, C. I. Díaz, P. G. Cavazos, P. M. T. Granados, R. G. R. Gómez, R. E. (2011). Elementos para entender el cambio climático y sus impactos. Ed. Porrúa. México. 166 p.

Sarukhán, J. (2010). Algunos elementos sobre cambio climático. Taller para periodistas de América Latina sobre cambio climático. CONABIO.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2008). El cambio climático en las comunidades rurales. México. 24 pp.

SEMARNAT. (2009). Cambio Climático, Ciencia, evidencia y acciones. México. 79 p.

Teutsch, B. C. (2006). Metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad poblacional a los desastres de la variabilidad y el cambio climático. Memoria de título. Universidad de Chile. Chile. 11 pp.

Urbano, T. P. (1991). Tratado de fitotecnia general. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 24-28 y 55-74 pp.

Vázquez, A. J. L. (2010). Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México. SEMARNAT-INE. México. 88 p.

Zhang, X. Yang, F. (2004). RclimDex (1.0) Manual de usuario. Climate Research Branch Environment Canada. Cánada. 22 p.

Consultas electrónicas

Amador, J. A. y Alfaro, E. J. (2009). Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. Revista Iberoamericana de Economía Ecológica. Vol. 11:39-52. 40 pp. Disponible en http://www.redibec.org/IVO/rev11_04.pdf Consultado el 30/08/11

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Manual sobre evaluaciones de Vulnerabilidad y Adaptación. Disponible en: http://unfccc.int/resource/cd_roms/na1/v_and_a/Spanish/index.htm Consultado el 9 de julio de 2012.

Enciclopedia de los municipios de México, Campeche, Campeche. Disponible en: <http://e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/campeche/Mpios/04002a.htm> Consultado el 21 de mayo de 2012.

Fondo de aseguramiento ANEC. <http://www.anec.org.mx/seguroanec/documentos-fondo-de-aseguramiento-anec/guanajuato-fechas-siembra-p-v-2012/view>. Consultado el 2 de febrero de 2013.

INIFAP 2008. <http://www.inifap.gob.mx>. Consultado el 15 de julio de 2012.

INIFAP, 2008. Disponible en: <http://www.agromapas.inifap.gob.mx/potencialproductivo/sorgo.html> Consultado el 4 de septiembre de 2012.

Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono. 2000. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/internacional/Documents/SAT/Montreal-Protocol-Booklet-sp.pdf> Consultado el 2 de junio de 2012.

Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) SIAP, SAGARPA. <http://www.siap.gob.mx/>. Consultado el 10 de julio de 2012.

Turrent, F. A.  Cambio Climático y última opción para el campo? Disponible en: <http://www.jornada.unam.mx/2012/02/25/opinion/022a2pol> Consultado el 9 de julio de 2012.

VII. ANEXOS

ANEXO 1

Lista de los índices de cambio climático²³

ID	Nombre del Indicador	Definición	Unidad
FD0	Frost days (Días de heladas)	Número de días en un año cuando TN(mínimo diario)<0°C	Días
SU25	Summer days (Días de verano)	Número de días en un año cuando TX(máximo diario)>25°C	Días
ID0	Ice days (Días de hielo)	Número de días en un año cuando TX(máximo diario)<0°C	Días
TR20	Tropical nights (Noches tropicales)	Número de días en un año cuando TN(mínimo diario)>20°C	Días
GSL	Growing season Length (Duración de la estación de cultivo)	Anual (1st Ene a 31 st Dic en HN, 1 st Julio a 30 th Junio en HS) cuenta entre el primer periodo de por lo menos 6 días con TG>5°C y primer periodo después de Julio 1 (Enero 1 en HS) de 6 días con TG<5°C	Días
TXx	Max Tmax	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	°C
TNx	Max Tmin	Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria	°C
TXn	Min Tmax	Valor mensual mínimo de temperatura máxima diaria	°C
TNn	Min Tmin	Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	°C
TN10p	Cool nights (Noches frías)	Porcentaje de días cuando TN<10th percentil	Días
TX10p	Cool days (Días fríos)	Porcentaje de días cuando TX<10th percentil	Días
TN90p	Warm nights (Noches calientes)	Porcentaje de días cuando TN>90th percentil	Días

²³ Zhang y Yang, 2004.

TX90p	Warm days (Días calientes)	Porcentaje de días cuando TX>90th percentil	Días
WSDI	Warm spell duration indicador (Indicador de la duración de periodos calientes)	Contaje anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TX>90th percentil	Días
CSDI	Cold spell duration indicador (indicador de la duración de periodos fríos)	Contaje anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TN<10th percentil	Días
DTR	Diurnal temperature range (rango diurno de temperatura)	Diferencia media mensual entre TX y TN	°C
RX1day	Max 1-day precipitation amount (Cantidad Máxima de precipitación en un día)	Máximo mensual de precipitación en 1 día	Mm
Rx5day	Max 5-day precipitation amount (Cantidad Máxima de precipitación en 5 días)	Máximo mensual de precipitación en 5 días consecutivos	Mm

SDII	Simple daily intensity index (Índice simple de intensidad diaria)	Precipitación anual total dividida para el número de días húmedos (definidos por PRCP>=1.0mm) en un año	Mm/día
R10	Number of heavy precipitation on days (Número de días con precipitación intensa)	Número de días en un año en que PRCP>=10mm	Días
R20	Number of very heavy precipitation on days (Número de días con precipitación muy intensa)	Número de días en un año en que PRCP>=20mm	Días
Rnn	Number of days above nnmm (Número de días sobre nn mm)	Número de días en un año en que PRCP>=nn mm, nn es un parámetro definido por el usuario	Días
CDD	Consecutive dry days (Días secos consecutivos)	Número máximo de días consecutivos con RR<1mm	Días
CWD	Consecutive wet days (Días húmedos)	Número máximo de días consecutivos con RR>=1mm	Días

R95p	consecutivos) Very wet days (Días muy húmedos)	Precipitación anual total en que RR>95 percentil	Mm
R99p	Extremely wet days (Días extremadamente secos)	Precipitación anual total en que RR>99 percentil	Mm
PRCP TOT	Annual total wet-day precipitation (Precipitación total anual en los días húmedos)	Precipitación anual total en los días húmedos (RR>=1mm)	Mm

ANEXO 2.

Definición de los índices²⁴

1. FDO

Sea T_{nij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j . Cuente el número de días cuando:

$$T_{nij} < 0^{\circ}C$$

2. SU25

Sea T_{xij} la temperatura máxima diaria en el día i periodo j . Cuente el número de días cuando:

$$T_{xij} > 25^{\circ}C$$

3. ID0

Sea T_{xij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j . Cuente el número de días cuando:

$$T_{xij} < 0^{\circ}C$$

4. TR20

Sea T_{nij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j . Cuente el número de días cuando:

$$T_{nij} > 20^{\circ}C$$

5. GSL

Sea T_{ij} la temperatura media en el día i en el periodo j . Cuente el número de días entre la primera ocurrencia de por lo menos 6 días consecutivos con:

$$T_{ij} > 5^{\circ}C$$

²⁴ Zhang y Yang, 2004.

Y la primera ocurrencia después de 1st Julio (1st Enero en HS) de por lo menos 6 días consecutivos con:

$$T_{ij} < 5^{\circ} C$$

6. TXx

Sea T_{Xkj} la temperatura máxima diaria en el mes k , periodo j . La máxima temperatura máxima diaria cada mes es entonces:-

$$TX_{Xkj} = \max(T_{Xkj})$$

7. TNx

Sea T_{nkj} la temperatura mínima diaria en el mes k , periodo j . La máxima temperatura mínima diaria cada mes es entonces:-

$$TN_{Xkj} = \max(T_{nkj})$$

8. TXn

Sea T_{Xkj} la temperatura máxima diaria en el mes k , periodo j . La mínima temperatura máxima diaria cada mes es entonces:-

$$TX_{nkj} = \min(T_{Xkj})$$

9. TNn

Sea T_{nkj} la temperatura mínima diaria en el mes k , periodo j . La mínima temperatura mínima diaria en cada mes es entonces:-

$$TN_{nkj} = \min(T_{nkj})$$

10. Tn10p

Sea T_{nij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea T_{in10} el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5-días (calculado usando el método del Anexo D). El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$T_{nij} < T_{in10}$$

11. Tx10p

Sea T_{xij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea T_{xin10} el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5-días (calculado usando el método del Anexo D). El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$T_{xij} < T_{xin10}$$

12. Tn90p

Sea T_{nij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea T_{nin90} el día calendario del percentil 90th centrado en una ventana de 5-días (calculado usando el método del Anexo D). El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$T_{nij} > T_{nin90}$$

13. Tx90p

Sea T_{xij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea T_{xin90} el día calendario del percentil 90th centrado en una ventana de 5-días (calculado usando el método del Anexo D). El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$T_{xij} > T_{xin90}$$

14. WSDI*

Sea T_{xij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea T_{xin90} el día calendario del percentil 90th centrado en una ventana de 5-días (calculado usando el método del Anexo D). Entonces el número de días por periodo es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos:-

$$T_{xij} > T_{xin90}$$

15. CSDI*

Sea T_{nij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea T_{xin10} el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5-días (calculado usando el método del Anexo D). Entonces el número de días por periodo es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos:-

$$T_{nij} < T_{xin10}$$

16. DTR

Sean T_{xij} y T_{nij} las temperaturas diarias máximas y mínimas respectivamente en el día i en el periodo j . Si I representa el número de días en j , entonces:

$$DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^I (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{I}$$

17. RX1day

Sea RR_{ij} el total diario de precipitación en el día i en el periodo j . Entonces los valores máximos de 1-día para el periodo j son:

$$Rx1day_j = \max(RR_{ij})$$

18. Rx5day

Sea RR_{kj} la cantidad de precipitación para el intervalo de cinco días terminando en k , periodo j . Entonces los valores máximos de 5-días para el periodo j son:

$$Rx5day_j = \max(RR_{kj})$$

19. SDII

Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en días húmedos, $w(RR \geq 1mm)$ en el periodo j . Si W representa el número de días húmedos en j , entonces:

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W}$$

20. R10

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq 10mm$$

21. R20

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq 20mm$$

22. Rnn

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Si nn representa cualquier valor razonable de precipitación diaria entonces, cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq nmm$$

23.DD*

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el más grande número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} < 1mm$$

24.CWD*

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el más grande número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} \geq 1mm$$

25.R95pTOT

Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo ($RR \geq 1.0mm$) en el periodo j y sea RR_{wn95} el percentil 95th de precipitación en los días húmedos en el periodo 1961-1990. Si W representa el número de días húmedos en el periodo, entonces:

$$R95 p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ where } RR_{wj} > RR_{wn95}$$

26.R99p

Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo ($RR \geq 1.0mm$) en el periodo j y sea RR_{wn99} el percentil 99th de precipitación en los días húmedos en el periodo 1961-1990. Si W representa el número de días húmedos en el periodo, entonces:

$$R99 p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ where } RR_{wj} > RR_{wn99}$$

27.PRCPTOT

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Si I representa el número de días en j , entonces

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij}$$

ANEXO 3

Duración media posible de la luz expresada en unidades de 30 días de horas cada uno.

Mes Latitud.	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	.92	.76	.70