

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE



**ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y EVALUACIÓN DEL RIESGO DEL
CULTIVO DE MAÍZ DE TEMPORAL FRENTE A EVENTOS
EXTREMOS: TLAXCALA, MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

PRESENTA:

Mercedes Neria Castillo

BAJO LA DIRECCIÓN DE

Dr. José Jiménez López

Dra. Maricela Hernández Vázquez

TUTORES:

Dr. Tomás Morales Acoltzi

Dr. Oscar Gumersindo Vázquez Cuecuecha



IXTACUIXTLA, TLAX., JUNIO DE 2018



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRIA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

Código: 505-RGE-04

Publicación: Febrero 2018

Revisión: 9001:2015 02

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

LCA. MERCEDES NERIA CASTILLO

CANDIDATO(A) A MCSA

PRESENTE

En cumplimiento al artículo 52 fracción "d" del Reglamento General de Evaluación Académica, el comité de titulación ha revisado el trabajo de investigación titulado: **"Escenarios climáticos y evaluación del riesgo del cultivo de maíz de temporal frente a eventos extremos: Tlaxcala, México"**, realizado bajo la dirección del Dr. José Jiménez López y la Dra. Maricela Hernández Vázquez. No habiendo encontrado objeción alguna, se autoriza su impresión:

Dr. José Jiménez López

Dra. Maricela Hernández Vázquez

Dr. Tomás Morales Acoltzi

Dr. Oscar Gumersindo Vázquez Cuecuecha

Dra. Hermila Orozco Bolaños

Dr. Hipólito Muñoz Nava

Dr. Saturnino Orozco Flores

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

[Handwritten signatures of Dr. José Jiménez López, Dra. Maricela Hernández Vázquez, Dr. Tomás Morales Acoltzi, Dr. Oscar Gumersindo Vázquez Cuecuecha, Dra. Hermila Orozco Bolaños, Dr. Hipólito Muñoz Nava, and Dr. Saturnino Orozco Flores]

"POR LA CULTURA A LA JUSTICIA SOCIAL"
Ixtacuixtla, Tlax., 28 de mayo de 2018

[Handwritten signature of MSP. Patricia Limón Huitrón]
MSP. Patricia Limón Huitrón

COORDINADOR(A) GENERAL DEL POSGRADO



c.c.p. Expediente



AGRADECIMIENTOS

A Dios, por todas las bendiciones que ha derramado sobre mí en compañía de mi familia, prueba de ello, este proyecto de tesis de Grado.

A mis padres, Elvira Castillo Toltecatl y Maximino Neria Peña por su amor, consejos y su apoyo en todo momento. A mis hermanos, Concepción Neria Castillo y Samuel Neria Castillo.

A mi esposo, el Ing. Bezaleel Vargas Mejia por su amor, apoyo incondicional y confianza.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACyT**) por la beca otorgada que me permitió realizar el Posgrado.

Al Centro de Investigación en Genética y Ambiente (**CIGyA**) por brindarme el espacio físico y a cada catedrático por el conocimiento compartido.

Dr. Tomás Morales Acoltzi investigador del CCA, **UNAM** por la confianza depositada en mi persona y su apoyo infatigable, que ha permitido continuar con mi preparación académica.

Al Dr. José Jiménez López, Dra. Maricela Hernández Vázquez y al Dr. Oscar Gumersindo Vázquez Cuecuecha por su asesoría, aportación, tiempo, dedicación y sugerencias durante mi formación y obtención del Grado.

A mi compañero y amigo, Rogelio Bernal Morales por su ayuda y solidaridad.

DEDICATORIA

A mi esposo, Ing. Bezaleel Vargas Mejia porque siempre me ha apoyado en tiempos difíciles y acompañado en los mejores momentos que Dios nos ha dado.

ÍNDICE

RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Clima.....	1
1.2. Cambio climático	1
1.3. Nicho ecológico	11
1.3.1. La dualidad de Hutchinson.....	11
1.3.2. Diagrama BAM.....	12
1.4. Modelos de simulación de distribución potencial de especies	14
1.5. MaxEnt.....	16
1.5.1. Evaluación del modelo de distribución de especies	17
1.6. Escenarios de cambio climático.....	17
1.7. Maíz.....	21
1.7.1. Características del cultivo	22
1.7.2. Descripción física del cultivo	23
1.8. Fenología del maíz	24
1.8.1. Estadios vegetativos	25
1.8.2. Estadios reproductivos y desarrollo del grano.....	27
1.9. Requerimientos climáticos	30
1.10. Selección de suelos	32
1.10.1. Fertilización.....	32
1.11. Plagas comunes del maíz	34
1.12. Variabilidad de maíz en México	38
1.13. Maíz en Tlaxcala	42
1.13.1. Grupo Cónico.....	42
1.13.2. Grupo de maíces dentados tropicales	50
1.14. Variabilidad climática.....	53
1.15. Riesgo: amenaza y vulnerabilidad	54
1.16. Seguridad alimentaria	55
II. ANTECEDENTES.....	58

2.1. Escenarios de cambio climático.....	58
2.2. Riesgo climático en el maíz	60
III. JUSTIFICACIÓN.....	62
IV. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	63
4.1. Hipótesis	63
4.2. Objetivo general.....	63
4.3. Objetivos específicos	63
V. METODOLOGÍA	64
5.1. Área de estudio.....	64
5.1.1. Base de datos de maíz.....	64
5.1.2. Series de datos ambientales y de cambio climático	64
5.1.3. Método MaxEnt	66
5.2. Bases de datos de maíz de temporal y áreas de estudio	67
5.2.1. Base de datos climáticos.....	68
5.2.2. Matriz de riesgo.....	69
VI. RESULTADOS	72
6.1.1. Escenario base (1960-1990)	73
6.1.2. Escenario RCP4.5 (2050)	75
6.1.3. Escenario RCP6.0 (2050)	77
6.1.4. Análisis estadístico.....	79
6.2. Variabilidad climática	80
6.2.1. Comportamiento de la temperatura mínima y número de heladas.....	81
6.2.2. Comportamiento de la temperatura máxima	87
6.2.3. Comportamiento de la precipitación	93
6.2.4. Comportamiento de la cantidad de lluvia y el número de días con lluvia .	99
6.2.5. Caracterización de años secos, normales y con exceso de lluvia.....	105
6.3. Evaluación del riesgo climático por precipitación.....	111
VII. DISCUSIÓN.....	114
VIII. CONCLUSIONES	119
8.1. Trabajos futuros.....	121
IX. LITERATURA CITADA	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. <u>Escenario de emisiones de GEI</u>	20
Tabla II. <u>Efecto de la temperatura nocturna por 52 noches después de la polinización en el rendimiento de maíz</u>	30
Tabla III. <u>Variables climáticas</u>	66
Tabla IV. <u>Ubicación geográfica de las estaciones de estudio en Tlaxcala, México</u>	69
Tabla V. <u>Matriz de riesgo</u>	71
Tabla VI. <u>Probabilidad de rendimiento ante eventos extremos por lluvia en España</u>	111
Tabla VII. <u>Probabilidad de rendimiento ante eventos extremos por lluvia en Tlaxco</u>	111
Tabla VIII. <u>Probabilidad de rendimiento ante eventos extremos por lluvia en Apizaco</u>	112
Tabla IX. <u>Probabilidad de rendimiento ante eventos extremos por lluvia en Tlaxcala</u>	112
Tabla X. <u>Probabilidad de rendimiento ante eventos extremos por lluvia en Terrenate</u>	112
Tabla XI. <u>Probabilidad de rendimiento ante eventos extremos por lluvia en El Carmen Tequexquitla</u>	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <u>Diez claves del acuerdo de París sobre el cambio climático</u>	10
Figura 2. <u>Espacio ecológico</u>	12
Figura 3. <u>Diagrama BAM (denotado por (a) y ecuación de la tasa de crecimiento poblacional (denotado por (b))</u>	14
Figura 4. <u>Etapas fenológicas de la fase vegetativa y reproductiva del maíz</u>	11
Figura 5. <u>Principales plagas en relación al desarrollo fenológico del cultivo del maíz</u>	25
Figura 6. <u>Grupo Cónico de maíz en México</u>	35
Figura 7. <u>Grupo Sierra de Chihuahua o razas de las partes altas del norte de México</u>	39
Figura 8. <u>Grupos de maíces de Ocho hileras o razas del occidente de México</u>	39
Figura 9. <u>Grupo Chapalote</u>	40
Figura 10. <u>Razas de maíces tropicales precoces o de maduración temprana</u>	40
Figura 11. <u>Grupo de maíces dentados tropicales</u>	40
Figura 12. <u>Grupo de maíces de maduración tardía</u>	41
Figura 13. <u>Muestra de la raza Cónico</u>	41
Figura 14. <u>Muestra de la raza Elotes Cónicos</u>	43
Figura 15. <u>Muestra de la raza Cacahuacintle</u>	44
Figura 16. <u>Muestra de la raza Chalqueño</u>	46
Figura 17. <u>Muestra de la raza Palomero Toluqueño</u>	47
Figura 18. <u>Muestra de la raza Arrocillo</u>	49
Figura 19. <u>Muestra de mazorcas de la raza Celaya</u>	50
Figura 20. <u>Regionalización de maíz de temporal en el estado de Tlaxcala</u>	52
Figura 21. <u>Distribución de maíz Cónico y Elotes Cónicos en el estado de Tlaxcala</u>	68
	72

Figura 22. <u>Escenario actual de maíz Cónico bajo la climatología 1960-1990 del estado de Tlaxcala</u>	73
Figura 23. <u>Escenario actual Elotes Cónicos bajo la climatología 1960-1990 del estado de Tlaxcala</u>	74
Figura 24. <u>Escenario RCP4.5 de maíz Cónico bajo la climatología 2050 del estado de Tlaxcala</u>	75
Figura 25. <u>Escenario RCP4.5 Elotes Cónicos bajo la climatología 2050 del estado de Tlaxcala</u>	76
Figura 26. <u>Escenario RCP6.0 de maíz Cónico bajo la climatología 2050 del estado de Tlaxcala</u>	77
Figura 27. <u>Escenario RCP6.0 Elotes Cónicos bajo la climatología 2050 del estado de Tlaxcala</u>	78
Figura 28. <u>Curva operacional para el maíz Cónico</u>	79
Figura 29. <u>Curva operacional para Elotes Cónicos</u>	79
Figura 30. <u>Comportamiento de la temperatura mínima anual y del número de heladas en Españita (1978-2014)</u>	81
Figura 31. <u>Comportamiento de la temperatura mínima anual y del número de heladas en Tlaxco (1971-2014)</u>	82
Figura 32. <u>Comportamiento de la temperatura mínima y del número de heladas anuales en Apizaco (1961-2014)</u>	83
Figura 33. <u>Comportamiento de la temperatura mínima y del número de heladas anuales en Tlaxcala (1961-2014)</u>	84
Figura 34. <u>Comportamiento de la temperatura mínima y del número de heladas anuales en Terrenate (1992-2009)</u>	85
Figura 35. <u>Comportamiento de la temperatura mínima y del número de heladas anuales en El Carmen Tequexquitla (1992-2014)</u>	86
Figura 36. <u>Comportamiento de la temperatura máxima anual en Españita (1978-2014)</u>	87
Figura 37. <u>Comportamiento de la temperatura máxima anual en Tlaxco (1971-2014)</u>	88

Figura 38. <u>Comportamiento de la temperatura máxima anual en Apizaco (1961-2013)</u>	89
Figura 39. <u>Comportamiento de la temperatura máxima anual en Tlaxcala (1961-2014)</u>	90
Figura 40. <u>Comportamiento de la temperatura máxima anual en Terrenate (1992-2009)</u>	91
Figura 41. <u>Comportamiento de la temperatura máxima anual en El Carmen Tequexquitla (1992-2014)</u>	92
Figura 42. <u>Comportamiento de la lluvia anual en Españita (1978-2014)</u>	94
Figura 43. <u>Comportamiento de la lluvia anual en Tlaxco (1971-2014)</u>	95
Figura 44. <u>Comportamiento de la lluvia anual en Apizaco (1961-2014)</u>	96
Figura 45. <u>Comportamiento de la lluvia anual en Tlaxcala (1961-2014)</u>	97
Figura 46. <u>Comportamiento de la lluvia anual en Terrenate (1992-2014)</u> ...	
Figura 47. <u>Comportamiento de la lluvia anual en El Carmen Tequexquitla (1992-2014)</u>	98
Figura 48. <u>Comportamiento y número de días con lluvia en Españita (1978-2014)</u>	99
Figura 49. <u>Comportamiento y número de días con lluvia en Tlaxco (1971-2014)</u>	100
Figura 50. <u>Comportamiento y número de días con lluvia en Apizaco (1961-2014)</u>	101
Figura 51. <u>Comportamiento y número de días con lluvia en Tlaxcala (1961-2014)</u>	102
Figura 52. <u>Comportamiento y número de días con lluvia en Terrenate (1992-2014)</u>	103
Figura 53. <u>Comportamiento y número de días con lluvia en El Carmen Tequexquitla (1992-2014)</u>	104
Figura 54. <u>Caracterización de años secos y húmedos anuales en Españita (1992-2014)</u>	105
Figura 55. <u>Caracterización de años secos y húmedos anuales en Tlaxco, (1992-2014)</u>	106

Figura 56. <u>Caracterización de años secos y húmedos anuales en Apizaco (1992-2014)</u>	107
Figura 57. <u>Caracterización de años secos y húmedos anuales en Tlaxcala (1992-2014)</u>	108
Figura 58. <u>Caracterización de años secos y húmedos anuales en Terrenate (1992-2009)</u>	109
Figura 59. <u>Caracterización de años secos y húmedos anuales en El Carmen Tequexquitla (1992-2014)</u>	110

RESUMEN

En Tlaxcala el cultivo de maíz de temporal, ocupa el primer lugar entre los cuatro principales granos básicos, por ello, su disponibilidad asegura la alimentación de la población. Sin embargo, la variabilidad del clima y el cambio climático tienen consecuencias en el cultivo de maíz de temporal. En esta investigación, de acuerdo al Modelo de Circulación General HadGEM2-AO, bajo dos vías de concentración de gases de efecto invernadero (GEI), RCP4.5 y RCP6.0, se alimentó al algoritmo MaxEnt para modelar los nichos potenciales. Para generar los escenarios, se utilizaron 635 datos georreferenciados de las razas de maíz *Cónicos* y *Elotes Cónicos*, con la climatología base de 1960-1990, y el escenario futuro 2050. Explícitamente, se identificó la distribución potencial del maíz de temporal, ante los dos escenarios futuros de cambio climático, y se evaluó el riesgo frente a eventos climáticos extremos. Los resultados mostraron que el cambio climático para el 2040, tiempo real, incrementará el área de distribución de los *Elotes Cónicos*, siendo favorecida esta raza bajo la ruta RCP6.0, contrario a la raza *Cónico* será menos beneficiada con este escenario. Respecto a la evaluación del riesgo se analizaron seis municipios del estado de Tlaxcala, tres con bajo rendimiento y tres con alto rendimiento, donde se evalúan las amenazas, y los impactos. Los resultados mostraron, que predominan los rendimientos medios en el municipio de Españita, Tlaxco, Apizaco y Tlaxcala ante eventos de sequía, años normales y años con exceso de lluvia; para el caso de Terrenate en años normales se pronosticó que se puede obtener un 68.8% de alcanzar rendimientos medios y en años con exceso de lluvia un 50% de rendimientos altos; finalmente, en El Carmen Tequexquitla, aún en años de sequía es posible obtener rendimientos medios con un 100% de probabilidad y con exceso de lluvia también alcanza el máximo de rendimientos altos. Evaluar el riesgo, permite a los agricultores diseñar estrategias para reducir la vulnerabilidad frente a los eventos climáticos extremos, además, de proteger y evitar la pérdida de los recursos genéticos del maíz, otro recurso natural importante de la región.

Palabras clave: Escenarios de Cambio Climático, Razas de maíz, Evaluación del riesgo.

Abstract

In Tlaxcala the cultivation of seasonal corn occupies the first place among the four main basic grains; therefore, its availability ensures the feeding of the population. However, climate variability and climate change have had consequences in the cultivation of seasonal corn. In this research, according to the HadGEM2-AO General Circulation Model, under two routes of concentration of greenhouse gases (GHG), RCP4.5 and RCP6.0, the MaxEnt algorithm was fed to model the potential niches. To generate the scenarios, 635 georeferenced data from the Conic and Conical Elotes races were used, with the base climatology of 1991-1990, and the future 2050 year scenario. Explicitly, the potential distribution of the corn of rain was identified, before the two future scenarios of climate change, and the risk in the face of extreme climatic events was evaluated. The results showed that climate change for the 2040, real time, will increase the distribution area of the Elotes Conic, this race being favored under the RCP6.0 route, contrary to the Conic breed it will be less benefited with this scenario. Regarding the risk assessment, six municipalities in the state of Tlaxcala were analyzed, three with low performance and three with high performance, where threats and impacts are evaluated. The results show that the average yields in the municipalities of Españita, Tlaxco, Apizaco and Tlaxcala predominate in the event of drought, normal years and years with excess rainfall; in the case of Terrenate in normal years, it was predicted that 68.8% of average yields could be obtained and in years with excess rainfall 50% of high yields; finally, in El Carmen Tequexquitla, even in years of drought it is possible to obtain average yields with a 100% probability and with excess rainfall it also reaches the maximum of high yields. Evaluating risk allows farmers to design strategies and reduce vulnerability to extreme weather events, in addition to protect and prevent the loss of genetic resources of corn, another important natural resource of the region.

Keywords: Climate Change scenarios, Corn races, Risk assessment.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Clima

El clima de la Tierra depende de un gran número de factores, producto de la interacción entre atmósfera, océanos, capas de hielo, nieve, en general la vida en el planeta (Conde, 2006) en diversas escalas de tiempo y espacio (Magaña, 2004). La vida de diferentes especies animales y vegetales están condicionadas por el equilibrio entre diferentes factores, entre los que juega un papel determinante el sistema climático (Useros, 2013). Los cambios en el sistema climático se han presentado por causas naturales entre las que se encuentra la órbita terrestre, actividad volcánica intensiva e impactos de meteoritos (Rivera, 1999). Además, cambios en la radiación solar, incremento en la concentración de gases de invernadero, cambio en el uso del suelo y aerosoles (Staines, 2007).

1.2. Cambio climático

El cambio climático, uno de los principales problemas que afectan a la humanidad por sus efectos ambientales y de salud (Useros, 2013), definido 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 observado durante períodos de tiempo comparables” (CMNUCC, 1992), mientras el Panel Intergubernamental de Cambio Climático, indica un cambio en el estado del clima identificable mediante análisis estadísticos (IPCC, 2014).

El cambio climático es uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo y supone una presión adicional para nuestras sociedades y el ambiente. Desde pautas meteorológicas cambiantes, que amenazan la producción de alimentos, hasta el aumento del nivel del mar, que incrementa el riesgo de inundaciones catastróficas, los efectos del cambio climático son de alcance mundial y de una escala sin precedentes (Moore, 2018).

Los gases de efecto invernadero (GEI) se producen de manera natural y son esenciales para la supervivencia de los seres humanos y de millones de otros seres

vivos ya que, al impedir que parte del calor del sol se propague hacia el espacio, hacen la Tierra habitable. Un siglo y medio de industrialización, junto con la tala de árboles y la utilización de ciertos métodos de cultivo, han incrementado las cantidades de gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera. A medida que la población, las economías y el nivel de vida crecen, también lo hace el nivel acumulado de emisiones de ese tipo de gases (Zickfeld *et al.*, 2017).

Los GEI se clasifican en directos e indirectos con base en la inducción al forzamiento radiactivo. Los directos son aquellos gases que inducen el calentamiento global y a los cuales se les atribuye el aumento de la temperatura del planeta así como la variabilidad climática regional: bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso N_2O , hidrofluorocarbonos ($HFC's$), perfluorocarbonos ($PFC's$) y el hexafluoruro de azufre SF_6 . Los gases indirectos son aquellos que tienen impacto en la química atmosférica modificando la vida de los GEI directos en la atmosfera: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano ($COVDM$) (Martínez, 2016 y Solomon *et al.*, 2010).

Se han relacionado científicamente varios hechos:

- La concentración de GEI en la atmósfera terrestre está directamente relacionada con la temperatura media mundial de la Tierra.
- Esta concentración ha ido aumentando progresivamente desde la Revolución Industrial y, con ella, la temperatura mundial.
- El GEI más abundante, el dióxido de carbono (CO_2), es resultado de la quema de combustibles fósiles (gasolina, petróleo carbón, diésel).

Dentro de los instrumentos jurídicos de las Naciones Unidas se encuentra:

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

El sistema de las Naciones Unidas está a la vanguardia de los esfuerzos para salvar nuestro planeta. En 1992, la Cumbre para la Tierra dio lugar a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) como primer paso para afrontar el problema. Hoy en día cuenta con un total de 197 países que han

ratificado la Convención. El objetivo final de la Convención es prevenir una interferencia humana peligrosa con el sistema climático (CMNUCC, 1992).

Protocolo de Kyoto

En 1995 los países iniciaron las negociaciones para fortalecer la respuesta mundial al cambio climático y, dos años después, adoptaron el Protocolo de Kioto. Este obliga jurídicamente a los países desarrollados que son parte a cumplir unas metas de reducción de las emisiones. El primer período de compromiso del Protocolo comenzó en 2008 y finalizó en 2012. El segundo período de compromiso empezó el 1 de enero de 2013 y terminará en 2020. Hoy en día hay 197 Partes en la Convención y 192 en el Protocolo de Kioto (Protocolo de Kioto, 1998).

Persiguiendo el objetivo último de la Convención enunciado en su artículo 2 y guiadas por el artículo 3 de la Convención:

Artículo 2

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

a) Aplicará y/o seguirá elaborando políticas y medidas de conformidad con sus circunstancias nacionales, por ejemplo las siguientes:

i) fomento de la eficiencia energética en los sectores pertinentes de la economía nacional;

ii) protección y mejora de los sumideros y depósitos de los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal, teniendo en cuenta sus compromisos en virtud de los acuerdos internacionales pertinentes sobre el medio ambiente; promoción de prácticas sostenibles de gestión forestal, la forestación y la reforestación;

iii) promoción de modalidades agrícolas sostenibles a la luz de las consideraciones del cambio climático;

- iv) investigación, promoción, desarrollo y aumento del uso de formas nuevas y renovables de energía, de tecnologías de secuestro del dióxido de carbono y de tecnologías avanzadas y novedosas que sean ecológicamente racionales;
 - v) reducción progresiva o eliminación gradual de las deficiencias del mercado, los incentivos fiscales, las exenciones tributarias y arancelarias y las subvenciones que sean contrarios al objetivo de la Convención en todos los sectores emisores de gases de efecto invernadero y aplicación de instrumentos de mercado;
 - vi) fomento de reformas apropiadas en los sectores pertinentes con el fin de promover unas políticas y medidas que limiten o reduzcan las emisiones de los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal;
 - vii) medidas para limitar y/o reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal en el sector del transporte;
 - viii) limitación y/o reducción de las emisiones de metano mediante su recuperación y utilización en la gestión de los desechos así como en la producción, el transporte y la distribución de energía;
- b) Cooperará con otras Partes del anexo I para fomentar la eficacia individual y global de las políticas y medidas que se adopten en virtud del presente artículo, de conformidad con el apartado i) del inciso e) del párrafo 2 del artículo 4 de la Convención. Con este fin, estas Partes procurarán intercambiar experiencia e información sobre tales políticas y medidas, en particular concibiendo las formas de mejorar su comparabilidad, transparencia y eficacia. La Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo, en su primer periodo de sesiones o tan pronto como sea posible después de éste, examinará los medios de facilitar dicha cooperación, teniendo en cuenta toda la información pertinente.
2. Las Partes incluidas en el anexo I procurarán limitar o reducir las emisiones de gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal generadas por los combustibles del transporte aéreo y marítimo internacional trabajando por conducto de la Organización de Aviación Civil Internacional y la Organización Marítima Internacional, respectivamente.
3. Las Partes incluidas en el anexo I se empeñarán en aplicar las políticas y medidas a que se refiere el presente artículo de tal manera que se reduzcan al mínimo los

efectos adversos, comprendidos los efectos adversos del cambio climático, efectos en el comercio internacional y repercusiones sociales, ambientales y económicas, para otras Partes, especialmente las Partes que son países en desarrollo y en particular las mencionadas en los párrafos 8 y 9 del artículo 4 de la Convención, teniendo en cuenta lo dispuesto en el artículo 3 de la Convención. La Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo podrá adoptar otras medidas, según corresponda, para promover el cumplimiento de lo dispuesto en este párrafo.

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

Artículo 3

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

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

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

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

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

5. Las Partes incluidas en el anexo I que están en vías de transición a una economía de mercado y que hayan determinado su año o periodo de base con arreglo a la decisión 9/CP.2, adoptada por la Conferencia de las Partes en su segundo periodo de sesiones, utilizarán ese año o periodo de base para cumplir sus compromisos

dimanantes del presente artículo. Toda otra Parte del anexo I que esté en transición a una economía de mercado y no haya presentado aún su primera comunicación nacional con arreglo al artículo 12 de la Convención podrá también notificar a la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo que tiene la intención de utilizar un año o periodo histórico de base distinto del año 1990 para cumplir sus compromisos dimanantes del presente artículo. La Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo se pronunciará sobre la aceptación de dicha notificación.

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

7. En el primer periodo de compromiso cuantificado de limitación y reducción de las emisiones, del año 2008 al 2012, la cantidad atribuida a cada Parte incluida en el anexo I será igual al porcentaje consignado para ella en el anexo B de sus emisiones antropógenas agregadas, expresadas en dióxido de carbono equivalente, de los gases de efecto invernadero enumerados en el anexo A correspondientes a 1990, o al año o periodo de base determinado con arreglo al párrafo 5 supra, multiplicado por cinco. Para calcular la cantidad que se les ha de atribuir, las Partes del anexo I para las cuales el cambio del uso de la tierra y la silvicultura constituían una fuente neta de emisiones de gases de efecto invernadero en 1990 incluirán en su año de base 1990 o periodo de base las emisiones antropógenas agregadas por las fuentes, expresadas en dióxido de carbono equivalente, menos la absorción por los sumideros en 1990 debida al cambio del uso de la tierra.

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

9. Los compromisos de las Partes incluidas en el anexo I para los periodos siguientes se establecerán en enmiendas al anexo B del presente Protocolo que se

adoptarán de conformidad con lo dispuesto en el párrafo 7 del artículo 21. La Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo comenzará a considerar esos compromisos al menos siete años antes del término del primer periodo de compromiso a que se refiere el párrafo 1 supra.

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

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

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

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

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

Acuerdo de París

El Acuerdo de París está apoyado por la Agencia de Acción Lima-Paría (LPAA, por sus siglas en inglés), una iniciativa liderada por Francia, Perú, el Secretario General de Naciones Unidas y la Secretaría de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). Su objetivo es mostrar los compromisos y las asociaciones de ciudades, regiones, empresas y organizaciones de la sociedad civil, a menudo con los gobiernos, mediante las que se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y se construye resiliencia contra el cambio climático.

Tras su adopción, el Acuerdo de París fue depositado en las Naciones Unidas en Nueva York y está a disposición para ser firmado durante un año a partir del 22 de abril de 2016, el Día de la Madre Tierra. El acuerdo entrará en vigor cuando 55 países que representen al menos el 55% de las emisiones mundiales hayan depositado sus instrumentos de ratificación.

En la 21a Conferencia de París, las Partes en la CMNUCC alcanzaron un acuerdo histórico con el objetivo de combatir el cambio climático y acelerar e intensificar las acciones y las inversiones necesarias para un futuro sostenible con bajas emisiones de carbono. El Acuerdo de París se basa en la Convención y, por primera vez, agrupa a todas las naciones bajo una causa común: realizar ambiciosos esfuerzos con el objetivo de combatir el cambio climático y adaptarse a sus efectos, con mayor apoyo para ayudar a los países en desarrollo a que lo hagan. De esta manera, define un nuevo camino en el esfuerzo climático a nivel mundial. El principal objetivo del Acuerdo de París es reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático manteniendo el aumento de la temperatura mundial en este siglo por debajo de los 2 °C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir con los esfuerzos para limitar aún más el aumento de la temperatura a 1.5 °C (figura 1 (CMCC, 2015)).



Figura 1. Diez claves del acuerdo de París sobre el cambio climático.

En **México**, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) publicó en diciembre de 2009 el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI) para el periodo 1990-2006 (INECC, 2009), a través del Instituto Nacional de Ecología (INE) hoy Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Así como los acuerdos tomados por la Conferencia de las Partes (COP), de adoptar las buenas prácticas con la finalidad de mejorar la transparencia, comparabilidad, exhaustividad, exactitud y consistencia de los inventarios de estos países (UNFCCC-COP, 2003).

1.3. Nicho ecológico

El nicho ecológico, es una respuesta multidimensional de factores bióticos y abióticos presentes en el ambiente (Hutchinson, 1957). El concepto de nicho ha tenido gran importancia pues ha permitido integrar y organizar una serie de aspectos fundamentales para entender la ecología y cambios de los organismos. Uno de los conceptos de mayor importancia en la ecología ya que ha sido utilizado desde principios del siglo XX para tratar problemas, tales como factores que afectan las áreas de distribución geográficas de las especies (Grinnell, 1917a) y la composición y estructura de las comunidades ecológicas (Hutchinson, 1957 y MacArthur, 1968). Al modelar las áreas potenciales: área invadible (GI) o (A) variables scenopoéticas, lo cual esencialmente implica localizar en la geografía las regiones favorables a la especie, entonces, sería usar el término Modelación de Nichos Ecológicos (por sus siglas en inglés, ENM) (Elith y Leathwick, 2009; Franklin, 2009; Soberón *et al.*, 2017).

1.3.1. La dualidad de Hutchinson

La idea fundamental tanto en la modelación de áreas ocupadas (SDM) como en la modelación de áreas potenciales o en la de nichos (ENM) es que existen dos espacios, el geográfico convencional, denotado por **G** y un espacio abstracto, denotado por **E**, que se ejemplifica en dos variables climáticas en la nube de puntos llamado nicho fundamental, expresado por **N_F**, en la figura 2. **E** y **G** se relacionan directamente, ya que en un tiempo dado, a cada punto geográfico de G corresponde una combinación de valores ambientales en E. Esta combinación puede o no ser única, dependiendo de la resolución de la información ambiental, del número de variables usadas y de su precisión.

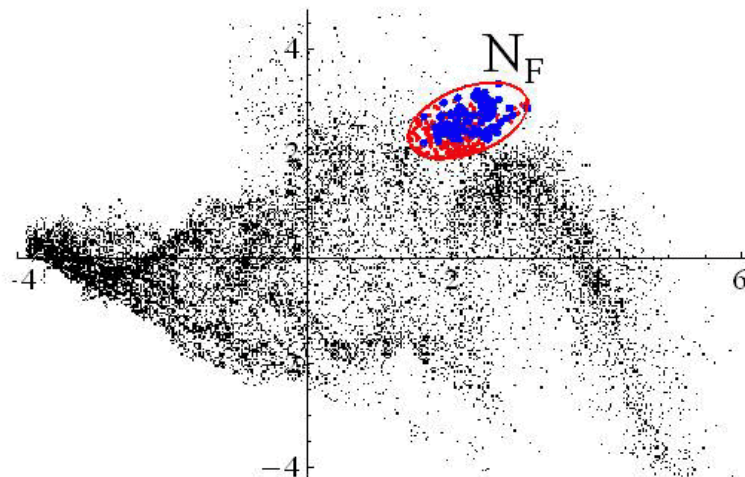


Figura 2. Espacio ecológico.

El espacio **E** está compuesto por variables no interactivas, que Hutchinson llamo variables scenopoéticas o sea variables que establecen las condiciones (el escenario) en el que una especie puede simplemente existir (Hutchinson, 1978 y Soberón *et al.*, 2017).

1.3.2. Diagrama BAM

En ecología se ha establecido que el área de distribución de una especie, en un tiempo dado, es resultado de una combinación de factores (Grinnell, 1917; Good, 1931; Cain, 1944 y Udvardy, 1969), tres de los cuales son de importancia particular como se muestra en el diagrama BAM (figura 3a) (Soberón *et al.*, 2005), las propiedades demográficas de la especie se pueden hacer corresponder a un descubrimiento con las distintas partes del diagrama. Si se denota con el símbolo $x_{i,g}(t)$ la densidad de la especie i en la celda g al tiempo t , la tasa de crecimiento poblacional se puede describir con la ecuación de la figura 3b (Soberón, 2010). Una representación abstracta del espacio geográfico **G** donde:

- A.** Un término denso-independiente $r_{i,g}$, representa la tasa intrínseca de crecimiento. La región del mundo donde se encuentran las condiciones ambientales que permiten la sobrevivencia y reproducción de la especie (este

conjunto de condiciones se llama el nicho fundamental de la especie). Se mide usando variables scenopoéticas.

B. Un segundo término $\varphi_{i,g}$, representa los cambios denso-dependientes y relacionados con la presencia de los interactores. La región del mundo que contiene el ambiente biótico adecuado para la especie. Esto es, los sitios donde no hay competidores capaces de excluir a la especie, ni depredadores o enfermedades capaces de extirpar todas las poblaciones, y existen los mutualistas (polinizadores, dispersores de semillas) necesarios. Se mediría, si existieran datos, usando las densidades de población de las principales especies interactuantes.

M. Un tercer término, Ψ que representa cambios en la tasa de crecimiento debidos a la inmigración a la celda g y emigración de ella. El conjunto de sitios que la especie ha tenido tiempo de visitar, o explorar desde una fecha dada (origen, la última glaciación, su introducción a un nuevo continente).

G_o: el área ocupada es la parte del mundo que cuenta con condiciones ambientales y bióticas favorables, que ha estado accesible a la especie.

G_i: el área invadible es una zona con condiciones ambientales y bióticas favorables.

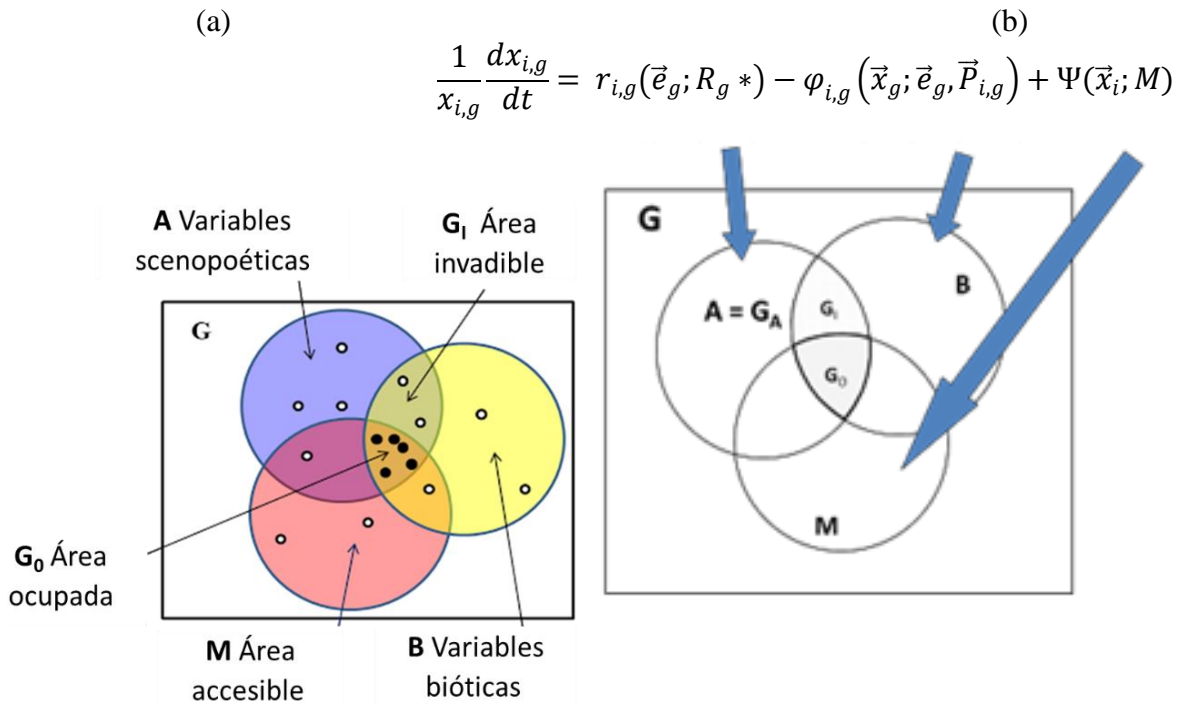


Figura 3. Diagrama BAM (denotado por (a)) y ecuación de la tasa de crecimiento poblacional (denotado por (b)).

1.4. Modelos de simulación de distribución potencial de especies

Un modelo se define como una representación parcial de la realidad que refleja algunas de sus propiedades. Los modelos son: simplificaciones, debidas a la necesidad de reducir la complejidad del objeto. Los modelos de distribución de especies son por tanto, representaciones cartográficas de la idoneidad de un espacio para la presencia de una especie en función de las variables empleadas para generar dicha representación. La idoneidad es la relación matemática o estadística entre la distribución real conocida y un conjunto de variables independientes que se usan como indicadores (Mateo *et al.*, 2011). Estas variables suelen ser geológicas, topográficas o climáticas, y se espera que con algunas de ellas, individualmente o en combinación, se puedan definir los factores ambientales que delimiten las condiciones favorables para la presencia de la especie (Guisan y Zimmermann, 2000). La variable dependiente es dicotómica (presencia/ ausencia) y las independientes pueden ser cuantitativas (temperatura o elevación) o nominales (litología o uso del suelo). Los métodos implicados son clasificadores que

deben generar un valor numérico para cada punto del terreno. Dicho valor refleja, directa o indirectamente, la idoneidad de presencia de la especie en función de los valores locales de las variables independientes (Guisan y Zimmermann, 2000).

La distribución de las especies y los factores bióticos y abióticos que la determinan constituyen un tema central para abordar cuestiones relacionadas con la ecología, biogeografía y conservación (Graham *et al.*, 2004 y Peterson, 2007). Recientemente se ha notado un creciente interés en modelar la inclusión de dichos factores para determinar la distribución potencial de las especies, desde una perspectiva enfocada a su conservación (Mladendorf *et al.*, 1995). De esta forma, los modelos de nichos ecológicos han sido objeto de impresionante aumento de atención en los últimos años (Guisan y Zimmermann, 2000; Soberón y Peterson, 2004; Thomas *et al.*, 2004; Araújo *et al.*, 2005; Thuiller *et al.*, 2005; Elith *et al.*, 2006; Matsui *et al.*, 2009).

Los métodos empleados para modelar la distribución de especies han sido diversos como Bioclim, distancia de Mahalanobis, GARP, MaxEnt, Redes neuronales, GLIM, GAM, Árboles de Regresión, BIOCLIM y DOMAIN, sin embargo, es de suma importancia el tipo de datos con el que se cuenta, ya sea datos de ausencias estrictas, datos de presencia o ambas para determinar el modelo. Además, el número de datos es importante ya que usar muy pocos datos corre el riesgo de proporcionar un modelo muy estrecho, por lo que Wisz *et al.*, (2007) recomienda evitar modelar con menos de 10 puntos y demasiados datos tienden a crear problemas de sobreajuste, el algoritmo no debe ser excesivamente necesitado de datos. Es decir, algunos algoritmos muy potentes tienden a requerir grandes cantidades de datos de ocurrencia de entrada para funcionar de manera efectiva (Wisz *et al.*, 2008), que rara vez están disponibles en aplicaciones de modelado de nicho. Los enfoques capaces de replicar respuestas complejas a datos solo de presencia incluyen la máxima entropía: Maxent (Phillips *et al.*, 2006; Elith *et al.*, 2011).

1.5. MaxEnt

MaxEnt, un programa basado en una distribución de Máxima Entropía para modelar la distribución geográfica de las especies. Escrito por Steven Phillips, Miro Dudik y Rob Schapire, con el apoyo de los laboratorios de investigación de AT&T, la Universidad de Princeton y el Centro para la Biodiversidad y Conservación del Museo Americano de Historia Natural (Steven *et al.*, 2006; Steven *et al.*, 2008).

Este modelo se basa en el principio de máxima entropía que es: la cantidad de información contenida por un sistema, entonces, la máxima entropía es la distribución más extendida y cercana a uniforme (Liras, 2008). Se buscaría encontrar aquella distribución de probabilidades que maximice la entropía, dado ciertas restricciones que representan la información disponible sobre el fenómeno o tema estudiado. Numerosas caracterizaciones se pueden encontrar en la literatura sobre la medida de Shannon para la solución de la ecuación funcional o vía axiomática (Chaundy y McLeod, 1960; Shannon, 1948; Feinstein, 1958; Aczél y Daróczy, 1975; Mathai y Rathie, 1975).

De manera que, la mejor predicción disponible de la distribución es aquella que maximiza la entropía de la información de entrada y la salida es el nicho que la especie ocupa (Phillips *et al.*, 2006). Por lo que se requiere, un conjunto de localidades (puntos) donde se sabe que la especie está presente y coberturas geográficas (parámetros ambientales) que pueden potencialmente limitar la capacidad de supervivencia de la especie. La variable de entrada es, en realidad, una serie de variables ambientales y la variable de salida o nicho se define en términos de estas variables ambientales. El potencial de distribución de la especie analizada se define en función de estas variables ambientales, que corresponden con los datos de ocurrencia de las especies estudiadas (Anderson *et al.*, 2003).

Algunas de las ventajas de MaxEnt incluyen:

- 1) Requiere solo datos de presencia, pero puede usar datos de ausencia, y en ambos casos en conjunto con variables ambientales.

- 2) Puede usar tanto datos continuos como categóricos y puede incorporar interacciones entre distintas variables.
- 3) Utiliza eficientes algoritmos que han sido desarrollados para garantizar convergencia en una óptima (entropía máxima) distribución probabilística.
- 4) La distribución probabilística de MaxEnt tiene una definición matemática concisa.

1.5.1. Evaluación del modelo de distribución de especies

Para evaluar el desempeño del Modelo de Distribución de Especies (MDE) se tomaron en cuenta dos posibles tipos de errores: 1) El error de omisión, que predice la no presencia de la especie donde realmente está (falso negativo) y 2) El error de comisión, que predice la presencia de la especie donde no está (falso positivo). El error de omisión es mucho más importante, y peor, desde el punto de vista científico, ya que no predice lugares de presencia que pueden ser de importancia crucial para la supervivencia de la población, o contener genotipos únicos. El error de comisión, por el contrario, puede ser real o aparente, ya que un falso positivo puede significar o una sobre predicción del modelo o una predicción de nicho potencial de la especie (Naoki *et al.*, 2006).

Para la evaluación del modelo se utiliza el índice AUC (Area Under the Curve, por sus siglas en inglés).

1.6. Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático son una descripción coherente, internamente consistente y plausible de un estado futuro del mundo (Conde *et al.*, 2010; IPCC, 2007). La metodología empleada para la construcción de escenarios varía de acuerdo al propósito de la evaluación. Por muchos años, los escenarios han sido utilizados por los gobiernos en los ámbitos empresariales y militares como base para el planeamiento estratégico. Estos escenarios socioeconómicos proporcionan un marco para el pensamiento estructurado de cómo el futuro se puede revelar. Por ejemplo, los escenarios pueden requerirse para:

- Ilustrar el cambio climático (en términos del presente clima).

- Proyección de las consecuencias potenciales del cambio climático, como por ejemplo, estimar el cambio futuro de la vegetación natural e identificar especies en riesgo.
- Planeamiento estratégico ante riesgos de incrementos de nivel del mar y de inundaciones.
- Políticas de control de las emisiones.

Existen escenarios del clima futuro, que son derivados de los escenarios de posibles emisiones futuras de gases de efecto invernadero, los cuales se utilizan en modelos climáticos como elemento introducido para el cálculo de proyecciones climáticas. Cualquier descripción posible del clima futuro dependerá de elevaciones sobre las emisiones futuras de los gases de invernadero y otros agentes contaminantes; es decir, dependerán de la opción del panorama de las emisiones. Un panorama en el cual la emisión de gases de invernadero es baja, debe conllevar a un cambio menos rápido del clima que uno en el cual las emisiones son altas. Un panorama del cambio del clima por lo tanto es una descripción coherente de un cambio futuro del clima bajo asunciones específicas sobre el crecimiento de emisiones de gases de invernadero y de otros agentes contaminantes y sobre otros factores que puedan influenciar en el clima futuro.

Brooks (2003), señala que los escenarios son una descripción del clima futuro, el cual depende de aumento acerca de futuras emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, dependiendo de las opciones de los escenarios de emisiones. En el 2000, el IPCC finalizó su Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (REEE). Estos nuevos escenarios examinan el período de 1990 al 2100 e incluyen diversos supuestos socioeconómicos como la población mundial y el producto bruto interno. Los escenarios REEE se han utilizado como base de las proyecciones climáticas de modelos de circulación general de la atmósfera (MCG) y modelo acoplados. Los escenarios comprenden una línea evolutiva similar en lo que respecta a sus características demográficas, sociales, económicas y de cambio tecnológico y está constituido de cuatro familias de escenarios: A1, A2, B1 y B2.

A1. La familia de escenarios y línea evolutiva A1 describe un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido; la población mundial alcanza su nivel más alto a mitad de siglo y disminuye posteriormente, produciéndose una rápida introducción de nuevas tecnologías más eficientes. Las cuestiones más importantes son la interacción cultural y social entre las regiones y la capacitación, con una importante reducción de las diferencias regionales en los ingresos per cápita. La familia de los escenarios A1 se divide en tres grupos que describen las distintas direcciones del cambio tecnológico en el sistema energético. Los tres grupos A1 se distinguen por su énfasis tecnológico: fuentes de energía intensivas de origen fósil A1F1, de origen no fósil (A1T) o un equilibrio entre todas las fuentes A1B (el equilibrio se define como la no dependencia excesiva de una fuente de energía concreta, suponiendo que se apliquen ritmos similares de mejoras en todas las formas de aprovisionamiento energético y en las tecnologías de uso final).

A2. La familia de escenarios y línea evolutiva A2 describe un mundo muy heterogéneo. La cuestión subyacente es la autosuficiencia y preservación de las identidades locales. Los perfiles de fertilidad en las distintas regiones tienden a converger muy lentamente, lo cual acarrea un aumento continuo constante de la población. El desarrollo económico tiene una orientación principalmente regional y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico están fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

B1. La familia de escenarios y línea evolutiva B1 describe un mundo convergente, con la misma población mundial, que alcanza su nivel más alto a mediados del siglo para disminuir posteriormente, como línea evolutiva A1 pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de la información y de los servicios, con reducciones en el consumo de materiales e introducción de tecnologías limpias y de recursos eficaces. En esta línea evolutiva se hace hincapié en las soluciones mundiales a la sostenibilidad económica social y ambiental, lo que comprende una mejora de la equidad.

B2. La familia de escenarios y línea evolutiva B2 describe un mundo en el que se hace hincapié en las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Se trata de un mundo cuya población mundial crece continuamente, a un ritmo menor al de la línea evolutiva A2, con niveles medios de desarrollo económico y cambios tecnológicos menos rápidos y más variados que en las líneas evolutivas B1 Y A1. Aunque el escenario también está orientado hacia la protección ambiental y a la equidad social, se centra en las escalas: local y regional.

Al evaluar los cambios climáticos futuros el IPCC, en su quinto informe presenta cuatro escenarios conocidos como Trayectorias Representativas de Concentración (RCP, por sus siglas en inglés), éstas se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5 W/m^2 . Los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XX frente a los escenarios de emisión utilizados en el IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4) (denominados SRES, por sus siglas en inglés) que no contemplaban los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales tendentes a mitigar las emisiones.

El escenario de emisiones bajas (RCP2,6) supone una reducción considerable y sostenida en las emisiones de gases de efecto invernadero, el escenario de emisiones altas (RCP8,5) supone la continuidad de las tasas de emisiones altas. Los dos escenarios intermedios (RCP 4,5 y 6,0) suponen una cierta estabilización de las emisiones (IPCC, 2014). Estos escenarios muestran el resultado de los diferentes niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, actuales y hasta 2100 (tabla I).

Tabla I. Escenarios de emisiones de GEI.

	FR	Tendencia del FR	(CO ₂) 2100
RCP2.6	2.6 W/m^2	Decreciente en 2100	421 ppm
RCP4.5	4.5 W/m^2	Estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6.0 W/m^2	Creciente	660 ppm
RCP8.5	8.5 W/m^2	Creciente	936 ppm

1.7. Maíz

El cultivo de maíz se originó mediante el proceso de domesticación que llevaron a cabo los antiguos habitantes de Mesoamérica, a partir de los teocintles, gramíneas muy similares al maíz, que crecen de manera natural principalmente en México y en parte de Centroamérica. Se considera que las poblaciones de teocintle del centro del México (Kato *et al.*, 1984) o los que crecen en el trópico seco de la Cuenca del Balsas (Matsuoka *et al.*, 2002), pudieron ser los ancestros de los cuales se domesticó el maíz como planta cultivada. El proceso de domesticación del maíz inició hace aproximadamente 10 000 años, muy asociada a la invención y desarrollo independiente de la agricultura en Mesoamérica, continua en el presente con el manejo, cultivo y selección que hacen año con año los agricultores y sus familias de sus variantes de maíces nativos (o criollos), asimismo con la interacción de este cultivo con sus parientes silvestres, los teocintles, en las regiones donde coinciden de manera natural (CONABIO, 2018).

Es distintivo entre las plantas cultivadas que al maíz lo podamos consumir en diferentes estados de su maduración, tierno o elote, previo a su maduración o como grano maduro. Se utilizan sus hojas (*totomoxtle*), mazorcas y sus granos de cientos de maneras distintas. Una vez que el maíz ha sido nixtamalizado (cocido con cal), proceso que lo vuelve más nutritivo en masa, se transforma en tortillas, tacos, tamales, panuchos, molotes, quesadillas, sopes, chalupas, tostadas, tlacoyos, huaraches, memelas, peneques, picadas, enchiladas, chilaquiles, bolitas de masa en el mole de olla y en el mole amarillo. El maíz entero se utiliza en sopas como el pozole y el maíz molido en bebidas como el pozole, pinole y una gran variedad de atoles. El maíz fermentado se utiliza en bebidas como el tesgüino, chicha y tepache. Sólo en México, se han identificado al menos 600 formas de preparar el maíz en la alimentación (CONABIO, 2018).

A través de los años, con la domesticado el maíz y adaptación a diferentes alturas, regiones, climas, suelos, laderas, sistemas de manejo y desarrollo tecnológico (CONABIO, 2011; Hernández, 1985), con la polinización hay flujo de genes y los

agricultores con su intercambio entre localidades cercanas y entre vecinos se ha generado gran diversidad de maíces (CONABIO, 2017; Muñoz, 2003). Las diferentes características fenotípicas (cónico, por la forma de la mazorca), tipo de grano (reventador, por la capacidad del grano para explotar y producir palomitas), por el lugar o región donde inicialmente fueron colectadas o son relevantes (Tuxpeño de Tuxpam, Veracruz; Chalqueño, típico del Valle de Chalco) o por el nombre con que son conocidas por los grupos indígenas o mestizos que las cultivan (Zapalote Chico en el Istmo de Oaxaca o Apachito en la Sierra Tarahumara) (McClintock, 1981; Wellhausen *et al.*, 1951), han hecho posible agrupar poblaciones con el término razas, incluyen rasgos en común ya sea morfológico, genético, ecológico y de historia (Anderson *et al.*, 1942; Harlan *et al.*, 1971; Hernández *et al.*, 1970).

El concepto y la categoría de raza es de gran utilidad como sistema de referencia rápido para comprender la variación de maíz, para organizar el material en las colecciones de bancos de germoplasma y para su uso en el mejoramiento (McClintock, 1981) así como para describir la diversidad a nivel de paisaje (Perales *et al.*, 2011). A su vez, las razas se agrupan en grupos o complejos raciales ya sea por la distribución geografía y climática (Goodman *et al.*, 1977; Sánchez *et al.*, 1989; Sánchez *et al.*, 2000). En América Latina se han descrito cerca de 220 razas de maíz (Goodman *et al.*, 1977), de las cuales 64 (29%) se han identificado y descrito en su mayoría para México (Anderson 1946; Wellhausen *et al.*, 1951; Sánchez 1989; Hernández *et al.*, 1970; Sánchez *et al.*, 2000), de las cuales para el estado de Tlaxcala se localizaron 7 razas de maíz: Arrocillo amarillo, Cacahuacintle, Celaya, Chalqueño, Cónico, Elotes cónicos y Palomero toluqueño (CONABIO, 2011).

1.7.1. Características del cultivo

Nombre común: Maíz.

El nombre proviene de las Antillas, pero en México, los nahuas lo denominaron *centil* (mazorca) o *tlaolli* (grano).

Reino: Plantae

Subclase: Monocotiledónea

Familia: Gramíneas (Gramineae)

Nombre científico (género y especie): *Zea mays*

Clase: Angiosperma

Orden: Cereales

1.7.2. Descripción física del cultivo

La planta alcanza de medio metro a seis metros de alto. Las hojas forman una larga vaina enrollada al tallo y un limbo más ancho y alargado. Del tallo nacen dos o tres inflorescencias muy densas o mazorcas envueltas en espatas, en la axila de las hojas muy ceñidas. Encada mazorca se ven las filas de granos, cuyo número puede variar de ocho a treinta. A cada grano le corresponde un largo hilo sedoso que sobresale por el extremo de la mazorca. El tallo de la planta está rematado en el extremo por una gran panoja de pequeñas flores masculinas; cuando el polen ha sido aventado, se vuelven secas y parduscas (Galarza *et al.*, 2007).

La planta de maíz es de porte robusto de fácil desarrollo y de producción anual, el tallo es simple y erecto, de elevada longitud, pudiendo alcanzar los cuatro metros de altura, es robusto y sin ramificaciones. La reproducción del maíz es sexual, ya que tienen espiga o inflorescencia masculina que presenta una panícula (espiga o penacho) de coloración amarilla que posee una cantidad muy elevada de polen en el orden de 20 a 25 millones de granos, en cada florecilla que compone la panícula se presentan tres estambres donde se desarrolla el polen. La mazorca o inflorescencia femenina marca un menor contenido en granos de polen, alrededor de los 800 o 1000 granos (Galarza *et al.*, 2007).

La polinización de las plantas se realiza con ayuda del viento, que transporta el polen de una planta a otra (polinización cruzada). El polen de la panícula masculina, arrastrado por el viento (polinización anemófila), cae sobre los estilos, donde germina y avanza hasta llegar al ovario; cada ovario fecundado crece hasta transformarse en un grano de maíz. Actualmente las variedades perfeccionadas de

maíz requieren un suelo arcilloso, de buen desagüe y cálido. El maíz produce más si se siembra después de una cosecha de leguminosas en rotación (Galarza *et al.*, 2007).

1.8. Fenología del maíz

El desarrollo fenológico del maíz se refiere al ritmo de crecimiento vegetativo y reproductivo expresado en función de los cambios morfológicos y fisiológicos de la planta, relacionados con el ambiente.

El desarrollo del cultivo consiste en una sucesión obligatoria de etapas o fases dadas en un orden riguroso e irreversible, correspondiendo a la iniciación de órganos nuevos, es un fenómeno puramente cualitativo. Se le llama ciclo de desarrollo al conjunto de fases que van desde la germinación de la semilla hasta la floración y formación del fruto. Este ciclo comprende dos etapas bien definidas: desarrollo vegetativo y desarrollo reproductivo. El sistema para clasificación de etapas o estadios utilizado por la Universidad de Iowa (Iowa State University of Science and Technology) que se presenta a continuación divide al desarrollo de la planta en vegetativo y reproductivo. Las subdivisiones del estadio vegetativo (V) son designadas como V1, hasta V(n), siendo (n) la última hoja antes del panojamiento (VT) para el cultivar considerado (Ritchie *et al.*, 1986). El número de hojas varía de acuerdo al cultivar y el efecto ambiental. Las divisiones de los estados reproductivos están designadas en el figura 4.

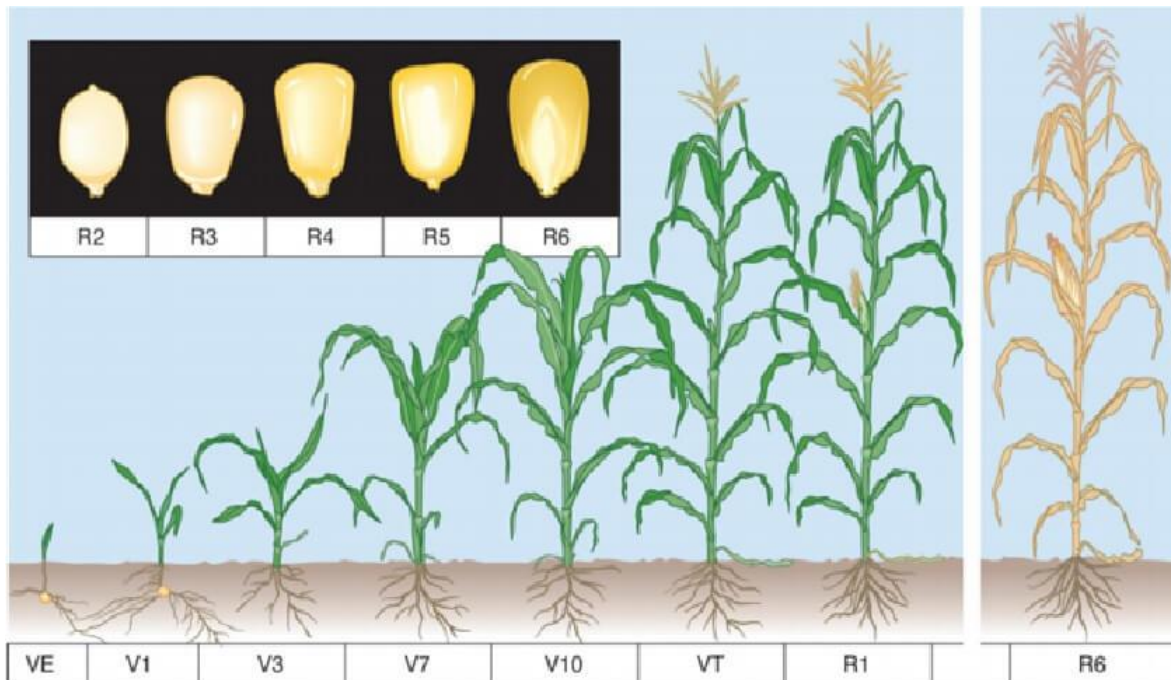


Figura 4. Etapas fenológicas de la fase vegetativa y reproductiva del maíz (Fuente: Emerson-Nafziger).

1.8.1. Estadios vegetativos

Etapa de Germinación y Emergencia

Se entiende por germinación a la serie de procesos que incluyen desde la imbibición o absorción de agua por parte de la semilla, hasta emergencia de la radícula; y por emergencia, a la etapa desde que emerge la radícula hasta la aparición del coleóptilo sobre el suelo (Bewley *et al.*, 1994). La semilla de maíz está recubierta por una capa externa que se llama pericarpio. La función de esta capa es proteger a la semilla, limitando o impidiendo la entrada de hongos o bacterias. Si el pericarpio resulta dañado, probablemente la germinación se torne más lenta, pues los patógenos pueden utilizar reservas de las semillas (Rojas *et al.*, 1987).

Desarrollo del Sistema Radical

El sistema radical del maíz consiste de dos sistemas de raíces: (1) raíces seminales cuyo origen está presente en el embrión y (2) raíces adventicias que se originan del tallo después de la germinación. Estos sistemas radicales son llamados temporario y permanente respectivamente, si bien el sistema seminal puede persistir y ser

funcional durante toda la vida de la planta (Kiesselbach, 1980). El sistema adventicio empieza a desarrollarse cerca de VE y las primeras raíces empiezan a elongarse a partir del primer nudo durante V1. Desde V1 hasta casi R3 (después de la cual hay un crecimiento radical limitado), se desarrollan raíces adventicias en cada nudo del tallo hasta un total de 7 a 10 nudos.

Dado que la radícula y las raíces seminales laterales comienzan el crecimiento directamente de la semilla, la profundidad a la cual se desarrollan inicialmente dependerá de la profundidad de siembra. El crecimiento de estas raíces, sin embargo, decrece después de VE y es casi inexistente en el estado V3. (Ritchie *et al.*, 1986). Las raíces adventicias, al igual que las seminales, crecen primero horizontalmente y después en profundidad. Este cambio en la dirección de crecimiento ocurre aproximadamente 4 semanas después de la siembra. Si la temperatura del suelo aumenta, hay menor crecimiento horizontal. El crecimiento horizontal puede abarcar un área de 2.5 m de diámetro (Kiesselbach, 1980). Además, de las raíces funcionales, 3 o 4 entrenudos aéreos pueden llevar raíces no funcionales que sirven para fijar la planta al suelo.

Estadio V3

Aproximadamente a los 8 días posteriores a la emergencia la planta presenta 2 hojas y a los doce días 3 hojas. En V3 el ápice del tallo (punto de crecimiento) aún se encuentra por debajo de la superficie del suelo. En este momento se inician todas las hojas y espigas que la planta podría eventualmente producir. La ocurrencia de granizo, viento o heladas que puedan dañar las hojas expuestas en V3 tiene un efecto pequeño o nulo sobre el punto de crecimiento (subterráneo) o el rendimiento final de grano.

Estadio V10

Cerca de V10 (35 días en promedio, posemergencia) la planta comienza un rápido incremento en la acumulación de materia seca que continuará hasta la etapa

reproductiva avanzada. Se requieren altas cantidades de nutrientes y agua del suelo para cumplir con la demanda.

Estadio VT (Panojamiento)

VT se inicia aproximadamente 2-3 días antes de la emergencia de barbas, tiempo durante el cual la planta de maíz ha alcanzado su altura final y comienza la liberación del polen. El tiempo entre VT y R1 puede variar considerablemente en función del cultivar y de las condiciones ambientales (Ritchie *et al.*, 1986).

1.8.2. Estadios reproductivos y desarrollo del grano

Los seis estadios reproductivos que se describen a continuación se refieren principalmente al desarrollo del grano y sus partes. La descripción de R2, R3 y R4, si bien, generalmente se aplica a todos los granos de la espiga, se basa en los que se poseionan en medio de la misma. La descripción de los granos en R5 o R6 corresponde a todos los granos de la espiga. En condiciones de campo, en cada planta la panoja libera el polen antes de que las barbas hayan emergido de la espiga, pero continúa liberándolo varios días después de que las barbas estén listas para ser polinizadas (en total una semana o más) (Kiesselbach, 1980).

Estadio R1 - Emergencia de Barbas

La etapa R1 comienza cuando algunas barbas son visibles fuera de las vainas, aproximadamente 66 días después de la emergencia. La polinización ocurre cuando los granos de polen se depositan sobre las barbas. Un grano de polen capturado requiere 24 horas para crecer dentro de la barba hasta el óvulo donde ocurre la fertilización y el óvulo es fecundado. Generalmente se necesitan entre 2 y 3 días para que todas las barbas de una espiga queden expuestas y sean polinizadas. Las barbas van a crecer 2.5-3.8 cm por día y continuarán elongándose hasta ser fertilizadas (Ritchie *et al.*, 1986).

La barba suministra agua al polen y provoca su crecimiento. En este momento se determina el número de óvulos fertilizados. Cuando la punta del tubo polínico llega

al micrópilo penetra entre las células del tejido nuclear hasta alcanzar el saco embrionario femenino. Cuando entra al saco embrionario, el tubo polínico se rompe liberando los dos espermatozoides. El núcleo de uno de los espermatozoides ($n=10$) se fusiona con el núcleo del óvulo ($n=10$) formando el cigoto ($2n=20$) del maíz. El otro espermatozoide se fusiona con los dos núcleos polares estableciendo el endosperma primario de 30 cromosomas ($3n$). Este proceso es denominado doble fertilización (Kiesselbach, 1980).

Estadio R2 - Ampolla (aproximadamente 10-14 días después de emergencia de Barbas).

Aunque el embrión todavía se está desarrollando lentamente durante esta etapa, la radícula, el coleóptero y la primera hoja embrionaria ya se han formado. La mazorca está casi por alcanzar o ya alcanzó su tamaño completo. Las barbas, habiendo completado su función de floración se oscurecen y comienzan a secarse. (Ritchie *et al.*, 1986).

Los granos presentan cerca de 85% de humedad, porcentaje que irá descendiendo gradualmente hasta la cosecha.

Estadio R3 - Lechoso (18-22 días después de emergencia de barbas).

En R3 el grano es externamente de un color amarillo y el fluido interno es blanco lechoso debido a la acumulación de almidón. El embrión en esta etapa crece rápidamente (Ritchie *et al.*, 1986).

Los granos presentan una rápida acumulación de materia seca y contiene aproximadamente 80% de humedad. En R3 las divisiones celulares del endosperma están esencialmente terminadas, por lo que el crecimiento es debido principalmente a la expansión celular y la acumulación de almidón en las células.

El rendimiento final depende del número de granos que se desarrollen y del tamaño final o peso de los granos. Aunque no tan severo como en R1, deficiencias en R3 pueden tener un efecto profundo en el rendimiento reduciendo ambos componentes de rendimiento. A medida que el grano madura, la reducción de rendimiento es menor al presentarse un estrés hídrico.

Estadio R4 - Pastoso (24-28 días después de emergencia de barbas).

La continua acumulación de almidón en el endosperma provoca que el fluido interno se transforme en una consistencia pastosa. Normalmente en esta etapa ya se han formado cuatro hojas embrionarias y el embrión ha crecido considerablemente en tamaño con respecto a la etapa R3 (Ritchie *et al.*, 1986).

Estadio R5 - Dentado (35-40 días después de emergencia de barbas)

Los granos se secan comenzando por la parte superior donde aparece una capa dura de almidón de color blanco. Condiciones adversas en esta etapa reducirán el rendimiento a través de una disminución del peso de los granos y no del número de granos. Una helada severa, temprana (antes de R6) en siembras tardías puede cortar la acumulación de materia seca y causar la formación prematura de punto negro. También puede causar reducción en el rendimiento retrasando las operaciones de cosecha, debido a que en los maíces dañados por heladas el grano se seca más lentamente (Ritchie *et al.*, 1986). En este estadio es cuando se recomienda normalmente realizar el ensilaje.

Estadio R6 - Madurez Fisiológica (55-65 días después de emergencia de barbas).

El estadio R6 se define cuando todos los granos en la espiga han alcanzado su máximo peso seco o máxima acumulación de materia seca y se forma una absición marrón o negra en la zona de inserción del grano a la mazorca (punto negro o capa negra). Esta absición es un buen indicador de la máxima acumulación de materia seca (madurez fisiológica) y señala el final de crecimiento del grano. El promedio de humedad de grano en R6 (formación del punto negro) es 30-35%, sin embargo, esto puede variar entre cultivares y condiciones ambientales. El grano aún no está pronto para un almacenamiento seguro, para lo cual se requiere 13-15% de humedad, cosechar en R6 o en seguida, puede ser caro debido a los costos de secado, puede ser ventajoso dejar que el cultivo se seque parcialmente en el campo, dado que las pérdidas no son un problema. La tasa de secado después de R6 depende del

cultivar y del ambiente (Ritchieef al, 1986). La duración del período emergencia de plántula y emergencia de barbas es muy sensible a las variaciones climáticas.

1.9. Requerimientos climáticos

El maíz debido a sus tipos ampliamente divergentes crece en un amplio rango de condiciones climáticas, no pudiéndose establecer límites precisos. Es cultivado en áreas tropicales, subtropicales y templadas y en altitudes que van desde el nivel del mar hasta varios miles de metros sobre el mismo, pero presenta un límite, producto de una combinación de temperaturas bajas con el período libre de heladas (Shaw, 1988).

Temperatura

Aunque el maíz es originario de los Trópicos, el crecimiento óptimo del cultivo ocurre a temperaturas de 24 a 30 °C. Temperaturas nocturnas altas no favorecen el crecimiento del cultivo (tabla II) (Pendelton, 1979), sino que incrementan las tasas de respiración y de esta forma se reduce el peso seco acumulado durante el día por la fotosíntesis.

Tabla II. Efecto de la temperatura nocturna por 52 noches después de la polinización en el rendimiento de maíz

Tratamiento	Temperatura promedio nocturna	Rendimiento t/ha
Aire natural	18	10.5
Aire enfriado	17	10.2
Aire calentado	29	6.3

Viento y Evapotranspiración

En condiciones variables de humedad del suelo, la espiga más larga fue producida con 60% de saturación, mientras que la máxima acumulación de peso de la planta fue alcanzada a 80%. A contenidos de humedad mayores el crecimiento de las plantas fue mayor pero no fue correspondido por un aumento en el tamaño de las espigas. El viento es un factor muy importante cuando se consideran las pérdidas de agua a través de la evapotranspiración, las que por su parte es mayor con el

aumento de la temperatura (Shaw, 1955). Durante períodos de viento, alta radiación solar y alta temperatura, más agua es extraída por evaporación de la superficie del suelo y por transpiración de las hojas.

Radiación

La energía solar utilizada por el maíz es la proveniente de longitud de onda entre 0.4 y 0.7 micrones, la llamada radiación visible del espectro. Radiación alta y temperaturas excesivamente altas, pueden causar que la fotosíntesis del estrato superior de hojas cese por el proceso de fotoinhibición. La cantidad de radiación potencialmente interceptable en un período fenológico específico está determinada por la radiación incidente diaria, la que a su vez determina la tasa de crecimiento del cultivo, y por la temperatura, que define la duración del período. La cantidad de radiación interceptada en el período crítico de floración, define el número de granos, mientras que aquella interceptada durante el período de llenado de granos, define el peso de mil granos (Fischer *et al.*, 1984; Tollenaar, 1977).

Balance Hídrico

La disponibilidad de agua de un suelo, depende de la profundidad y textura del mismo (el agua en suelos de tipo arenoso está retenida con menos fuerza que en suelos de tipo arcilloso). Es así que para evaluar las relaciones hídricas de las plantas es necesario evaluar cuantitativamente la humedad disponible en el suelo, las características de retención de agua y la demanda atmosférica.

Cuanto mayor es la demanda atmosférica, mayor es el nivel de humedad en el suelo necesario para satisfacerla y evitar el estrés. Cuando la evapotranspiración (ET) es menor al 100% potencial la planta está sometida a algún grado de estrés. Por ejemplo, con una humedad disponible en el suelo de 40% en la zona de las raíces, para una alta demanda atmosférica, la ET real será el 82% de la potencial; para una demanda media el 93% y para una demanda baja el 100%. En el período posterior a emergencia de barbas (con 40% de humedad disponible), dichos valores serán de 59, 83 y 100% respectiva mente. El grado de estrés variará con el tipo de suelo debido a las diferentes características en cuanto a la retención de agua. La

demanda atmosférica por agua es una función de la energía disponible (radiación solar), el movimiento de humedad de la superficie evaporante (viento), la humedad de la atmósfera y la temperatura del aire. La temperatura del aire está relacionada con la temperatura de la superficie evaporante y también afecta la humedad atmosférica, variando su capacidad de retención de agua. La radiación es el factor principalmente considerado como controlador de la demanda atmosférica (Shaw, 1988).

Agua

El maíz necesita por lo menos de 500 a 700 mm de precipitación bien distribuida durante el ciclo del cultivo (Deras, 2014).

1.10. Selección de suelos

En regiones de clima frío y con fuertes precipitaciones, los suelos relativamente ligeros son preferibles por su facilidad para drenar y alta capacidad conservar el calor. En lugares de escasas precipitaciones, los suelos de textura relativamente pesada (arcillosa) dotados de alta capacidad relativa para retener el agua, son los más convenientes. En general los más idóneos para el cultivo de maíz son los de textura media (francos), fértiles, bien drenados, profundos y con elevada capacidad de retención de agua. El maíz se adapta bastante bien a la acidez o alcalinidad del terreno. Puede cultivarse con buenos resultados entre pH 5.5 y 7.0 aunque el óptimo corresponde a una ligera acidez (pH entre 5.5 y 6.5) (Deras, 2014).

1.10.1. Fertilización

El maíz necesita para su desarrollo ciertas cantidades de elementos minerales. Las carencias en la planta se manifiestan cuando algún nutriente mineral está ausente o en exceso. Se recomienda un abonado de suelo rico en Potasio (K) y Fósforo (P). En cantidades de 0.3 kg de P en 100 Kg de abonado. También un aporte de nitrógeno (N) en mayor cantidad sobre todo en época de crecimiento vegetativo. El abonado se efectúa normalmente según las características de la zona de plantación, por lo que no se sigue un abonado riguroso en todas las zonas por igual. No

obstante, se aplica un abonado muy flojo en la primera época de desarrollo de la planta hasta que la planta tenga un número de hojas de 6 a 8 (CONACYT, 2018).

A partir de esta cantidad de hojas se recomienda un abonado de:

- N: 82% (abonado nitrogenado).
- P₂O₅: 70% (abonado fosforado).
- K₂O: 92% (abonado en potasa)

Para el cultivo de maíz un abonado de fondo en cantidades de 825Kg/ha durante las labores de cultivo. Los abonados de cobertera son aquellos que se realizan cuando aparecen las primeras hojas de la planta y los más utilizados son (CONACYT, 2018):

- Nitrato amónico de calcio. 500 kg/ha
- Urea. 295kg/ha
- Solución nitrogenada. 525kg/ha

Es importante realizar un abonado ajustándose a las necesidades presentadas por la planta de una forma.

Nitrógeno (N): La cantidad de nitrógeno a aplicar depende de las necesidades de producción que se deseen alcanzar así como el tipo de textura del suelo. La cantidad aplicada va desde 20 a 30 Kg de N por ha. Un déficit de N puede afectar el crecimiento y el rendimiento de maíz (Below, 2002). Los síntomas se ven más reflejados en aquellos órganos fotosintéticos, las hojas, que aparecen con coloraciones amarillentas sobre los ápices y se van extendiendo a lo largo de todo el nervio. Las mazorcas aparecen sin granos en las puntas.

Fósforo (P): La dosis dependen del tipo de suelo presente ya sea rojo, amarillo o suelos negros. El fósforo da vigor a las raíces. Su déficit afecta a la fecundación y el grano no se desarrolla bien

Potasio (K): Debe aplicarse en una cantidad superior a 80-100 ppm en caso de suelos arenosos y para suelos arcillosos las dosis son más elevadas de 135-160 ppm. La deficiencia de potasio hace a la planta muy sensible a ataques de hongos y su porte es débil, ya que la raíz se ve muy afectada (CONACYT, 2018). Además, cantidades adecuadas de potasio son importantes en la adaptación de al stress causado por factores bióticos, abióticos, tales como sequía, salinidad, heladas, ataques de insectos o enfermedades (Kant *et al.*, 2006).

Otros elementos: Boro (B), Magnesio (Mg), Azufre (S), Molibdeno (Mo) y Cinc (Zn). Son nutrientes que pueden aparecer en forma deficiente o en exceso en la planta. Las carencias del Boro aparecen muy marcadas en las mazorcas con inexistencia de granos en algunas partes de ella. Los primeros estadios de desarrollo del maíz son muy sensibles a la falta de agua y nutrientes por lo que la consolidación del cultivo demanda una buena inversión en insumos y labores culturales (López *et al.*, 2003).

1.11. Plagas comunes del maíz

De acuerdo con Saunders *et al.*, (1998), las plagas de los cultivos son aquellos organismos (insectos, ácaros, babosas, nemátodos, roedores, pájaros y en algunas definiciones las malezas y enfermedades) que compiten con el hombre por los alimentos que produce. Hay insectos que en estados larvales se alimentan de las semillas en germinación o de raíces de las plantas interfiriendo en la nutrición de agua, sales minerales y translocación, causando pérdidas en la producción y ocasionando problemas socio-económicos. Muchos de ellos pueden pasar todo su ciclo de vida debajo de la superficie del suelo. También hay insectos que en estados larvales pueden alimentarse de raíces de plantas cultivadas (figura 5), mientras que los adultos se alimentan muchas veces de las partes aéreas, como por ejemplo la gallina ciega y el gusano alambre (Jiménez *et al.*, 2009).

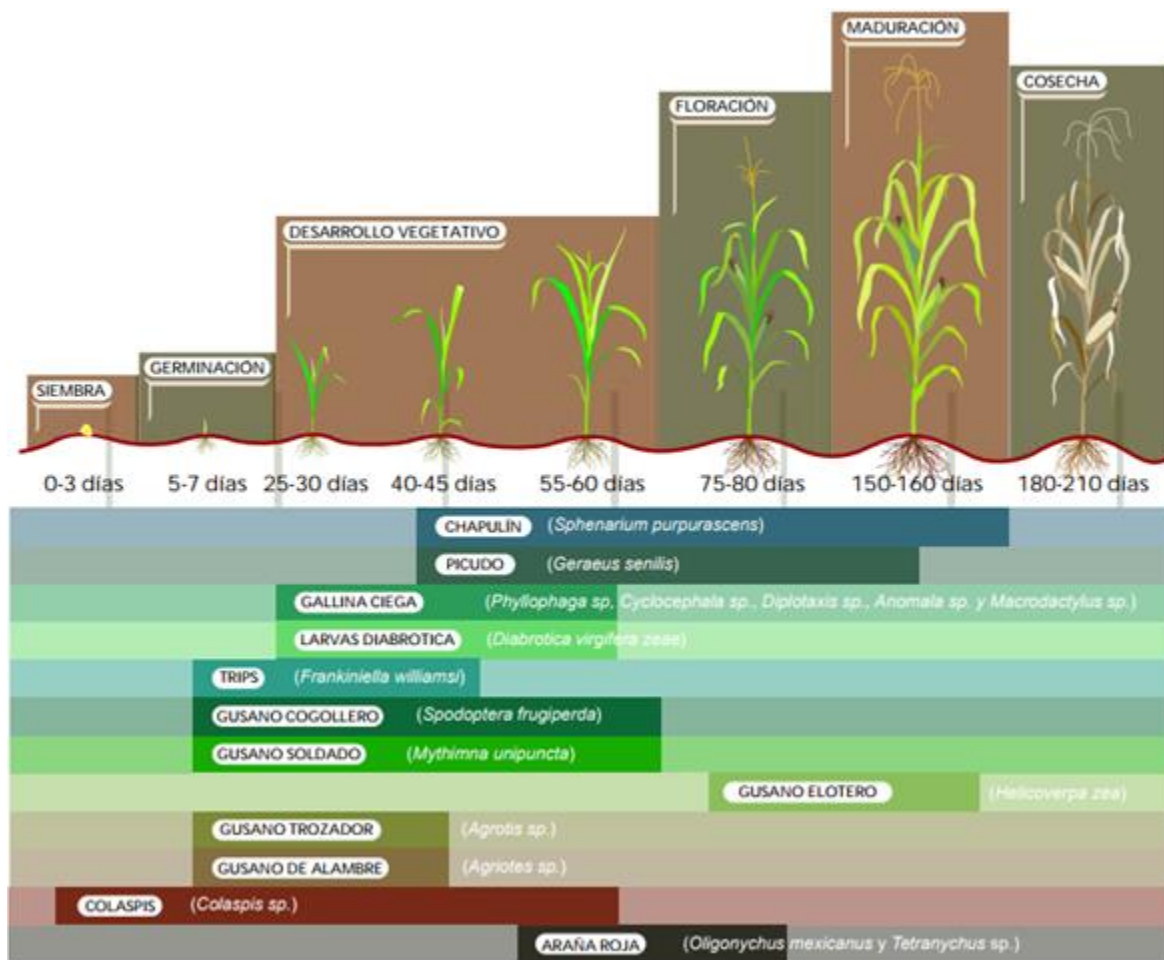


Figura 5. Principales plagas en relación al desarrollo fenológico del cultivo del maíz (Fuente: Comité Estatal de Sanidad Vegetal Guanajuato).

Chapulín (*Sphenarium sp*, *Melanoplus sp*)

Estos insectos devoran las hojas y partes tiernas de la planta. El ataque lo inician en los bordes de las parcelas, ya que las hembras depositan su paquete de huevecillos en las grietas de los terrenos sin laboreo (CESAVEG, 2008b).

Picudo (*Geraeus senilis*, *Nicentrites testaceipes*)

Las larvas se alimentan de las raíces del maíz. Los adultos se presentan desde julio a octubre, con poblaciones más altas en agosto. Se considera una plaga de importancia secundaria (CESAVEG, 2008b).

Gallina ciega (*Phyllophaga sp, Cyclocephala sp, Diplotaxis sp, Macroductylus sp y Anomala sp*)

Los adultos (escarabajos de color pardo rojizo) emergen del suelo tres días después de que se establece el temporal de lluvias y a los 25 días aproximadamente aparece el gusano de gallina ciega, durando hasta 6 meses en esta fase de desarrollo, para después pupar y formar una galería en el suelo como adulto (CESAVEG, 2008a).

Gusano alfilerillo (*Diabrotica virgifera zea*)

El daño principal lo realiza la larva al alimentarse de la raíz. Aparece como problema en suelos arcillosos. Las plantas dañadas presentan síntomas de falta de agua aun cuando exista buena humedad en el suelo, además el daño disminuye la capacidad del anclaje y soporte de la planta, lo que ocasiona el “cuello de ganso” y la caída de la planta (CESAVEG, 2008b).

Trips (*Frankliniella williamsi*)

Estos insectos empiezan a causar daños en cuanto la plántula se establece, pueden llegar a ser tan severos que la planta puede presentar el síntoma de falta de humedad (CESAVEG, 2008a). Los huevos son depositados en el tejido tierno de la planta y la eclosión se presenta en 2 a 14 días dependiendo de la temperatura. Las larvas de primer estadio empiezan a alimentarse pronto después de eclosionar (CESAVEG, 2008b).

Gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*)

Las larvas al eclosionar tienen hábitos gregarios, canibalísticos y se establecen en el cogollo de la planta (CESAVEG, 2008b). El ataque temprano ocasiona retraso en el desarrollo del cultivo, además de que causa daño a los tejidos que formarán la mazorca y por lo tanto afecta directamente el rendimiento; en algunos casos el ataque severo causa la muerte de la planta. En épocas de sequía se llega a observar causando daños como gusano trozador, lo que llega a dificultar su control (CESAVEG, 2008a).

Gusano soldado (*Spodoptera exigua*)

La etapa larval pasa por cinco instares de desarrollo. La larva del cuarto instar come el 80 % del follaje total que consumirá en todo su ciclo. La incidencia de estos insectos es muy irregular ya que aparecen de manera esporádica cada 2 – 3 años. Los adultos son de hábitos nocturnos, su primera generación se presenta en mayo y la hembra pone hasta 2,000 huevecillos durante su vida. Las larvas defolian principalmente maíz y sorgo (CESAVEG, 2008b).

Gusano elotero (*Helicoverpa zea*)

El daño principal que ocasiona este insecto es la destrucción de los granos de la punta del elote. El adulto de este gusano es una palomilla que pone hasta 3,000 huevecillos en los estigmas (pelos) del jilote (mazorca) de manera separada pues las larvas son caníbales. Esto ocurre de los 85 a 90 días después de la fecha de siembra (CESAVEG, 2008a y CESAVEG, 2008b).

Gusano trozador (*Agrotis sp*)

Es una plaga secundaria, aunque puede convertirse en un problema serio durante la sequía (CESAVEG, 2008a). Las larvas permanecen ocultas durante el día y en la noche se alimentan CESAVEG, 2008b.

Gusano de alambre (*Agriotes sp*)

Pueden alimentarse de semillas en germinación, raíces y pueden barrenar las partes subterráneas de las plántulas. Las larvas pasan cinco años en el suelo donde se alimentan, mudando dos veces en el año. Suelos en donde se adicionan estiércol son propensos al ataque de este tipo de insectos (CESAVEG, 2008b).

Catarina del maíz (*Colaspis sp*)

La fase larval continúa en el suelo durante 30 a 90 días. En este estado se alimenta de raíces de gramíneas (CESAVEG, 2008b).

Araña roja (*Olygonychus mexicanus* y *Tetranychus* sp)

Poblaciones dañinas económicamente importantes aparecen durante Junio, Julio y Agosto; particularmente si el clima es caliente, ventoso y seco. Los efectos sobre el rendimiento son más severos cuando los ácaros dañan las hojas en o arriba del nivel de la mazorca. Las infestaciones severas se parecen al estrés por sequía ya que el daño progresa de la base de la planta hacia arriba (CESAVEG, 2008b).

1.12. Variabilidad de maíz en México

El cultivo del maíz en México se hace actualmente en un amplio rango de altitud y variación climática, desde el nivel del mar hasta los 3 400 msnm. Se siembra en zonas tórridas con escasa precipitación, en regiones templadas, en las faldas de las altas montañas, en ambientes muy cálidos y húmedos, en escaso suelo, en pronunciadas laderas o en amplios valles fértiles, en diferentes épocas del año y bajo múltiples sistemas de manejo y desarrollo tecnológico (CONABIO 2011, Hernández X. 1985). A esta gran diversidad de ambientes, los agricultores, indígenas o mestizos, mediante su conocimiento y habilidad, han logrado adaptar y mantener una extensa diversidad de maíces nativos (Muñoz, 2003).

La variabilidad del maíz de México ha sido objeto de varios estudios que han descrito las razas y las relaciones raciales a lo largo de casi un siglo. El primer estudio que documentó con gran detalle el maíz de México fue el de Chávez (1913) quien describió 56 variedades con base en caracteres del grano, olote, mazorca y el período de crecimiento vegetativo. Muchas de las variedades corresponden a las razas descritas recientemente y que se siembran en la actualidad de acuerdo a la CONABIO, (2018) se encuentran en 7 grupos: Grupo Cónico de maíz en México (figura 6), Grupo Sierra de Chihuahua (figura 7), Grupos de maíces de Ocho hileras (figura 8), Grupo Chapalote (figura 9), Razas de maíces tropicales precoces (figura 10), Grupo de maíces dentados tropicales (figura 11) y Grupo de maíces de maduración tardía (figura 12).

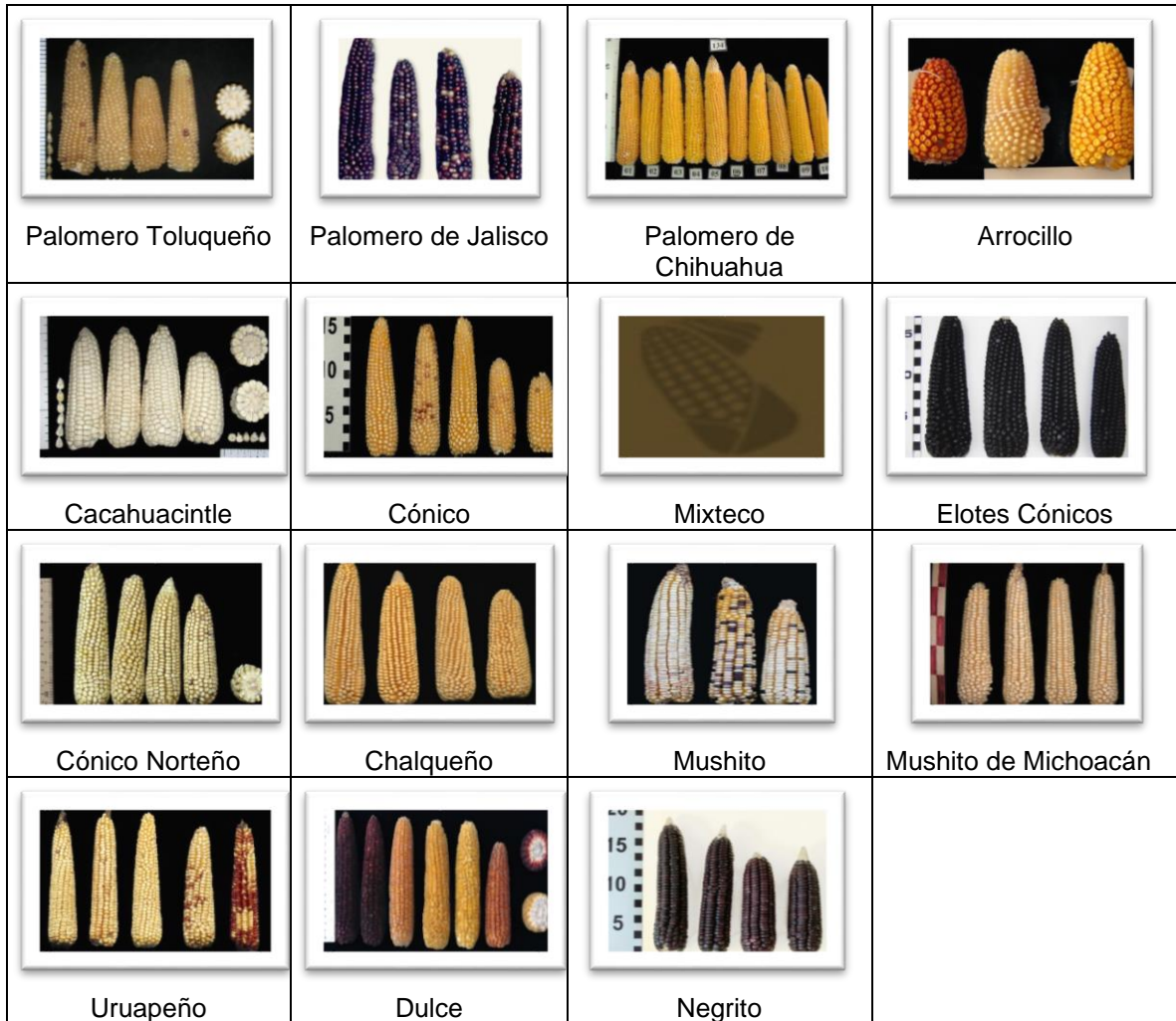


Figura 6. Grupo Cónico de maíz en México.

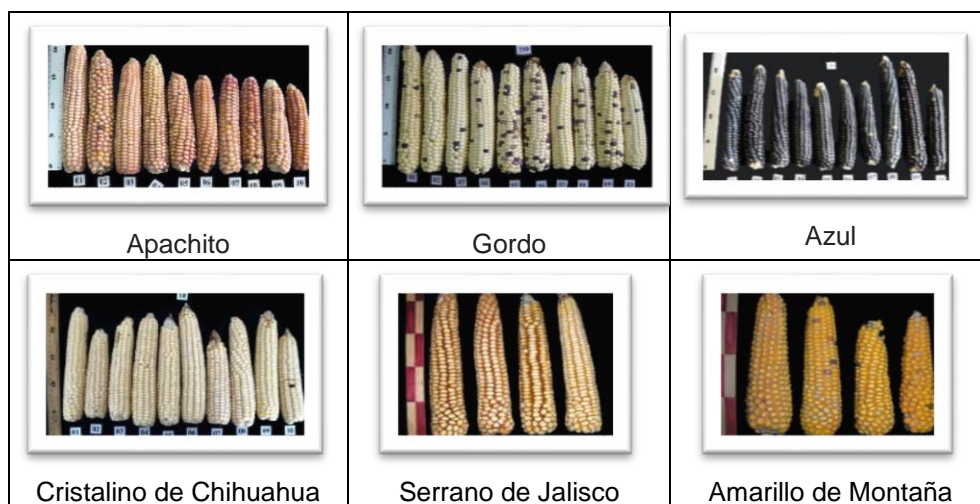


Figura 7. Grupo Sierra de Chihuahua o razas de las partes altas del norte de México.



Figura 8. Grupos de maíces de Ocho hileras o razas del occidente de México.



Figura 9. Grupo Chapalote



Figura 10. Razas de maíces tropicales precoces o de maduración temprana.

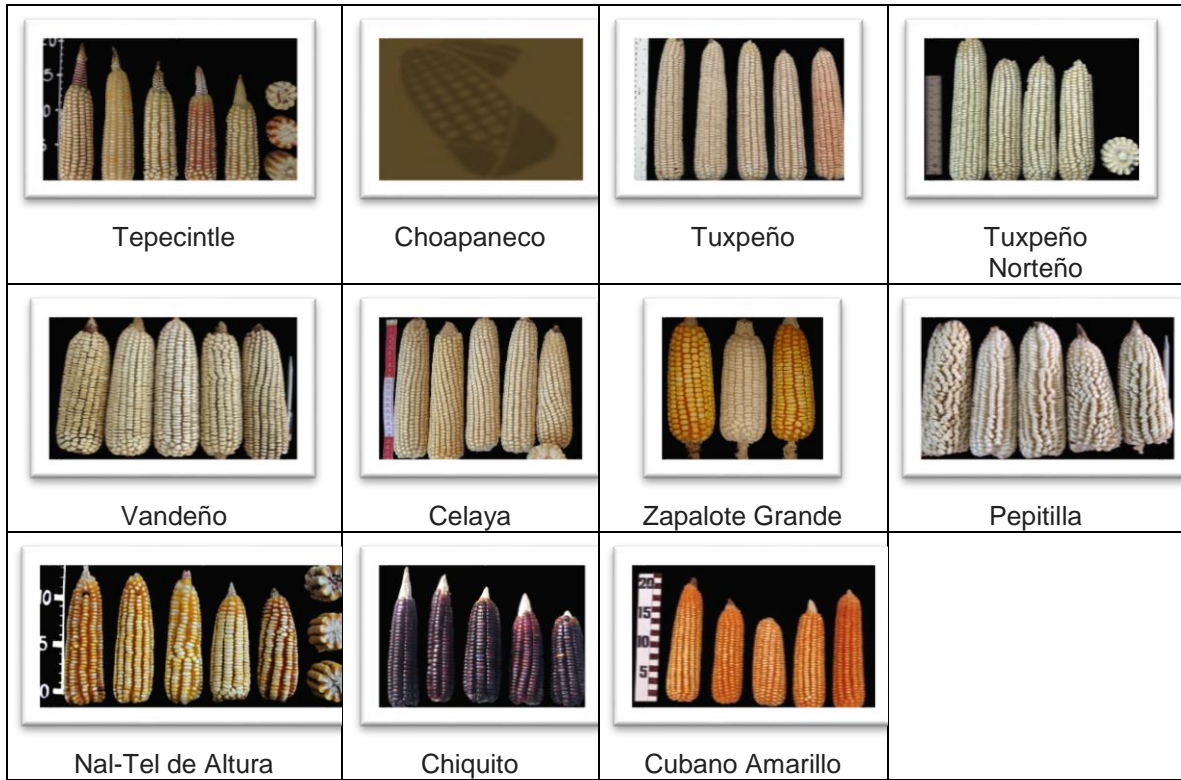


Figura 11. Grupo de maíces dentados tropicales.

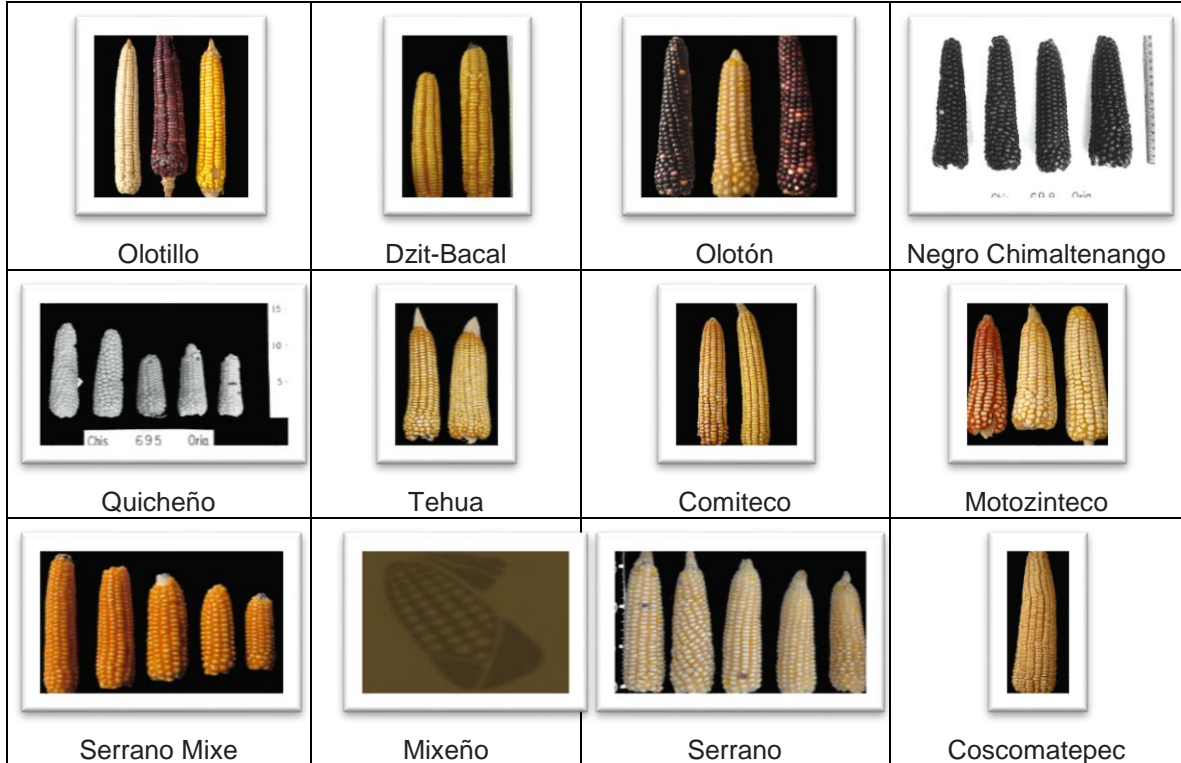


Figura 12. Grupo de maíces de maduración tardía.

1.13. Maíz en Tlaxcala

1.13.1. Grupo Cónico

El grupo Cónico incluye razas de maíz cuya característica resaltante es la forma cónica o piramidal de sus mazorcas (Sánchez, 2000).

Las razas del grupo Cónico se distribuyen predominantemente en las regiones con elevaciones de más de 2 000 m (Sánchez, 2011) y en su mayoría son endémicas a los valles altos y sierras del centro del país: el Valle de México, el Valle de Toluca, la Sierra Norte de Puebla, la Meseta Purhépecha en Michoacán y la Mixteca Alta en Oaxaca. Hacia el sur prevalecen las razas Chalqueño y Cónico. Las razas de este grupo, tienen en común mazorcas de forma cónica, números altos de hileras de grano, entre 14 y 20; granos de 4 a 8 mm de ancho con textura variable, desde harinosos hasta palomeros, número reducido de ramas de la espiga, sistema de raíces débiles, hojas caídas y vainas de las hojas fuertemente pubescentes con la presencia de antocianina (Sánchez, 2011).

El grupo Cónico es uno de los más característicos y endémicos de México (Anderson, 1946 y Sánchez *et al.*, 2000). Sus razas son la base de la producción en zonas agrícola del centro del país, y se destinan a diferentes usos alimenticios, como producción de tortilla, tamales, antojitos, pozoles, palomitas, entre otros. A la importancia económica del grano se asocia el aprovechamiento de subproductos de la planta como la hoja para tamal y la planta entera para forraje. En la zona de cultivo de las razas del grupo Cónico se distribuyen de manera natural poblaciones de teocintle, muchas veces asociadas a los campos de cultivo de maíz, principalmente en el Valle de Toluca, el oriente y sur del Valle de México y la región central de Puebla. Los teocintles que crecen en esta región corresponden, en su mayoría, a la subespecie *Zea mays* spp. *mexicana* raza Chalco (Sánchez *et al.*, 2008 y Wilkes, 1977).

Las razas del grupo Cónico presentan similitudes morfológicas con los teocintles de la raza Chalco en el tipo de planta, pubescencia y coloración rojiza en las vainas de

las hojas (Kato, 1996 y Wilkes, 1977), así como cercanía genética con teocintles de la raza Balsas –*Zea mays ssp. parviglumis*- (van Heerwaarden *et al.*, 2011). Esta similitud morfológica dificulta diferenciar los teocintles del maíz, en los terrenos de cultivo donde confluyen en sus primeras etapas de crecimiento. En algunos lugares se le llega a considerar a los teocintles como maleza, no obstante también representan una importante fuente de forraje y de flujo genético con el maíz (Kato, 1996 y Sánchez *et al.*, 2008).

Cónico

La raza Cónico, como su nombre lo indica, agrupa un conjunto de poblaciones de maíces de mazorca de forma cónica o piramidal, que presentan una amplia variación en color de grano, siendo el más frecuente el blanco, diferentes tonalidades de amarillo, morados y rojos; en textura de grano son principalmente semicristalinos y semidentados (figura 12). Su longitud de ciclo de vida es de medio a precoz (CONABIO 2011 y Wellhausen *et al.*, 1951).



Figura 13. Muestra de la raza Cónico (fuente: Castaño-Suárez, E).

Se cultiva en las áreas agrícolas de temporal de zonas altas y templadas la Mesa Central, principalmente en los estados de México, Puebla, Tlaxcala e Hidalgo, desde 950-3 000 msnm, aunque predomina entre los 1 800 y 2 800 msnm (CONABIO 2011, Wellhausen *et al.*, 1951). Esta raza presenta un vigor de emergencia alto y

tolerancia al frío por lo que se llega a cultivar hacia las faldas de los volcanes del centro de México (Ortega, 2011).

Su uso es amplio: tortilla, elotes, antojitos y como forraje. Ha sido empleada como fuente de materiales mejorados de valles altos en México y para ampliar la base genética de maíces mejorados en áreas templadas de otras regiones del mundo (CONABIO 2011, Eagles *et al.*, 1990; Eagles *et al.*, 1994; Ortega, 2011; Wellhausen *et al.*, 1951). Se postula que se originó de la selección a partir de cruce natural de poblaciones de las razas Palomero Toluqueño y Cacahuacintle (Wellhuasen *et al.*, 1951).

Elotes Cónicos

Esta raza se caracteriza por sus mazorcas con granos semi-harinosos de coloración rojiza a morado o negra, pigmentaciones que se presentan en la aleurona (tejido interno del grano) o en el pericarpio. Es característico en esta raza la presencia de un pedúnculo (estructura que conecta a la mazorca con el tallo de la planta) extramadamente pequeño o delgado, lo que da lugar a que los granos cubran prácticamente la base de la mazorca (figura14) (Wellhausen *et al.*, 1951).



Figura 14. Muestra de la raza Elotes Cónicos (fuente: Ortega-Paczka, R).

Se cultiva principalmente en la Mesa Central: Estado de México, Michoacán, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo y partes altas y frías de Veracruz y en la Mixteca de Oaxaca, a alturas de 1 700 a 3 000 msnm (Aragón *et al.*, 2006; Hernández, 2010; Wellhausen *et al.*, 1951).

Por sus caracteres de color y textura de grano es muy apreciada para elotes ya que son más dulces y blandos que otros maíces de la raza Cónico con los cuales coincide en su distribución, así como para numerosos antojitos, pinoles y atoles de color. Tiene alto potencial por su alta producción de pigmentos. En la región centro del país está aumentando el uso de estos maíces de color para ofrecer tortillas o antojitos como signos de calidad o novedad (Ortega, 2011 y Wellhausen *et al.*, 1951). Esta raza fue considerada inicialmente como subraza de Cónico, derivada de ésta con posible introgresión de Cacahuacintle (Wellhausen *et al.*, 1951), posteriormente se maneja como raza separada (Ortega *et al.*, 1989 y Sánchez *et al.*, 2000).

Cacahuacintle

Raza de grano grande y harinoso, predomina el grano blanco (figura 15), aunque también puede presentar coloraciones rosas o azules. Es el maíz por excelencia para pozole y elotes en los valles altos centrales del país, en gran parte de los estados de México, D. F., Tlaxcala y algunas zonas templadas de Puebla (Wellhausen *et al.*, 1951).



Figura 15. Muestra de la raza Cacahuacintle (fuente: Hernández-Casillas, J. M).

Cultivada principalmente en el valle de Toluca en suelos de origen volcánico, región que se considera su centro de diversidad, aunque también se cultiva ampliamente en la región de los “Llanos de Serdán” en el estado de Puebla y ocasionalmente en otras localidades de valles altos del centro del país (Hidalgo, Puebla, Tlaxcala), en partes altas y con temperaturas bajas (Wellhausen *et al.*, 1951). Por sus hojas péndulas (caídas) tolera las granizadas. Sus usos son amplios: pozole, elote, pinole, atole, galletitas y harina. Dada su calidad de grano, el kilogramo de este adquiere valores mayores al maíz común (Wellhausen *et al.*, 1951).

Chalqueño

Una de las razas más productivas. Se caracteriza por sus plantas de porte alto, mazorcas grandes y cónicas con alto número de hileras (figura 16). Presenta alto vigor de germinación y emergencia, ciclo largo y resistencia a la sequía en etapas medias de crecimiento (Wellhausen *et al.*, 1951).



Figura 16. Muestra de la raza Chalqueño (fuente: Ortega-Paczka, R).

Domina en las partes altas, arriba de 1 800 msnm en suelos volcánicos que retienen humedad de las precipitaciones invernales, y en terrenos con riego, donde no hay maíces mejorados adecuados en los valles altos del centro de México. También es fundamental para siembras en suelos de humedad en lugares altos de Durango, Zacatecas y en la Mixteca Oaxaqueña. (Hernández, 2010; Muñoz, 2003; Wellhausen *et al.*, 1951). Producen gran cantidad de biomasa debido a sus plantas vigorosas y mazorcas grandes, aunque esta característica, aunada a la debilidad de las raíces, propicia la caída de las plantas ante los vientos fuertes. Tienen hojas péndulas (caídas) que toleran las granizadas. Sus mazorcas presentan una alta proporción de desgrane debido a sus hileras numerosas, olote de grosor medio y grano grande. (Wellhausen *et al.*, 1951).

En el valle de Chalco-Amecameca se distinguen, con base en estos caracteres, los tipos: crema de grano semicristalino con coloraciones amarillo claro a blanco; palomo de textura semiharinosa y grano blanco; azul de grano semiharinoso, morado a azul oscuro; colorado de textura semiharinosas y coloración rosado a rojo; y amarillo ya en baja frecuencia de textura semicristalina. (Antonio *et al.*, 2004; Hernández, 2010; Herrera *et al.*, 2004). Las diferentes variantes de esta raza se

asocian a usos específicos: los tipos crema principalmente para tortillas; palomo para harina de tamal; azules y rojos, colores presentes en la aleurona y pericarpio para antojitos, golosinas (burritos, maíz tostados y adheridos con piloncillo) y pinole; amarillos para tortilla y forraje. Todas las variantes de esta raza se usan como forraje tanto en planta entera ensilada como en rastrojo (plantas después de cosechar). El totomoxtle de esta raza es muy apreciado para envolver tamales y para elaboración de artesanías (Antonio *et al.*, 2004, Hernández, 2010; Herrera *et al.*, 2004).

Es una de las principales fuentes en la formación de maíces mejorados para valles y partes altas del centro de México, junto con materiales de la raza Cónico y en menor proporción de la raza Bolita (Gámez *et al.*, 1996 y Muñoz 2003).

Esta raza pudo haber derivado de la cruce de Cónico con Tuxpeño (Wellhausen *et al.*, 1951). En la actualidad se considera como formas altamente desarrolladas de Cónico, adaptadas a buenas condiciones de suelo y humedad, y algunas de sus variante (palomo) con posible intervención de Cacahuacintle (Antonio *et al.*, 2004 y Herrera *et al.*, 2004).

Palomero Toluqueño

Es considerada una de las razas antiguas de México. Se caracteriza por sus mazorcas pequeñas de numerosas hileras y grano puntiagudo y reventador (Wellhausen *et al.*, 1951). Con aparente centro de distribución en el Valle de Toluca (2 600 msnm), aunque se han colectado formas similares en otras regiones aisladas de la Mesa Central (Michoacán, Puebla), en altitudes que varían de 2 000 a 2 800 msnm (figura 17) (Hernández, 2010; Ortega, 2011; Wellhausen *et al.*, 1951). En la región del valle de Toluca su cultivo está ligado a grupos indígenas, aspecto que influye en que aún se siga cultivando.



Figura 17. Muestra de la raza Palomero Toluqueño (fuente: Hernández-Casillas, J. M).

Desde las exploraciones en los años 40s hasta la actualidad, las poblaciones de esta raza son escasas y están poco representadas en los bancos de germoplasma, por lo que se considera en riesgo (Hernández, 2010; Hernández *et al.*, 2010; Wellhausen *et al.*, 1951). Las poblaciones actuales ya no presentan en su totalidad las características típicas inicialmente descritas de esta raza. Esta raza se considera adecuada para la elaboración de palomitas, por el carácter reventador del grano, pero no se ha hecho selección científica a partir de estos caracteres en México. Puede ser una fuente importante para mejoramiento en zonas templadas y frías por las condiciones donde se desarrolla (Ortega, 2011, Wellhausen *et al.*, 1951).

Arrocillo amarillo

Raza caracterizada por mazorcas pequeñas y de grano semi-cristalino, apiculado (puntiagudo), a semi-dentado (figura 18) (Wellhausen *et al.*, 1951). Se cultiva en las regiones templadas-frías con alta nubosidad de la Sierra Norte de Puebla y áreas aledañas del estado de Veracruz, en terrenos de ladera y marginales (Wellhausen *et al.*, 1951). En esta región es sostén de muchas comunidades nahuas, totonacas y mestizas.



Figura 18. Muestra de la raza Arrocillo (Fuente: Mota-Cruz, C).

Se han reportado también poblaciones de esta raza, o emparentadas con ella, en algunas áreas altas de la Mesa Central (partes altas de Hidalgo, Tlaxcala, Estado de México y Michoacán) y Oaxaca (Hernández, 2010). En las primeras colectas predominaba el color amarillo en el grano (Wellhausen *et al.*, 1951), pero posteriormente se han colectado variantes de numerosos colores (figura 8) (Ortega *et al.*, 1991). Las variantes de grano blanco y amarillo se utilizan predominantemente para tortilla, las formas de color obscuro, con alto contenido de antocianinas, tanto en el pericarpio como en la aleurona del grano, se usan para antojitos o para variar la dieta; algunas formas o variantes de grano predominantemente cristalino y de carácter reventador pueden ser adecuadas para la producción de palomitas (Ortega, 2011).

1.13.2. Grupo de maíces dentados tropicales

Este grupo incluye razas agrónomicamente muy importantes del sur de México, distribuidas principalmente en regiones intermedias y de baja altitud (Fig. 87): como la raza Celaya (Ortega *et al.*, 1989). Las razas de este grupo se caracterizan por plantas de altura entre 250 y 320 cm, de 85 a 105 días a floración, 20 a 25 hojas por planta, y muchas ramas de espiga (20 a 35). Las mazorcas son medianas a largas (12 a 20 cm), cilíndricas, con 12 a 16 hileras de granos profundamente dentados y con endospermo que va de suave a medio duro. Las razas de este grupo y sus

derivados, son probablemente las más usadas en los programas de mejoramiento genético públicos y privados en el ámbito mundial" (Sánchez, 2011).

Este complejo racial es el uno de los de mayor distribución en México. Las razas que incluye se cultivan principalmente en zonas bajas e intermedias de trópico húmedo y seco. La utilización de razas de este grupo en programas de mejoramiento, especialmente de poblaciones de Tuxpeño y Celaya, ha favorecido su difusión amplia, por lo que se encuentran frecuentemente como materiales acriollados en varias regiones (Morris *et al.*, 2000). Tuxpeño también ha sido la base de materiales mejorados en las zonas tropicales del mundo (Wellhausen, 1990; Mafuru *et al.*, 1999; Morris *et al.*, 2000) y se ha utilizado para ampliar la base genética de híbridos de la Faja Maicera de los E.E.U.U (Goodman, 1999). Esta raza y sus derivadas (Tuxpeño Norteño y Ratón) están emparentadas con la raza Southern Dents, uno de los progenitores de las variedades mejoradas de la Faja Maicera de los Estados Unidos de Norteamérica (Anderson *et al.*, 1952 y Ortega, 1985).

Las regiones donde se siembran las razas Pepitilla, Vandeño y Tepecintle, coinciden con las áreas de distribución de teocintle (*Zea mays* ssp. *parviglumis*) de la cuenca del Balsas; y Celaya con los teocintles de la Mesa Central (*Zea mays* ssp. *mexicana* raza Mesa Central) (Wilkes, 1977 y CONABIO, 2011). Se incluyen en este grupo las razas Choapaneco, Chiquito y Cubano Amarillo. La primera descrita por Benz (1986) con semejanzas a Tepecintle en cuanto al área de distribución y características morfológicas de mazorca y grano. Chiquito fue propuesta por Ortega *et al.*, (1991) para nombrar a las muestras mexicanas clasificadas como Nal-Tel de Altura, raza descrita inicialmente para Guatemala (Wellhausen *et al.*, 1951). Cubano Amarillo es relacionado y agrupado con maíces dentados de México y el Caribe por Goodman *et al.*, (1977).

Celaya

Raza considerada parte del mejor germoplasma de maíz de América por su rendimiento, aptitud combinatoria y rango de adaptación (800 a 1 800 msnm) (Wellhausen *et al.*, 1951). Es una de las razas más productivas de México; tiene mazorcas cilíndricas, grandes, con alto número de hileras, grano dentado predominantemente blanco (figura 19) (Wellhausen *et al.*, 1951).



Figura 19. Muestra de mazorcas de la raza Celaya (Foto: Ramírez-Vega, H).

Su distribución ocupaba ampliamente el Bajío y Jalisco, la emigración, entre otras causas, han disminuido su cultivo, no obstante se siguen manteniendo variantes precoces con planta baja en las áreas de temporal y se han colectado recientemente muy buenas muestras en esta región. (Ron *et al.*, 1997; Preciado *et al.*, 2010; Wellhausen *et al.*, 1951). Ha sido una de las principales fuentes y base genética de los materiales mejorados de valles intermedios y subtropical de México (Gómez *et al.*, 1996). Algunas poblaciones de esta raza han servido de fuente de germoplasma en la formación de variedades mejoradas e híbridos (Ortega, 2011).

Su empleo en el mejoramiento amplió su distribución a estados del norte (Aguascalientes, Zacatecas, San Luis Potosí, Durango, Chihuahua, Coahuila) y sur (Puebla y Oaxaca), donde se le encuentra en formas segregantes o en combinación con otras razas (Gámez *et al.*, 1996). Además, de los usos comunes, por su rendimiento y calidad de grano es muy apreciada por los molineros y la industria harinera. Se considera de formación relativamente reciente (Wellhausen *et al.*, 1951), posiblemente al abrirse terrenos a la agricultura en el Bajío. Su origen se atribuye a la combinación de germoplasma de dos de las razas más productivas de México, el Tuxpeño y el Tabloncillo (Wellhausen *et al.*, 1951).

1.14. Variabilidad climática

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos de tiempo relativamente cortos y se expresa mediante la valoración de las anomalías (IGAC *et al.*, 2011). Además, tiene una escala temporal diferente al cambio climático y está asociada a la noción al tiempo vivido y en donde se perciben las oscilaciones (Roa *et al.*, 2012).

Cuando un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura sale de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano; o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en la intensidad de la radiación solar recibida o incluso cambios en las características del planeta (concentraciones de gases de efecto invernadero, cambios en el uso de suelo) resultado de la actividad humana (Martínez, 2004). Desde la segunda mitad del siglo XX se ha venido reportando a nivel global, regional y local la alteración espaciotemporal de dichos patrones del comportamiento climático y en torno a esto, el conocimiento científico ha puntualizado y demostrado que una de sus principales causas es la ocurrencia e intensidad de los fenómenos de la variabilidad climática ocasionados por el ciclo ENSO (El Niño –Oscilación del Sur–) (Pinilla, 2016).

1.15. Riesgo: amenaza y vulnerabilidad

Riesgo climático es una combinación de la amenaza de clima extremo y de la vulnerabilidad (Landa, 2010), ya que las amenazas climáticas tendrán efectos diversos en la región, principalmente negativos, en la reducción de la productividad. De modo que el riesgo, entendido como el potencial de pérdidas que pueden ocurrirle al sector agrícola, resultado de ésta combinación es posible expresarlo matemáticamente como la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas, sociales o ambientales (Cardona, 1985).

Amenaza es la probabilidad de que ocurra un evento, en un lugar y un tiempo determinado, con suficiente intensidad como para producir daños (Landa, 2010). Para la agricultura se puede entender como el aumento en la intensidad, frecuencia y magnitud en los fenómenos hidrometeorológicos (sequías, inundaciones, heladas, huracanes, tornados), en un lugar y un tiempo determinado atribuidos al cambio climático.

Mientras para el IPCC (2007; 2012; 2014) y Magaña (2004) define la vulnerabilidad como el grado al cual un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los eventos meteorológicos extremos. La vulnerabilidad se puede concebir a distintas escalas y actores, según el objeto de estudio, puede ser: nacional, regional o local, a la vez que como productores, consumidores o comunidades (Ruiz *et al.*, 2015).

Una vez conocida la amenaza o peligro A_i , entendida como la probabilidad de que se presente un suceso con una intensidad mayor o igual a i durante un periodo de exposición t , y conocida la vulnerabilidad V_e , entendida como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto e a ser afectado o de ser susceptible a sufrir un daño ante la ocurrencia de un suceso con una intensidad i , el riesgo R_{ie} se expresa como la probabilidad de que se presente una pérdida sobre el elemento e , como resultado de la ocurrencia de un suceso con una intensidad mayor o igual a i ,

$$Rie = f(Ai, Ve)$$

es decir, el riesgo en general puede entenderse como la probabilidad de pérdida durante un periodo de tiempo t dado (Cardona, 1985).

La agricultura es uno de los sectores que más resentirán los efectos del cambio climático por su dependencia del clima. Entre las consecuencias destacan: la modificación en los cultivos (debido a un incremento atmosférico en la concentración de CO₂); una mayor probabilidad de incremento en la población de plagas; y ajustes en la demanda de agua para irrigación, (Adams *et. al.*, 1988). Para los productores agrícolas de pequeña escala, con un alto grado de vulnerabilidad y exposición a efectos de cambio climático, puede tener efectos desastrosos, tanto en el patrimonio como en la diversificación productiva.

1.16. Seguridad alimentaria

El término de seguridad alimentaria fue definido durante la Cumbre Mundial de la Alimentación celebrada en 1996 en la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura (FAO), “existe seguridad alimentaria cuando todas las personas tienen en todo momento acceso físico y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias en cuanto a los alimentos a fin de llevar una vida activa y sana” (FAO, 1996).

El maíz es un bien básico para los mexicanos, pero para las familias rurales es un grano especial porque ha garantizado su reproducción biológica y cultural; además, la venta de excedentes de maíz es un eslabón económico para que obtengan otros recursos destinados, en parte, para comprar otros alimentos. Por esta razón, se asume que el maíz ha sido garantía de la seguridad alimentaria familiar (Damián *et al.*, 2014; Damián *et al.*, 2016). Los últimos datos publicados por el Instituto Nacional de Salud Pública indican que más de la cuarta parte de los mexicanos tiene acceso deficiente a la alimentación.

En el ámbito productivo, pese al dinamismo de las exportaciones agroalimentarias, el déficit de la balanza comercial agroalimentaria se duplicó entre 2000 y 2011 para alcanzar los 5 000 millones de dólares y las importaciones en volumen de varios productos estratégicos (arroz, maíz amarillo, trigo, soya) han aumentado hasta superar su producción nacional. El maíz blanco es una de las semillas que más contribuyen a la seguridad alimentaria, pues su principal destino es el consumo humano, el cual se transforma para la elaboración de insumos para alimentos, ya sea a través de la nixtamalización para generar masa o bien por medio de la deshidratación y molienda para obtener harina, y posteriormente todos sus derivados (SAGARPA, 2016).

En México, el maíz forma parte de nuestra alimentación diaria, es el cultivo de mayor presencia en el país, constituye un insumo para la ganadería y para la obtención de numerosos productos industriales (Polanco *et al.*, 2008). De acuerdo con datos del padrón de la Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios (ASERCA), alrededor de 2 millones de personas se dedican al cultivo de maíz, cifra que representa el 30% de la población ocupada en el sector primario de la economía del país (SAGARPA, 2016).

Conseguir la seguridad alimentaria requiere aumentar el potencial productivo del maíz, medido en rendimiento por hectárea de forma sostenida en el tiempo. El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) lo definió como la producción nacional promedio de varios años que se obtendría de maíz, si en el área sembrada se aplicara la tecnología pública disponible (Turrent *et al.*, 2012).

El esfuerzo conjunto de las varias instituciones y renombrados expertos ha permitido la elaboración del Panorama de la Seguridad Alimentaria y Nutricional en México 2012, un valioso insumo para la toma de decisiones informada en el diseño de una política alimentaria para México y para la elaboración del Programa Nacional México

sin Hambre, previsto en el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Entre los mensajes del estudio se encuentra:

La crisis de los precios de los alimentos colocó el tema de la seguridad alimentaria en la agenda política internacional y nacional rebasando las fronteras de los organismos y foros especializados. La crisis evidenció problemas en los mercados, así como cambios estructurales en la oferta y la demanda de alimentos y puso de manifiesto la necesidad de construir una gobernanza global sólida para proteger intereses comunes. Ésta es una oportunidad para replantear un nuevo paradigma de desarrollo desde la perspectiva de la seguridad alimentaria y repensar la institucionalidad nacional de una política afín con su carácter multidimensional (Urquía, 2014).

El crecimiento agrícola con la participación de los pequeños agricultores, la mayoría en el país, especialmente las mujeres, será más eficaz para reducir la pobreza si permite aumentar los ingresos de los trabajadores y generar empleo para la población en pobreza (Urquía, 2014).

La erradicación de la inseguridad alimentaria requiere un rediseño de una política y estrategias orientadas a tal fin, en un proceso participativo que considere la multidimensionalidad de la seguridad alimentaria, la institucionalidad que asegure la coordinación y coherencia de las políticas sectoriales y la propuesta de los recursos indispensables. La complejidad –económica, social, política y ambiental– de la seguridad alimentaria demanda una participación amplia en el debate sobre las distintas opciones que se tienen para asegurar una disponibilidad suficiente, estable, inocua y sustentable de alimentos (Urquía, 2014; FAO, 2017).

II. ANTECEDENTES

2.1. Escenarios de cambio climático

- Ruiz *et al.*, (2014) evaluaron el efecto del cambio climático del período 2041-2060 con nichos potenciales de distribución de las razas mexicanas de maíz del grupo cónico, se consideró el modelo de circulación general HadGEM2-AO bajo dos vías de concentración de Gases Efecto Invernadero (GEI) RCP4.5 y RCP6.0. Se aplicaron los nichos potenciales de distribución mediante el modelo MaxEnt. Los resultados mostraron que el cambio climático del período 2041-2060, incrementará la superficie con aptitud ambiental alta para la distribución del grupo racial cónico de maíz, es más favorable el panorama que se presentó bajo la ruta rcp4.5 que bajo la ruta rcp6.0 de emisiones y concentración de GEI.
- Navarro *et al.*, (2012) realizaron un estudio en Málaga y Granada, España, el objetivo de este trabajo es proporcionar una comparación entre los distintos algoritmos de modelado para estudiar la distribución del hábitat de una especie tan fragmentada como *Buxus balearica* Lam, mediante la evaluación de la capacidad de predicción de los diferentes modelos de distribución espacial a escala local. El enfoque básico de estos modelos consiste en combinar un conjunto de acontecimientos conocidos junto con variables de predicción como las topográficas, climáticas, edáficas, biogeográficas y las obtenidas por teledetección. Los modelos de correlación que utilizan registros de localizaciones con presencia y ausencia de especies para predicciones de hábitat son referidos como técnicas de discriminación, mientras que aquellos que usan solamente registros de presencia de especies son referidos como técnicas de perfil. Los modelos de predicción fueron evaluados basándose en 17 variables ambientales. Seis métodos fueron comparados: Multivariate adaptative regression spline (MARS); Maximum entropy approach to modelling species distributions (MaxEnt); dos algoritmos genéricos basados en disimilitudes métricas ambientales, Bioclim, y Algorithm for Rule-set Prediction (GARP); y

métodos de aprendizaje supervisado basados en clasificadores lineales generalizados (Support Vector Machines, SVMs). Como prueba de la capacidad predictiva de los modelos se usó el índice Kappa. En cuanto a los resultados:

- El poder predictivo fue mejor para MaxEnt.
 - El resto de los modelos probados obtuvieron valores menos precisos.
 - Al comparar el poder predictivo de MaxEnt, las variables climáticas son las que mostraron la mayor contribución de todas las variables ambientales.
 - Todos los algoritmos produjeron mapas.
-
- En Chile, Ziska *et al.*, (2009) utilizaron Maxent para determinar las áreas de distribución y centros de diversidad de 27 especies de plantas monocotiledóneas, pertenecientes a la familia de las bromeliáceas, de las cuales 20 son endémicas. El objetivo principal fue utilizar esta información para determinar el estado de conservación de estas especies. Gracias a la información generada utilizando Maxent los autores pudieron reclasificar las especies usando la nomenclatura de la IUCN, ya que el uso de MaxEnt combinada con herramientas SIG ayuda en la generación de mapas de distribución actual y potencial de especies nativas, lo que resulta fundamental tanto para evaluar el estado de conservación de las especies, como para evaluar potenciales sitios para desarrollar iniciativas de conservación y restauración.

 - Sobek-Swant, (2012) desarrollaron mapas de riesgo de algunas plagas, como por ejemplo *Agrilus planipennis*, con el fin de ayudar en la asignación de recursos para detección y tratamiento de las zonas más propensas a ser afectadas.

2.2. Riesgo climático en el maíz

- Estudios realizados con el cultivo de maíz, se han encontrado en algunas regiones del mundo (El sur del Sahara, Sudáfrica, Egipto, Afandi, Khalil, Ouda, China, Tao, Zhang, India, Byjesh, Kumar, Aggarwal, Italia, Estados Unidos, Medellín, Howitt, Lund, Guanajuato, Querétaro y Sinaloa) el rendimiento de maíz disminuirá para finales del siglo XXI bajo diferentes escenarios de emisiones de GEI (A2 corresponde a un escenario de emisiones altas, B2 a uno de emisiones medio bajas y B1 a uno de emisiones bajas), principalmente por incremento de la temperatura y la variabilidad de la precipitación, así como la disminución de las áreas aptas para el desarrollo del cultivo bajo condiciones de temporal (Ahumada *et al.*, 2014).

- Desde 2003 se está desarrollando el proyecto de investigación Fomento de capacidades para la etapa II de adaptación al cambio climático en Centroamérica, México y Cuba, apoyado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y coordinado para el caso de México por el Instituto Nacional de Ecología de la SEMARNAT (INE–SEMARNAT). En este proyecto participaron ocho países, que son Panamá, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, El Salvador, Cuba y México. En cuanto a la investigación en México, se realizó un estudio que abarcara tres sectores: recursos hídricos, recursos forestales y agricultura. Tlaxcala se seleccionó como sitio de estudio por ser representativo de la forma de apropiación y uso de los recursos naturales de la mayor parte del país. En cuanto a la agricultura, se identificó que los más vulnerables a las variaciones y cambios en el clima son los productores de maíz de temporal. Son vulnerables a eventos climáticos como las heladas, la sequía, las lluvias torrenciales, los vientos fuertes y las granizadas, en ese orden de importancia (Magaña *et al.*, 2007).

- En Apizaco, Tlaxcala, se efectuó un estudio de caso con series de datos de temperaturas máximas y mínimas diarias para el periodo 1952-2003, con el

objetivo de presentar una metodología para el análisis de los eventos extremos de temperatura y detectar si estos están cambiando (López *et al.*, 2013). Para lo cual, los resultados de los índices mostraron que los eventos extremos relacionados con temperatura máxima tuvieron más cambios, los días de verano se incrementaron y los días fríos disminuyeron. Además, hubo un incremento en los días de heladas, es decir, se presentó una mayor cantidad de días con temperaturas mínimas por debajo de 0°C.

- En el estado de Tlaxcala, para los municipios de Españita e Ixtacuixtla se realizó un estudio con el objetivo de evaluar el riesgo y la vulnerabilidad del maíz de temporal frente a los impactos del cambio climático. Los resultados indican que Ixtacuixtla es más vulnerable a la sequía y le beneficia tener exceso de lluvia para un mayor rendimiento (Hernández *et al.*, 2015).

III. JUSTIFICACIÓN

El cultivo de maíz de temporal se realiza prácticamente en todo el país, aún en aquellas zonas con climas, suelos o pendientes no propicios, por lo que forma parte de la alimentación diaria, además, constituye un insumo para la ganadería y numerosos productos industriales. En Tlaxcala el cultivo de maíz ocupa el primer lugar entre los cuatro principales granos básicos que se producen: avena, cebada y trigo, ya que lo cultivan las familias campesinas con sus propios recursos. Su disponibilidad es indispensable para su seguridad de numerosos grupos sociales en el campo. De ahí que la carencia de maíz se expresa no sólo como hambre y desnutrición, sino también como extinción cultural de las sociedades que dependen de él y desde el punto de vista ambiental por la conservación de las diferentes razas que se localizan en el estado.

En consecuencia, es importante identificar zonas de riesgo y vulnerabilidad en el estado, debido a los cambios ambientales drásticos que ha tenido el entorno en los últimos años y la influencia que tienen las actividades humanas en la modificación de los patrones climáticos, como el incremento de la temperatura y la reducción de la precipitación, impactos que se verán reflejados en la actual distribución del maíz bajo escenarios de cambio climático, los cuales son imágenes alternativas de cómo sería el mundo si uno a varios factores se modifican mostrando diferentes aspectos de lo que podría suceder en los próximos años.

IV. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

4.1. Hipótesis

- Un cambio climático induce un incremento de temperatura dentro del rango de confort del maíz, induciendo una diferencia entre la producción potencia y la actual del maíz de temporal bajo los escenarios de cambio climático para el horizonte 2050.
- La combinación de la variabilidad natural y antrópica incrementará la amplitud de los valores extremos de la temperatura y precipitación en el cultivo de maíz de temporal.
- La sequía es uno evento extremo que influye en la producción de maíz de temporal, pues reduce la probabilidad de obtener buenos rendimientos.

4.2. Objetivo general

Identificar la distribución potencial del maíz de temporal ante escenarios futuros de cambio climático, y evaluar el riesgo frente a eventos climático extremos.

4.3. Objetivos específicos

- ✓ Evaluar la distribución potencial del maíz bajo escenarios de cambio climático.
- ✓ Analizar la variabilidad climática del estado, con la finalidad de reconocer los eventos climáticos extremos que se presentan.
- ✓ Evaluar el riesgo y la vulnerabilidad de la producción de maíz ante los eventos climáticos extremos.

V. METODOLOGÍA

5.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el estado de Tlaxcala, situado entre los 97°37'07'' y 98°42'51'' de longitud oeste y los 19°05'43'' y 19°44'07'' de latitud norte. Limita al sur, este y norte con el estado de Puebla, al noroeste con Hidalgo y al poniente con el estado de México. Tiene un área de 4 060 km² donde habitan 1 068 207 personas, 78.2 % considerada urbana, 21.8 % rural. El 2.2 % de la población es considerada indígena. La entidad se encuentra entre los 2 200 y 4 400 metros sobre el nivel del mar (msnm), el 99.2% de la superficie presenta clima templado-húmedo, el 0.6 % clima seco y semiseco, localizado al este, el restante 0.2 % presenta clima frío, localizado en la cumbre de la Malinche y una precipitación media anual de 720 mm, la temperatura media anual es de 14°C, la temperatura máxima promedio es alrededor de 25 °C y se presenta en abril y mayo, la temperatura mínima promedio es de 1.5 °C en enero, los suelos predominantes son los cambisoles y feozems que cubren, respectivamente, 75.4 y 22 % del territorio Tlaxcalteca. La economía del estado gira en torno a los sectores secundario y terciario, los cuales absorbieron 81.8 % de la población ocupada y generaron 93.4 % del Producto Interno Bruto (PIB) estatal (INEGI, 2015). Por su índice de marginación el estado Tlaxcala está considerado con grado de marginación medio (CONAPO, 2001).

5.1.1. Base de datos de maíz

Se obtuvieron los datos georreferenciados de la raza Cónico (555) y de la raza Elotes cónicos (80) de la base de datos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2011), estos registros corresponden a la distribución actual que tienen estas razas en todo el estado de Tlaxcala.

5.1.2. Series de datos ambientales y de cambio climático

Se utilizaron los datos mensuales y anuales de precipitación, temperatura máxima, mínima y media del periodo 1960-1990 (climatología de referencia) y para el escenario 2050 para determinar las áreas potenciales de distribución de las razas

Cónico y Elotes Cónicos. Estos datos climáticos se obtuvieron de WorldClim (Datos Climáticos Globales) con resolución de 30" de arco ($0.93 \times 0.93 = 0.86 \text{ km}^2$ en el ecuador) a menudo denominada resolución de 1 km^2 por pixel en coordenadas geográficas (Datum WGS-84) (WorldClim, 2016), trabajados mediante imágenes raster en QGIS, un Sistema de Información Geográfica libre (2.18.0) (Hijmans, 2005). Para la proyección 2050 se utilizó el modelo de circulación general HadGEM2-AO (Hadley), bajo dos de las cuatro trayectorias representativas de concentración de gases de efecto invernadero (RCP4.5 y RCP6.0). Los modelos forman parte en la modelación del clima desarrollado por el proyecto de inter-comparación de modelos acoplados fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés) (Taylor *et al.*, 2012). Los RCP se refieren al forzamiento radiactivo expresado en W m^{-2} considerando que éste varía al incrementar los Gases de Efecto Invernadero (GEI). El RCP4.5 y 6.0 asumen un forzamiento radiactivo de W m^{-2} y las emisiones de GEI llegarán a la cima alrededor del año 2050 suponiendo una cierta estabilización de las emisiones. A partir de las variables básicas mencionadas, se derivó una serie de variables adicionales, para realizar el análisis con el modelo de nicho ecológico y distribución potencial de especies MaxEnt, bajo condiciones de referencia y climatología 2050 para el total de las variables utilizadas (tabla III).

Tabla III. Variables climáticas.

BIO1	Temperatura promedio anual
BIO2	Rango medio diario (temp max – temp min; promedio mensual)
BIO3	Isotermalidad (BIO1/BIO7) * 100
BIO4	Estacionalidad en temperatura (desviación estándar * 100)
BIO5	Temperatura máxima del trimestre más cálido
BIO6	Temperatura mínima del trimestre más frío
BIO7	Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)
BIO8	Temperatura media en el trimestre más lluvioso
BIO9	Temperatura promedio en el trimestre más seco
BIO10	Temperatura promedio en el trimestre más caluroso
BIO11	Temperatura promedio en el trimestre más frío
BIO12	Precipitación anual
BIO13	Precipitación en el trimestre más lluvioso
BIO14	Precipitación en el trimestre más seco
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
BIO16	Precipitación en el trimestre más lluvioso
BIO17	Precipitación en el trimestre más seco
BIO18	Precipitación en el trimestre más caluroso
BIO19	Precipitación en el trimestre más frío

Los resultados de la modelación fueron considerados como porcentajes de aptitud ambiental y se agruparon en cinco categorías, las cuales se denominaron de la siguiente manera: 0-25% (aptitud ambiental muy baja); 25-50% (aptitud ambiental baja), 50-75% (aptitud ambiental media) y 75-100% (aptitud ambiental alta).

5.1.3. Método MaxEnt

La distribución potencial de la raza de maíz Cónico y Elotes Cónicos se analizó mediante el modelo Maximum Entropy Species Distributions Modeling, versión 3.3.3k (MaxEnt). El algoritmo de este sistema fue adaptado por Steven J. Phillips y colaboradores (Phillips y Dudík, 2008; Phillips *et al.*, 2006) para la construcción de modelos de distribución potencial. La distribución de una especie se representa mediante una función de probabilidad P sobre un conjunto X de sitios en el área de estudio. Se construyó un modelo de P mediante un conjunto de restricciones derivado de datos empíricos de presencia de la especie. Las restricciones se expresaron como funciones simples de variables ambientales conocidas.

El algoritmo de MaxEnt obliga a que la media de cada función, de cada variable, se aproximó a la media real de la variable en las áreas de presencia de la especie. De todas las posibles combinaciones de funciones, se seleccionó la que logra minimizar la función de entropía; la cual es medida con el índice de Shannon.

La expresión general de la función de probabilidad para i variables ambientales es:

$$P(X) = e^{\lambda f(x)} / Z\lambda$$

Donde: $P(X)$ = función de probabilidad; λ = vector de coeficientes de ponderación; f = vector correspondiente de funciones de variables ambientales; Z = constante de normalización para asegurar que $P(X)$ equivalga a la unidad.

Los valores $P(X)$ así obtenidos, representaron valores de idoneidad relativa para la presencia de la especie, constituyendo así la base de un modelo de distribución potencial. En la modelación Maxent, 75% de los registros de presencia fueron utilizados como puntos de entrenamiento y 25% como puntos de validación (Phillips *et al.*, 2008; Pearson *et al.*, 2007; Yañez *et al.*, 2012), para la calibración del modelo valores de 1 (por defecto en MaxEnt) para muestras pequeñas < 100 y de 1.5 para muestras grandes, asimismo, se utilizó el índice AUC, para evaluar el modelo estadístico, ya que este índice es de los más utilizados para medir la calidad de los modelos (Moreno *et al.*, 2011). La complejidad del modelo fue controlada con la elección de las variables, además, MaxEnt presentó dentro de su configuración, un operador denominado regularización de parámetros que impiden la superposición de variables (Phillips y Dudík, 2008).

5.2. Bases de datos de maíz de temporal y áreas de estudio

Para evaluar el riesgo se utilizaron las bases históricas de datos de rendimiento de maíz de temporal de los municipios del estado de Tlaxcala, que corresponden al periodo de 1992-2014 proporcionadas por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2014). De acuerdo a los datos obtenidos en el SIAP se llevó a cabo una regionalización con la finalidad de determinar los tres municipios con los rendimientos de maíz de temporal más altos (Españita, Tlaxco y Apizaco) y los tres municipios con los rendimientos más bajos (Tlaxcala, Terrenate

y El Carmen Tequexquitla). Es importante señalar que al seleccionar estos municipios se consideró que existirá una estación meteorológica (figura 20).

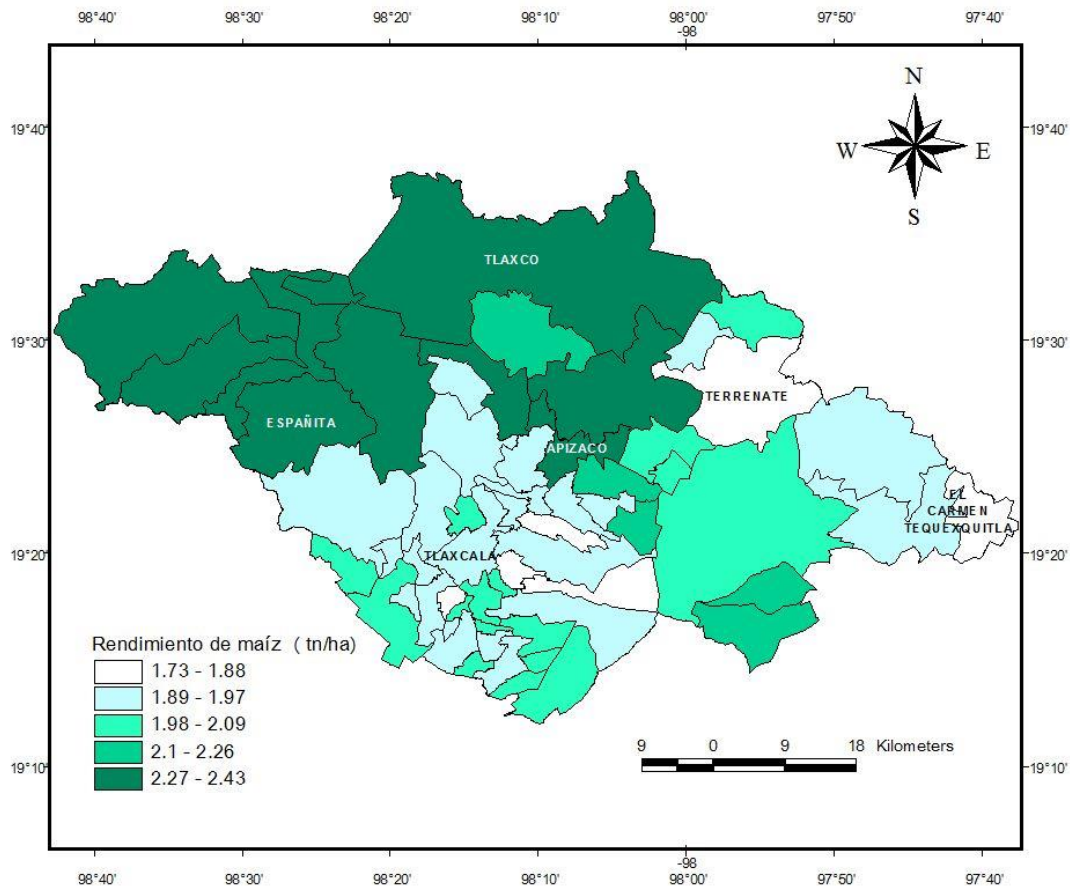


Figura 20. Regionalización de maíz de temporal en el estado de Tlaxcala (elaboración: Hernández-Vázquez, M).

5.2.1. Base de datos climáticos

Para el análisis de las variables climáticas precipitación, temperatura máxima y mínima se utilizó la base de datos diaria de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2014) delegación Tlaxcala, correspondiente al periodo histórico existente para las 6 estaciones meteorológicas en estudio (tabla IV).

Tabla IV. Ubicación geográfica de las estaciones de estudio en Tlaxcala, México.

Municipio	Estación	Periodo	Longitud	Latitud	Msnm
Tlaxco	Tlaxco	1971-2014	98° 07' 32''	19° 35' 33''	2530
Españita	Españita	1978-2014	98° 42' 22''	19° 45' 78''	2624
Apizaco	Apizaco	1961-2014	98° 08' 24''	19° 24' 56''	2406
Tlaxcala capital	Tlaxcala de Xicoténcatl	1961-2014	98° 14' 48''	19° 19' 26''	2230
Terrenate	Terrenate	1992-2009	97° 55' 2''	19° 28' 37.7''	2694
El Carmen Tequexquitla	El Carmen	1992-2014	97° 38' 50''	19° 19' 05''	2350

La calidad de datos climáticos se analizaron con el software RCLimDex (1.0), además, permitió calcular los índices de extremos climáticos. La serie de datos climáticos se sometieron a procedimientos estadísticos de verificación, de la siguiente manera: 1) Reemplaza todos los datos faltantes con el código -99.9 y 2) Reemplaza todos los valores no razonables por NA, por ejemplo: Cantidades de precipitación diaria menores que cero y temperatura máxima diaria menor que temperatura mínima diaria (Zhang *et al.*, 2003).

Una vez que los datos han pasado el control de calidad, éstos deben ser sujetos a una prueba y análisis de homogeneidad, dejando para el análisis sólo las series de datos que contienen información únicamente debido a las variaciones del clima y están libres de alteraciones en las mediciones a causa de cambios en la ubicación de la estación, cambios de instrumentos o cambios en el entorno. Una vez que los datos han pasado por un control de calidad, es posible diseñar gráficas, tablas, mapas, o bien someterlos a un análisis estadístico.

5.2.2. Matriz de riesgo

El riesgo se valoró solamente en términos físicos, dado que la vulnerabilidad social es difícil de evaluar en términos cuantitativos. Esto significa que no sea factible analizar la vulnerabilidad en forma relativa o mediante indicadores, lo que permite proponer “riesgos relativos”, que igualmente permiten la toma de decisiones y la

definición de prioridades de prevención y mitigación. En síntesis, para realizar un análisis de riesgo se siguió tres pasos:

- a) estimar la amenaza
- b) evaluar la vulnerabilidad
- c) llevar a cabo la estimación del riesgo como resultado de relacionar los dos parámetros anteriores.

Para evaluar el riesgo agroclimático se utilizó información climática y de producción de maíz de temporal, su cálculo representa una herramienta de gran utilidad en la planeación de las actividades agrícolas. Para determinar el riesgo climático se estimó cada uno de los componentes; la amenaza y la vulnerabilidad. Para este análisis fue necesario lo siguiente:

1. Generar diagnósticos climáticos. Consistió en evaluar las condiciones históricas del clima. Con base en estos datos, fue posible establecer en qué medida las variaciones del clima constituyeron una amenaza para el cultivo de maíz. Tales diagnósticos incluyeron aspectos del clima de relevancia en la agricultura.
2. Estimar la vulnerabilidad agrícola en forma cualitativa, para ello se requirieron datos del rendimiento de maíz, y se procede a la siguiente deducción:

$$VULNERABILIDAD (V) = IMPACTOS (I) - ADAPTACIÓN (A)$$

Donde:

(A) = estrategias y acciones para enfrentar el riesgo.

(I) = efectos en el cultivo por variabilidad climática.

Cuando no existen medidas de adaptación la vulnerabilidad se resume en $V = I$. Una forma de evaluar dicho impacto es a partir de los valores de rendimiento (t/ha). Se sabe que existen otros factores físicos, biológicos y sociales que pueden determinar los valores del rendimiento, como es la aplicación de ciertas tecnologías, semillas mejoradas, uso de fertilizantes, entre otros., en este estudio alguno de estos factores tiene un impacto asociado a la variabilidad climática la cual es la principal causa de presentar bajos o altos rendimientos.

El riesgo se estimó en términos de probabilidad condicional (Wilks, 1995), que es la probabilidad de que un evento E_1 ocurra cuando sabemos que un evento E_2 ocurrió u ocurrirá y lo denotamos por $\Pr(E_1|E_2)$. Formalmente la probabilidad condicional fue definida en términos de la intersección del evento de interés (E_1) y el evento condicional (E_2).

$$\Pr(E_1 | E_2) = \frac{\Pr\{E_1 \cap E_2\}}{\Pr E_2}$$

La evaluación del riesgo se desarrolló con base en una matriz que describe la relación impacto/amenaza. Los renglones representan las amenazas dadas por la variabilidad climática y las columnas los posibles impactos evaluados en los valores de rendimiento (t/ha).

Se consideró que dada la situación de que se presente un peligro o condición de amenaza [A1], los impactos que pueden corresponder a la vulnerabilidad son de obtener rendimientos bajos, medios o altos (B1, B2 o B3). Por lo tanto, los elementos $R(A,B)$ representan los valores de la probabilidad de riesgo de obtener rendimientos bajos, medios o altos cuando se presenta una condición climática extrema (tabla V).

Tabla V. Matriz de riesgo

Amenaza/Impacto	B1	B2	B3
A1	R(A1,B1)	R(A1,B2)	R(A1,B3)
A2	R(A2,B1)	R(A2,B2)	R(A2,B3)
A3	R(A3,B1)	R(A3,B2)	R(A3,B3)

VI.RESULTADOS

La distribución geográfica actual de las razas de maíz Cónico y Elote Cónico en el estado se muestra en la figura 21. La raza Cónico tiene mayor presencia en todo el territorio, mientras que la raza Elotes Cónicos, en menor cantidad, pero está distribuida en todo el Estado y predomina en la parte sur.

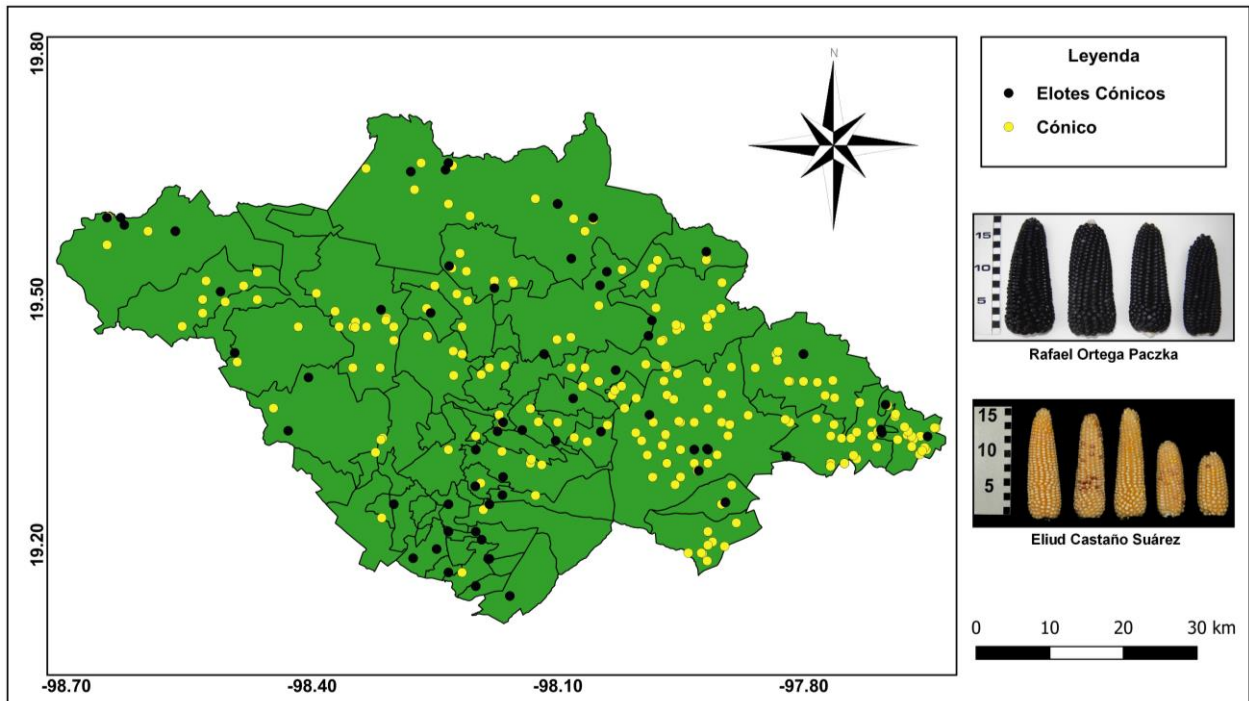


Figura 21. Distribución de maíz Cónico y Elotes Cónicos en el estado de Tlaxcala (elaboración propia, con datos del SIAP).

6.1.1. Escenario base (1960-1990)

La presencia de maíz Cónico, se encuentra distribuida en la mayor parte del estado ocupando 332 224.396 ha, que representa el 83.167%, siendo estas las condiciones adecuadas para el desarrollo de este maíz (figura 22). Las áreas de ausencia se caracterizan por ser las zonas altas y boscosas del estado, al norte el municipio de Tlaxco, al sureste la Malintzi, al este Nanacamilpa y partes de la periferia del estado con 67 240.7819 ha equivalentes al 16.8%.

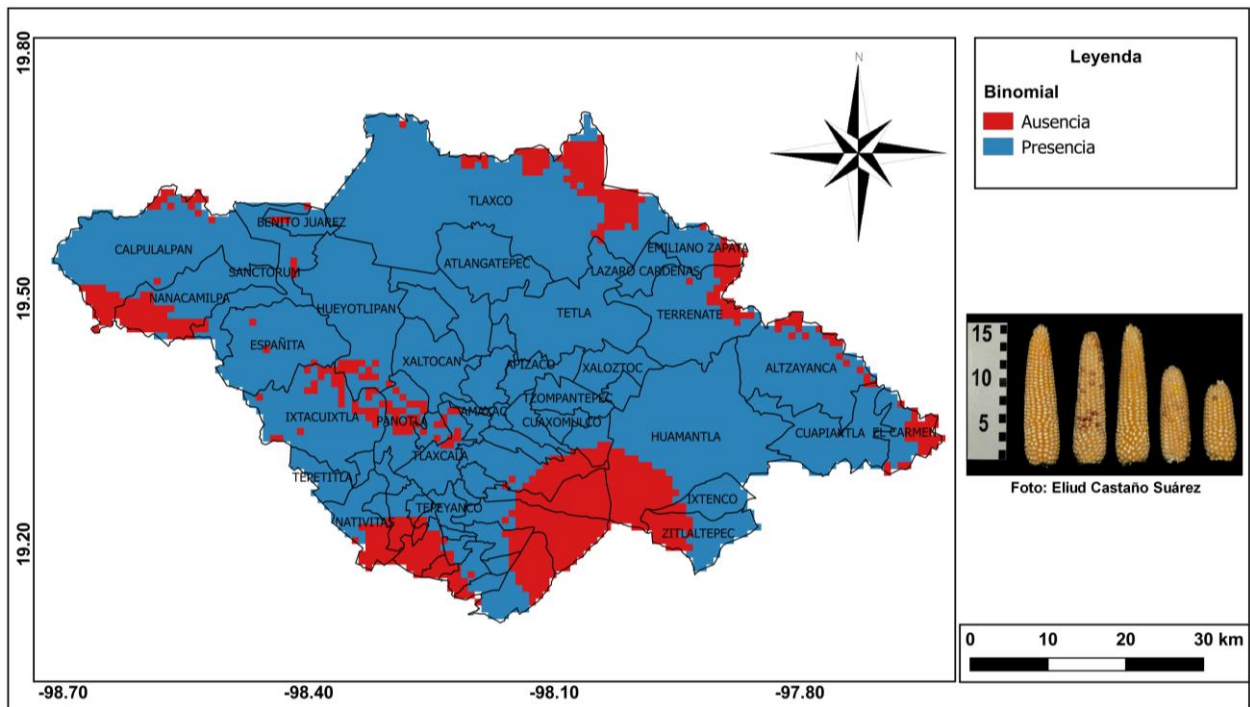


Figura 22. Escenario base de maíz Cónico bajo la climatología 1960-1990 del estado de Tlaxcala (elaboración propia, con datos del SIAP).

En las condiciones del escenario base (figura 23) la raza de Elotes Cónicos cuenta con un área de distribución de 313 949.646 ha que representan el 78.59% de presencia y 85 515.438 ha con 21.41% de ausencia, de manera que existen las condiciones climáticas favorables para el desarrollo de maíz prácticamente en todo el estado.

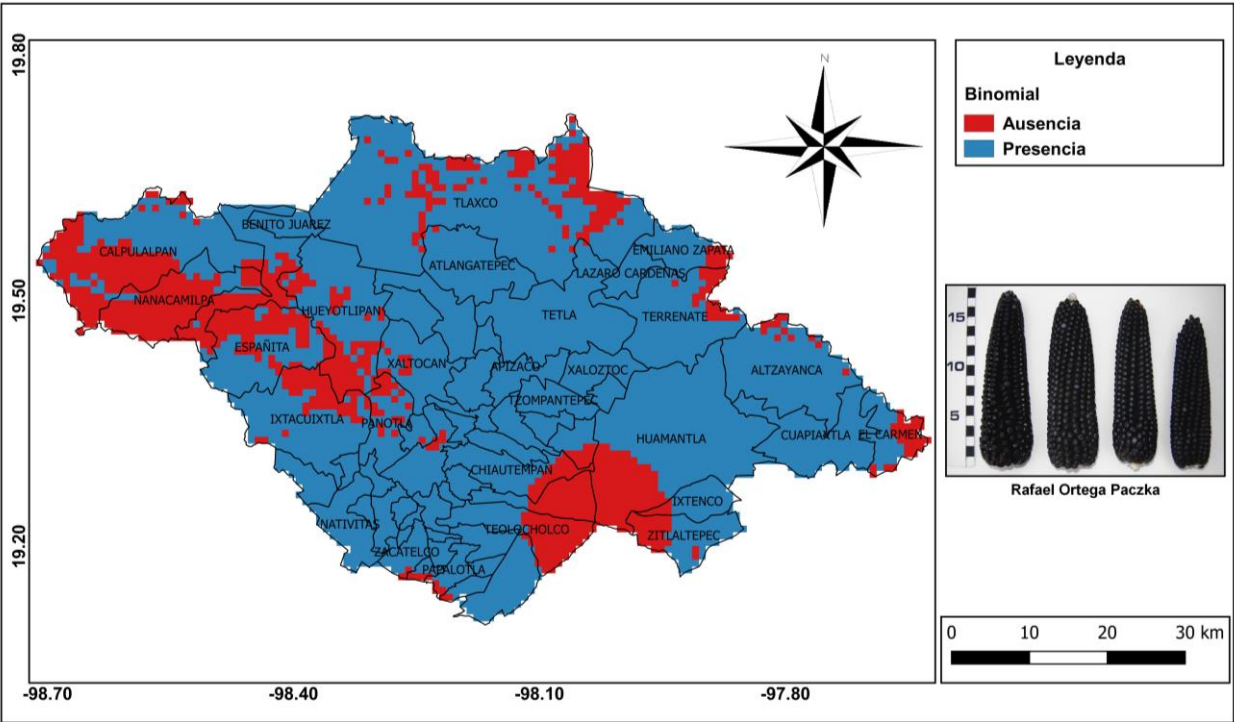


Figura 23. Escenario base Elotes Cónicos bajo la climatología 1960-1990 del estado de Tlaxcala (elaboración propia, con datos del SIAP).

6.1.2. Escenario RCP4.5 (2050)

El escenario RCP4.5 (figura 24) proyectó la distribución potencial del maíz Cónico, donde se muestran las condiciones climáticas adecuadas únicamente en dos categorías: aptitud ambiental media que cubre 348 103.852 ha que representan el 87.14% del estado y aptitud muy baja de 51 361.248 ha igual al 12.86%. En comparación con el escenario base, la ganancia del área de distribución potencial es de 51 361.248 ha equivalente al 3.98% en los municipios de Tlaxco, Calpulalpan, Nanacamilpa, Nativitas, Tetlatlahuca y Zacatelco, principalmente.

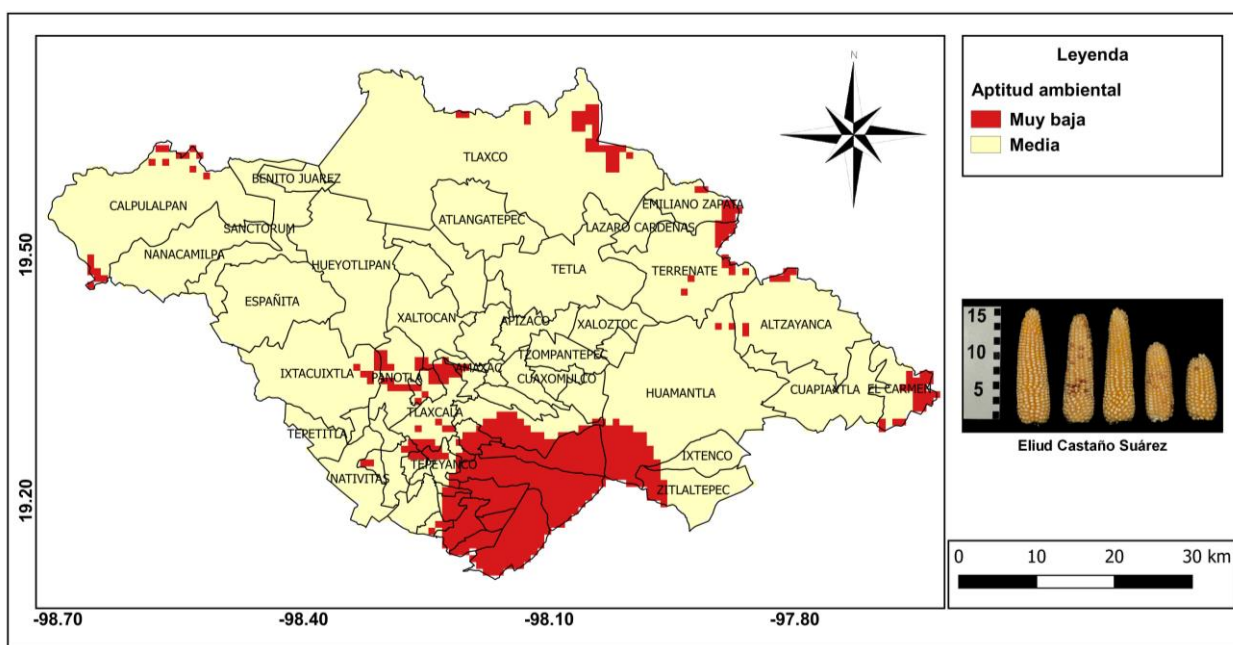


Figura 24. Escenario RCP4.5 de maíz Cónico bajo la climatología 2050 del estado de Tlaxcala (elaboración propia, con datos del SIAP).

Para Elotes Cónicos se reportaron tres de las cuatro categorías previstas de aptitud ambiental (figura 25), ésta es muy baja, baja y media, equivalente a 10 576.634 ha, 225 012.393 ha y 163 875.886, proporcionalmente al 2.65%, 56.33% y 41.02%. Donde la zona este, suroeste y noreste tiene la mejor aptitud ambiental media. Además, hay una ganancia de 18.76%, algunos de los municipios que se encuentran son Calpulalpan, Nanacamilpa, Sanctorum de Lázaro Cárdenas, Españita, Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, Tlaxco, Terrenate y alrededores de la Malintzi.

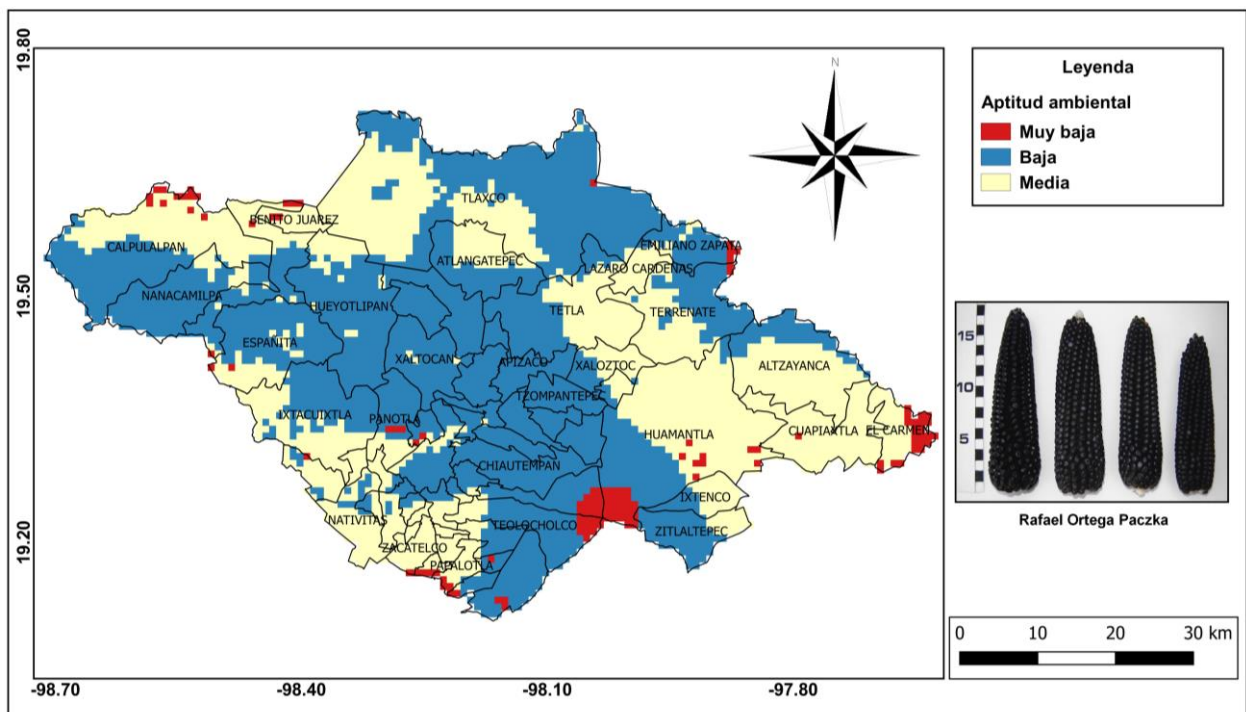


Figura 25. Escenario RCP4.5 Elotes Cónicos bajo la climatología 2050 del estado de Tlaxcala (elaboración propia, con datos del SIAP).

6.1.3. Escenario RCP6.0 (2050)

La proyección de maíz Cónico en el escenario 2050 (figura 26) muestra los cuatro rangos de aptitud ambiental: muy baja de 114 929.376 ha, baja 262 003.051 ha, con 28.77% y 65.59%, respectivamente; además, en la parte sureste del estado se presentó aptitud media y alta, correspondientes a 18 654.952 ha, 3 878.120 ha que representan un 4.67 y 0.97%. En esta última, el área se concentra en los municipios de Zacatelco, Nativitas, Xicotzingo, Papalotla de Xicohtencal y Tenancingo. No obstante, se redujo el área potencial en un 11.94% considerando el escenario de referencia.

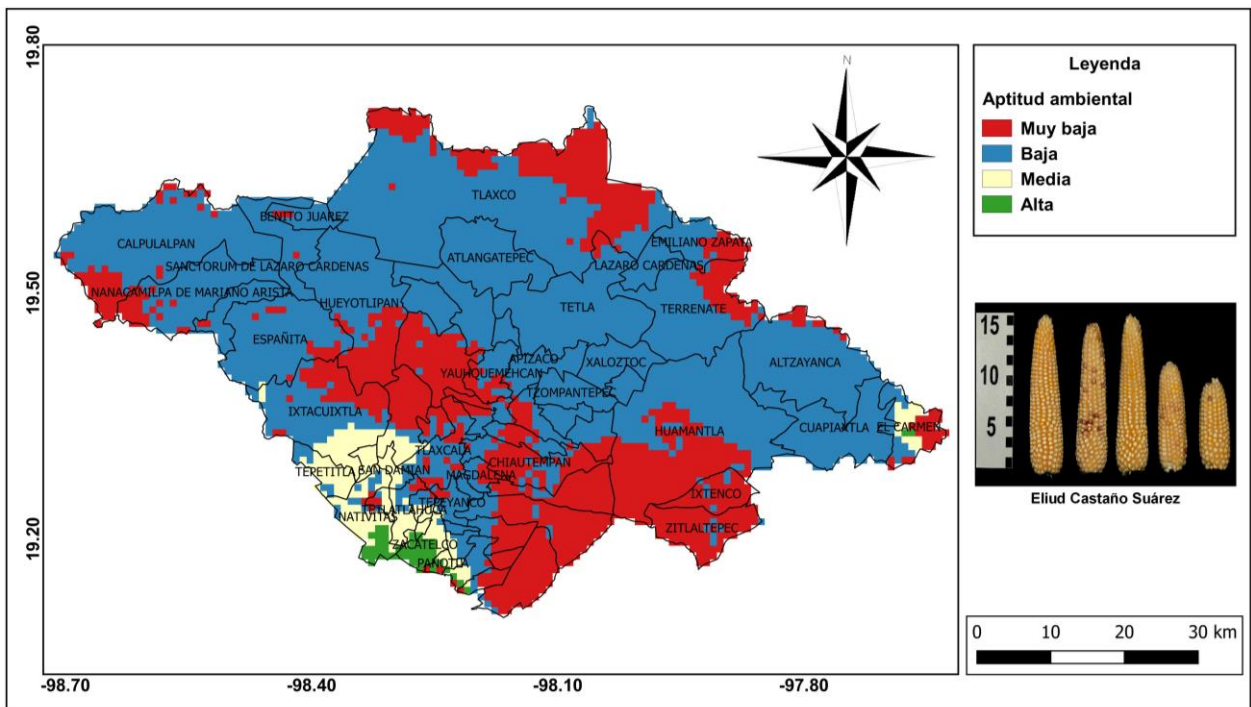


Figura 26. Escenario RCP6.0 de maíz Cónico bajo la climatología 2050 del estado de Tlaxcala (elaboración propia, con datos del SIAP).

Con el escenario RCP6.0 (figura 27) el 98.69% del estado es apto para el cultivo de maíz, al contar con las condiciones climáticas adecuadas con aptitud media de 191 506.221 ha y aptitud baja de 202 708.562 ha. Considerando el escenario de referencia, las zonas aptas tuvieron una ganancia del 20.09%.

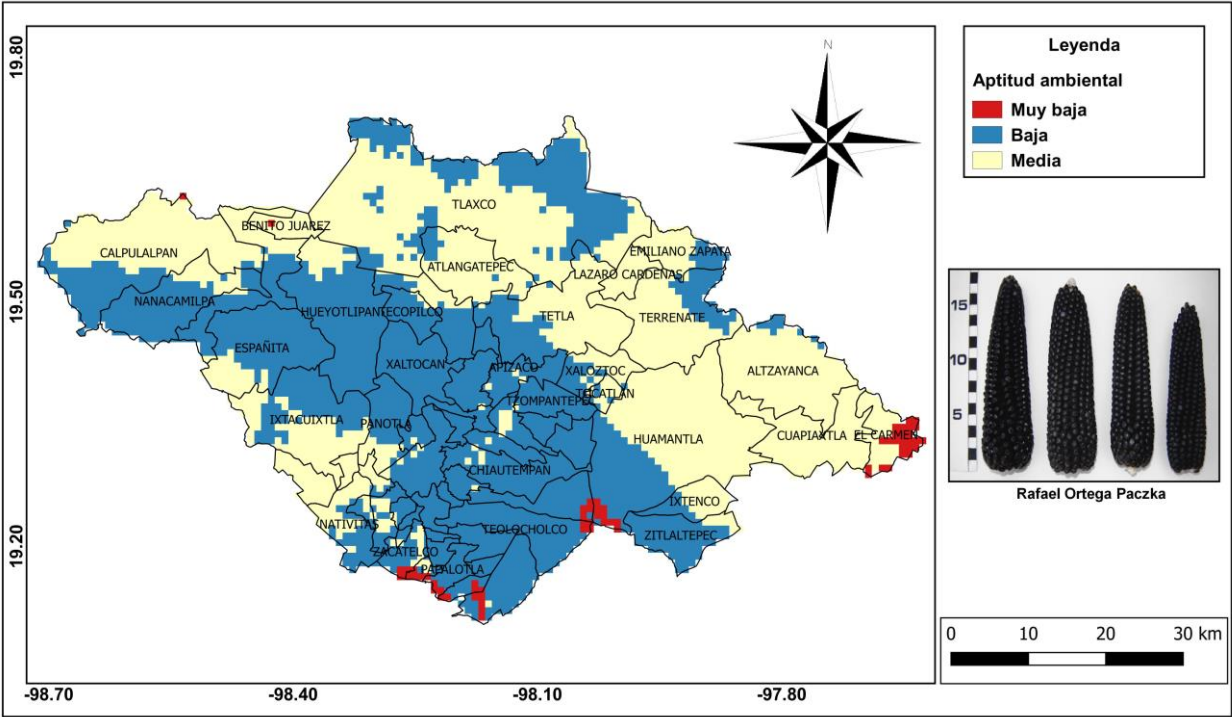


Figura 27. Escenario RCP6.0 Elotes Cónicos bajo la climatología 2050 del estado de Tlaxcala (elaboración propia, con datos del SIAP).

6.1.4. Análisis estadístico

Los valores de AUC para la raza Cónico (figura 28) muestran valores cercanos a 1 e indicando una calidad del modelo excelente en la predicción de zonas aptas para el cultivo de maíz. Con respecto al análisis potencial de distribución de la raza Elotes Cónico (figura 29), los valores de AUC fueron mayores a 0.5 para datos de entrenamiento y datos de prueba, por lo que no es considerado un modelo al azar. Sin embargo, cuanto más se acerca la línea azul a la esquina superior izquierda, mejor es el modelo para predecir las presencias de los datos de prueba.

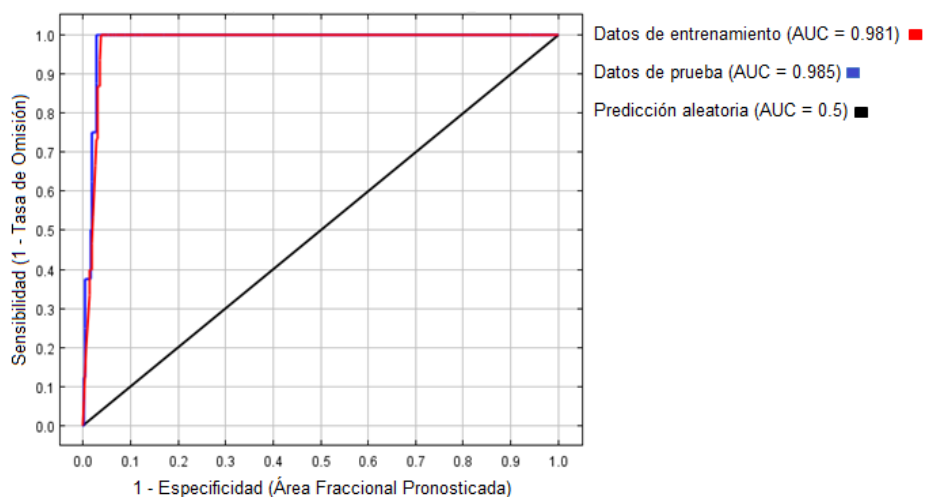


Figura 28. Curva operacional para el maíz Cónico.

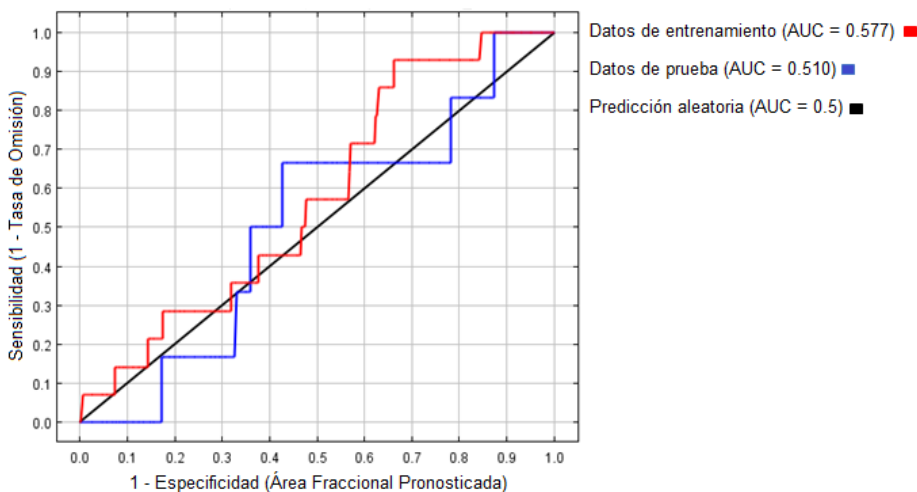


Figura 29. Curva operacional para Elotes Cónico.

6.2. Variabilidad climática

La agricultura de maíz de temporal se ve afectada por una serie de eventos climáticos extremos, aunque los más frecuentes son las sequías y las heladas, también las intensas granizadas, los fuertes vientos que soplan de la parte noroeste del estado y ocasionalmente las inundaciones que impactan en la producción de este grano.

6.2.1. Comportamiento de la temperatura mínima y número de heladas

La temperatura mínima de España (figura 30) oscila entre los 5.1-11°C mientras la línea de tendencia indica su disminución, sin embargo, en los últimos 11 años la temperatura no ha sobrepasado los 6 °C, además, se observa la relación directa que hay entre la temperatura mínima y el número de días con heladas en 17 años, ya que al disminuir la primera variable la segunda aumenta, notablemente, como se muestra en 1999 y 2010, al registrarse 73 y 61 heladas, con temperaturas mínimas 5.1 °C y 5.3 °C, respectivamente. Lo inverso también ocurre: en 1993 con 7.2 °C, el máximo relativo del periodo 1981 a 2014, se presenta el mínimo relativo en el número de helada. Cabe resaltar la diferencia de magnitud en el comportamiento de la temperatura mínima entre los tres primeros años y el resto del periodo. También el número de días con helada presenta una disminución marcada en dos periodos, iniciando en 1978 y 1993, así mismo resalta la amplitud en la variabilidad en el número de días con heladas. En 1999 se presentó año de LA NIÑA con efecto en aumento en el número días con heladas.

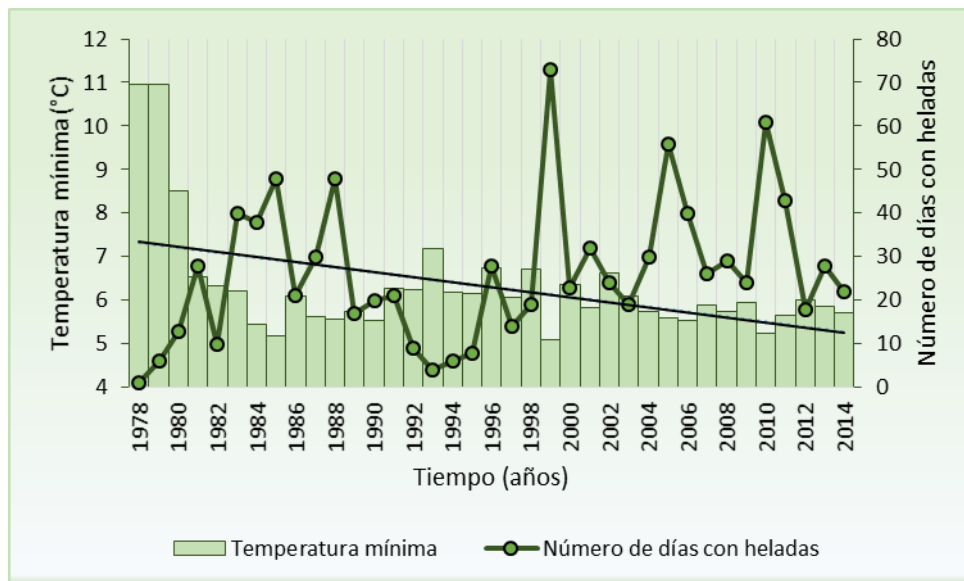


Figura 30. Comportamiento de la temperatura mínima anual y del número de heladas en España (1978-2014).

En el comportamiento de la temperatura mínima anual y el número de días con heladas en Tlaxco (figura 31), se observa un mayor número de heladas con temperaturas ≤ 5.5 °C, oscilando entre los 55 y 102 días por año, por lo que se aprecia una relación inversa entre temperaturas mínimas anuales, al disminuir ésta, el número de días con heladas aumenta en la mayor parte de los registros. Mientras que la línea de tendencia indica un aumento de temperatura mínima. Comparado con datos de la NOAA, se tiene años de LA NIÑA como se muestra en 1971, 1974, 1975, 1999, 2000 y 2011 al registrarse bajas temperaturas.

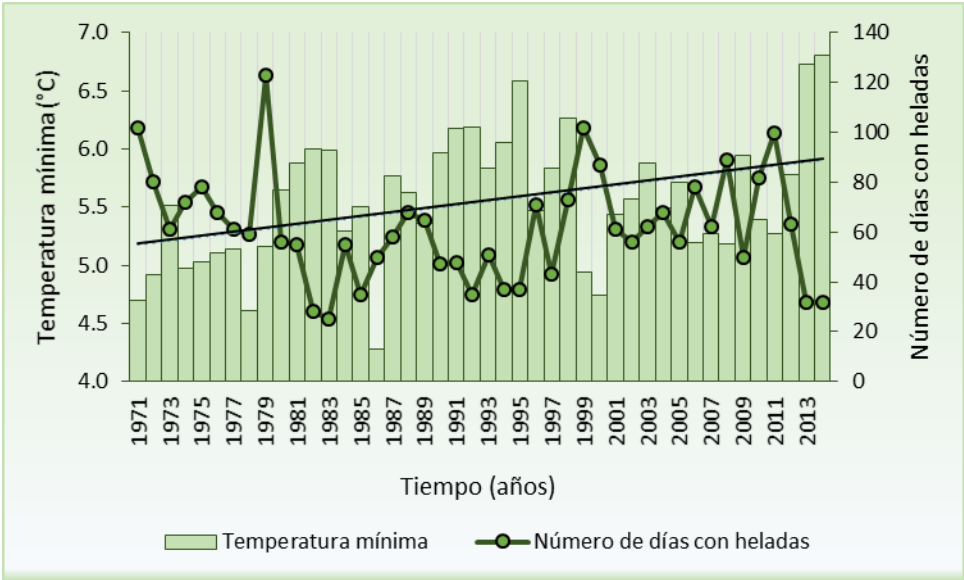


Figura 31. Comportamiento de la temperatura mínima anual y del número de heladas en Tlaxco (1971-2014).

La línea de tendencia indica la disminución de temperatura mínima en Apizaco (figura 32), con un rango de 3.5 °C a 7.2 °C, donde la temperatura suele mantenerse por debajo del número de días con heladas en el periodo de 1955 a 1975, caso contrario a partir de 1973 ya que la temperatura y heladas están relacionadas entre sí, sin embargo, en este periodo se localiza extremos como 1999 al disminuir la temperatura el número de heladas aumento drásticamente. Contrastando con datos de la NOAA se registraron años de LA NIÑA para 1971, 1974, 1975, 1989 inició con evento frío de enero-mayo y 1996 de enero-marzo.

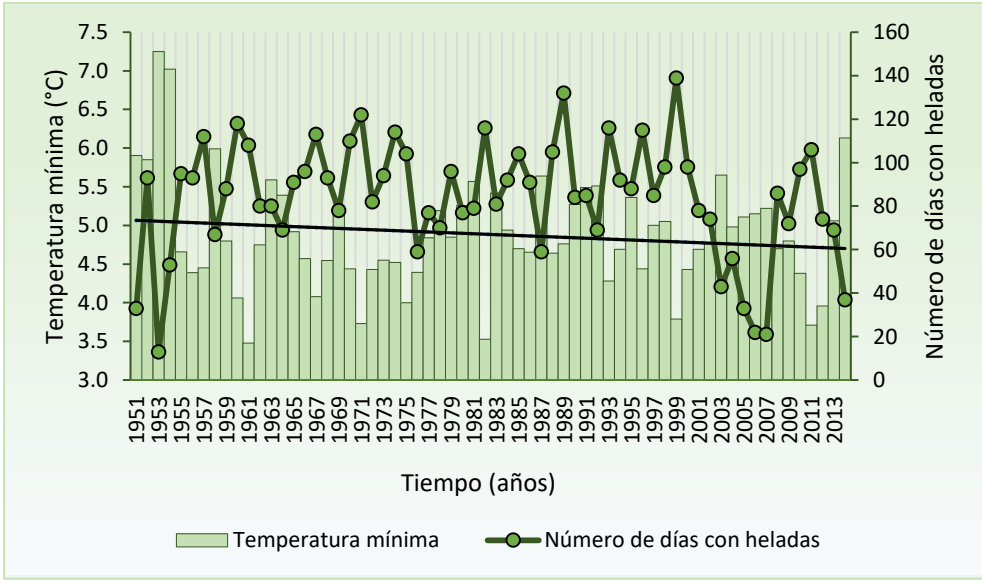


Figura 32. Comportamiento de la temperatura mínima y del número de heladas anuales en Apizaco (1961-2014).

En la temperatura mínima de Tlaxcala (figura 33) se observa dos periodos que difieren por su comportamiento de 1961-1986 muestra una temperatura que varía entre 5.3 y 8.1°C con heladas mayores a 37 por año y representa el 81 %, para el segundo periodo de 1989-2014 la mínima de 7.4 y 9.1 °C lo que muestra un aumento en la temperatura y el número de heladas disminuye en un 87 %. Tal como lo muestra la línea de tendencia, en el aumento de la temperatura y los años de 1966, 1967, 1967, 1969, 1987 y 1988 no se registró información.

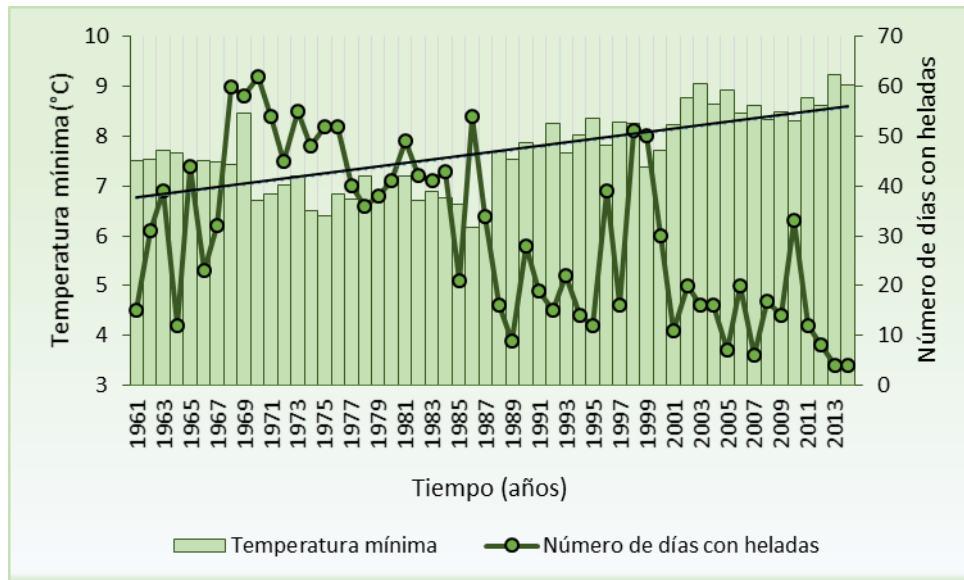


Figura 33. Comportamiento de la temperatura mínima y del número de heladas anuales en Tlaxcala (1961-2014).

La temperatura de 1992-1998 es poco variable ya que la diferencia máxima es de 1 °C, mientras en 1999 disminuye para después aumentar de manera constante hasta el 2009 con 3 °C y ésta es representada por la línea de tendencia (figura 34). En 1999 y 2000 se presenta el evento la NIÑA donde se registran las temperaturas más bajas del municipio, coincidiendo con los años que tiene mayor número de heladas incluidos 1996 y 1998.

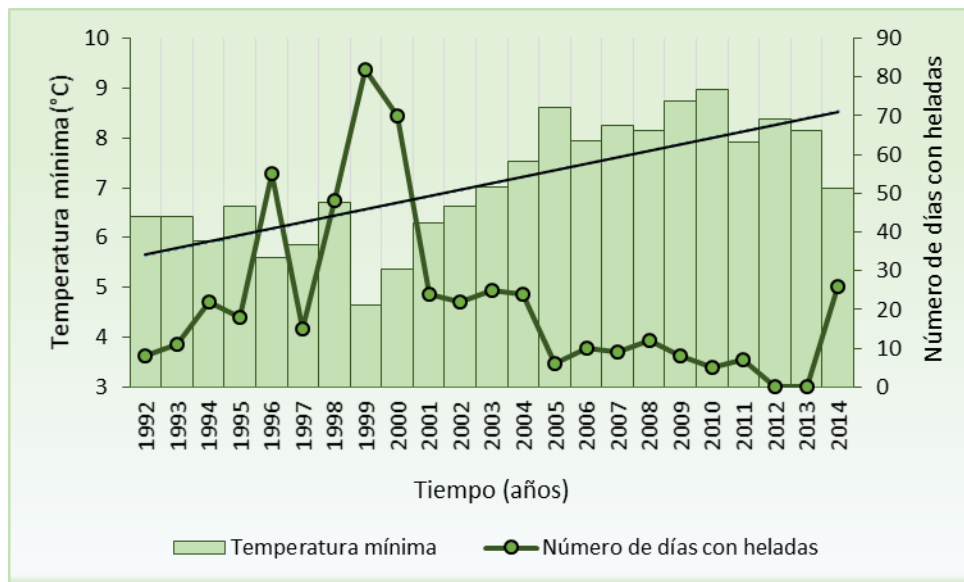


Figura 34. Comportamiento de la temperatura mínima y del número de heladas anuales en Terrenate (1992-2009).

El comportamiento de la temperatura mínima muestra variabilidad no abrupta a excepción de la temperatura más fría presente en 1996 y, de acuerdo con la NOAA en éste año fue categorizado como LA NIÑA moderada coincidiendo con el mayor número de días con heladas. Además, se puede notar que entre menor es la temperatura mayor es el número de días con heladas, como se muestra en 1996, 1997 y 2008-2013 (figura 35).

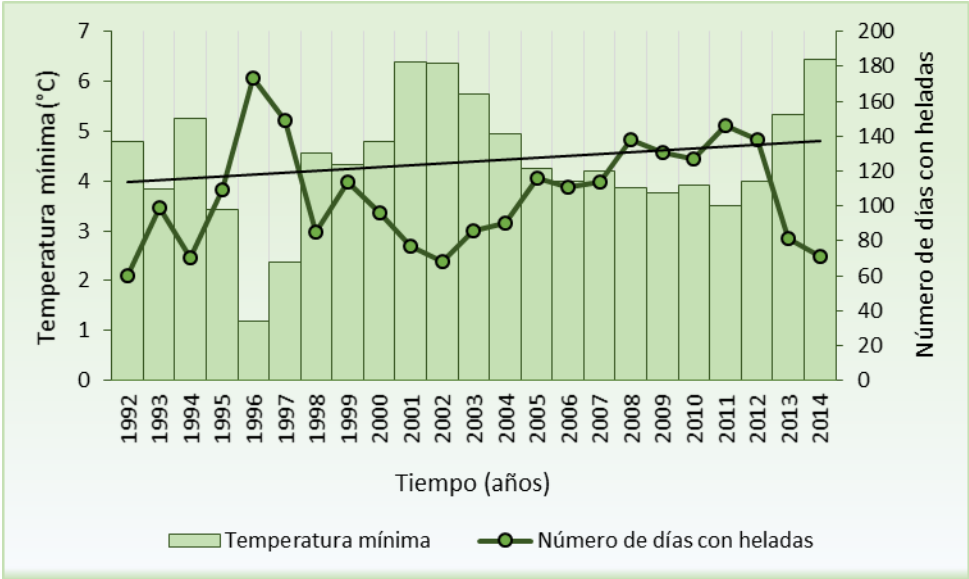


Figura 35. Comportamiento de la temperatura mínima y del número de heladas anuales en El Carmen Tequexquitla (1992-2014).

6.2.2. Comportamiento de la temperatura máxima

La amplitud de la temperatura se mantiene entre 20.6-23.3 °C de 1980-2014, a excepción de los dos primeros años con una temperatura máxima anual de 25.5 y 26.3 °C considerados por la NOAA como años de EL NIÑO débil, posible consecuencia del aumento de temperatura, por otro parte en principio, no se espera eventos drásticos por heladas para el cultivo de maíz (figura 36). Por otro lado, la línea de tendencia muestra una disminución de temperatura máxima anual.

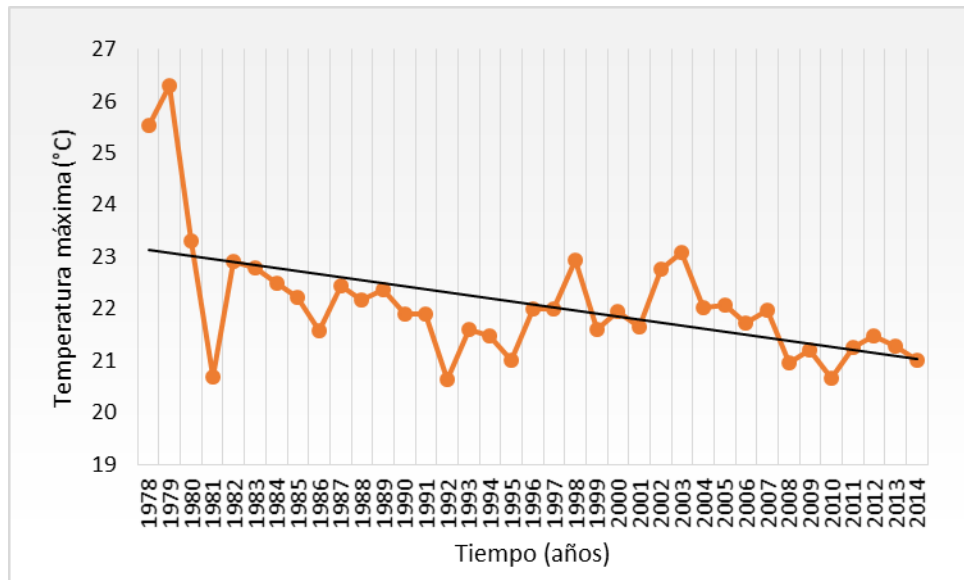


Figura 36. Comportamiento de la temperatura máxima anual en España (1978-2014).

La amplitud de la temperatura máxima entre un año y otro no es drástica (figura 37), sin embargo, se presentan años cálidos como 1998 y 2005 considerados por la NOAA como El Niño de intensidad muy fuerte y débil. No obstante, hay incremento de temperatura como lo muestra la línea de tendencia a pesar de tener un descenso gradual de 5 °C en los últimos tres años, probablemente debido a la intensidad de las lluvias presentes al menos en 2012 determinado por la NOAA como año de EL NIÑO de categoría débil.

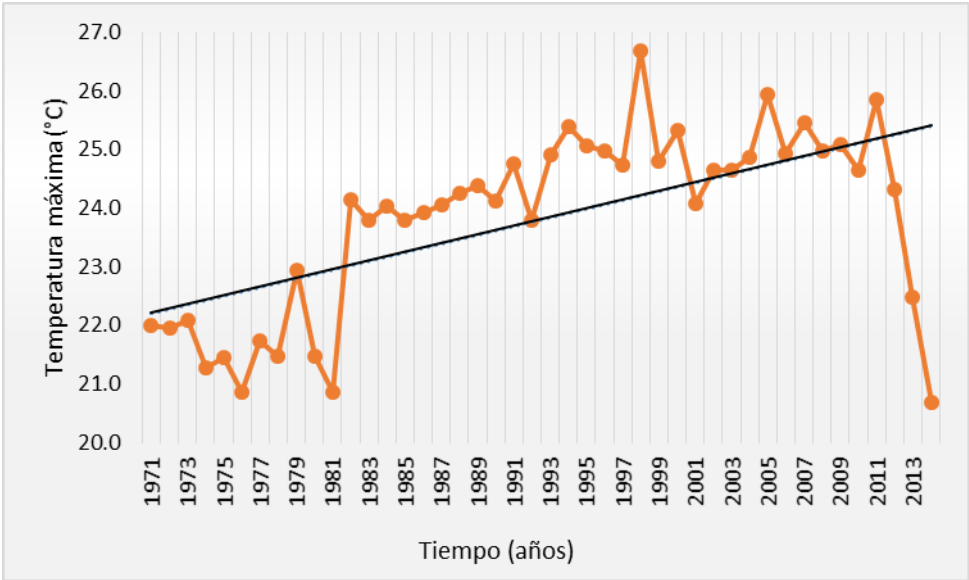


Figura 37. Comportamiento de la temperatura máxima anual en Tlaxco (1971-2014).

La temperatura máxima en Apizaco oscila entre 21.3-24.2 °C, no obstante la línea de tendencia muestra un comportamiento ligero que va a la alza y entre los primeros años se tiene a 1966 como el menos caluroso, además, reportado por la NOAA como El NIÑO de categoría fuerte, mientras el año más caluroso fue 1998 y es considerado LA NIÑA de categoría moderada (figura 38). De manera que no se muestra variación drástica inter-anual, únicamente se hizo evidente de 1981-1982 de categoría NEUTRO a EL NIÑO de categoría muy fuerte.

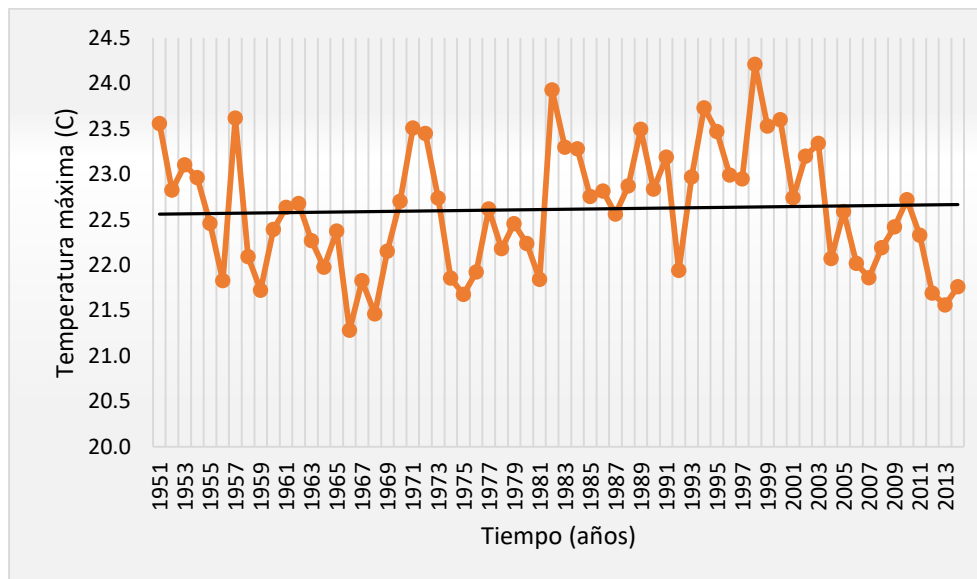


Figura 38. Comportamiento de la temperatura máxima anual en Apizaco (1961-2013).

En Tlaxcala la temperatura se puede observar en dos fases de máximas, en la primera de 1961-1987 donde alcanza su máximo en 1982 considerado por la NOAA como EL NIÑO de categoría muy fuerte, mientras en el segundo periodo de 1989-2014 la temperatura ha tenido un aumento en el 68 % de los años, con respecto al punto máximo del primer periodo, el cual es considerado EL NIÑO de categoría débil. La línea de tendencia nos indica un aumento en la temperatura (figura 39).

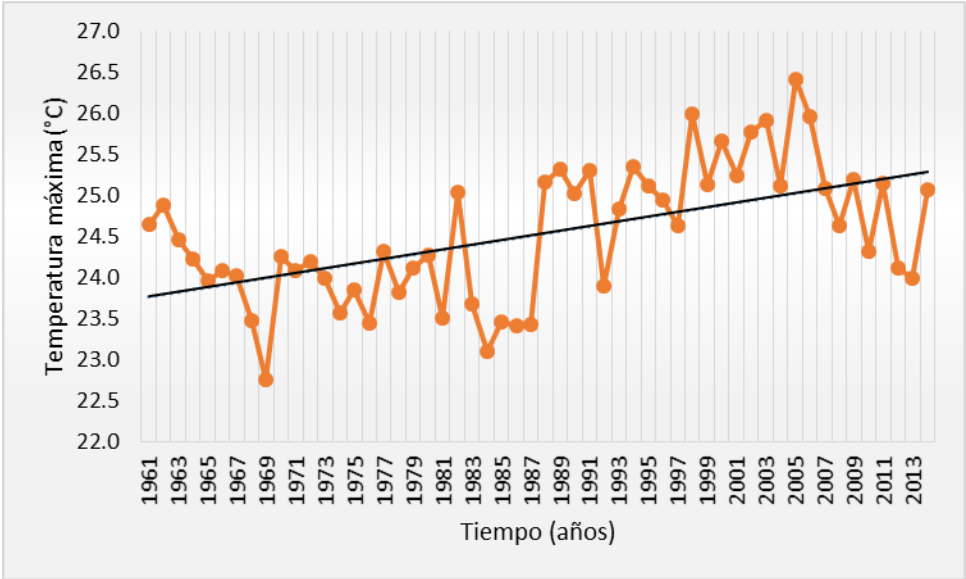


Figura 39. Comportamiento de la temperatura máxima anual en Tlaxcala (1961-2014).

Terrenate alcanza una máxima de 24.6 °C, mientras en los próximos años no se vuelve a presentar temperatura semejante a la máxima registrada, la línea de tendencia muestra la baja de temperatura en los siguientes años a partir de 2001, hasta llegar a 19.8 °C en 2011 considerado por la NOAA año de LA NIÑA de categoría fuerte (figura 40).

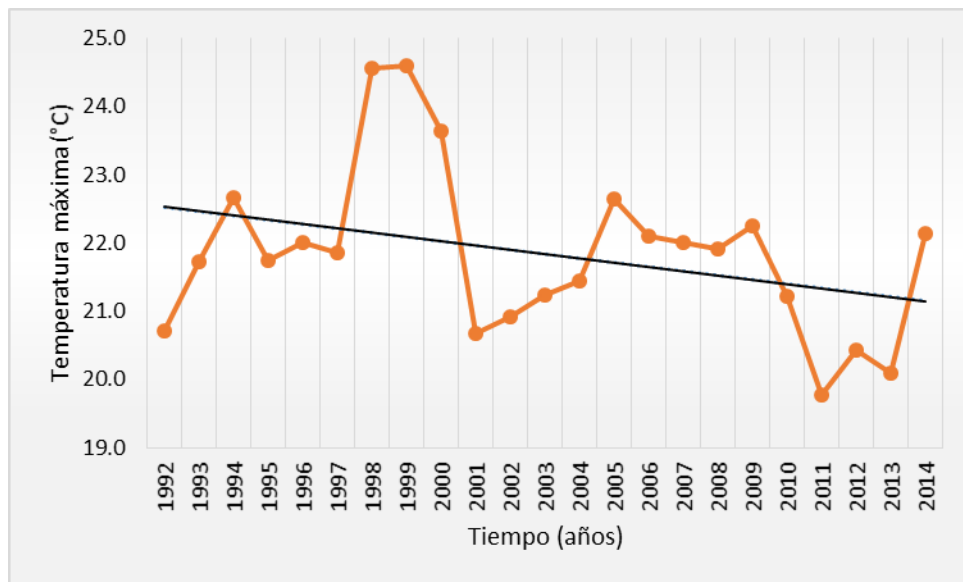


Figura 40. Comportamiento de la temperatura máxima anual en Terrenate (1992-2009).

El comportamiento de la temperatura máxima en El Carmen oscila entre 20.4 y 26.9 °C, tiene su punto máximo en 2006 considerado como EL NIÑO de categoría débil y la línea de tendencia exhibe un ligero aumento en los próximos años (figura 41).

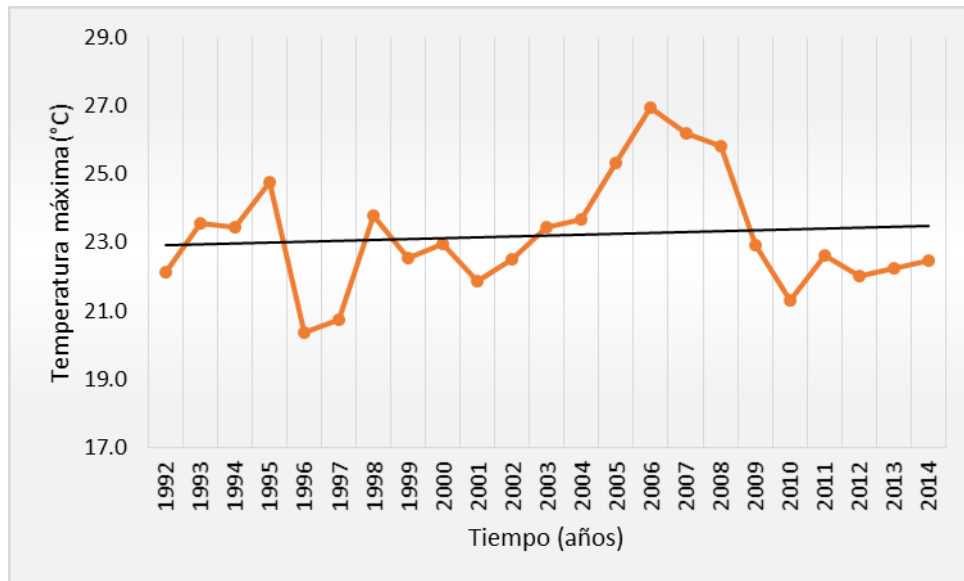


Figura 41. Comportamiento de la temperatura máxima anual en El Carmen Tequexquitla (1992-2014).

6.2.3. Comportamiento de la precipitación

Españita es el municipio en el que más llueve del estado de Tlaxcala con un promedio de 1143.71 mm y variación entre 538-2039.2 mm anuales de acuerdo al periodo registrado de 36 años, pese a la variación la línea de tendencia no muestra cambios significativos de aumento o disminución de lluvia (figura 42). Cabe resaltar que los cambios interanuales no son drásticos y la lluvia acumulada anualmente no representa un riesgo por sequía en el rendimiento del maíz. Sin embargo, una lluvia abundante que no está distribuida a lo largo del ciclo de la planta puede causar daños, provocando pérdidas en la producción de maíz como se muestra de 1900-1992 con lluvia mayor a 1820 mm anuales.

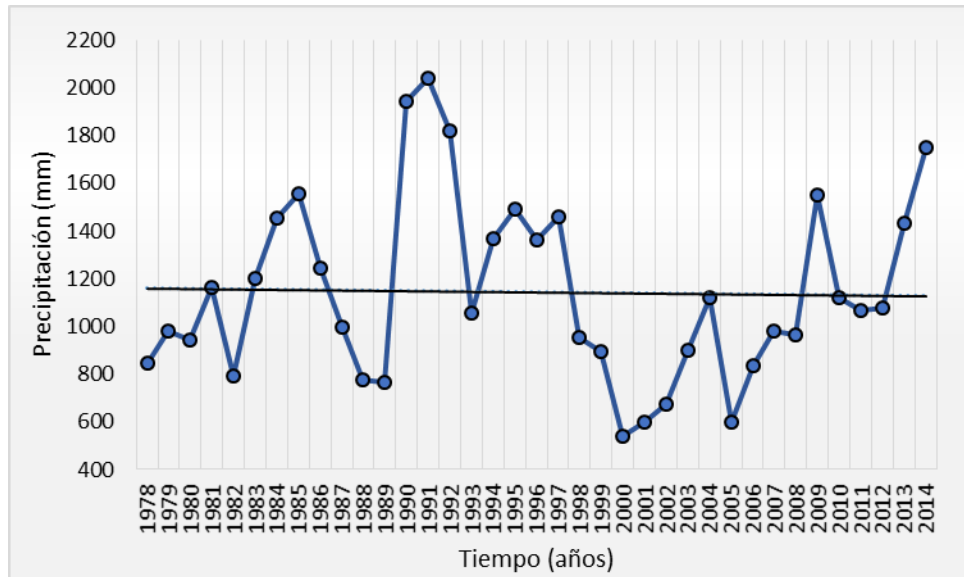


Figura 42. Comportamiento de la lluvia anual en Españita (1978-2014).

La precipitación anual en Tlaxco tiene un máximo de 991.6 mm, a pesar de ello, se observa un periodo de disminución de lluvia de 1981-1996, resaltando 1986 al tener la mínima acumulada de 463.1 mm por lluvias tardías a partir de junio, además, considerado por la NOAA como año de EL NIÑO en categoría moderado, situación que pudiera contribuir a la sequía (figura 43). En la mayor parte del periodo no se muestran cambios significativos inter-anales a excepción de 1998-2001 con una diferencia máxima de 373.9 mm.

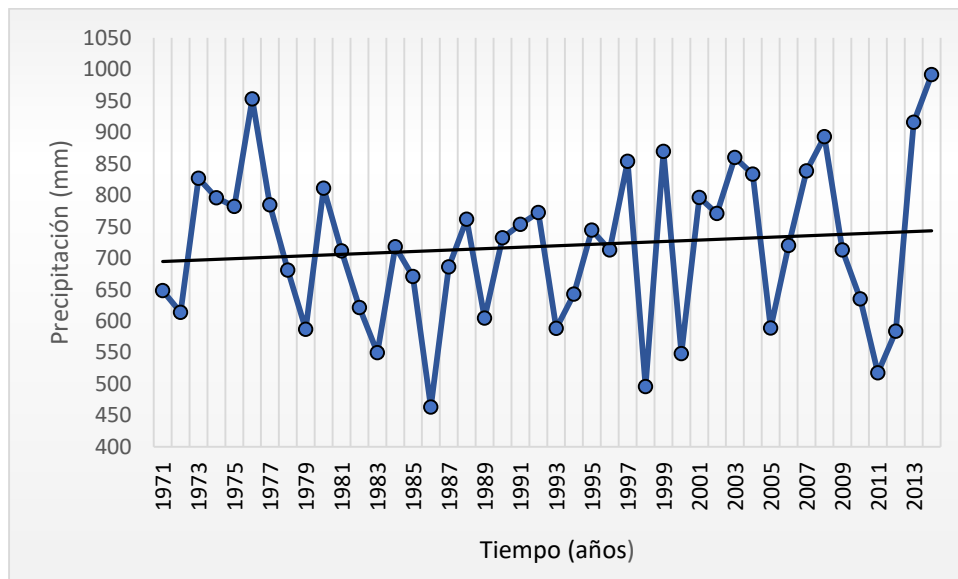


Figura 43. Comportamiento de la lluvia anual en Tlaxco (1971-2014).

La precipitación a partir de 1996 disminuyó en amplitud, tanto máxima como mínima a excepción de 2003 y 2014 con lluvia de 1074.0 y 1661.5 mm (figura 44), aunque la precipitación tiende a disminuir, en cuanto al valor mínimo no hay disminución ya que se mantiene dentro del promedio.

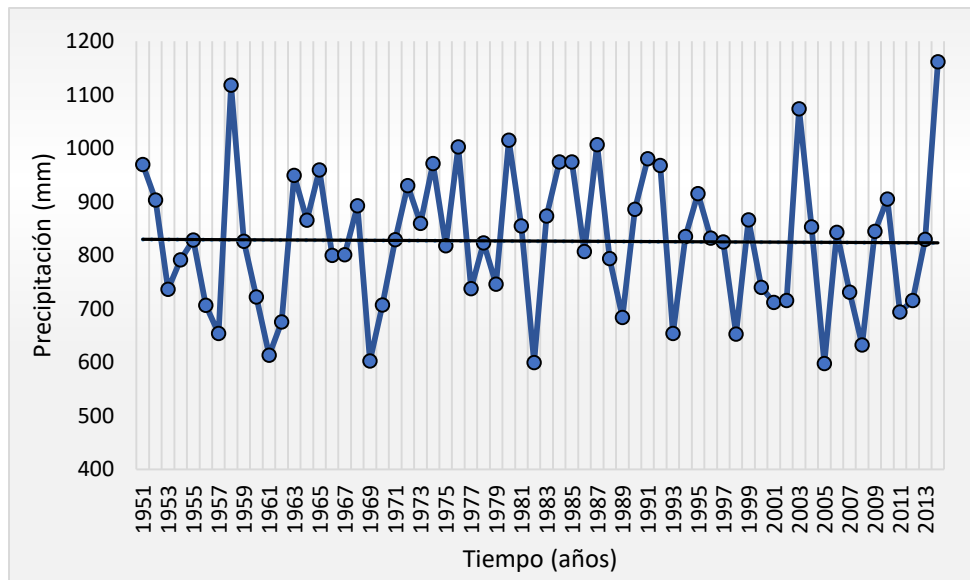


Figura 44. Comportamiento de la lluvia anual en Apizaco (1961-2014).

El comportamiento de la precipitación en Tlaxcala capital muestra dos periodos, en el primero: de 1962-1991 con un rango de 436.9-1134.6 mm con un comportamiento diferenciado con años más lluviosos que otros, considerados por la NOAA como LA NIÑA de categoría fuerte en 1973-1976. En el segundo periodo: de 1992-2014 con precipitación de 613.6-1145.1 mm se observa menor amplitud entre cada año a partir de 1998, considerado éste año y 1999-2000 de categoría fuerte. La línea de tendencia indica un ligero aumento de precipitación en los siguientes años (figura 45).

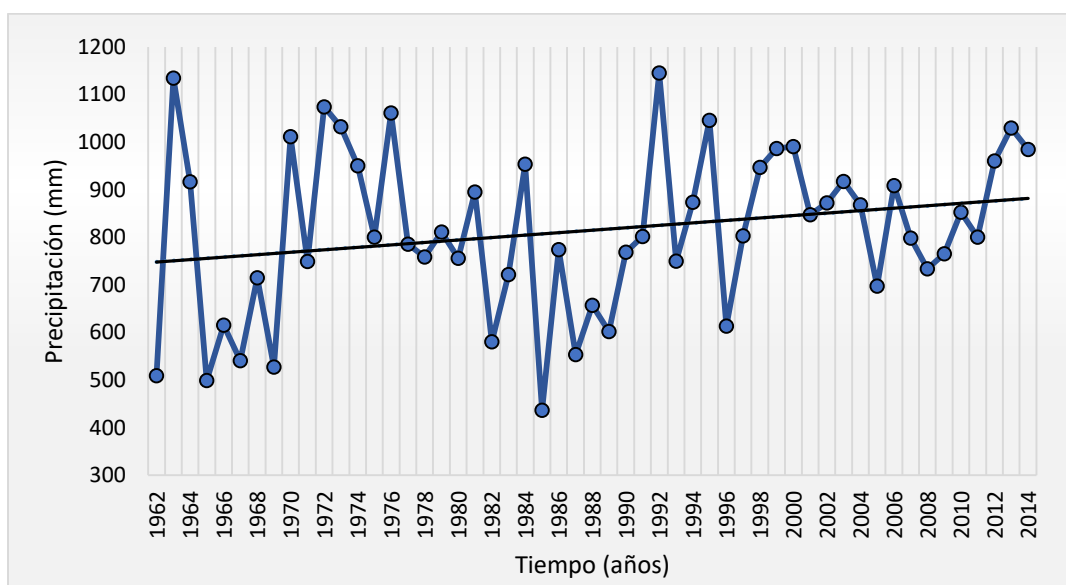


Figura 45. Comportamiento de la lluvia anual en Tlaxcala (1961-2014).

En el municipio de Terrenate tienen una variabilidad no abrupta en los primeros 18 años, considerando 1995 y 2005 por sus extremos, además, para el 2010 y los dos últimos años tienen la mayor amplitud en todo el periodo. Pese a ello, la línea de tendencia muestra disminución en la precipitación (figura 46).

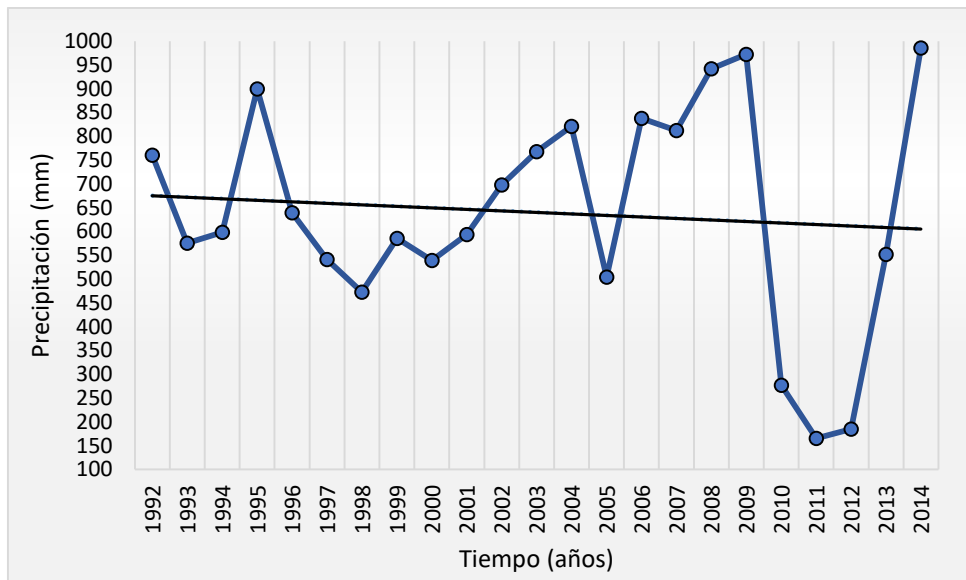


Figura 46. Comportamiento de la lluvia anual en Terrenate (1992-2014).

De acuerdo a la precipitación inter-anual de El Carmen se puede dividir en dos periodo: el primero de 1992-1999, donde el primer y segundo año se encuentran en extremos, debido a su precipitación de 652 y 291 mm al mostrar mayor amplitud. En el segundo periodo: 2000-2014 se presenta menor amplitud pero con una tendencia a incrementar la lluvia acumulada (figura 47).

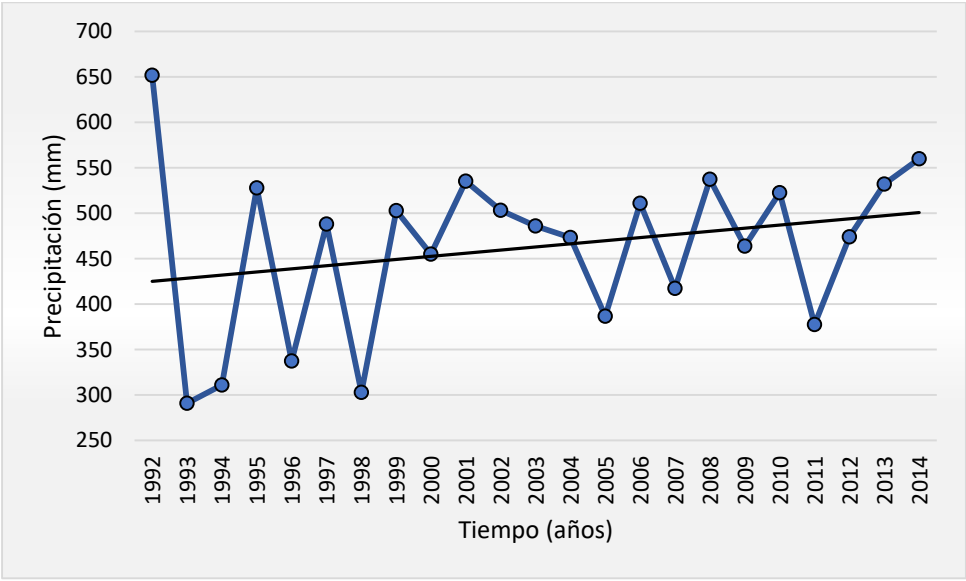


Figura 47. Comportamiento de la lluvia anual en El Carmen Tequexquitla (1992-2014).

6.2.4. Comportamiento de la cantidad de lluvia y el número de días con lluvia

El número de días con lluvia oscila entre 44-217 en treinta y siete años donde se distinguen dos periodos: el primero de 1978-1993 con mayor variabilidad y días de lluvia de 89-217, para el segundo periodo en los siguientes 21 años es menor la variación interanual y el número de días con lluvia fluctúa de 44-146 mostrando una disminución e incluso en los últimos siete años los días con lluvia están por debajo de la precipitación anual (figura 48). Situación que en muchos casos se traducen como lluvia torrencial provocando en primera instancia pudrición en las plantas y un segundo problema es la plaga por el gusano cogollero al comerse la mazorca.

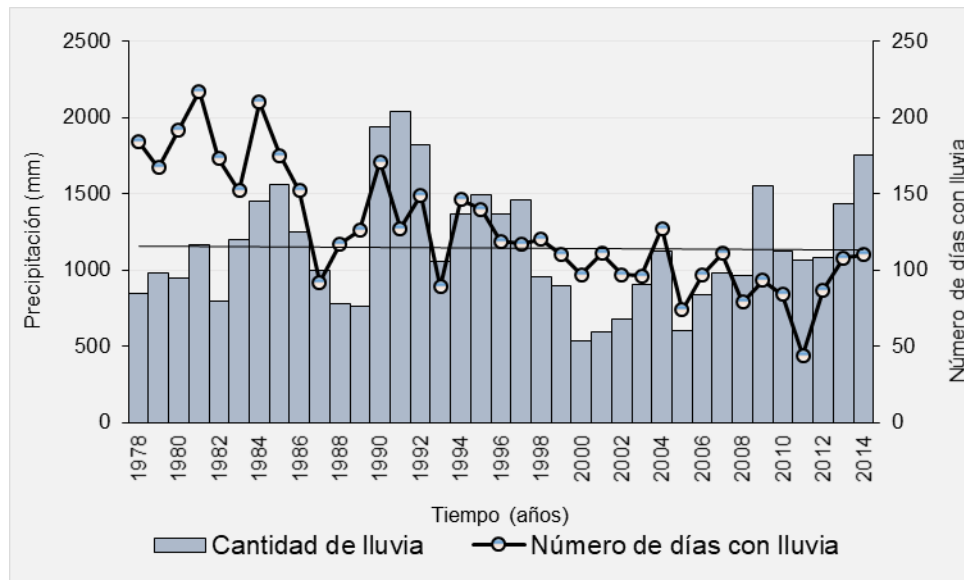


Figura 48. Comportamiento y número de días con lluvia en España (1978-2014).

La línea de tendencia para Tlaxco indica un ligero aumento de precipitación para algunos años a partir de 1997, con respecto al número de días con lluvia se observa tres periodos que va en descenso, el primero de 1971-1987, el segundo de 1988-2004 y el último de 2005-2014. Cabe resaltar que el comportamiento de la precipitación no tuvo cambios significativos, sin embargo, es notoria la relación entre variables al observarse dos comportamientos: en el primero sobre sale el número de días con lluvia mayor a la precipitación en los años de 1971, 1972 y 1981-1987 y el segundo comportamiento la precipitación está por arriba del número de días con lluvia para 1973-1980, 1988-2014 (figura 49).

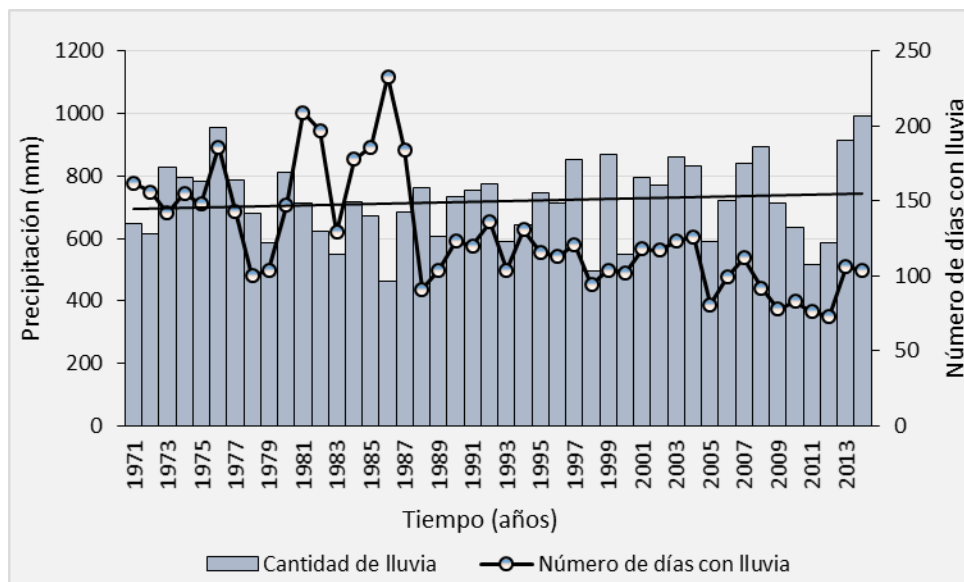


Figura 49. Comportamiento y número de días con lluvia en Tlaxco (1971-2014).

De 1951-1970 la precipitación fluctúa entre 602.7-1118.0 mm, mientras que los días de lluvia son menores a la precipitación, para el periodo de 1971-1992 se encuentra entre 599.7-1015.1 mm y el número de días con lluvia tienen mayor variabilidad, además, en su mayoría se localizan por arriba de la acumulada por lo que es el periodo con las dos variables de mayor presencia, para 1993-2014 el número de días con lluvia son los más estables y se localizan por debajo de la precipitación de 600 mm (figura 50).

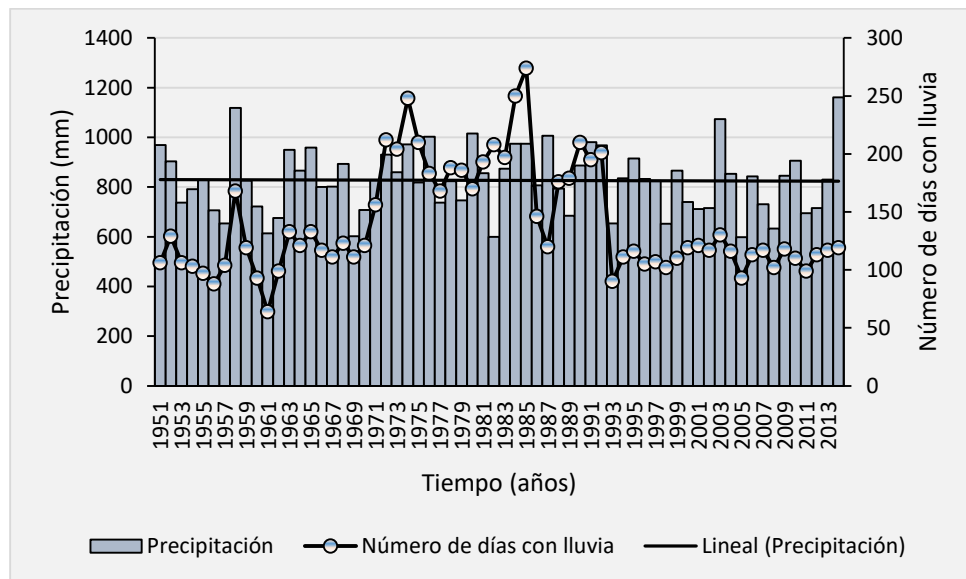


Figura 50. Comportamiento y número de días con lluvia en Apizaco (1961-2014).

Al inicio del periodo hasta 1972 los días con lluvia fueron en la mayoría de los años proporcional al disminuir o aumentar la precipitación. Sin embargo, de 1973-1990 el número de días con lluvia está por arriba de la precipitación acumulada, no obstante, en los siguientes años el número de días con lluvia disminuye en dos periodos marcados de 1991-2005 y 2006-2014, quedando por debajo de la lluvia acumulada (figura 51).

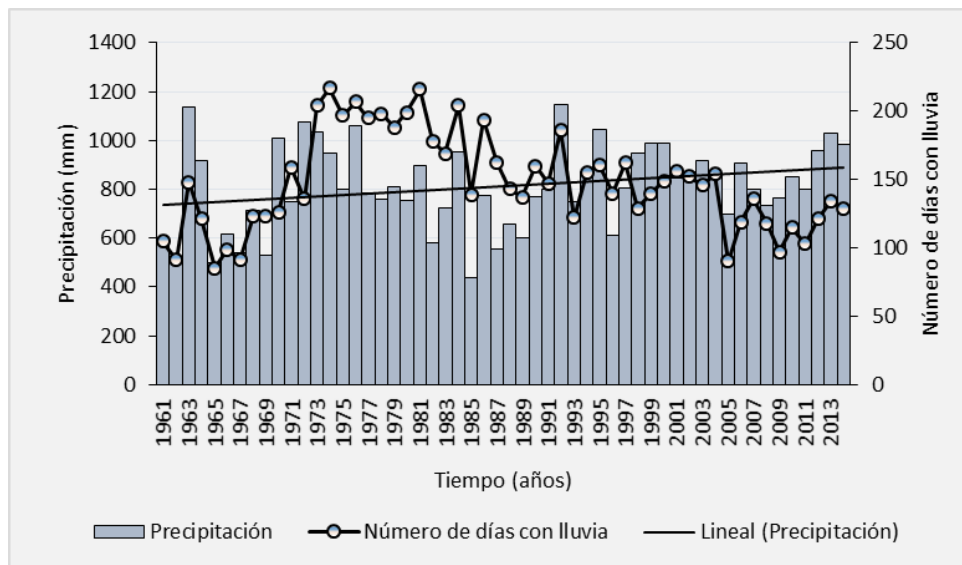


Figura 51. Comportamiento y número de días con lluvia Tlaxcala (1961-2014).

En Terrenate el número de días con lluvia es mayor en los primeros seis años, posterior a este periodo se muestra una estrecha relación con la lluvia acumulada, sin embargo, de 2010-2012 la precipitación se vio afectada pero los días con lluvia en menor grado (figura 52).

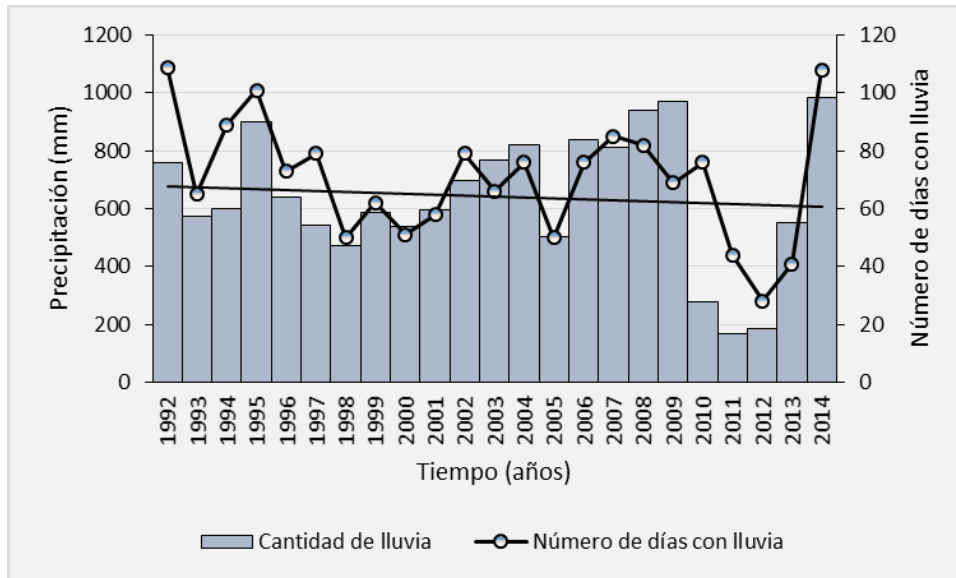


Figura 52. Comportamiento y número de días con lluvia en Terrenate (1992-2014).

En el Carmen se observa el comportamiento del número de días con lluvia en forma creciente, mientras la línea de tendencia muestra un ligero aumento en la precipitación. De manera que se puede apreciar con muy pocos cambios al preservar en la mayoría de los años como sobresalen los días de lluvia (figura 53).

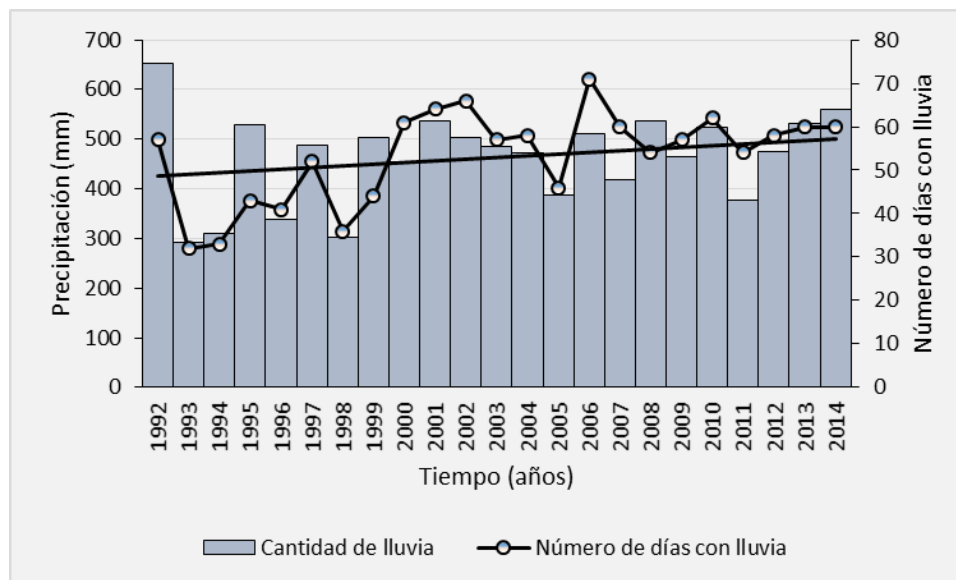


Figura 53. Comportamiento y número de días con lluvia en El Carmen Tequexquitla (1992-2014).

6.2.5. Caracterización de años secos, normales y con exceso de lluvia

Se realizó la caracterización de años de acuerdo al comportamiento de la precipitación indicada con línea azul para Española (figura 54), cuatro años con exceso de lluvia (1992, 1995, 2009 y 2014) mostrados sobre la primera línea punteada, cuatro con sequías (2000, 2001, 2002 y 2005) bajo la última línea punteada y los quince años restantes son considerados neutros entre la primera y última línea punteada.



Figura 54. Caracterización de años secos y húmedos anuales en Española (1992-2014).

La caracterización de años con excesos de lluvia, normales y secos del municipio de Tlaxco, periodo 1992-2014. El comportamiento de la precipitación indica que en el periodo de estudio se presentaron seis años con sequía (1993, 1998, 2000, 2005, 2011 y 2012) y tres años con exceso de lluvia (2008, 2013 y 2014). Recordado 2008 como el más productivo del periodo con 3.45 t/ha y 872.9 mm de lluvia (figura 55).

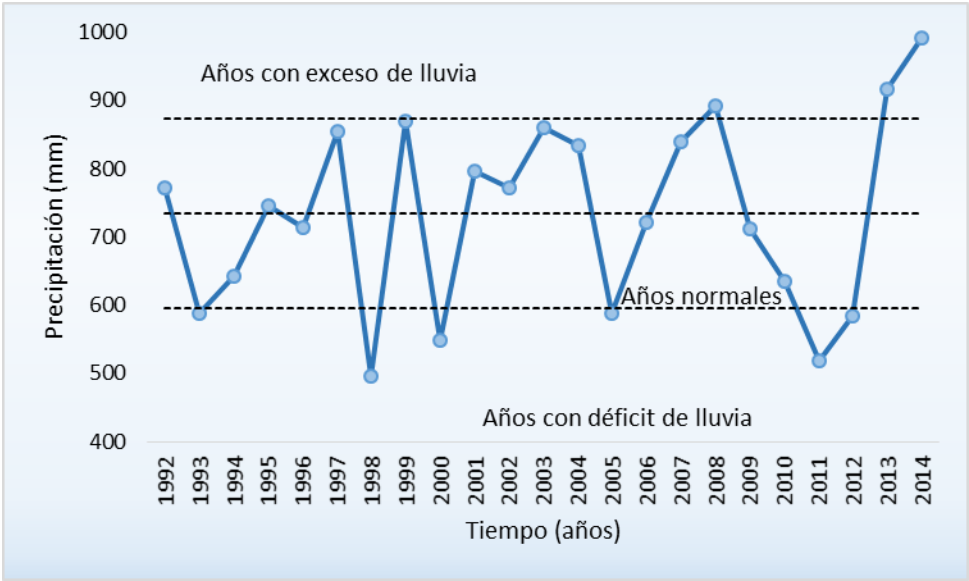


Figura 55. Caracterización de años secos y húmedos anuales en Tlaxco (1992-2014).

Para el caso de Apizaco los años con exceso de lluvia obtuvieron buenos rendimientos (figura 56), en función del incremento de la lluvia para 1992, 2003 y 2014 al incrementarse de 2.80, 2.53 y 2.40 t/ha. El 69.6 % de información se encuentra en condiciones normales con rendimiento de 0.6-3.1 t/ha, destaca el 2011 por su bajo rendimiento, en este año se presentó una fuerte helada el 7 y 8 de septiembre, afectando de manera negativa la producción de maíz a pesar de tener el segundo lugar de mayor superficie sembrada. De igual manera se contabilizaron años con déficit de precipitación, al obtener menores rendimientos en 1993 y 1998 con 1.80 y 1.30 t/ha al registrarse el mayor número de heladas para este primer año y para el segundo la producción fue afectado por las lluvias tardías.

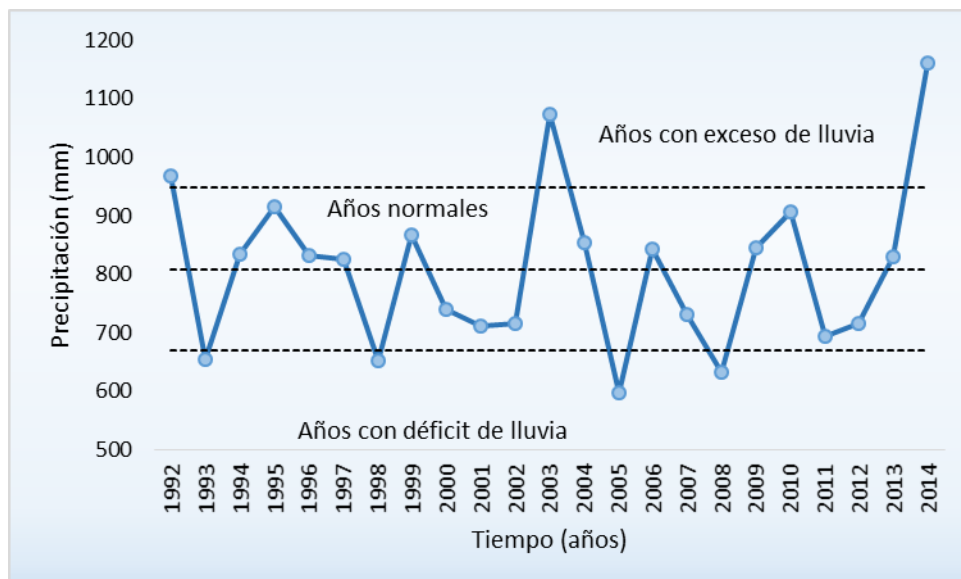


Figura 56. Caracterización de años secos y húmedos anuales en Apizaco (1992-2014).

En Tlaxcala capital se obtuvo los mejores rendimientos con lluvia excesiva al llegar a 2.64 t/ha en 1992 (figura 57), mientras en años normales se localiza el 69.6% de la serie con rendimientos que va de 1.0-2.5 t/ha. Para el caso de déficit de lluvia, se localizan 4 años con rendimiento menor a 2.0 t/ha.

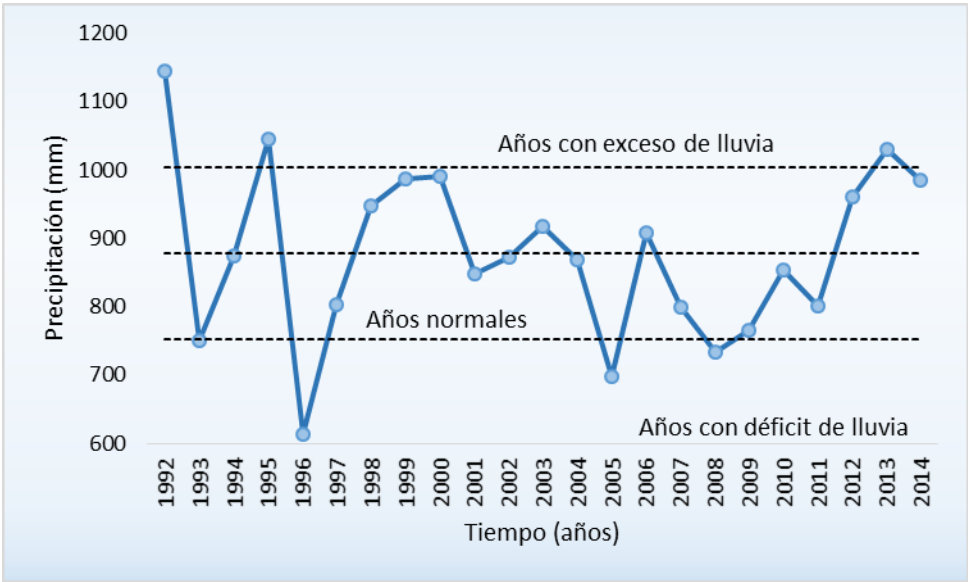


Figura 57. Caracterización de años secos y húmedos anuales en Tlaxcala (1992-2014).

Terrenate se identifica por ser uno de los municipios que registra bajos rendimientos de maíz de temporal en el estado, el análisis de caracterización de años secos y húmedos muestra 3 años con exceso de lluvia (1995, 2008 y 2009) y 3 años con sequía (1998, 1999 y 2005). Respecto a los rendimientos sobresale 1992 caracterizado como año normal con 2.8 t/ha, 2008 y 2014 años con exceso de lluvia con 2.9 y 3.0 t/ha, respectivamente (figura 58).

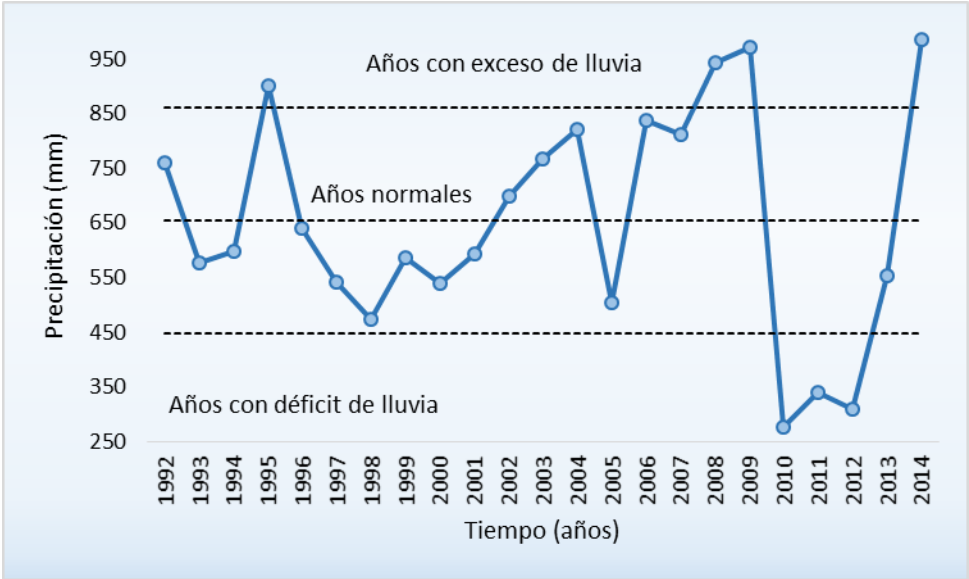


Figura 58. Caracterización de años secos y húmedos anuales en Terrenate (1992-2009).

El municipio de El Carmen Tequexquitla tuvo un comportamiento de la precipitación con mucha variabilidad (figura 59). Respecto a la caracterización de los años secos y húmedos, se observan únicamente 2 años con exceso de lluvia (1992 y 2014) y 4 años con sequías (1993, 1994, 1996 y 1998). El análisis del rendimiento muestra que en 1999, 2002 y 2011 no hubo producción de maíz, además, es notorio los efectos de la helada temprana del 2011, el año 2005 y 2009 registran los rendimientos más bajos, el primero con 0.3 t/ha y el segundo con 0.9 t/ha ambos caracterizados como años normales.

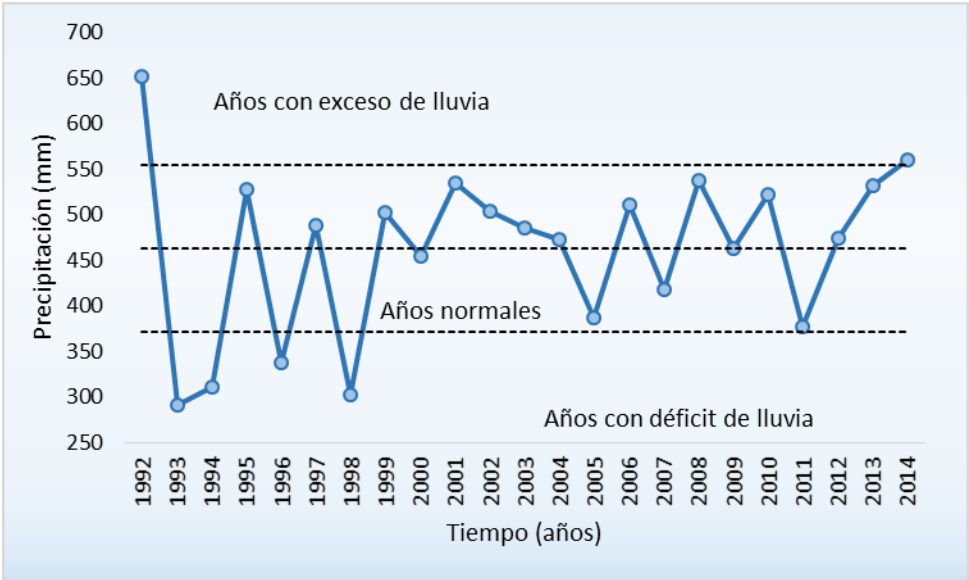


Figura 59. Caracterización de años secos y húmedos anuales en El Carmen Tequexquitla (1992-2014).

6.3. Evaluación del riesgo climático por precipitación

La matriz de riesgo de Españita (tabla VI) muestra rendimientos bajos del 25 % cuando se presenta sequía y lluvia normal, con lluvia excesiva se obtuvo la mayor probabilidad, generalmente, se esperan rendimientos altos con exceso de lluvia, sin embargo, para este municipio hay un 100 % de probabilidad de obtener rendimientos medios.

Tabla VI. Probabilidad de rendimiento ante eventos extremos por lluvia en Españita.

Evento	Rendimiento (%)		
	Bajo	Medio	Alto
Sequía meteorológica	25.0	75.0	0.0
Lluvia normal	25.0	56.2	18.8
Lluvia excesiva	0.0	100.0	0.0

La matriz de riesgo de Tlaxco (tabla VII) sobresale un 71.4 % de probabilidad de obtener rendimientos medios en años normales, con lluvia excesiva un 66.7 % y sequía se tiene el 50 %. El análisis muestra un 33.3 % de probabilidad de obtener rendimiento alto con exceso de lluvia e indicando la necesidad de ésta para obtener mayor ganancia de maíz sin riesgo, atribuible en parte a la zona boscosa del lugar al conservar humedad y nutrimentos en el suelo.

Tabla VII. Probabilidad de rendimiento ante eventos extremos por lluvia en Tlaxco.

Evento	Rendimiento (%)		
	Bajo	Medio	Alto
Sequía meteorológica	33.3	50.0	16.7
Lluvia normal	21.4	71.4	7.1
Lluvia excesiva	0.0	66.7	33.3

En Apizaco la mayor probabilidad de rendimiento medio (tabla VIII) se encuentra bajo condición de sequía, normal y lluvia excesiva de menor a mayor proporción, mientras tanto, con un 25 % se tiene rendimiento bajo, lo que sugiere alternativas ante una sequía.

Tabla VIII. Probabilidad de rendimiento ante eventos extremos por lluvia en Apizaco.

Evento	Rendimiento (%)		
	Bajo	Medio	Alto
Sequía meteorológica	25.0	50.0	25.0
Lluvia normal	18.8	75.0	6.3
Lluvia excesiva	0.0	100.0	0.0

La lluvia excesiva es relevante para Tlaxcala capital (tabla IX) por su probabilidad de rendimiento alto del 67 %, además, debido a la precipitación su rendimiento tiende a ser de medio a alto, sin embargo, en escala de amenaza la probabilidad es decreciente.

Tabla IX. Probabilidad de rendimiento ante eventos extremos por lluvia en Tlaxcala.

Evento	Rendimiento (%)		
	Bajo	Medio	Alto
Sequía meteorológica	0.0	100.0	0.0
Lluvia normal	18.8	75.0	6.3
Lluvia excesiva	0.0	33.0	67

La mayor probabilidad se encuentra en rendimientos altos con evento de sequía y lluvia (tabla X), sin embargo, un bajo rendimiento es considerable a tomar decisiones y acciones, principalmente al presentarse sequía que refleja el 33.3 % de probabilidad.

Tabla X. Probabilidad de rendimiento ante eventos extremos por lluvia en Terrenate.

Evento	Rendimiento (%)		
	Bajo	Medio	Alto
Sequía meteorológica	33.33	0.0	66.7
Lluvia normal	18.7	68.8	12.50
Lluvia excesiva	25.0	25.0	50.0

El Carmen Tequexquitla (tabla XI) tiene alta probabilidad de rendimiento del 100 % ante condiciones de lluvia excesiva, lo que conviene para un buen rendimiento y, aunque con el mismo porcentaje pero en menor cantidad en sequía. Con el 58.8 % ante condiciones normales se obtiene un rendimiento medio.

Tabla XI. Probabilidad de rendimiento ante eventos extremos por lluvia en El Carme Tequexquitla.

Evento	Rendimiento (%)		
	Bajo	Medio	Alto
Sequía meteorológica	0.0	100.0	0.0
Lluvia normal	29.4	58.8	11.8
Lluvia excesiva	0.0	0.0	100.0

VII. DISCUSIÓN

El cambio climático trae consigo efectos en la distribución potencial de las especies a diferentes escalas de espacio y tiempo, también en diferentes formas. En un 75%, existe la tendencia a aumentar las áreas potenciales de maíz, en los escenarios climáticos por el MCG HadGEM2-AO, debido al rango de confort del cultivo de maíz. La concentración elevada de CO₂ en la atmósfera tiene el potencial de aumentar la productividad del cultivo al mejorar la fotosíntesis y reducir la transpiración de las hojas de las plantas (Deryng *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2018), aunque en nuestra modelación sólo se ha considerado el efecto del CO₂ equivalente en el maíz, para determinar áreas potenciales. Para la raza cónico se obtuvo un 4% y de elotes cónicos el 19% de área ganada con el RCP4.5, que reúne las condiciones climáticas adecuadas tomando de referencia el escenario base. Por su parte, Ruiz *et al.*, (2014) obtuvieron para la raza cónico con el RCP4.5 una ganancia de 5.6% y 5.7% de área para elotes cónicos, al utilizar el escenario base para la república mexicana.

El maíz cónico tiene un rango de distribución geográfica más amplio en comparación con las otras razas, es de gran importancia para la dieta de los tlaxcaltecas, ya que su uso es amplio: tortilla, elotes, antojitos, atole y como forraje. Mientras Osorio *et al.*, (2015); Martínez *et al.*, (2016); Sierra *et al.*, (2016); Vargas (2017), mencionan la importancia para conservar la base genética de maíces mejorados en áreas templadas de otras regiones del mundo. Se considera de gran interés económico para los agricultores (Bautista *et al.*, 2008; Ortiz *et al.*, 2016; Cerros, 2017). Pese a ello, el resultado es desfavorable para el maíz cónico en la proyección del RCP6.0, con una disminución del 12% en pérdida de área respecto al escenario base. Siendo las partes más afectadas al noreste y sureste del estado de Tlaxcala. Información que coincide con la de Rueda *et al.*, (2010), al obtener un incremento en la superficie no apta para el desarrollo del maíz con dos modelos diferentes para el horizonte de tiempo 2050.

Con los resultados obtenidos para el maíz cónico de Martínez *et al.*, (2009), los escenarios: A1 29.17%, A2 28.77%, B1 26.19% y B2 25.46%, el área disminuye al

2050 con respecto al escenario base en la república mexicana. En el mismo estudio, se obtuvieron resultados de pérdida de área para elotes cónicos: A1 27.11%, A2 25.74%, B1 23.18% y B2 20.57%. De acuerdo a nuestros resultados de la modelación para maíz cónico, se presentó un cambio en el porcentaje de aptitud para el RCP4.6 y RCP6.0, de aptitud media del 87.14% para el primer escenario, a aptitud baja de 65.59% a aptitud media de 4.67% en el segundo escenario, lo que implica el efecto negativo del cambio climático en el cultivo del maíz.

Por otro lado, es semejante a la investigación que se llevó a cabo en el estado de Veracruz, donde se identificaron zonas con potencial productivo de maíz de temporal alto y medio. Se aplicaron los escenarios de cambio climático A1B, A2 y B1 para el periodo 2011-2020. Los resultados de la modelación presentaron variación en los escenarios de cambio climático A1B y A2, estas variaciones implican la disminución de las áreas de potencial productivo alto y medio a modificarse en áreas de medio y no apto (Guajardo *et al.*, 2016).

Entre los estudios de modelación de nicho se encuentra Ureta *et al.*, (2012), para México en el 2050, su estudio muestra en la mayoría de las razas una pérdida de área, entre las que son más vulnerables ante el cambio climático: palomero toluqueño 99.57%, Jala 98.49% y Apachito 92.44%. Sin embargo, al cambiar de escala, en nuestros resultados se mostró una disminución de área apta para el cultivo de maíz cónico del 11.49%, respecto al escenario base, esto es considerando escenarios de mitigación de GEI. Caso que se puede comparar con un escenario con la continuidad de las tasas de emisiones de GEI, como se presenta en los resultados de la modelación para el forzamiento radiativo 8.5 al 2039, indica que la extensión actual para el estado de Aguascalientes podría tener cambios del 42%, con respecto a la superficie que cubre actualmente la agricultura de secano, específicamente el maíz (Montiel *et al.*, 2017), resaltando el efecto de escala.

En los diferentes modelos para la distribución de 47 razas de maíz en México, incluida maíz cónico y elotes cónicos, destacan cuatro regiones como centros de

diversidad: Chiapas, Oaxaca, Centro Oriente (México, Puebla y Tlaxcala), Centro Occidente (Jalisco, Michoacán y Guerrero), Noroeste (Sonora y Sinaloa) y Chihuahua. Donde se ha reportado pérdida de riqueza en las razas, debido al descenso de 44 colectas en un periodo de 1975-2000, principalmente en la región del Noroeste (Perales *et al.*, 2011). Es importante destacar la importancia que han adquirido las semillas para sus diferentes usos en el estado de Tlaxcala como los son los elotes cónicos, tiene alto potencial por su alta producción de pigmentos. En la región centro del país está aumentando el uso de estos maíces de color para ofrecer tortillas o antojitos alimentos como signos de calidad y/o novedad (Ortega *et al.*, 2011; CONABIO, 2011). Sin embargo, con relación al análisis de nicho potencial de distribución de elotes cónicos, el valor del área bajo la curva para los datos de entrenamiento 0.577 y los datos de prueba 0.510 con 80 georreferencias, superado por los valores reportados por Ruiz *et al.*, (2014), al obtener 0.976 y 0.973, respectivamente, con 866 georreferencias, para la república mexicana.

El análisis de la variabilidad climática que se realizó en esta investigación, identificamos que la lluvia presenta variación inter-anual, principalmente, Tlaxco, Terrenate y El Carmen Tequexquitla, que podría deberse a los efectos del cambio climático por los valores extremos de precipitación, posterior a 1990 como lo indica el IPCC; tal y como lo reporta Ahumada *et al.*, (2014), señalando que es posible una mayor variabilidad de la precipitación a consecuencia de la acumulación de los GEI en la atmósfera. Mientras Jaramillo *et al.*, (2000), mencionan que la precipitación local está determinado por los sistemas de nubosidad asociados a la circulación local de cada vertiente y a su vez, está condicionada por la altitud y la orientación de las montañas.

Por otro lado, la reducción de días con lluvia, conservando la misma cantidad anual, se traduce que en pocos días llueve una gran cantidad de agua, como se muestra en los municipios Españita y Tlaxco, principalmente, ocasionando problemas en la agricultura de maíz al no distribuirse a lo largo del periodo vegetativo de la planta. Además, exige tarea extra a los agricultores, como el desazolve (Lucero *et al.*,

2001). Por lo anterior y, de acuerdo a nuestros resultados, se puede explicar que al evaluar el riesgo para Tlaxco, Españita y Terrenate y tener varios años con exceso de lluvia sólo existe una probabilidad menor del 20% de obtener rendimientos altos de maíz, por otra parte, para Terrenate y El Carmen Tequexquitla requiere de un exceso de agua para tener entre el 50 y el 100% de probabilidad de obtener rendimientos altos. De acuerdo a lo reportado por Cubillas, (2016), las fuertes precipitaciones en León han dejado numerosas parcelas anegadas, dejando más de 5 000 ha de maíz sin cosechar y posiblemente, podrían echarse a perder una parte de tal cultivo e impida continuar con la siembra.

La población asentada en los diferentes municipios analizados, está sujeta a las variaciones de precipitación y la disponibilidad anual de este recurso, aunado al potencial productivo del maíz. De los municipios con mayor precipitación anual son: Españita con 1 143 mm al sur; Apizaco 826.6 mm al centro y Tlaxcala capital 810.7 mm sureste, respectivamente. Siguiendo en el mismo orden por magnitud, Tlaxco con 719.13 mm al norte, Terrenate 640.3 mm noreste y El Carmen Tequexquitla 463 mm al este. Por otro lado, la fecha de inicio de lluvia se da al centro del estado generalizándose en un mes de acuerdo a Jiménez, (1990). De acuerdo a nuestros resultados, se tiene de 3-6 años de sequía, posterior a 1993. En comparación con Rodríguez, (2016), realizó un estudio en relación a la variabilidad climática, sustentada por un modelo de simulación y pronóstico de precipitación, utilizando las estaciones meteorológicas: en el primer subsistema los municipios de Apizaco, Tlaxcala capital y Españita considerados con las mejores condiciones de precipitación y estabilidad, con lluvias por arriba de los 800 mm anuales, en el segundo subsistema están Atlangatepec, Calpulalpan, San Marcos Calpulalpan, Terrenate, Tlaxco, Ixtacuixtla, Lardizábal, Tocatlán y Zitlaltepec con precipitaciones menos estables y más sensibles, entre 500 y 800 mm anuales consideradas menos productivas en ciertas zonas. Y el subsistema tres en el que se encuentra Huamantla y El Carmen Tequexquitla, con precipitación más vulnerable y zonas de bajo potencial productivo. Los resultados obtenidos en la investigación, muestran que a pesar de las diferentes precipitaciones, todas tienden a la sequía.

Nuestros resultados muestran para Españita un rendimiento bajo del 25% cuando se presenta sequía, mientras la mayor probabilidad de obtener rendimientos medios se ubica en las tres categorías de eventos, generalmente, se esperan rendimientos altos con exceso de lluvia, sin embargo, para este municipio hay un 100% de probabilidad de obtener rendimientos medios. Estos resultados difieren con lo reportado por Hernández *et al.*, (2015), donde registraron el 50% y 25% de probabilidad en rendimientos medios y rendimientos altos con lluvia excesiva, mientras que con lluvia normal tienen el 25% de probabilidad en rendimientos altos a pesar de conservar prácticamente la misma precipitación. Sin embargo, en cuanto a la distribución de ésta, es importante resaltar la importancia de la lluvia en el mes después de la siembra y periodos de treinta días antes hasta 20 días después de la floración masculina para un mayor rendimiento (María *et al.*, 1999).

De acuerdo a los resultados obtenidos en Tlaxco, se muestra la mayor probabilidad en rendimientos medios, con sequía se tiene el 50%, años normales el 71.4% y el 66.7% con lluvia excesiva. El análisis indica que Tlaxco es vulnerable a la sequía meteorológica con un 33.3% y la misma probabilidad de obtener rendimiento alto con exceso de lluvia e indicando la necesidad de ésta para obtener mayor ganancia de maíz. Ya que la producción depende principalmente por factores climáticos, de acuerdo con los agricultores del estado de Tlaxcala, la producción de maíz disminuye bruscamente por sequía como señala Lazos, (2014), en su mayoría de las hectáreas cultivables dependen de los ciclos de lluvia, dado que no hay posibilidades de que puedan percibir agua de una manera distinta a la pluvial (Esparza, 2014).

VIII. CONCLUSIONES

1. Existen diferentes comportamientos de distribución potencial entre las razas Cónicos y Elotes cónicos ante escenarios futuros de cambio climático, por lo tanto, la raza con la aptitud más alta es menos vulnerable al cambio del clima. Para el periodo 2050 con el escenario RCP4.5, se incrementará el área con aptitud ambiental media de distribución para la raza Cónico, de manera que es más favorable en comparación bajo la ruta RCP6.0, a pesar de contar con aptitud alta, ya que el mayor porcentaje está localizado con aptitud muy baja. La raza que se beneficia con el cambio climático, como lo plantea nuestra hipótesis, es la de Elotes cónicos, al cuantificar las áreas con diferente aptitud ambiental, es notorio como el impacto del cambio climático sobre la posible presencia de elotes cónicos varía de acuerdo con la ruta representativa de concentración de gases de efecto invernadero al obtener mayor porcentaje ganado.
2. La variabilidad del clima, incluyendo ambas componentes natural e inducida, puede tener efectos benéficos o desastrosos en la producción de maíz de temporal. Es importante señalar que la precipitación es la variable más importante en la producción de maíz. La cantidad de lluvia y una adecuada distribución durante el temporal aseguran un buen rendimiento. Este estudio muestra que los municipios de Terrenate y El Carmen Tequexquitla son afectados de manera constante por la sequía. No obstante, la lluvia excesiva también es una amenaza, Españita, al no distribuirse a lo largo del periodo vegetativo de la planta, cumpliéndose nuestra segunda hipótesis.
3. En la agricultura de temporal, es importante evaluar los riesgos ante eventos climáticos extremos en la precipitación como en el área de El Carmen Tequexquitla obligando el diseño y adopción de estrategias de prevención específica, como la preparación de los agricultores para una respuesta adecuada ante el inicio de la precipitación, cumpliéndose nuestra tercera hipótesis.

4. Es importante la participación conjunta de los diversos actores para que intercambien información que permitan la retroalimentación de los conocimientos entre generaciones, por otro lado, la información climática local puede ser gran utilidad, y si se complementa con las investigaciones sobre riesgo se pueden minimizar vulnerabilidades productivas frente a las heladas, granizadas, sequías e inundaciones.

Si bien es cierto, que las variables como temperatura y precipitación están relacionadas con la variabilidad del clima, sin embargo, no son las únicas. Existen otras variables que forman parte importante en un buen rendimiento como la humedad del suelo, los cambios de uso de suelo con el fin de beneficiar con nutrimentos a éste, la cobertura vegetal, evapotranspiración, variedad y prácticas de manejo, entre otros, por ejemplo, la intensidad de la variabilidad de la sequía intra-estival. Además, han aumentado las prácticas agrícolas no apropiadas, como el uso indiscriminado de insecticidas y pesticidas para la eliminación de las plagas. También la explotación indiscriminada de los recursos naturales, lo cual ha incrementado la vulnerabilidad del equilibrio natural del ecosistema. A esta problemática ambiental se agregan otros de origen social como: la falta de apoyos a tiempo a los agricultores, el abandono de las tierras de cultivo lo que pone en riesgo la seguridad alimentaria, difusión de los resultados que puedan mejorar las actividades en el campo, generados por las distintas universidades. Conocer ésta constituye un elemento de juicio fundamental para el diseño y adopción de estrategias de prevención específica, como la preparación de los agricultores para una respuesta adecuada, se debe integrar la reducción del riesgo como política pública y en los planes de desarrollo a diferentes escalas: nacional, estatal y municipal.

Por otro lado, cabe resaltar que fueron alcanzados, explícitamente, los tres objetivos específicos.

8.1. Trabajos futuros

Utilizar variables edáficas que no fueron consideradas en este trabajo, que seguramente podría mejorar los resultados obtenidos sobre la distribución del maíz.

Para el caso de los escenarios de cambio climático, seleccionar los modelos dinámicos más recientes que utilizan alta resolución y mejora de procesos de interacción océano-atmósfera.

Incluir el efecto de los diferentes rangos en los escenarios de cambio climático, RCP2.6 y RCP8.5, sobre la distribución de las diferentes razas de maíz de temporal.

Al analizar el comportamiento de la variables “número de días con heladas” se identificó un comportamiento extraordinario en 1999, pudiendo explicarlo con la presencia de LA NIÑA todo el año, después de un SUPER EL NIÑO, por lo que se sugiere estudiar el control de número de días con heladas y las diferentes fases del ENSO.

Otro aspecto que debe analizarse es el de considerar dominios naturales como las cuencas hidrológicas, permitiendo identificar en forma natural las regiones con sus propiedades pertinentes, por ejemplo, salud de la cuenca.

De esta forma se puede mejorar la calidad de los escenarios y prevenir los efectos del cambio climático a mediano o largo plazo. Algunas variables pueden ser: tipo de suelo y altitud.

IX. LITERATURA CITADA

- Aczél, J. D. and Daróczy, Z. 1975. On Measures of Information and their Characterizations. Academic Press, New York. 5.
- Adam, R. 1988. Implications of Global Climate Change for Western Agriculture. *Western Journal of Agricultural Economics*. 13 (2): 348-356.
- Ahumada-Cervantes, R., Velázquez-Angulo, G., Flores-Tavizón, E. y Romero-Gonzales, J. 2014. Impactos potenciales del cambio climático en la producción de maíz. *Investigación y Ciencia*. 48-53.
- Anderson, E. 1946. Maize in Mexico. A preliminary survey. *Annals of Missouri Botanical Garden* 33: 147- 247.
- Anderson, E. and Cutler, H. C. 1942. Races of *Zea mays*. Their recognition and classification. *Annals of Missouri Botanical Garden* 29:69-88.
- Anderson, R. P., Lew, D. and Peterson, A. T. 2003. Evaluating predictive models of species distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*. 162(3): 211-232.
- Araújo, M. B., Thuiller, W., Williams, P. H. and Reginster, I. 2005. Downscaling European species atlas distributions to a finer resolution: Implications for conservation planning. *Global Ecology and Biogeography*. 14: 17–30.
- Bautista, J. A. y Ramírez-Juarez, J. 2008. Agricultura y pluriactividad de los pequeños productores de agave en la región del mezcal, Oaxaca, México. *Agricultura Técnica en México*. (34): 443-451.
- Berg, A., Noblet-Ducoudré, de N., Sultan, B., Lengaigne, M. y Guimberteau, M. 2013. Projections of climate change impacts on potential C4 crop productivity over tropical regions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 89-102.
- Brooks, N. 2003. Vulnerability, risk and adaptation: a conceptual framework. Norwich: Tyndall Centre for Climate Change Research. Working paper. 38.
- Cain-Stanley, A. 1944. *Foundations of Plant Geography*. Harper & Brothers, London and New York. 556.
- Cardona, O. D. 1991. Evaluación de la Amenaza, la Vulnerabilidad y el Riesgo, Taller Regional de Capacitación para la Administración de Desastres ONAD/PNUD/OPS/UNDRO, Bogotá. 3.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 1991. "Manual para la estimación de los efectos socioeconómicos de los desastres naturales". Santiago de Chile. 1991.
- Cerros-Chávez .2017. En busca del cultivo prometido: las repercusiones sociales por la introducción de nuevos cultivos. *Acta Sociológica*. (73): 123-145.

- Chaundy, T. W. and McLeod, J. B. 1960. On a functional equation. Proceedings of Edinburgh Mathematical Society, Edinburgh Math. 43: 7-8.
- CMCC (Convenio Marco de sobre el Cambio Climático). 2015. Informe de la Conferencia de las Partes sobre su 21er período de sesiones. París del 30 de noviembre al 13 de diciembre de 2015.
- CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Naciones Unidas en Nueva York. 1-27.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2011. Base de datos de maíz. Recuperado el 02 de octubre de 2015, de <http://www.biodiversidad.gob.mx/genes/genes.html>
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2011. Base de datos de maíz. Recuperado el 02 de octubre de 2015, de <http://www.biodiversidad.gob.mx/genes/genes.html>
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2017. Recuperado el 30 de enero de 2017, de www.conabio.gob.mx/
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). Recopilación, generación, actualización y análisis de información acerca de la diversidad genética de maíces y sus parientes silvestres en México. 2011. Proyecto global. México, D. F. Marzo, 2011.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2014. Datos de precipitación, temperatura máxima y mínima. Recuperado el 21 de octubre de 2015, de <http://smn.cna.gob.mx/>
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). 2001. Indices de Marginación 2000. Grupo S. M. México, México. 19.
- Conde, C. (2006). México y el cambio climático global. México D.F., Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. 28.
- Conde, C., Estrada, F., Martínez, B., Sánchez, O. and Gay, C. 2010. Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera* 24(1): 125-140.
- Cubillas, A. 2016, 17 de abril. La lluvia pone en jaque el cultivo de remolacha y maíz y augura plagas de hongos en el campo Leonés. *El Norte de Castilla*, España, León.
- Damián-Huato, M. A., Romero-Arenas, O., Ramírez-Valverde, B., López Reyes. L., Parraguirre-Lezama, C y Cruz-León, A. 2014. Agricultura familiar y seguridad alimentaria entre productores de maíz de temporal en México. *Agroecología*. 9: 89-99.
- Damián-Huato, M. A., Romero-Arenas, O., Sangerman-Jarquín, D. Ma., Reyes-Muro, L, Parraguirre-Lezama, C. y Orozco-Cirilo, S. 2016. Maíz, potencial productivo y seguridad alimentaria: el caso de San Nicolás de Los Ranchos, Puebla-México. *Nova scientia*. 8 (16): 352-370.

- Deryng, D., Elliott, J., Folberth, C., Müller, C., Pugh, T. A. M., Boote, K.J., Conway, D., Ruane, A. C., Gerten, D., Jones, J.W., Khabarony, N., Olin, S., Schaphoff, S., Schmid, E., Yang, H. y Rosenzweig, C. 2016. Regional disparities in the beneficial effects of rising CO₂ concentrations on crop water productivity. *Nature Climate Change*. 6: 786–790.
- Elith, J. and J. Leathwick. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 40:677-697.
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. M., Peterson, A. T., Phillips, S. J., Richardson, K. S., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberón, J., Williams, S., Wisz, M. S. and Zimmermann, N. E. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*. 29: 129-151.
- Elith-Jane., Phillips-Steven. J., Hastie-Trevor., Dudík-Miroslav., Chee-Yung En and Yates-Colin J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*. 17:43-57.
- Esparza, M. 2014. La sequía y la escasez de agua en México. Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia. Revista de historia y ciencias sociales*, (89): 193-219.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) y OPS (Organización Panamericana de la Salud). 2017. *Panorama de la Seguridad Alimentaria y Nutricional en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile. 1-118.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1996. *Cumbre mundial sobre la alimentación*. Roma, Italia. 13-17 de noviembre de 1996. 1-4.
- Feinstein, F. 1958. *Foundations of Information Theory*, McGraw-Hill. New York. 3
- Franklin, J. 2009. *Mapping Species Distributions. Spatial Inference and Prediction*. Cambridge University Press, Cambridge. 320
- Good, R. D. 1931. A theory of plant geography. *The New Phytologist* 30:149-171.
- Goodman, M. M. and Mck-Bird, R. 1977. The races of maize: IV Tentative grouping of 219. *Latín American Races. Economic. Botany*. 31: 204-221.
- Graham, C. H., Ron, S. R., Santos, J. C., Schneider, C. J. y Moritz, C. 2004. Integrating phylogenetics and environmental Niche models to explore speciation mechanisms in dendrobatid frogs. *Evolution* 58:1781-1793.
- Grinnell, J. 1917. Field tests of theories concerning distributional control. *American Naturalist*. 51:115-128.

- Guajardo-Panes, R. A., Sánchez-Cohen, I., Díaz-Padilla, G., Granados-Ramírez, G. R., Barradas-Miranda, V. y Gómez-Rojas, J. C. 2016. Vulnerabilidad del maíz de temporal bajo escenarios de cambio climático en Veracruz. Colegio de Posgraduados. 153-183.
- Guisan, A. and Zimmermann, N. E. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*.135:147-186.
- Harlan, J. R y Wet, J. M. J. 1971. Toward a rational classification of cultivated plants. *Taxon* 20(4):509- 517.
- Hernández, X. E y Alanís, G. F. 1970. Estudio morfológico de cinco razas de maíz de la Sierra Madre Occidental de México: Implicaciones filogenéticas y fitogeográficas. *Agrociencia*. 5(1): 3-30.
- Hernández, X. E. 1985. Maize and man in the Greater Southwest. *Economic Botany* 39(4):416-430.
- Hernández-Vázquez, M., Jiménez, G. D., García, J. G., Jiménez-López, J., Orozco-Bolaños. H., Hernández, C. L. M. y Morales-Acoltzi, T. 2015. Riesgo y vulnerabilidad del maíz de temporal en la región suroeste del estado de Tlaxcala frente al cambio climático. *Biológico Agropecuaria Tuxpan*. 1-8.
- Hijmans, R. J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P. G. y Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 25: 1965-1978.
- Hutchinson, G. E. 1957. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*. 2: 415–427.
- Hutchinson, G. E. 1978. *An Introduction to Population Ecology*. Yale University Press, New Haven. 256.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), IDEAM (Instituto de Hidrometeorología y Estudios Ambientales). y DANE. 2011. Reporte final de áreas afectadas por inundaciones 2010-2011. Reporte Dos. Bogotá, 1-35.
- INECC. 2009. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. II. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2006. Recuperados el 27 de enero de 2018, de <http://www.publicaciones.inecc.gob.mx/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2015. Anuario estadístico de Tlaxcala. Recuperado el 10 de octubre de 2015, de <http://www.inegi.gob.mx>.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza: IPCC/ OMM-PNUMA. 104.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). 2014. Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo

- Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza. 34.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). Field, C. B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M. and Midgley, P.M. 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Cambridge University Press. 582.
- IPCC. 2000. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Resumen para responsables de políticas. Escenarios de emisiones. Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC. Naciones Unidas en Nairobi. 2000.
- Jaramillo-Robledo, A. y Chaves-Córdoba. 2000. Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. *Cenicafé*. 51 (2): 102-103.
- Jiménez-López, J. 1990. Fechas de inicio de lluvias y probabilidades de sequía para el estado de Tlaxcala. Tesis de licenciatura en biología agropecuaria. Departamento de Agrobiología. Universidad Autónoma de Tlaxcala.
- Jiménez-Valverde, A., Lobo, J. M. and Hortal, J. 2008. Not as good as they seem: the importance of concept in species distribution modelling. *Diversity and Distributions* 14:885-890.
- Kimball, B.A., Kobayashi, K. y Bindi, M. 2002. Responses of Agricultural Crops to Free-Air CO₂ Enrichment. *Enrichment in Agronomy*. 77:293–368.
- Kumar-Srivastava, A., Miltin-Mboh, C., Zhao, G.M., Gaiser, T, y Ewert, F. 2017. Climate change impact under alternate realizations of climate scenarios on maize yield and biomass in Ghana. *Agricultural Systems*. 159: 157-174.
- Landa, R., Ávila, B. y Hernández, M. 2010. Cambio Climático y Desarrollo Sustentable para América Latina y el Caribe. Conocer para Comunicar. British Council, PNUD México, Cátedra UNESCO-IMTA, FLACSO México. México D.F. 140.
- Lazos, C. E. 2014. Consideraciones socioeconómicas y culturales en la controvertida introducción del maíz transgénico: el caso de Tlaxcala. *Sociología*, Número (83): 201-240.
- Li-Xiaojie., Kang-Shaozhong., Zhang-Xiaotao., Li-Fusheng. y Lu-Hongna. 2018. Deficit irrigation provokes more pronounced responses of maize photosynthesis and water productivity to elevated CO₂. *Agricultural Water Management*. 195: 71–83.
- López, D. F., Conde, C. and Sánchez, O. 2013. Analysis of indices of extreme temperature events at Apizaco, Tlaxcala, Mexico: 1952-2003. *Atmósfera*. 26 (3): 349-358.

- Lucero, O., Rozas, D., 2001. Characteristics of aggregation of daily rainfall in a middle-latitudes region during a climate variability in annual rainfall amount. *Atmospheric Research*. 35–47.
- MacArthur, R. H. 1968. The theory of the niche. En R. C. Lewontin (Comp.). *Population Biology and Evolution*. Syracuse University Press, Syracuse, New York, U.S.A. 159-186.
- Magaña-Rueda. V. O. 2004. El cambio climático global: comprender el problema. En: Martínez, J y Fernández. *Cambio climático: una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología. Sección 1, las bases científicas. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 15-17.
- Magaña-Rueda. V. O., Gómez, M. L., Ávila, F. B. y Méndez, M. 2007. Proyecto: Fomento de las Capacidades para la Etapa II de Adaptación al Cambio Climático en Centroamérica, México y Cuba. Instituto Nacional de Ecología. Enero 2007.
- María-Ramírez, A. y Volke-Haller, V. 1999. Estratificación del potencial productivo del maíz en la región oriente del estado de Tlaxcala. *Terra Latinoamericana*, 17(2): 131-138.
- Martínez, J. y Fernández, A. 2004. *Cambio climático: una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 523.
- Martínez-Guardia, M., Palacios-Palacios, I. y Medina-Arroyo, H. H. 2016. Composición química del grano de maíz (*Zea mays*) Chococito del municipio de Quibdó, Chocó, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. 7(1): 1-6.
- Martínez-Meyer, E. Ureta-Sánchez, C. 2009. Impactos, vulnerabilidad y adaptación de las razas mexicanas de maíz y sus ancestros ante escenarios de cambio climático. Informe final. Instituto de biología, UNAM. Octubre de 2009. 1-23.
- Martínez-Prado, M. 2016. Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero para el estado de Durango, México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 15 (2): 575-601.
- Mateo-Rubén, G., Felicísimo-Ángel, M. y Muñoz, Jesús. 2011. Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*. 84: (2). 217-240.
- Mathai, A. M. and Rathie, P. N. 1975. *Basic Concepts in Information Theory and Statistics*. Wiley Eastern, New Delhi.
- Matsui, T.; Takahashi, K.; Tanaka, N.; Hijioka, Y.; Horikawa, M.; Yagihashi, T. Harasawa, H. 2009. Evaluation of habitat sustainability and vulnerability for beech (*Fagus crenata*) forests under 110 hypothetical climatic change scenarios in Japan. *Applied Vegetation Science* 12: 328–339.
- Mezaour, A. 2005. Filtering web documents for a thematic warehouse case study: edot a food risk data warehouse (extended) en: *Intelligent information processing and web mining*. Laboratoire de Recherche en Informatique (LRI), Université Paris Sud, France.

- Mladendorff, D.J., Sickely, T.A., Haight, R.G. y Wydenven, A. P. 1995. A regional landscape analysis and prediction of favorable grey wolf habitat in the northern Great Lakes region. *Conservation Biology*. 9: 279-294.
- Montiel-González, I., Martínez-Santiago, S., López-Santos., A. y García-Herrera, G. 2017. Impacto del cambio climático en la agricultura de secano de Aguascalientes, México para un futuro cercano (2015-2039). *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*. 16 (1): 1-13.
- Moore, S. E. *Climate Change*. 2018. Academic Press. 3: 194-197.
- Moreno, R., Zamora, R., Molina, J. R., Vásquez, A. y Herrera, M. 2011. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in south Chilean temperate forest using maximum entropy (Maxent). *Ecology. Informatic*. 6:364-370.
- Muñoz, O. A. 2003. Centli-maíz. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. México. 210.
- Naoki K., Gómez, M. I., López, R. P., Meneses R. I. and Vargas, J. 2006. Comparación de Modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. *Ecología en Bolivia*. 41(1): 65–78.
- Navarro-Cerrillo, R. M., Hernandez-Bermejo, J. E. and Hernandez-Clemente, R. (2011). Evaluating models to assess the distribution of *Buxus balearica* in southern Spain. *Applied Vegetation Science*. 14(2): 256-267.
- Ortega, P. R. 2003. La diversidad del maíz en México. In G.Esteva, and C.Marielle, Coord. Sin Maíz no Hay País. Conaculta, Museo Nacional de Culturas Populares, Mexico, DF. 123–154.
- Ortiz-Arango, F. y Montiel-Guzmán, A. N. 2016. Transmisión de precios futuros de maíz del Chicago Board of Trade al mercado spot mexicano. *Contaduría y Administración*. 62 (3): 924-940.
- Osorio-García, N., López-Sánchez, H., Ramírez-Valverde, B., Gil-Muñoz, A. y Gutiérrez-Rangel, N. 2015. Producción de maíz y pluriactividad de los campesinos en el Valle de Puebla, México. *Nova scientia*. 7(14): 577-600.
- Perales-Rivera, H y Golicher, D. 2011. Modelos de distribución para las razas de maíz en México y propuesta de centros de diversidad y de provincias bioculturales. Informe técnico. Distribución, diversidad y provincias bioculturales de las razas de maíz en México. CONABIO, octubre, 2011. 1-162.
- Peterson, A. T. 2007. Usos y requisitos de modelos de nichos ecológicos y modelos de distribución relacionados. *Biodiversity Informatics*. 3; 59-72.
- Peterson, A. T., Papes, M y Muir-Eaton. 2007. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. *Ecography* 30: 550-560.

- Phillips, S. J., Anderson, R. P. and Schapire, R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 190: 231-259.
- Phillips-Steven, J. and Dudík-Miroslav. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 31:161-175.
- Pinilla-Herrera, M. C., Sánchez, J., Rueda, A. y Pinzón, C. 2016. Variabilidad climática y cambio climático: percepciones y procesos de adaptación espontánea entre campesinos del centro de Santander, Colombia. 1-12.
- Polanco–Jaime, A. y Flores-Méndez, T. 2008. Bases para una política de I&D e innovación de la cadena de valor del maíz, Foro Consultivo y Científico, A.C., México. Comunicación. 46-56.
- Protocolo de Kioto. 1998. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Kyoto, Japón. 25.
- Rivera-Ávila, M. A. 1999. El cambio climático. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. México, D. F. 25-33.
- Roa, O. A. A. y Malaver, C. E. A. 2012. Estudio sobre los efectos de la variabilidad climática sobre la dimensión de la disponibilidad de alimentos en la seguridad alimentaria en Colombia e iniciativas de política. PNUD. 12-20.
- Rodríguez-Maldonado, J de J. 2016, 13 de diciembre. Distribución de la precipitación pluvial-vulnerabilidad y huella hídrica. La Jornada de Oriente, Tlaxcala, Tlaxcala.
- Ruiz-Corral, J, A., Sánchez-González, J, J., Ramírez-Ojeda, G., Ramírez-Díaz, J, L., Durán-Puga, N., de la Cruz-Larios, L., Medina-García, G., Rodríguez-Moreno, V y Zarazúa-Villaseñor, P. 2014. Cambio climático en México y distribución potencial del grupo racial de maíz cónico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 1871-1883.
- Ruiz-Rivera, N y Galicia, L. 2015. La escala geográfica como concepto integrador en la comprensión de problemas socio-ambientales. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 89: 137-153.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2016. Maíz blanco y amarillo, alimentación e industria. SAGARPA. México. Recuperado el 27 de abril de 2018, de <https://www.gob.mx/sagarpa/articulos/maiz-blanco-y-amarillo-alimentacion-e-industria>
- Sánchez, G y J. J. 1989. Relationships among the Mexican Races of maize. Ph. D. Thesis. North Carolina State University, Department of Crop Science. Raleigh, N. C: 187.
- Sánchez, G., J. J., Goodman, M. M. y Stuber, C. W. 2000. Isozymatic and morphological diversity in the Races of maize of México. *Economic Botany*. 54(1): 43–59.
- Shannon, C. E. 1948. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*. 27: 379-423.

- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2014. Recuperado el 18 de octubre de 2015, de <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>.
- Sierra-Macías, M., Andrés-Meza, P., Palafox-Caballero, A. y Meneses-Márquez, I. 2016. Diversidad genética, clasificación y distribución racial del maíz nativo en el estado de Puebla, México. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*. 3 (9): 12-21.
- Sobek-Swant, S., Kluza, D. A., Cuddington, K. and Lyons, D. B. 2012. Potential distribution of emerald ash borer: What can we learn from ecological niche models using Maxent and GARP?. *Forest Ecology and Management*. 281: 23-31.
- Soberón, J and Peterson, A. T. 2004. Biodiversity informatics: Managing and applying primary biodiversity data. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 359: 689-698.
- Soberón, J. 2010. Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. *Ecography* 33:159-167.
- Soberón, J. and A. T. Peterson. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics*. 2:1-10.
- Soberón, J. and Peterson, A. T. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics*. 2:1-10.
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L. y Peterson, T. 2017. Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88 (2), 437-441.
- Solomon, S., John S. D., Sanford, T. J., Murphy, D. M., Kasper-Plattner, G., Knutti, R. and Friedlingstein, P. Persistence of climate changes due to a range of greenhouse gases. 2010. *PNAS*. 107 (43): 18354-18359.
- Staines, U. F. 2007. Cambio climático: interpretando el pasado para entender el presente. *Ciencia Ergo Sum*. 14(3): 345-351.
- Sultan, B. y Gaetani, M. 2016. Agriculture in West Africa in the twenty-first century: climate change and impacts scenarios, and potential for adaptation. *Frontiers in Plant Science*. 7: 1-20.
- Taylor-E, K., Stouffer-J, R. and Meehl-A, G. 2012. An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 93(4):485-498.
- Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B. F. N., Ferreira, de Siqueira, M., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., van-Jaarsveld, A. S., Midgely, G. E., Miles, L., Ortega-Huerta, M. A., Peterson, A. T., Phillips, O. L. and Williams, S. E. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature*. 427: 145–148.

- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M. B., Sykes, M. T. and Prentice, I. C. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 2: 8245-8250.
- Tinoco-Rueda, J. A., Gómez-Díaz, J. D. y Monterroso-Rivas, A. I. 2010. Efectos del cambio climático en la distribución potencial del maíz en el estado de Jalisco, México. *Terra Latinoamericana*. 29 (2): 161-168.
- Turrent, A., Wise, T. y Garvey, E. 2012. Factibilidad de alcanzar el potencial productivo de maíz de México. Reporte 24. *Mexican Rural. Development Research Reports*. 38.
- Udvardy, M. 1969. *Dynamic Zoogeography. With Special Reference to Land Animals*. Van Nostrand Reinhold, New York. 445.
- UNFCCC-COP. 2003. United Nations Framework Convention on Climate Change Conference of the Parties. A Brief Overview of Decisions. Recuperados el 27 de enero de 2018, de <http://unfccc.int/documentation/decisions/items/>
- Ureta-Sánchez, C., Martínez-Meyer, E., Perales, H. P. and Alvarez-Buylla, E. 2012. Projecting the effects of climate change on the distribution of maize races and their wild relatives in Mexico. *Global Change Biology*. 18: 1073-1082.
- Urquía-Fernández, N. 2014. La seguridad alimentaria en México. *Salud pública de México*. 56 (1): 1-7.
- Useros, F. J. L. 2013. El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales. *An Real Acad Med Cir Vall*. 50: 71-98.
- Vargas-Sánchez, G. 2017. El mercado de harina de maíz en México. Una interpretación microeconómica. *Economía Informa*. 405: 4-29.
- Wellhausen, E. J., Roberts, L. M., Hernández, X. E. y Mangelsdorf, P. C. 1951. Razas de maíz en México. Su origen, características y distribución. Oficina de Estudios Especiales Secretaría de Agricultura y Ganadería. Folleto técnico Núm. 55. México D. F.
- Wilks, D.F. 1995. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press. 467.
- Wisn, M.S., Hijmans, R. J., Li, J., Peterson, A. T., Graham, C. H. and Guisan, A. 2008. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*. 14: 763–773.
- Wisn, M.S., Walther, B. A. and Rahbek, C. 2007. Using potential distributions to explore determinants of Western Palaearctic migratory songbird species richness in sub-Saharan Africa. *Journal of Biogeography*. 34: 828–841.
- WorldClim (Global Climate Data). 2017. Free climate data for ecological modeling and GIS. Recuperado el 10 de febrero de 2016, de <http://www.worldclim.org/>
- Yañez-Arenas, C., Mandujano, S., Martínez-Meyer, E., Pérez-Arteaga, A. y Arturo González-Zamora. 2012. Modelación de la distribución potencial y el efecto del

cambio de uso de suelo en la conservación de los ungulados silvestres del Bajo Balsas, México. *THERYA*. 3(1):67-79.

Zhang-Xuebin. and Yang-Feng. 2003: RCLimdex (1.0) User Manual. Climate Research Branch, Environment Canada Downsview, Ontario Canada. 1-23.

Zickfeld, K., Solomon, S. and Gilford, D. M. 2017. Centuries of thermal sea-level rise due to anthropogenic emissions of short-lived greenhouse gases. *PNAS*. 114 (4): 657-662.

Zizka, G., Schmidt, M., Schulte, K., Novoa, P., Pinto, R. and König, K. 2009. Chilean Bromeliaceae: diversity, distribution and evaluation of conservation status. *Biodiversity and Conservation*, 18: 2449-2471.