

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



ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN SUELO-CLIMA EN EL
RENDIMIENTO DEL MAÍZ DE TEMPORAL, ESTADO DE
TLAXCALA, MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

PRESENTA:

Rogelio Bernal Morales

BAJO LA DIRECCIÓN DE

Dra. Maricela Hernández Vázquez

Dr. Tomás Morales Acoltzi

TUTORES:

Dr. Saturnino Orozco Flores

Dr. José Jiménez López



Ixtacuixtla, Tlaxcala, Diciembre de 2017



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA

Código: 505-RGE-04

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE

Publicación: Mayo 2017

MAESTRIA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

Revisión: 01
0001/2015

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

ROGELIO BERNAL MORALES
CANDIDATO 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: "Análisis de la interacción suelo-clima en el rendimiento del maíz de temporal, estado de Tlaxcala, México", realizado bajo la dirección de la Dra. Maricela Hernández Vázquez y del Dr. Tomás Morales Acoltzi. No habiendo encontrado objeción alguna, se autoriza su impresión:

Dr. Hipólito Muñoz Nava

Dra. Maricela Hernández Vázquez

Dr. José Jiménez López

Dr. Saturnino Orozco Flores

Dr. Tomás Morales Acoltzi

Dr. Oscar Gumersindo Vázquez Cuecuecha

MAR. Victor Carrasco Reséndiz

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

"POR LA CULTURA A LA JUSTICIA SOCIAL"
Tlaxacuixtla, Tlax., 8 de diciembre de 2017



MSP. Patricia Luján Huitrón
COORDINADORA DE LA MCSA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRIA EN CIENCIAS
EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

c.c.p. Expediente



Documento exclusivo para uso de la dependencia responsable o autoridad correspondiente

AGRADECIMIENTOS

Al **CONACYT** por la beca económica que me permitió realizar el Posgrado.

Al **CIGYA** por darme las facilidades para realizar el Posgrado.

A mi Comité Tutorial integrado por la Dra. Maricela Hernández Vázquez, el Dr. Tomás Morales Acoltzi, el Dr. Saturnino Orozco Flores y Dr. José Jiménez López, por su conocimiento, asesoría, aportaciones, tiempo, dedicación, confianza y sugerencias durante mi formación personal y profesional.

Al Dr. Oscar G. Vázquez Cuecuecha, Dr. Hipólito Muñoz Nava y Mtro. Víctor Carrasco Reséndiz por sus contribuciones que enriquecieron el trabajo de investigación.

A mis compañeros de generación por su apoyo incondicional.

A todos aquellos que contribuyeron a este logro académico.

DEDICATORIAS

A DIOS, por permitirme estar aquí.

A mis Papás, por ser parte central en mi vida.

A mi familia, por su apoyo, paciencia y formar parte importante de mi vida.

A mi hija Dafne Yatziry Bernal Lima que me impulsa a seguir superando.



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	I
DEDICATORIAS	II
ÍNDICE DE TABLAS	V
INDICE DE MAPAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
TABLA DE ABREVIATURAS	IX
RESUMEN	XI
ABSTRACT.....	XII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. Cambio Climático.....	4
1.2. Degradación de los suelos agrícolas	5
1.3. Agroecología	6
1.4. Maíz.....	7
1.5. Seguridad Alimentaria	9
2 ANTECEDENTES.....	11
2.1. Internacional.....	11
2.2. Nacional.....	13
2.3. Regional o Local	14
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	24
4 JUSTIFICACIÓN	25
5 OBJETIVOS E HIPÓTESIS	26
5.1. Objetivo general.....	26
5.2. Objetivos específicos.....	26
5.3. Hipótesis	26
6 MÉTODOLOGÍA	27
6.1. Sitio de estudio.....	27
6.2. Bases de datos	27
6.2.1. Datos climáticos	28
6.2.2. Datos de maíz de temporal	30
6.2.3. Datos del suelo.....	30
6.2.4. Datos del Modelo Digital de Elevación.....	31

6.2.5. Datos de la SERIE V de INEGI.....	33
6.3. RClimDex y RHtests.....	34
6.4. Periodo de crecimiento.....	36
6.5. Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica.....	38
7. RESULTADOS.....	42
7.1. Análisis de los datos de maíz de temporal.....	42
7.2. Análisis de calidad de datos con RClimDex.....	42
7.3. Análisis de homogeneidad con RHtestsV4.r.....	44
7.4. Periodo de crecimiento.....	45
7.5. Propiedades físicas del suelo.....	60
7.5.1. Tipo de suelo.....	60
7.5.2. Textura.....	60
7.5.3. Densidad aparente.....	61
7.6. Propiedades químicas del suelo.....	62
7.6.1. pH.....	62
7.6.2. Conductividad eléctrica (CE).....	62
7.6.3. Materia orgánica.....	63
7.6.4. Nitrógeno.....	64
7.6.5. Fósforo.....	64
7.6.6. Potasio.....	64
7.7. Superficies aptas para el cultivo de maíz de temporal.....	65
8 DISCUSIÓN.....	83
9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	87
10 LITERATURA CITADA.....	89
11 ANEXOS.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Estaciones climatológicas operando.....	29
Tabla II. Rendimiento de maíz (t/ha).....	30
Tabla III. Ponderación de las variables.....	40
Tabla IV. Ponderación de las cinco categorías.....	40
Tabla V. Rendimiento de maíz (t/ha).....	42
Tabla VI. Porcentaje de datos faltantes, 1991-2014.....	43
Tabla VII. Prueba de homogeneidad, 1991-2014.....	45
Tabla VIII. Periodo de crecimiento 1991-2014.....	58
Tabla IX. Categorías para la aptitud potencial del periodo de crecimiento.....	59
Tabla X. Categorías para la aptitud potencial para el tipo de suelo.....	60
Tabla XI. Categorías para la aptitud potencial para el tipo de textura.....	61
Tabla XII. Relación de la densidad aparente con el crecimiento radicular.....	61
Tabla XIII. Categorías para la aptitud potencial de la densidad aparente.....	61
Tabla XIV. Efectos del pH en la disponibilidad de los nutrimentos.....	62
Tabla XV. Categorías para la aptitud potencial del pH.....	62
Tabla XVI. Clases de salinidad y respuesta de los cultivos.....	63
Tabla XVII. Categorías para la aptitud potencial de la conductividad eléctrica	63
Tabla XVIII. Categorías para la aptitud potencial de la materia orgánica.....	63
Tabla XIX. Categorías para la aptitud potencial del Nitrógeno.....	64
Tabla XX. Categorías para la aptitud potencial del Fósforo.....	64
Tabla XXI. Categorías para la aptitud potencial del Potasio.....	64
Tabla XXII. Ponderación para el periodo de crecimiento.....	66
Tabla XXIII. Ponderación para la altitud.....	67
Tabla XXIV. Ponderación para la pendiente.....	68
Tabla XXV. Ponderación para el tipo de suelo.....	69
Tabla XXVI. Ponderación para la textura.....	70
Tabla XXVII. Ponderación para la densidad aparente.....	71
Tabla XXVIII. Ponderación para el pH.....	72
Tabla XXIX. Ponderación para la conductividad eléctrica.....	73
Tabla XXX. Ponderación para la materia orgánica.....	74
Tabla XXXI. Ponderación para el Nitrógeno.....	75

Tabla XXXII. Ponderación para el Fósforo.....	76
Tabla XXXIII. Ponderación para el Potasio.....	77

INDICE DE MAPAS

Mapa 1. Estado de Tlaxcala, México.....	27
Mapa 2. Ubicación de las estaciones seleccionadas.....	28
Mapa 3. Ubicación de los estudios de suelo.....	31
Mapa 4. Altitud, estado de Tlaxcala.....	32
Mapa 5. Pendiente, estado de Tlaxcala.....	32
Mapa 6. Serie V de INEGI.....	33
Mapa 7. Ubicación de las estaciones.....	44
Mapa 8. Periodo de crecimiento, estado de Tlaxcala.....	60
Mapa 9. Interpolación del periodo de crecimiento.....	65
Mapa 10. Estandarización del periodo de crecimiento.....	65
Mapa 11. Zonas de aptitud potencial para el periodo de crecimiento.....	66
Mapa 12. Zonas de aptitud potencial para la altitud.....	68
Mapa 13. Zonas de aptitud potencial para la pendiente.....	69
Mapa 14. Zonas de aptitud potencial para el tipo de suelo.....	70
Mapa 15. Zonas de aptitud potencial para la textura.....	71
Mapa 16. Zonas de aptitud potencial para la densidad aparente.....	72
Mapa 17. Zonas de aptitud potencial para el pH.....	73
Mapa 18. Zonas de aptitud potencial para la conductividad eléctrica.....	74
Mapa 19. Zonas de aptitud potencial para la materia orgánica.....	75
Mapa 20. Zonas de aptitud potencial para el Nitrógeno.....	76
Mapa 21. Zonas de aptitud potencial para el Fósforo.....	77
Mapa 22. Zonas de aptitud potencial para el Potasio.....	78
Mapa 23. Zonas de aptitud potencial de las variables evaluadas.....	79
Mapa 24. Zonas de aptitud potencial para el maíz de temporal.....	79
Mapa 25. Zonas de aptitud potencial (PC, Altitud y TS).....	80
Mapa 26. Comparativo zonas de aptitud potencial.....	81
Mapa 27. Zonas de aptitud potencial PC, Altitud y TS por categoría.....	81
Mapa 28. Zonas de aptitud potencial todas las variables por categoría.....	82
Mapa 29. Comparativo zonas de aptitud potencial por categoría.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquematización de la metodología.....	38
Figura 2. Serie de tiempo homogénea, 29002 Apizaco.....	44
Figura 3. Periodo de crecimiento, 29002 Apizaco.....	46
Figura 4. Periodo de crecimiento, 29003 Atlanga.....	47
Figura 5. Periodo de crecimiento, 29011 Huamantla.....	47
Figura 6. Periodo de crecimiento, 29030 Tlaxcala.....	48
Figura 7. Periodo de crecimiento, 29032 Tlaxco.....	49
Figura 8. Periodo de crecimiento, 29007 El Carmen Tequexquitla.....	49
Figura 9. Periodo de crecimiento, 29025 San Marcos Huaquilpan.....	50
Figura 10. Periodo de crecimiento, 29026 Zitlaltepec.....	51
Figura 11. Periodo de crecimiento, 29027 Tocatlán.....	51
Figura 12. Periodo de crecimiento, 29035 Calpulalpan.....	52
Figura 13. Periodo de crecimiento, 29040 Ixtacuixtla.....	53
Figura 14. Periodo de crecimiento, 29041 Tepetitla.....	53
Figura 15. Periodo de crecimiento, 29042 Amaxac de Guerrero.....	54
Figura 16. Periodo de crecimiento, 29047 Españita.....	55
Figura 17. Periodo de crecimiento, 29051 Toluca de Guadalupe.....	55
Figura 18. Periodo de crecimiento, 29052 El Rosario.....	56
Figura 19. Periodo de crecimiento, 29151 Altzayanca.....	57
Figura 20. Periodo de crecimiento, 29169 Zacatelco.....	57
Figura 21. Periodo de crecimiento, 29170 San Pablo del Monte.....	58

TABLA DE ABREVIATURAS

A:	Altitud
BD:	Base de datos
CE:	Conductividad eléctrica
CIC:	Capacidad de intercambio catiónico
CMNUCC:	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CONABIO:	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
DA:	Densidad aparente
DDR:	Distrito de Desarrollo Rural
EMC:	Evaluación Multicriterio
ETCCDMI:	Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices
ETo:	Evapotranspiración de referencia
FAO:	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FIRA:	Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura
ha:	Hectáreas
HLPE:	High Level Panel of Experts
IIASA:	Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados
INEGI:	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC:	Intergovernmental Panel on Climate Change
IUSS:	International Union of Soil Sciences
K:	Potasio
MasAgro:	Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional
mm:	milímetros
MO:	Materia orgánica
N:	Nitrógeno
NA:	No available
NRCS:	Natural Resources Conservation Service
OPS:	Organización Panamericana de la Salud
P:	Fósforo
PC:	Periodo de crecimiento

PCP:	Precipitación
PDT:	Pendiente
QGIS:	Quantum Geographic Information System
SAGARPA:	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SEMARNAT:	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIAP:	Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera
SIG:	Sistemas de Información Geográfica
SMN:	Servicio Meteorológico Nacional
SQL:	Structure Query Language
ST:	Serie de tiempo
t:	Toneladas
T:	Textura
Tmáx:	Temperatura máxima
Tmín:	Temperatura mínima
TS:	Tipo de suelo
UNESCO:	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USDA:	United States Department of Agriculture
WRB:	World Reference Base
ZAE:	Zonificación agroecológica

RESUMEN

Hay factores que limitan la producción de maíz, como la cantidad de lluvia e irregular distribución, heladas tempranas, granizadas, profundidad de suelo, textura de la capa arable, pendiente y baja fertilidad de los suelos, plagas, el uso de semillas de bajo rendimiento y poco resistentes a las sequías y al acame, inclusive el impacto de un cambio en la variabilidad del clima inducido antrópicamente, entre otras. Esto aunado a que se siembra en zonas sin conocer el potencial idóneo, impacta en el rendimiento del maíz, lo que conlleva a un incremento en la inversión requerida para sembrar. En este estudio se aplicó el análisis multicriterio con un enfoque en Sistemas de Información Geográfica, para identificar cuáles son las zonas potenciales con las mejores condiciones edafoclimáticas, para el cultivo del maíz de temporal. Se evaluaron 12 capas de información: clima, altitud, pendiente, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, textura, tipo de suelo, densidad aparente, contenido de nitrógeno, fósforo y potasio. Se realizó un análisis de calidad a todas las variables consideradas, descartándose aquellas que no cumplieron con los parámetros de calidad de datos. Los resultados muestran un impacto diferenciado de las variables evaluadas, por lo que se podrá hacer una mejor selección de variedades/cultivos para obtener mejores rendimientos. Además, se identificaron los factores involucrados en la dinámica de la relación suelo-clima, lo que permitió determinar las zonas potenciales para el cultivo del maíz de temporal en el estado de Tlaxcala. Es importante mencionar que sobresale el Distrito de Desarrollo Rural 163 Calpulalpan, los valles que rodean la Malinche, así como la parte central del Estado, por tener un potencial de muy bueno y bueno. Es importante generar conocimiento que permita planificar las actividades agrícolas de temporal, que en el estado de Tlaxcala corresponden al 98.43% del total de la superficie agrícola.

Palabras claves: Zonas potenciales, Condiciones Edafoclimáticas, Análisis multicriterio y Agricultura de temporal.

ABSTRACT

There are factors that limit the production of corn, such as the amount of rain and irregular distribution, early frosts, hail, depth of soil, texture of the topsoil, slope and low soil fertility, pests, the use of low yield seeds and little resistant to drought and lodging, including the impact of a change in anthropically induced climate variability, among others. This, coupled with the fact that it is sown in areas without knowing the ideal potential, which increases the investment required to plant. In this study, the multicriteria analysis was applied with a focus on Geographic Information Systems, to identify potential areas with the best edaphoclimatic conditions for the cultivation of rainfed maize. 12 layers of information were evaluated: climate, altitude, slope, pH, electrical conductivity, organic matter, texture, type of soil, apparent density, nitrogen content, phosphorus and potassium. A quality analysis was carried out on all the variables considered, discarding those that did not comply with the data quality parameters. The results show a differentiated impact of the variables evaluated, so that a better selection of varieties/crops can be made to obtain better yields. In addition, the factors involved in the dynamics of the soil-climate relationship were identified, which allowed determining the potential areas for the cultivation of rainfed maize in the state of Tlaxcala. It is important to mention that the Rural Development District 163 stands out, Calpulalpan, the valleys surrounding La Malinche, as well as the central part of the state, for having a very good and good potential. It is important to generate knowledge, which allows planning the agricultural activities of temporary in the state of Tlaxcala correspond to 89.43% of the total agricultural area.

Key words: Potential areas, Edaphoclimatic conditions, multicriteria analysis and temporal agriculture.

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa una seria amenaza para la seguridad alimentaria, ya que los cambios en los patrones de temperatura y distribución de la lluvia, pueden tener un gran impacto en la materia orgánica y en los procesos que tienen lugar en los suelos, así como en las plantas y cultivos que crecen en ellos (FAO, 2015).

Es importante conocer información sobre la variabilidad en el crecimiento y rendimiento del cultivo del maíz, así como su relación con las propiedades físicas y químicas del suelo para establecer prácticas de manejo específico y en particular para lograr una mayor eficiencia en la fertilización. Dadas las condiciones particulares en las que se siembra el maíz, es importante profundizar en estudios del análisis de crecimiento en áreas particulares, para optimizar sus rendimientos y recomendar el uso de los fertilizantes con base en las características propias del suelo. (Sánchez *et al.* 2012).

El maíz entre las plantas cultivadas a nivel mundial se ubica en primer término, superando al trigo y al arroz. Es el de mayor diversidad no sólo genética sino también en uso. En el estado de Tlaxcala el 72.9% de la superficie estatal está destinada a la agricultura (INEGI, 2014), de ésta la participación de la superficie agrícola de temporal es de 89.43%. Del total de la superficie de temporal el 47.35% corresponde al principal cultivo en el estado, que es el maíz. A nivel regional, la entidad se divide en tres Distritos de Desarrollo Rural (**DDR**), el 163, ubicado en Calpulalpan, el 164, con sede en la ciudad de Tlaxcala y 165 con residencia en Huamantla. En el periodo 1999 a 2014, el **DDR** 163 ha tenido en 12 años el mayor rendimiento por hectárea, mientras que el **DDR** 164 en 2002 y 2011 tuvo el mayor rendimiento, y el **DDR** 165 en los más recientes años, 2013 y 2014 ha logrado el mayor rendimiento por hectárea (SAGARPA, 2017).

Es posible que a través de modelos de simulación de procesos se describa el crecimiento del cultivo a lo largo de sus diferentes etapas, mediante un conjunto de ecuaciones que relacionan el desarrollo de la planta, el suelo y los factores

climáticos. Sin embargo, presentan algunos inconvenientes, ya que requieren de datos climáticos y edáficos, no siempre disponibles en países como México (Conde *et al.* 2004).

Por otra parte, al pronosticar la vulnerabilidad del rendimiento de cultivos en relación con los escenarios climáticos, generalmente, no se considera la alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático. La alteración de la fertilidad del suelo puede ocasionar cambios en los rendimientos del cultivo de maíz hasta en un 20%, por lo que resalta la importancia de considerar las propiedades físicas y químicas del suelo para identificar las zonas potenciales del maíz de temporal (Castillo *et al.* 2007).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (**FAO**) ha propuesto la metodología de la zonificación agroecológica (**ZAE**) con el propósito de identificar áreas con similares potencialidades y limitaciones para el desarrollo del cultivo. La **ZAE** define zonas potenciales con base en parámetros climáticos y edáficos de los requerimientos de los cultivos, así como en las prácticas de manejo (FAO, 1997).

Por otra parte, la **FAO** y el Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (**IIASA**) durante los últimos 30 años han seguido desarrollando la metodología **ZAE**, con el propósito de evaluar los recursos y el potencial agrícola. Con los avances recientes en tecnología de la información se han generado bases de datos mundiales cada vez más detalladas y variadas, con esta información se realizó la primera evaluación mundial de la **ZAE** en el 2000. A partir de entonces, se han realizado evaluaciones mundiales cada año de la **ZAE**. Entre los datos que se consideran para esta evaluación están: recursos de tierra y agua, recursos agroclimáticos, idoneidad agrícola y rendimientos potenciales, rendimiento y producción reales a escala reducida y diferencias de rendimiento y producción (FAO, 2017).

Kihoro *et al.* (2013) menciona que el enfoque de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica es útil, ya que permite evaluar múltiples

variables, las cuales son ponderadas de acuerdo a su importancia relativa en las condiciones óptimas evaluadas. El objetivo es encontrar soluciones a los problemas de toma de decisiones caracterizados por múltiples alternativas que pueden ser evaluadas mediante criterios de decisión.

Eastman (2003) menciona que “la evaluación multicriterio se logra como una combinación lineal ponderada donde los criterios continuos (factores) son estandarizados en un rango numérico común, y luego combinados por medio de un promedio ponderado. El resultado es un mapeo de adecuación continuo que luego puede ser enmascarado por una o más restricciones booleanas para dar lugar a los criterios cualitativos, y finalmente se impone un umbral para producir una decisión final”.

La evaluación multicriterio es comúnmente integrada a los sistemas de información geográfica enfocados hacia los estudios de emplazamientos óptimos dirigidos a una actividad determinada permitiendo la obtención de mapas continuos de aptitud del suelo, al integrar distintos factores que intervienen en la aptitud del suelo, esto se puede llevar a cabo mediante la sumatoria lineal ponderada (Lara Romero, 2015).

Aguilar *et al.* (2010) mencionan que la evaluación multicriterio se basa en la ponderación y compensación de variables. Esto permite obtener mapas que expresan la evolución potencial para cada categoría en el uso del suelo o sistemas productivos, por lo que es necesario caracterizar ambientes con condiciones similares que expresen el potencial productivo de la zona.

Bagaram *et al.* (2016) mencionan que el suelo no es el único factor a considerar al evaluar la idoneidad. En su investigación identificaron y mapearon los principales factores que influyen en la regeneración del *Quercus Suber*, mediante la evaluación multicriterio. Los factores se incorporaron mediante la combinación lineal ponderada para determinar los índices de idoneidad para la regeneración. Los principales factores que influyen en la idoneidad de la regeneración del *Quercus Suber* son el clima, la pendiente, el espesor de la arena, la pendiente de

la capa de suelo de arcilla y las comunidades de plantas y tipos de suelos. Se obtuvieron cuatro clases de idoneidad de regeneración (adecuadas, mediana, baja y muy baja) y representan el 17.40%, 40.18%, 34.84% y 4.28% del área forestal, respectivamente.

1.1. Cambio Climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (**CMNUCC**), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (IPCC, 2014).

En el Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático definen el cambio climático como la variación del estado del clima, identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo (IPCC, 2014).

En relación al cambio climático y la agricultura, un incremento de la temperatura máxima puede conducir a una reducción grave del rendimiento y a un fracaso reproductor en muchos cultivos. En el maíz, por ejemplo, el rendimiento puede reducirse un 1,7% por cada grado-día por arriba de 30°C en condiciones de sequía. En general, se sabe poco acerca de las consecuencias del cambio climático sobre las plagas y las enfermedades de los cultivos, pero podrían ser considerables. Dentro de determinados límites, los insectos se reproducen más rápidamente a temperaturas más altas, y es más probable que invernen en lugares templados. Las malas hierbas proliferan con mayores concentraciones de CO₂ (HLPE, 2012).

1.2. Degradación de los suelos agrícolas

La degradación del suelo significa el cambio de una o más de sus propiedades a condiciones inferiores a las originales, por medio de procesos físicos, químicos y/o biológicos. En términos generales la degradación del suelo provoca alteraciones en el nivel de fertilidad del suelo y consecuentemente en su capacidad de sostener una agricultura productiva (FAO, 1993).

La degradación puede ser de forma natural y antrópica, y esta es el resultado de un proceso dado por los factores y procesos formadores que actúan sobre los suelos, como el tipo de suelo, el relieve, la vegetación y el clima; de factores socioeconómicos como la densidad poblacional, la propiedad de la tierra, las políticas ambientales y los cambios en el uso de suelo (Gardi *et al.* 2014).

“La preocupación e importancia de la degradación de los suelos se debe a la pérdida y deterioro de la calidad de los servicios ambientales que se obtienen de él, siendo quizá los más importantes la producción de alimentos y la captación de agua. El problema de la degradación y de la pérdida de productividad de los suelos se extiende, en muchos casos, más allá de las afectaciones a este recurso, cuando zonas con coberturas forestales o de otros ecosistemas naturales se transforman a campos de cultivo, con lo cual, además de los daños a la biodiversidad, se emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera” (SEMARNAT, 2015).

En México se realizó un estudio en 2002 para evaluar la degradación de los suelos causada por actividades antropogénicas. Los resultados indican que el 45.2% de la superficie del país presentaba degradación inducida por el hombre. El nivel de degradación predominante era de ligero a moderado, mientras que los procesos más importantes de degradación fueron la química (principalmente por la pérdida de fertilidad), la erosión hídrica y la erosión eólica. Estos tres procesos fueron responsables del 87% de los suelos degradados en el país. Entre las principales causas de degradación se identificaron el cambio de uso del suelo para fines

agrícolas (17.5%), el sobrepastoreo (17.5%) y la deforestación (7.4%) (SEMARNAT, 2017).

En México hay 88 millones de hectáreas (ha) afectadas por procesos de degradación de suelos. La erosión eólica abarca poco más del 9% del territorio nacional (18,5 millones de ha). Los estados con la mayor proporción superficial afectada son: Tlaxcala (26%), Chihuahua (26%) y Nuevo León (19%). Las zonas afectadas por erosión hídrica alcanzan el 12% del territorio nacional, lo que equivale a 23 millones de ha. Los estados que presentan una mayor proporción de superficie afectada son: Guerrero (32%), Michoacán (27%) y el Estado de México (25%). La degradación química del suelo está muy asociada a la intensificación de la agricultura y sus efectos se pueden observar en 35 millones de ha. La degradación física se produce en 12 millones de ha, la Ciudad de México es el más afectado con el 46% de su territorio, le siguen Tabasco (37%) y Veracruz (29%) (Gardi *et al.* 2014).

1.3. Agroecología

Las tecnologías agrícolas modernas han reportado mejoras globales en la producción agrícola, sin embargo, en numerosos países en desarrollo, un gran número de pequeños campesinos empobrecidos no se ha beneficiado de estas tecnologías. Para mejorar la calidad de vida de estos campesinos, es importante encontrar enfoques alternativos que intensifiquen la producción y al mismo tiempo conserven la base de los recursos naturales, manteniendo la biodiversidad y conservando el conocimiento tradicional. La agroecología facilita este enfoque, integrando los beneficios de las tecnologías modernas con las dimensiones social y ecológica de los sistemas agrícolas tradicionales, para llegar de manera más eficaz a los pequeños y más pobres agricultores (FAO, 2007).

La estrecha relación entre la fertilidad del suelo y la seguridad alimentaria requiere acciones estratégicas e inmediatas, sobre todo a nivel local para revertir la degradación del suelo, a fin de aumentar la producción alimentaria y aliviar la inseguridad alimentaria en las zonas donde más se necesita y en el contexto del

cambio climático. La agroecología es una estrategia para revertir la degradación del suelo. Al entender y trabajar con las interacciones entre suelo, plantas, animales, seres humanos y medio ambiente dentro de los sistemas agrícolas, la agroecología abarca múltiples dimensiones del sistema alimentario, incluyendo la restauración ecológica, la estabilidad política y social y la sostenibilidad económica (FAO, 2015b).

FAO (2007) menciona que los principios agroecológicos tienen que ver con: 1) Reducir el uso de insumos perjudiciales para el ambiente y aumentar el uso de insumos naturales y locales. 2) Disminuir las cantidades de sustancias tóxicas o contaminantes emitidas al ambiente. 3) Uso más eficaz de los nutrientes reciclando la biomasa y aplicación de fertilizantes orgánicos. 4) Aumentar la capa vegetal del suelo y reducir la cantidad de labranza, si es posible a cero. 5) Promover la actividad biológica del suelo. 6) Mantener un alto número de especies y la diversidad genética, en el tiempo y el espacio, y una estructura compleja del ecosistema agrícola, con el fin de facilitar un amplio número de servicios ecológicos y aumentar la resistencia del ecosistema agrícola y la flexibilidad ante los cambios.

Rosado *et al.* (2015) menciona “que los sistemas de manejo agrícola en manos de comunidades campesinas e indígenas, adquieren cada vez mayor importancia por los servicios ecológicos que éstos ofrecen a la sociedad” y que la conservación de las variedades nativas es trascendental para la seguridad alimentaria. Ya que en éstas los cultivos se van adaptando a las condiciones climáticas, de suelo, plagas y enfermedades cambiantes, debido al cambio climático.

1.4. Maíz

El maíz es el cultivo que más se produce en el mundo, superando al trigo y al arroz, debido a sus cualidades alimenticias para la producción de proteína animal, el consumo humano y el uso industrial, se ha convertido en uno de los productos más importantes en los mercados internacionales. Su relevancia económica y social supera a la de cualquier otro cultivo. Además, el cultivo y transformación del

maíz es fuente de empleo y alimento para un número importante de personas en el mundo (FIRA, 2016).

Se espera un incremento anual de 3.2% en el consumo mundial, para totalizar 1,008.7 millones de toneladas en 2016/17, de las cuales 61.9% corresponde a consumo forrajero y el 38.1% a consumo humano, industrial y semilla. A su vez las exportaciones mundiales de maíz tuvieron un incremento significativo durante los últimos ciclos comerciales. Éstas totalizaron 138.6 millones de toneladas en el ciclo 2015/16. Las expectativas para el ciclo 2016/17 estiman un incremento anual de 20.4% (FIRA, 2016).

En México la producción de maíz en 2015 creció a una tasa anual de 6.1% para totalizar 24.69 millones de toneladas. Donde diez estados concentran el 80% de la producción nacional. Destaca Sinaloa que se ubica como el principal productor de maíz con una participación del 21.8%. Por otro parte, se prevé que el consumo de maíz crezca 0.4% (38.7 millones de toneladas) para el ciclo comercial 2016/17 (FIRA, 2016).

La balanza comercial de maíz en México durante 2015, presentó un saldo negativo de 11.3 millones de toneladas, consecuencia de exportaciones por 0.73 millones de toneladas e importaciones por 12.35 millones de toneladas. Las importaciones de maíz en nuestro país presentan una tasa media de crecimiento anual de 7.8% entre 2006 y 2015, para ubicarse en este último en un volumen de 12.05 millones de toneladas, el nivel más alto de la historia (FIRA, 2016).

Estados Unidos es el principal proveedor de maíz para México. Las importaciones en 2015 se ubicaron en 11,792.6 millones de toneladas, con un valor de 2,319.2 millones de dólares. Para 2016, el acumulado de enero a agosto se ubicó en 9,654.4 millones de toneladas, con un valor de 1,819.2 millones de dólares (FIRA, 2016).

1.5. Seguridad Alimentaria

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, menciona que la seguridad alimentaria se da cuando todas las personas tienen acceso físico, social y económico permanente a alimentos seguros, nutritivos y en cantidad suficiente para satisfacer sus requerimientos nutricionales y preferencias alimentarias, y así poder llevar una vida activa y saludable (FAO, 2016).

En la Agenda 2030 se plantean nuevos desafíos para el sector agrícola, los cuales se tendrán que abordar con nuevos enfoques, para lograr la seguridad alimentaria y nutricional. Cabe mencionar, que los avances económicos, sociales y sanitarios observados en los últimos años también implican nuevas presiones en los sistemas alimentarios (FAO y OPS, 2016).

En los próximos 35 años la agricultura se verá expuesta a una confluencia de presiones sin precedentes, tales como un aumento del 30%, de la población mundial, una creciente competencia por recursos de tierra, agua y energía cada vez más escasos, así como la amenaza cada vez más evidente del cambio climático. Se estima que para 2050 la población llegará a 9,300 millones de habitantes y para atender las necesidades de alimentación, la producción anual deberá aumentar de los 8,400 millones de toneladas actuales a casi 13,500 millones de toneladas. Lograr ese nivel de producción a partir de una base de recursos naturales ya disminuida en proporciones graves, será imposible a menos que los sistemas de alimentación y agricultura experimenten profundos cambios. Se tienen que ampliar y acelerar la transición a un sistema de alimentación y agricultura sostenibles que garanticen la seguridad alimentaria mundial, brinden oportunidades económicas y sociales y protejan los servicios de los ecosistemas de los que depende la alimentación (FAO, 2015c).

En el mundo se pierden o desperdician cerca de 1,300 millones de toneladas de alimentos anualmente, por lo que se puede afirmar que para los sistemas alimentarios no solo existen amenazas futuras relativas a incrementos en el volumen, diversidad y calidad de la oferta de alimentos, sino también problemas

inmediatos relativos a las actuales formas de producción y consumo. En uno de los informes se señala que, antes de enfocar las inversiones en el aumento de la productividad, los países del mundo debieran invertir en reducir las pérdidas y desperdicios de alimentos (FAO, 2012).

El mundo no podrá erradicar el hambre y la malnutrición para 2030, debido a la escasez de recursos naturales y su gestión insostenible. Por otra parte, el cambio climático, la sequía, la inestabilidad política y los conflictos constituyen amenazas para la seguridad alimentaria en muchos lugares e impiden progresar en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Se requiere una respuesta más holística y coordinada por parte de la comunidad internacional a fin de vincular las respuestas a corto plazo, a las crisis humanitarias con iniciativas de desarrollo a más largo plazo, que hagan frente a las causas subyacentes de la inseguridad alimentaria y la malnutrición, promuevan medios de vida resilientes y sostenibles y apoyen sistemas alimentarios sostenibles mediante procesos de política inclusivos y alianzas eficaces (Naciones Unidas, 2017).

Por lo antes expuesto en esta investigación, se pretende analizar los efectos de las propiedades físico-químicas del suelo y la variabilidad del clima en el rendimiento del maíz de temporal mediante una Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica. Es importante mencionar que el suelo a pesar de que es un recurso natural muy valioso, generalmente no se le presta la debida atención. La superficie natural de suelos productivos es limitada y se encuentra sometida a una creciente presión debido a la intensificación y el uso competitivo que caracteriza el aprovechamiento de los suelos con fines agrícolas, forestales, ganaderos, y de urbanización. Los suelos deben ser valorados por sus capacidades productivas y por su contribución a la seguridad alimentaria y al mantenimiento de servicios ecosistémicos. El manejo sostenible de los suelos agrícolas y la producción sostenible son imprescindibles para invertir la tendencia de degradación de los suelos y garantizar la seguridad alimentaria (FAO, 2015a).

2 ANTECEDENTES

Se han realizado trabajos de investigación aplicando la Evaluación Multicriterio (**EMC**) con enfoque en Sistemas de Información Geográfica (**SIG**), con la finalidad de identificar las zonas potenciales para diferentes cultivos, especies vegetales y forestales. También se han realizado otras aplicaciones, para la planificación urbana más eficaz para uso residencial o comercial y para especies no maderables.

2.1. Internacional

Kihoro *et al.* (2013) desarrollaron un mapa de adecuación para el cultivo de arroz considerando las variables biofísicas de suelo, clima y topografía utilizando un enfoque de **EMC** y **SIG** en la región Mwea, Kenia. Los resultados indican que el uso de **SIG** y la aplicación de la **EMC** utilizando el Proceso de Análisis Jerárquico (**AHP**, por sus siglas en Inglés —Analytical Hierarchy Process—) podrían proporcionar una base de datos superior y un mapa guía para los tomadores de decisiones que consideran la sustitución de cultivos para lograr una mejor producción agrícola. Para un estudio más detallado, proponen seleccionar un mayor número de factores como el suelo, el clima, las instalaciones de riego y los factores socioeconómicos que influyen en el uso sostenible de la tierra. Esta investigación proporcionó información a nivel local que podría ser utilizada por los agricultores para seleccionar los patrones de cultivo y su idoneidad.

Kazemi *et al.* (2016) desarrollaron un modelo de evaluación del suelo para el cultivo de frijol (*Vicia faba L.*) utilizando **SIG** y análisis multicriterio en la región de Gonbad-Kavous (provincia de Golestan, norte de Irán). Considerando las variables: temperatura promedio anual, máxima y mínima, precipitación anual, pendiente, elevación y algunas propiedades del suelo como materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, textura, fósforo, potasio, calcio, hierro y zinc. Recomiendan que estudios similares utilicen otros parámetros como la humedad relativa, la velocidad del viento y la radiación solar.

Myagmartseren *et al.* 2017 investigaron cómo el análisis multicriterio y los sistemas de información geográfica pueden utilizarse para una planificación urbana más eficaz.

Goma-Bedawi *et al.* (2016) mencionan que la evaluación de la idoneidad del suelo es una herramienta valiosa para la planificación del uso del suelo en los principales países del mundo, así como en Malasia. Estimaron suelos agrícolas adecuados para cultivos de caucho en Seremban, Malasia mediante la aplicación de variables físicas en combinación con variables biofísicas y ecológicas, evaluando los pesos de sus respectivas contribuciones a la aptitud del suelo para uso agrícola. Los resultados muestran que Senawang, Mambau, Sandakan y Rantau como las áreas más adecuadas para cultivar caucho; mientras que Nilai y Labu son moderadamente adecuados para el cultivo de caucho. Lenggeng, Mantin y Pantai no son adecuados para el cultivo de caucho, ya que el estudio previó la posible degradación ambiental de estos lugares debido a la intensificación agrícola.

Galacho y Ocaña (2006) mencionan que los Sistemas de Información Geográfica y la Evaluación Multicriterio son útiles para identificar zonas potenciales en la evaluación territorial. El desarrollo metodológico de un modelo de evaluación pretende medir la capacidad del territorio para potencializar los usos comúnmente previstos en los planes de ordenación territorial, en este caso, residenciales y comerciales. Con la información espacial generada se pretende que sirva de apoyo a la toma de decisiones y que ésta se realice sobre una base objetiva.

Da Silva y Cardozo (2015) mencionan la importancia de tener información espacial que oriente la planificación territorial urbana, debido a los múltiples factores (ambientales, socio-económicos, etc.) que intervienen en la dinámica del crecimiento de las ciudades. En la investigación utilizaron técnicas de Análisis Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica con el propósito de determinar espacios potenciales para la ocupación residencial. Los resultados indican la buena capacidad del oeste y noroeste de la ciudad en albergar nuevas

instalaciones residenciales, contemplando principalmente factores ambientales y de accesibilidad.

De Pietri *et al.* (2011) elaboraron un modelo espacial integrando los factores ambientales que constituyen una amenaza para la salud, de aplicación en la cuenca del río Matanza-Riachuelo, en Argentina. Aplicaron procedimientos de evaluación multicriterio con enfoque en sistemas de información geográfica para obtener una zonificación del territorio basada en grados de aptitud para residir. Georreferenciaron variables que caracterizan las condiciones de habitabilidad de las viviendas y las posibles fuentes de contaminación de la cuenca. Los resultados mostraron que el 60% de la superficie tiene aptitud, el resto de la población habita en un territorio no apto, y 6% se encuentra en la condición más desfavorable de la cuenca.

2.2. Nacional

A nivel nacional se han caracterizado zonas potenciales para diferentes cultivos, desde 1963 el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias investiga el potencial productivo del maíz. Antes de 1980, se realizaron más de 2,500 experimentos en las principales regiones productivas de temporal y más de 800 bajo riego. Los resultados de estos experimentos integraron la variabilidad climática y edáfica (Turrent, 2009).

En 1977 se evaluó el potencial productivo del maíz, a partir de 2,545 experimentos, donde se incluyeron variedades nativas y maíces mejorados. Estos experimentos fueron agrupados en 72 agrosistemas de maíz, definidos a partir del cociente de la precipitación sobre la evaporación, así como tres diferentes requerimientos de temperatura y cuatro atributos de la calidad de la tierra. Los resultados indican que el potencial productivo del maíz fue de 20.17 millones de toneladas anuales a escala nacional (Turrent, 2009).

Turrent (2009) menciona que en 2003 el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias actualizó el potencial productivo, con nueva

información experimental entre 1987 y 1990, que incluyó 201 experimentos de temporal y 302 de riego, además de 1,297 parcelas. Se evaluaron semillas híbridas, públicas y privadas. Los resultados mostraron un incremento del potencial productivo de 29 millones de toneladas anuales.

Una estimación posterior realizada por Turrent sobre la misma base, indica que la estimación del potencial productivo de maíz se incrementa a 33 millones de toneladas anuales (Turrent, 2013); este potencial ha de contrastarse con la producción observada de 28,250,782.31 de toneladas anuales en 2016 (SIAP, 2017).

Por otra parte, se han caracterizado zonas agroecológicas para los cultivos de maíz, frijol y sorgo basándose en las cartas de fisiografía, textura y fases físicas del suelo, así como de datos de temperatura y precipitación (Ortiz, 1981).

Se evaluó el potencial productivo actual de los cultivos de maíz y frijol en la república mexicana, identificando las regiones agrícolas con mayor potencial (Turrent, 1986).

2.3. Regional o Local

María y Volke (1999) realizaron una estratificación del ambiente, con la finalidad de definir los estratos de potencial productivo del maíz (*Zea mays* L.), en la región oriente del estado de Tlaxcala, mediante una función de producción que consideró los factores de suelo, clima y manejo que afectan el rendimiento del maíz. Los resultados mostraron que los factores que afectan el rendimiento de maíz son: la precipitación en el mes después de la siembra, la precipitación en el período de 30 días antes hasta 20 días después de la floración, el potasio intercambiable, la profundidad, la pendiente y la fecha de siembra.

Medina *et al.* (2003) determinaron el potencial productivo de especies agrícolas para el estado de Zacatecas. Primero conjuntaron los requerimientos agroclimáticos de las diferentes especies y se identificaron las áreas geográficas con diferente potencial considerando información de temperatura, precipitación,

altitud, pendiente, profundidad, tipo de suelo y textura. Los resultados muestran las áreas con potencial alto, mediano y bajo, así como el número de hectáreas que representa para cada especie.

Para el estado de Morelos se identificaron las áreas con potencial productivo para el cultivo de maíz, tomando en cuenta las condiciones de clima, suelo y relieve que favorecen el crecimiento y desarrollo del cultivo, usando la Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica. Los resultados mostraron que los factores que tienen mayor importancia son: el índice de precipitación/evaporación, la altitud y la profundidad del suelo (Ceballos *et al.* 2008).

En el estado de México identificaron y delimitaron áreas con potencial para el cultivo del maíz, aplicando la metodología de análisis multicriterio como una alternativa para la zonificación y delimitación de las zonas con aptitud para maíz. Utilizaron información de clima, suelo y fisiografía, donde a cada variable se le dio un valor numérico, según la influencia que tienen en la adaptación, desarrollo y rendimiento del maíz. Los resultado mostraron que las variables con mayor peso son la temperatura, la altura, la precipitación y el tipo de suelo (Sotelo *et al.* 2016).

Con base en la revisión bibliográfica se describen las variables consideradas en la investigación, lo que permitirá identificar las cinco categorías evaluadas.

El tipo de suelo es importante ya que permite establecer que zonas tienen las mejores condiciones para el desarrollo de los cultivos. En el estado de Tlaxcala existen 11 tipos de suelo, destacando el Phaeozem (33.71 %), Regosol (12.79 %) y Cambisol (9.75 %), (INEGI, 2014).

La descripción general de los principales tipos de suelo presentes en el estado de Tlaxcala es de (FAO-UNESCO, 1976; INEGI, 1986; IUSS Working Group WRB, 2015 y SEMARNAT, 2015):

ANDOSOL: Tienen un alto potencial para la producción agrícola. Son suelos fértiles en general. Tienen propiedades favorables para cultivar, para el enraizamiento de las plantas y la retención de agua.

CAMBISOL: Generalmente constituyen buenas tierras agrícolas y se utilizan intensivamente. Los Cambisols con alta saturación de bases en la zona templada están entre los suelos más productivos de la tierra. Los Cambisols en pendientes pronunciadas se mantienen mejor bajo bosque. Los Cambisols en terreno ondulado o con colinas se usan con una variedad de cultivos anuales y perennes o se utilizan como tierra de pastoreo.

PHAEOZEM: Son suelos porosos, oscuros y ricos en materia orgánica, por lo que se utilizan intensivamente en la agricultura; sin embargo, las sequías periódicas y la erosión eólica e hídrica son sus principales limitantes. Se utilizan para la producción de granos (soya, trigo y cebada, por ejemplo) y hortalizas, y como zonas de agostadero cuando están cubiertos por pastos. Se encuentran en climas templados y húmedos con vegetación natural de pastos altos o bosques.

FLUVISOL: Buena fertilidad natural. Muchos cultivos de temporal también se producen en estos suelos, normalmente con algún tipo de control de agua.

GLEYSOL: El principal obstáculo para su utilización es la necesidad de instalar un sistema de drenaje para bajar el nivel freático. Los Gleysols adecuadamente drenados pueden usarse para cultivos herbáceos, ganadería y horticultura. El encalado de Gleysols drenados que son altos en materia orgánica y/o de pH bajo, crea un mejor hábitat para micro/meso-organismos y aumenta la tasa de descomposición de la materia orgánica (y el suministro de nutrimentos de las plantas).

LITOSOL: Están asociados a suelos con una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrimentos.

LUVISOL: La mayoría de estos suelos son suelos fértiles y adecuados para una amplia gama de usos agrícolas. Estos suelos en pendientes pronunciadas

requieren medidas de control de la erosión. Los Luvisols en la zona templada están ampliamente usados con cultivos de grano pequeño, remolacha azucarera y forraje; en zonas con pendiente, se utilizan para huertos, bosques y/o pastoreo.

REGOSOL: En general, son suelos muy jóvenes que se desarrollan sobre material no consolidado, de colores claros y pobres en materia orgánica y con mínimo desarrollo de perfil. Estos suelos con precipitaciones de 500 a 1,000 mm/año necesitan riego para la producción de cultivos satisfactorios. La baja capacidad de retención de humedad de estos suelos obliga a aplicaciones frecuentes de agua de riego; el riego por goteo o aspersión resuelve el problema, pero rara vez es económica. Cuando la precipitación excede los 750 mm/año, el perfil logra su capacidad de retención de humedad a principios de la temporada de lluvias; la mejora de prácticas con barbecho labrado puede ser una mejor solución que las costosas instalaciones de sistemas de riego.

RENDZINA: La naturaleza rocosa y zonal del suelo impide la mecanización o hace que la manutención del equipo sea muy costosa. La maduración de los cultivos tiende a ser desigual, lo que refleja la naturaleza discontinua de los suelos. En las rendzinas, la mayor parte de los agricultores modernos acaban por abandonar la agricultura labrantía en favor de las tierras de pastos permanentes.

SOLOCHAK: La excesiva acumulación de sales en el suelo afecta el crecimiento de las plantas.

VERTISOL: Tienen gran potencial agrícola. La susceptibilidad de los Vertisols al anegamiento puede ser el factor más importante que reduce el período de crecimiento real.

La Textura del suelo se refiere a la proporción relativa de partículas de menos de 2 mm de diámetro, es decir, la tierra fina del suelo; éstas partículas se agrupan en tres clases: arena (2 - 0.05 mm), limo (0.05 – 0.002 mm) y arcilla (< 0.002 mm); al combinarse éstas se puede categorizar el suelo en una de las 12 clases texturales (Jaramillo 2002 y Soil Science Division Staff, 2017).

La textura está íntimamente relacionada con la composición mineral, el área superficial específica y el espacio de poros del suelo. Esto afecta prácticamente a todos los factores que participan en el crecimiento de las plantas. La textura del suelo tiene influencia sobre el movimiento y la disponibilidad de la humedad del suelo, la aireación, la disponibilidad de nutrimentos y la resistencia a la penetración por las raíces (FAO, 2000).

Ibarra *et al.* (2008) identificaron como limitante la productividad de los suelos con condición de areno franco y franco arenoso, la cual predispone suelos con alta porosidad, escasa humedad, así como una baja retención de elementos nutritivos y una alta lixiviación de los mismos, lo que origina que la disponibilidad de los nutrimentos sea baja.

Los suelos arenosos pueden debilitar el crecimiento, y volumen del sistema radicular de las plantas, lo que disminuye la disponibilidad de los nutrimentos, perjudica la capacidad de retención del agua y limita la capacidad de intercambio catiónico.

Suelos arcillosos con agregados grandes y duros retrasan el crecimiento inicial de los cultivos (FAO, 2000).

De acuerdo a las Guías para la Interpretación de Cartografía: Edafología (INEGI, 2004), la clase textural indica el tamaño general de las partículas que forman el suelo y que en la carta aparecen con números:

- a) El 1 representa los suelos arenosos de textura gruesa (con más de 65% de arena), con menor capacidad de retención de agua y nutrimentos para las plantas.
- b) El 2 se refiere a suelos de textura media, comúnmente llamados francos, equilibrados generalmente en el contenido de arena, arcilla y limo.

- c) El 3 representa suelos arcillosos de textura fina (con más de 35% de arcilla) que tienen mal drenaje, escasa porosidad, son por lo general duros al secarse, se inundan fácilmente y son menos favorables al laboreo.

La densidad es el peso que tiene dicho material, por unidad de volumen (g/cm^3). Si se considera solamente la masa de las partículas sólidas, se tiene la densidad real. Si aparte de la masa de las partículas se tiene en cuenta su espacio poroso, entonces se tiene la densidad aparente (Jaramillo, 2002).

La densidad aparente (**DA**) del suelo puede servir como un indicador de la compactación. Afecta a la infiltración, crecimiento de las raíces, profundidad del enraizamiento, capacidad de agua disponible, porosidad y aireación del suelo, disponibilidad de nutrientes para el uso de las plantas y actividad de los microorganismos del suelo, que influyen en los procesos y la productividad del suelo. La compactación reduce los rendimientos de los cultivos y restringe el crecimiento de la cubierta vegetal que ayuda a proteger el suelo de la erosión. Las densidades típicas del suelo varían entre 1,0 y 1,7 g/cm^3 , y generalmente se incrementan con la profundidad en el perfil del suelo (USDA, 2001 y USDA-NRCS, 2014).

El pH del suelo es una medida de la acidez o alcalinidad de la solución del suelo, que afecta a la disponibilidad de nutrientes de las plantas, la actividad de los microorganismos y la solubilidad de los minerales del suelo. La acidez se asocia generalmente con suelos lixiviados. La alcalinidad generalmente ocurre en regiones más secas. Sin embargo, las prácticas agrícolas, como el encalado o la adición de fertilizantes de amonio, pueden alterar el pH del suelo. La medición del pH está midiendo la actividad del ion hidrógeno [H^+] en la solución del suelo. La acidificación del suelo también puede ser una indicación de las aplicaciones excesivas de fertilizantes nitrogenados y la pérdida de lixiviación de nitrógeno (USDA, 2001).

El principal efecto de un pH muy alto o muy bajo es que algunos nutrientes pueden estar disponibles en forma excesiva y ser tóxicos, mientras que la

disponibilidad de otros puede disminuir y aparecer como deficiencias del cultivo. La mayoría de los minerales son más solubles en suelos ácidos que en suelos neutros o ligeramente básicos.

En los suelos ácidos, el aluminio y el manganeso pueden volverse muy solubles y tóxicos y, además, reducir la capacidad de la planta para absorber fósforo, calcio, magnesio y molibdeno. Especialmente en los suelos ácidos, el fósforo no está disponible para las plantas. Si el boro, el cobre y el zinc están presentes en el suelo, pueden presentar toxicidad a bajos pH. En suelos medianamente alcalinos es posible encontrar deficiencia de boro, cobre y zinc y puede no estar disponible el fósforo. El pH del suelo tiene relativamente poco efecto sobre el nitrógeno. En general, los valores de pH entre 6 y 7,5 son óptimos para el crecimiento general del cultivo (Rawson, 2001).

El cultivo del maíz generalmente crece bien con un pH de 5.5 – 7.8. El efecto de un pH fuera de esos límites suele aumentar o disminuir la disponibilidad de ciertos elementos y se produce toxicidad o deficiencia. A un pH inferior de 5.5 se presentan problemas de toxicidad por aluminio (Al) y manganeso (Mn) y deficiencias de fósforo (P) y magnesio (Mg). A un pH superior a 8 se presentan deficiencias de hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn). Si el pH es inferior a 5.5 o superior a 7.8, estará fuera del intervalo para un buen crecimiento de maíz (Lafitte, 1994).

La conductividad eléctrica (**CE**) de las mezclas suelo-agua indica la cantidad de sales presentes en el suelo. Todos los suelos contienen algunas sales, que son esenciales para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, el exceso de sales obstaculizará el crecimiento de las plantas al afectar el equilibrio suelo-agua. Los suelos que contienen exceso de sales ocurren naturalmente y como resultado del uso y manejo del suelo. Los suelos afectados por la sal se encuentran principalmente en las zonas áridas y semiáridas, donde la precipitación anual es baja, lo que permite que las sales se acumulen en el perfil del suelo. La medición de la **CE** detecta la cantidad de cationes o aniones (sales) en solución; cuanto mayor sea la cantidad de aniones o cationes, mayor será la lectura de **CE**. Los

iones generalmente asociados con la salinidad son Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ (cationes), o NO_3^- , SO_4^- , Cl^- , HCO_3^- , OH^- (aniones) (USDA, 2001).

En general, los valores de la **CE** 1:1 entre 0 y 0,8 dS/m son aceptables para el crecimiento general del cultivo. El maíz está considerado como moderadamente sensible, es decir, a valores de la **CE** > 1.40 dS/m (USDA, 2001).

El exceso de sales afecta el crecimiento de las plantas por:

- 1) Toxicidad directa (Boro).
 - 2) Destrucción del equilibrio iónico en la planta.
 - 3) Interferencia con el insumo de nutrientes.
 - 4) Reducción de la asimilabilidad de agua por descenso del potencial osmótico.
- Sodio en exceso, expresado como porcentaje de sodio intercambiable, puede deteriorar la estructura del suelo dispersando las arcillas del suelo (**USDA**, 2001).

La fracción de materia orgánica comprende todas las partículas de materia orgánica del suelo de menos de 2 mm y de tamaño superior a 0,053 mm. La materia orgánica en partículas es biológicamente y químicamente activa y forma parte de la reserva lábil (fácilmente descomponible) de materia orgánica del suelo (USDA-NRCS, 2011).

La materia orgánica del suelo está compuesta por todos los materiales orgánicos muertos, de origen animal o vegetal. Una pequeña fracción de la materia orgánica incluye materiales ligeramente transformados y productos que han sido completamente transformados, de color oscuro y de alto peso molecular, llamados compuestos húmicos (FAO, 2000).

El contenido de nutrientes de la materia orgánica es importante para las plantas. Por medio de la actividad de la flora y la fauna presentes en el suelo esos nutrientes son transformados en sustancias inorgánicas y pasan a estar disponibles para las plantas. A medida que los rendimientos aumentan, el uso correcto de fertilizantes minerales y las masas de las raíces aumentan el

contenido de materia orgánica del suelo en razón de la mayor cantidad de residuos que se incorporan (FAO, 2000).

La materia orgánica favorece la formación de una estructura estable de agregados en el suelo, por medio de la estrecha asociación de las arcillas con la materia orgánica. Esta asociación incrementa la capacidad de retención de agua ya que puede absorber de tres a cinco veces más de su propio peso, lo cual es especialmente importante en el caso de los suelos arenosos. La materia orgánica incrementa la retención de los nutrientes del suelo disponibles para las plantas, debido a su capacidad de intercambio de cationes (FAO, 2000).

La disponibilidad de los nutrientes es fundamental para el desarrollo de los cultivos. El contenido de nutrientes del suelo depende del material y el proceso de formación del suelo —el contenido original del suelo—, del abastecimiento y naturaleza de los fertilizantes, de la intensidad de la lixiviación y la erosión, de la absorción de los nutrientes por parte de los cultivos y de la capacidad de intercambio catiónico (**CIC**) del suelo (FAO, 2000).

Aunque la deficiencia de nutrientes en muchos casos puede ser fácilmente corregida, los suelos con mejor disponibilidad natural de nutrientes requerirán menores inversiones y, por lo tanto, muestran una aptitud natural para dar mejores rendimientos. El conocimiento de la necesidad de aplicar o no grandes cantidades de nutrientes en forma de fertilizantes, comparado con la disponibilidad de recursos, es un factor determinante para la recomendación de uso de la tierra (FAO, 2000).

El cultivo de maíz necesita ciertos elementos minerales en cantidades adecuadas para un buen crecimiento. Estos nutrientes se suministran generalmente del suelo y por la aplicación de. Aunque la planta de maíz utiliza 13 nutrientes diferentes, sólo se requieren tres en cantidades relativamente grandes: nitrógeno, fósforo y potasio. Estos son los nutrientes que más frecuentemente limitan la producción de maíz, pero el azufre y algunos micronutrientes como el zinc y el magnesio pueden ser limitaciones importantes (Lafitte, 1994).

En los suelos con baja fijación de fósforo, el manejo de este elemento es relativamente simple ya que bajas dosis pueden ser aplicadas al voleo o en bandas cercanas a los surcos. En los suelos que fijan fósforo, la fijación es mayor cuando es esparcido al voleo; en este caso, cuando el maíz se planta a mano, el fósforo puede ser aplicado en un hoyo cercano a la semilla. En el caso de siembra mecánica, debería ser colocado en un surco vecino a la línea de siembra y ligeramente por debajo de esta (FAO, 2001).

Temperaturas muy altas o muy bajas reducen la absorción del fósforo por las plantas. El maíz muestra claramente síntomas de deficiencia de fósforo en las etapas tempranas de su crecimiento cuando hay bajas temperaturas, lo que se expresa por un color púrpura de las hojas (FAO, 2001).

La acidez afecta la solubilidad del fósforo ya que bajo condiciones ácidas los fosfatos de hierro y aluminio son altamente insolubles en agua, mientras que en condiciones alcalinas los compuestos del fósforo con el magnesio, el calcio y el sodio son también insolubles. A medida que pasa el tiempo, el fósforo en esos compuestos recién formados se adhiere más firmemente. El mejor pH para la solubilidad del fósforo está entre 5,5 y 7,0 (FAO, 2001).

El potasio puede ser absorbido por las plantas tanto si es esparcido al voleo o si es colocado en surcos. Debido a su alto contenido salino, los fertilizantes potásicos no deberían ser colocados muy cerca de la semilla, ya que podrían dañar el embrión y afectar la germinación. Por lo tanto, cuando es aplicado en bandas, debe ser colocado al lado y por debajo de las semillas (FAO, 2001).

Cuando los residuos de las plantas de maíz se dejan en el campo, constituyen una fuente importante de potasio ya que solo el 30% de este elemento es tomado por el grano; el resto es devuelto al suelo en los tallos, las hojas y otras parte de las plantas. La mayor parte del potasio requerida por el cultivo es absorbida antes de la floración y mucho de este termina en la parte aérea en la madurez (FAO, 2001).

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La balanza comercial de maíz en México durante 2015, presentó un saldo negativo de 11.3 millones de toneladas, consecuencia de exportaciones por 0.73 millones de toneladas e importaciones por 12.35 millones de toneladas. Las importaciones de maíz en nuestro país presentan una tasa media de crecimiento anual de 7.8% entre 2006 y 2015, para ubicarse en este último en un volumen de 12.05 millones de toneladas, el nivel más alto de la historia, por lo que se hace trascendental incrementar el rendimiento del cultivo del maíz de temporal, para invertir en un futuro esta tendencia (FIRA, 2016).

Por otra parte, existen una serie de factores que limitan la producción de maíz, como la baja cantidad de lluvia e irregular distribución, heladas tempranas, granizadas, profundidad de suelo, textura de la capa arable, pendiente y baja fertilidad de los suelos, plagas, e incluso el uso de semillas de bajo rendimiento y poco resistentes a las sequías y al acame. De tal situación se derivan diversos problemas, como la seguridad alimentaria, pues se pone en riesgo la producción en cantidad y calidad del maíz, también se verá afectado el bienestar de los agricultores (Altieri y Nicholls, 2009), principalmente su economía. En este sentido, ante tal problemática se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son las mejores interacciones suelo-clima, que permitirán identificar las zonas potenciales para el cultivo del maíz de temporal en el estado de Tlaxcala?

4 JUSTIFICACIÓN

Aun cuando el cultivo de maíz ha presentado numerosos problemas –económicos, políticos, ambientales, particularmente– y que además se han agudizado en los últimos años, al entrar a una dinámica mundial de compra-venta del maíz, se niega a desaparecer, y la razón principal de ello es que sigue siendo el sustento alimenticio de la familia campesina mexicana, y es el eje en torno al cual se articula la mayor parte de las actividades en la agricultura tradicional (Gil y Álvarez, 2007).

Entre las plantas cultivadas a nivel mundial el maíz se ubica en primer término, superando al trigo y al arroz. Estados Unidos es el principal productor mundial con 353,699,441 toneladas, mientras que México es séptimo productor con 22,663,953 toneladas en 2013 (SIAP, 2016). En 2016 a nivel nacional Tlaxcala se encuentra en el lugar sexto en cuanto a rendimiento con 2.87 ton/ha. Mientras que Jalisco se ubica en el primer lugar con un rendimiento de 6.19 ton/ha (SIAP, 2017). Es el de mayor diversidad no sólo genética sino también en uso. En el estado de Tlaxcala el 72.9% de la superficie estatal está destinada a la agricultura (INEGI, 2014), de ésta la participación de la superficie agrícola de temporal fue de 89.43%. Del total de la superficie de temporal el 47.35% corresponde al principal cultivo en el estado, que es el maíz (SAGARPA, 2015).

Por ser Tlaxcala un estado eminentemente agrícola, y donde el rendimiento del maíz no sólo se ve afectado por la variabilidad del clima, si no que en la mayoría de las actividades agrícolas no se consideran las propiedades del suelo, resulta de gran importancia identificar las zonas potenciales de la distribución de maíz, a partir de la relación existente entre las variables del clima y del suelo.

5 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

5.1. Objetivo general

Identificar las mejores interacciones suelo-clima, en el rendimiento del maíz de temporal, para el estado de Tlaxcala.

5.2. Objetivos específicos

Identificar el periodo de crecimiento del maíz, con base a los requerimientos climáticos.

Analizar las propiedades del suelo que afectan el cultivo del maíz.

Identificar las superficies aptas para el cultivo del maíz de temporal, mediante la Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica.

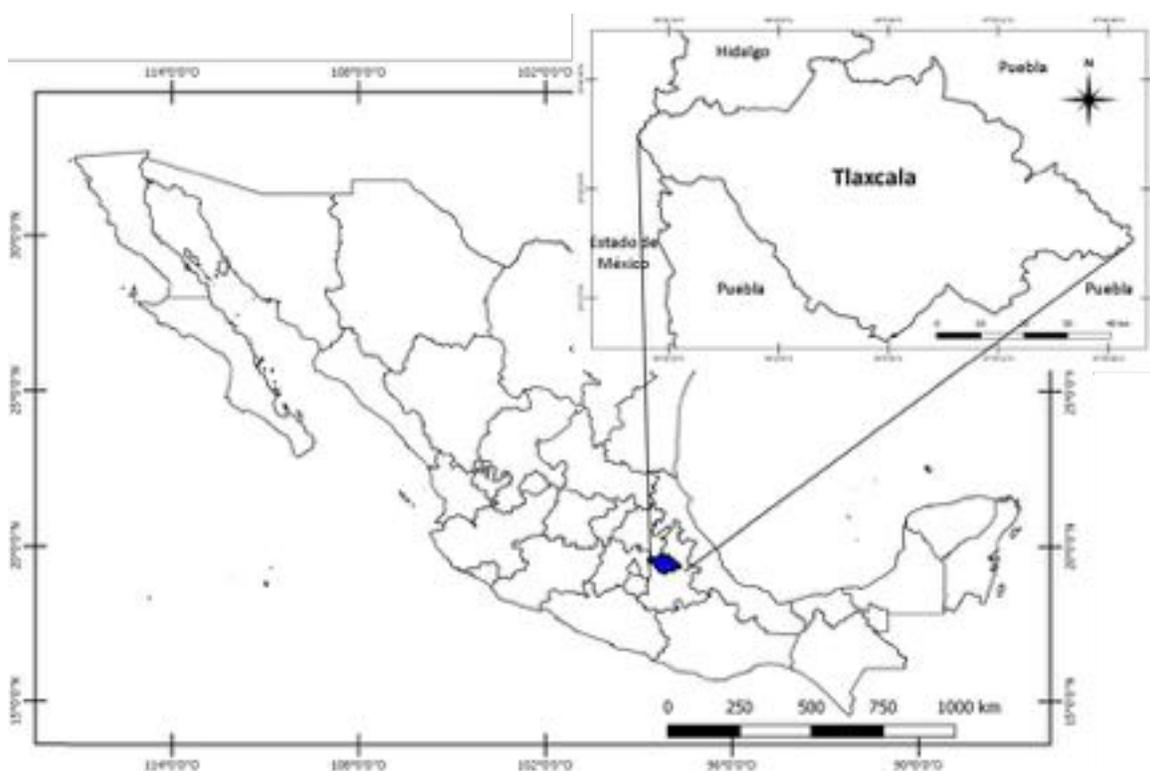
5.3. Hipótesis

La dinámica de la relación suelo-clima permitirá determinar de manera puntual las zonas potenciales para el cultivo del maíz de temporal en el estado de Tlaxcala.

6 MÉTODOLÓGÍA

6.1. Sitio de estudio

Tlaxcala se ubica entre los 19°44'39" y los 19°05'26" de latitud norte; y a los 97°36'46" y los 98°43'08" de longitud oeste. Colinda al norte con Hidalgo y Puebla; al este y sur con Puebla; al oeste con Puebla, Estado de México e Hidalgo, Mapa 1. Tlaxcala representa el 0.2% del territorio nacional, está integrada por 60 municipios (INEGI, 2014). A nivel regional, la entidad se divide en tres Distritos de Desarrollo Rural (**DDR**), el 163, ubicado en Calpulalpan, el 164, con sede en la ciudad de Tlaxcala y 165 con residencia en Huamantla.



Mapa 1. Estado de Tlaxcala, México (Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI)

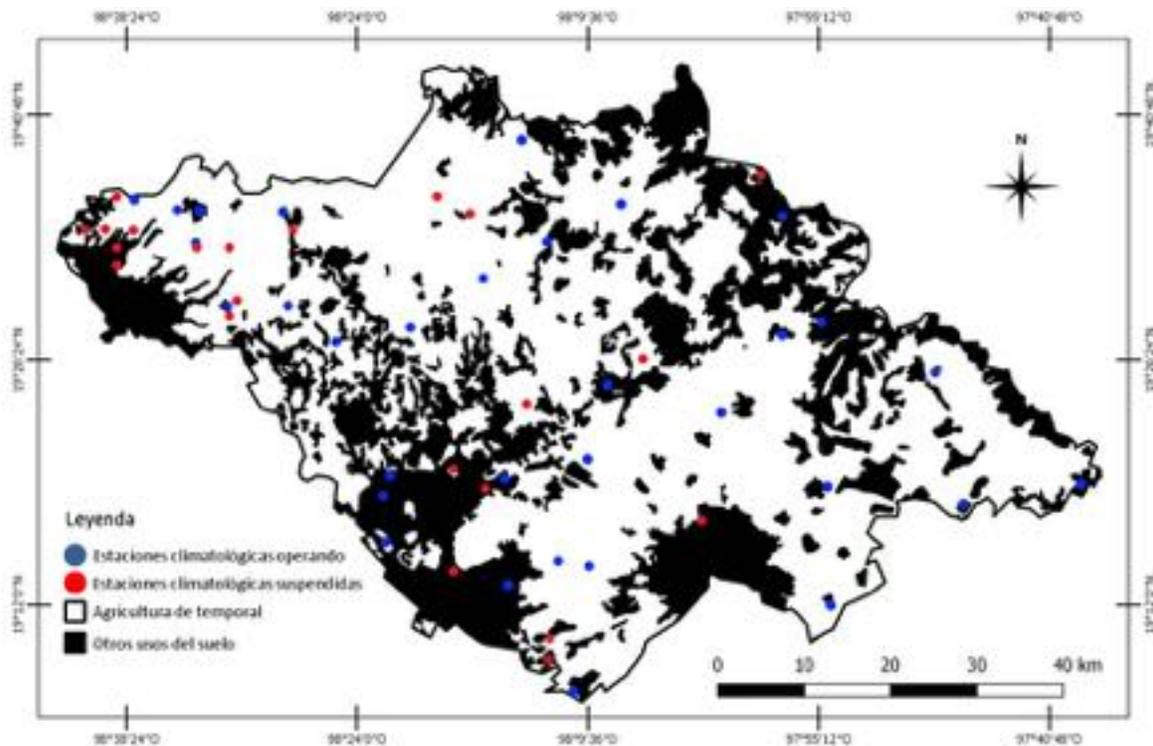
6.2. Bases de datos

La base de datos (**BD**) que se utilizó corresponde a las variables climáticas (precipitación, temperatura máxima y mínima), del suelo (tipo de suelo, textura, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, contenido de nitrógeno, fósforo y potasio), del modelo digital de elevación (altitud y pendiente) y

de la Serie **V** de **INEGI** (Uso de suelo y vegetación) para delimitar el área potencial.

6.2.1. Datos climáticos

Se analizó la serie de tiempo (**ST**) diaria de las variables de precipitación (**PCP**), temperatura máxima (**T_{máx}**) y mínima (**T_{mín}**), de 55 estaciones climatológicas del estado de Tlaxcala con diferente periodo, Mapa 2, obtenidas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2010), con fecha de emisión 09 de junio de 2017. En el Mapa 2, en la categoría de otros usos del suelo se incluye: Agricultura de riego, bosques, asentamientos humanos, cuerpos de agua, matorrales, pastizal, pradera de alta montaña, sin vegetación aparente, vegetación secundaria y zona urbana.



Mapa 2. Ubicación de las estaciones climatológicas (Fuente: Elaboración propia con datos de **INEGI** y **SMN**)

De las 55 estaciones climatológicas del estado de Tlaxcala, sólo 33 de ellas están operando, Tabla I, el primer criterio considerado para descartar estaciones es que del periodo de inicio y fin de registro de datos (1991-2015), tengan datos por lo

menos hasta el 2013. En este primer filtro se descartan las estaciones 29019 San Antonio Calpulalpan (1969-2006), 29024 Sanctórum (1966-2009), 29053 Terrenate (1981-2011) y 29172 I.T.A. 029 Xocoyucan (2002-2005), para las 29 restantes se les aplicó el software RClimDex para el análisis de calidad de datos y el RHtests para la homogeneidad de datos y se descartaron aquellas que tuvieron datos faltantes > 10%.

Tabla I. Estaciones climatológicas operando

Longitud (°)	Latitud (°)	Estación	Nombre	Fecha inicio	Fecha final
-98.14	19.4156	29002	Apizaco	01/01/1928	31/12/2013
-98.2028	19.5556	29003	Atlanga	01/01/1961	31/12/2013
-98.269	19.52	29004	Cuamantzingo	01/01/1969	30/09/2015
-97.77	19.299	29005	Cuapiaxtla	24/08/1962	31/12/2013
-97.6472	19.3181	29007	El Carmen Tequexquitla	01/03/1966	31/12/2013
-98.345	19.472	29010	Hueyotlipan	01/01/1961	31/03/2015
-97.9111	19.3158	29011	Huamantla	25/10/1942	31/12/2013
-98.535	19.493	29016	Nanacamilpa (DGE)	01/01/1985	30/09/2015
-98.568	19.555	29019	San Antonio Calpulalpan	01/01/1969	31/12/2006
-98.472	19.493	29024	Sanctórum	01/07/1966	30/06/2009
-98.6319	19.5969	29025	San Marcos Huaquilpan	01/08/1966	31/12/2013
-97.9075	19.1997	29026	Zitlaltepec	01/02/1966	31/12/2013
-98.0214	19.3886	29027	Tocatlán	01/02/1966	31/12/2013
-98.2467	19.3239	29030	Tlaxcala de Xicohténcatl (DGE)	01/10/1961	31/12/2013
-98.1256	19.5925	29032	Tlaxco	01/12/1943	31/12/2013
-98.478	19.585	29034	Zoquiapan	01/04/1966	30/09/2015
-98.5639	19.5861	29035	Calpulalpan	01/10/1947	30/09/2015
-98.3661	19.3267	29040	Ixtacuixtla	20/11/1974	31/12/2013
-98.3706	19.2614	29041	Tepetitla	01/09/1974	31/12/2013
-98.1606	19.3428	29042	Amamax de Guerrero	01/10/1980	31/12/2013
-98.373	19.307	29043	E.T.A. 161 Xocoyucan	01/02/1975	31/12/2013
-98.4222	19.4578	29047	Españita	01/03/1977	31/12/2013
-98.191	19.243	29050	Teolocholco	01/01/1985	30/11/2013
-97.9581	19.4647	29051	Toluca de Guadalupe	01/08/1979	31/12/2013
-98.2289	19.6553	29052	El Rosario	01/01/1981	31/12/2013
-97.917	19.477	29053	Terrenate	01/01/1981	31/12/2011
-97.7989	19.4281	29151	Altzayanca	19/05/1985	31/12/2013
-98.159	19.238	29161	Acxotla del Monte	01/06/1990	31/12/2013
-98.587	19.587	29162	Benito Juárez	01/04/1933	31/12/2013
-97.958	19.581	29165	El Epazote	01/10/1984	31/12/2013
-98.2431	19.2194	29169	Zacatelco	01/10/1994	31/12/2013
-98.1753	19.115	29170	San Pablo del Monte	12/03/1999	31/12/2013
-98.373	19.307	29172	I.T.A. 029 Xocoyucan	01/01/2002	31/12/2005

Fuente: Elaboración propia con datos del **SMN**

De las 22 estaciones que están suspendidas, se descartan 21 estaciones ya que ninguna de ellas cumple con el periodo de años requerido. Sólo se analizó con el software RCLimDex y RHtests la estación 29014 Límites (1967-2014) que se encuentra en Calpulalpan, ya que cumple con el requerimiento mínimo del periodo de años con registros.

6.2.2. Datos de maíz de temporal

La base de datos del rendimiento del maíz por municipio, del estado de Tlaxcala, se obtuvo del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (**SIAP**), del periodo 2003-2016 (SIAP, 2017). En la Tabla II, se presentan los rendimientos del maíz (t/ha) de 12 municipios, en el Anexo A se visualiza la tabla completa.

Tabla II. Rendimientos de maíz (t/ha)

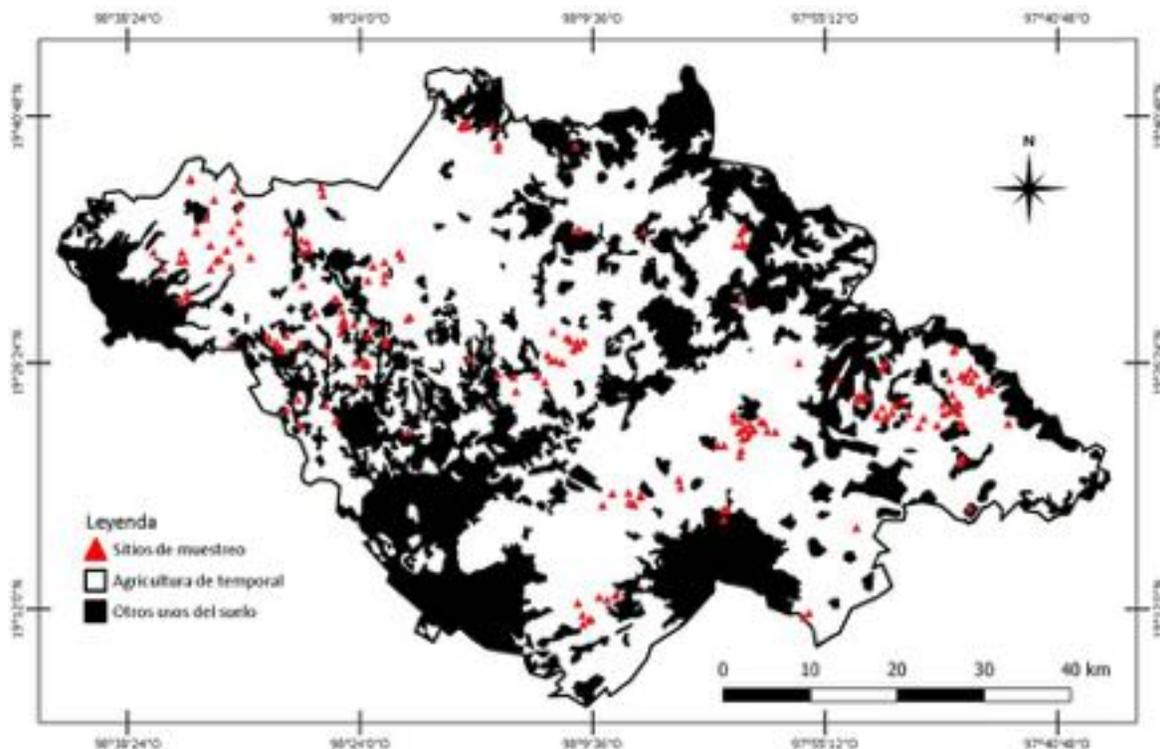
Municipio	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
El Carmen Tequexquitta	2.0	2.3	0.4	2.0	1.8	3.0	0.9	2.5	0.0	2.3	2.3	3.0	0.9	3.1
Españita	2.4	2.9	2.7	2.8	3.1	3.1	2.6	2.6	1.9	3.0	2.6	2.7	2.5	2.3
Huamantla	2.5	2.4	0.6	2.0	1.7	3.0	1.9	2.5	2.4	2.9	3.0	3.0	2.4	3.1
Hueyotlipan	2.4	2.7	2.8	2.6	2.9	3.2	2.6	2.7	1.7	3.0	2.6	2.7	2.5	2.4
Ixtacuixtla de Mariano Matamoros	1.3	1.9	1.8	2.0	1.9	1.7	2.0	2.0	2.3	1.4	2.0	2.6	2.5	3.0
Ixtenco	2.4	2.4	1.0	2.2	2.5	3.0	2.7	2.5	2.5	2.9	2.8	3.0	2.5	3.1
La Magdalena Tlaltelulco	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	1.7	1.5	2.0	3.5	3.0	3.0
Lázaro Cárdenas	2.4	2.4	0.5	2.0	1.8	3.0	1.1	2.5	0.4	2.9	3.0	3.0	3.1	3.2
Mazatecochco de José María Morelos	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.2	2.5	2.0	2.5	2.0	3.0
Muñoz de Domingo Arenas	2.5	2.5	2.8	2.6	2.8	3.2	2.6	2.6	1.8	3.4	2.5	2.6	2.5	2.3
Nanacamilpa de Mariano Arista	2.7	3.0	2.9	2.4	3.1	3.2	2.6	2.5	0.6	3.2	2.6	2.7	2.6	2.3
Nativitas	1.2	1.9	1.8	2.0	2.0	1.7	2.0	2.0	2.6	2.5	2.0	2.4	2.5	3.0

Fuente: Elaboración propia con datos del **SIAP**

6.2.3. Datos del suelo

La **BD** corresponde a 273 puntos geo-referenciados del estado de Tlaxcala (MasAgro, 2016). Las variables que se evaluaron son: el **tipo de suelo**, **densidad aparente** y **textura** para las propiedades *físicas* y **pH**, **conductividad eléctrica**, **materia orgánica**, **contenido de nitrógeno**, **fósforo** y **potasio** para las propiedades *químicas*. Los análisis de suelo se realizaron del 2012 al 2014.

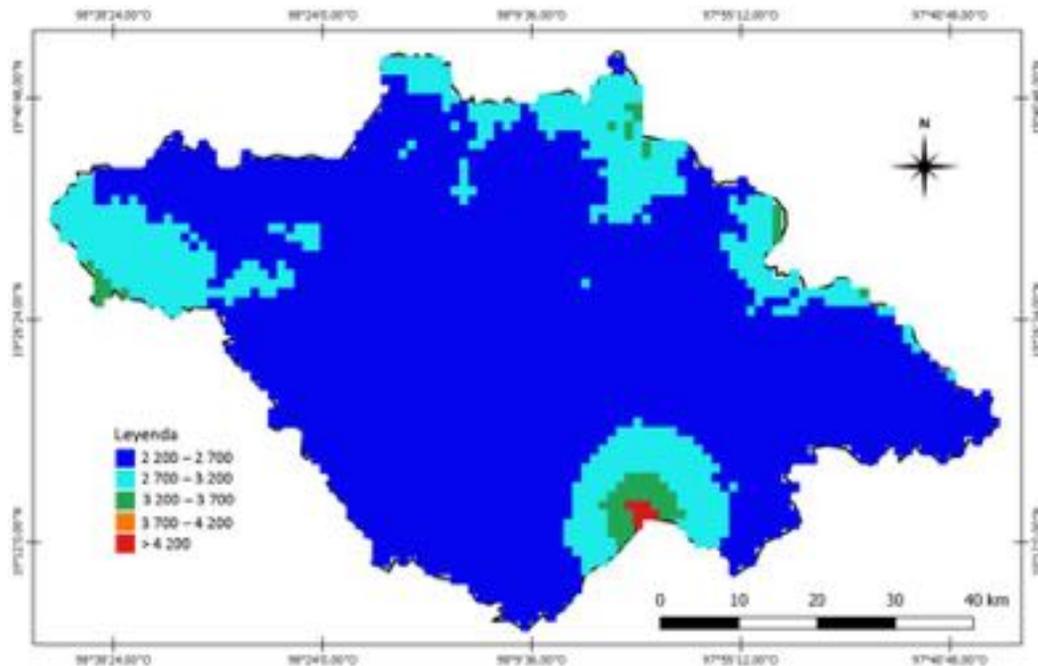
Se realizó el análisis de calidad de datos y se descartaron 41 sitios de muestreo que tuvieron algunas inconsistencias en la información —las coordenadas geográficas fuera del espacio geográfico de la zona de estudio y el porcentaje total de la textura mayor del 100 %— En el Mapa 3, se presenta los sitios de muestreo de los análisis de suelo en el estado de Tlaxcala, en la clasificación de otros usos del suelo se incluye: Agricultura de riego, bosques, asentamientos humanos, cuerpos de agua, matorrales, pastizal, pradera de alta montaña, sin vegetación aparente y vegetación secundaria.



Mapa 3. Ubicación de los estudios de suelo (Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI y MasAgro)

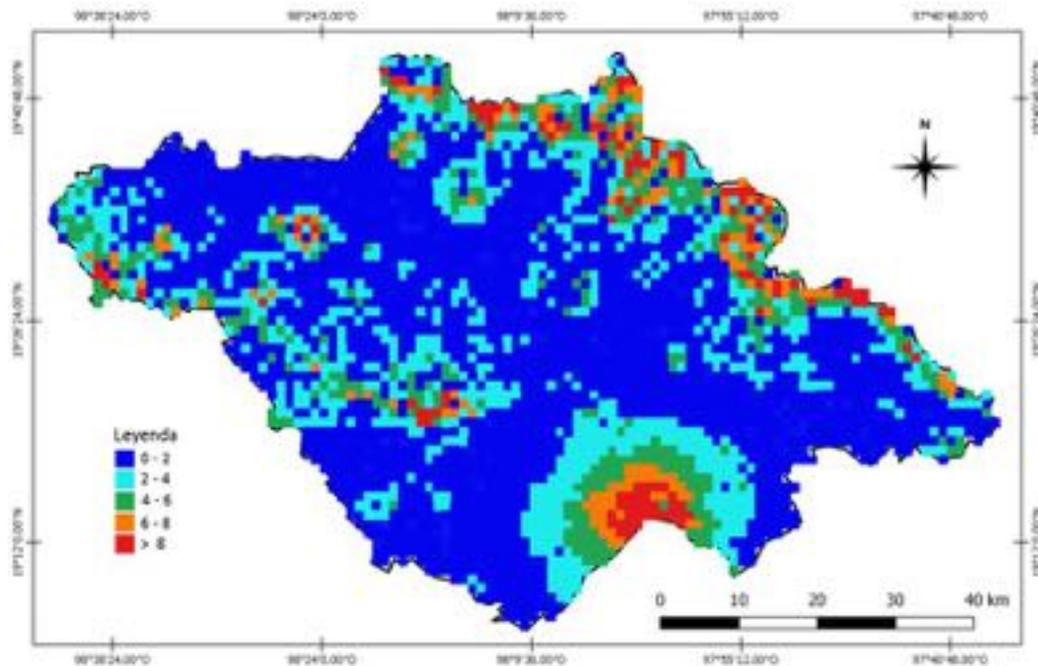
6.2.4. Datos del Modelo Digital de Elevación

Se consideró la capa de **altitud** y **pendiente**. En el Mapa 4, se presenta la altitud para el Estado, con un gradiente altitudinal que va de 2,200 a 4,200. Este conjunto de datos vectoriales se obtuvo del Portal de Geoinformación, Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (CONABIO, 2016).



Mapa 4. Altitud, estado de Tlaxcala (Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI y CONABIO)

En el Mapa 5, se presenta la capa de la pendiente para el estado de Tlaxcala, obtenida de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Guevara y Arroyo, 2016).

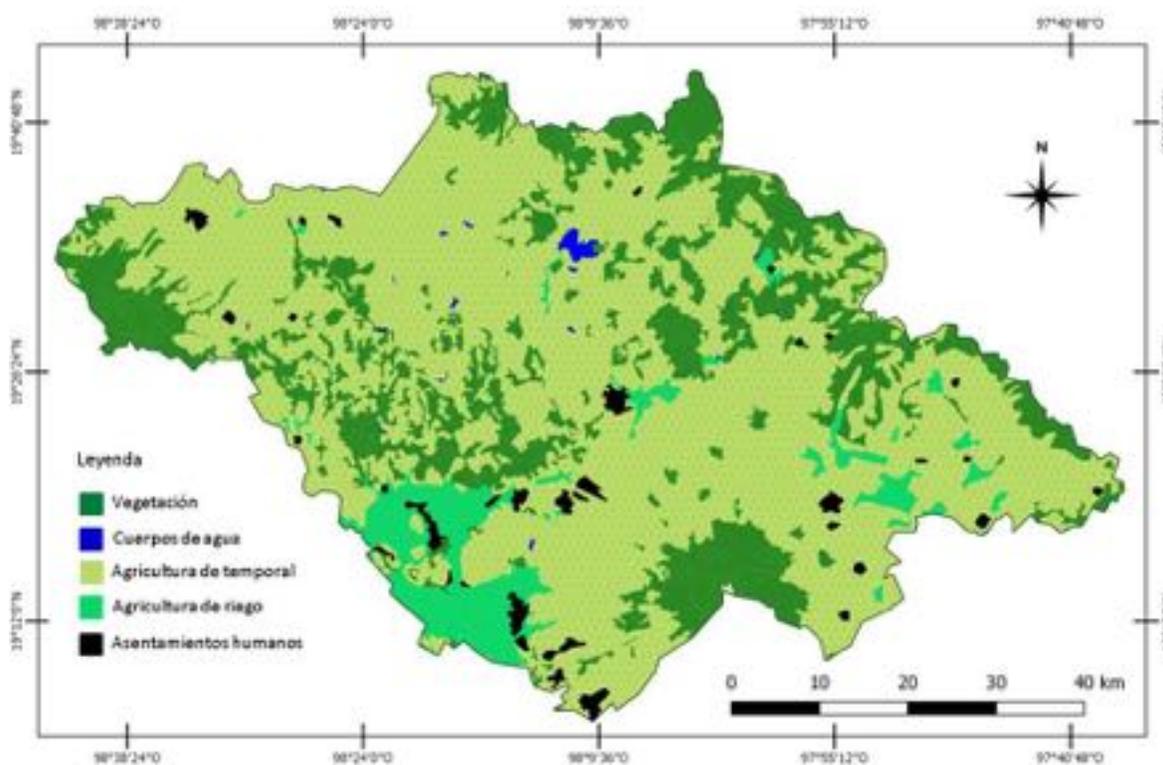


Mapa 5. Pendiente, estado de Tlaxcala (Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI y CONABIO)

6.2.5. Datos de la SERIE V de INEGI

La capa de **uso de suelo y vegetación** (Serie **V** de **INEGI**) se utilizó para delimitar el área potencial, con el fin de considerar solo el área disponible para la agricultura de temporal, ya que se pueden encontrar zonas potenciales para el cultivo de maíz de temporal, pero éstas pueden estar en otros usos de suelo, por ejemplo, zonas con bosque. Este conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación se obtuvo del Portal de Geoinformación, Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (INEGI, 2013).

En el Mapa 6, se visualiza la Serie **V** de **INEGI**, donde, con el color verde oscuro se identifican las áreas con vegetación, de color azul los cuerpos de agua, de color verde agua la agricultura de riego, de color negro los asentamientos humanos y la agricultura de temporal se representa con el color verde claro.



Mapa 6. Serie **V** de **INEGI** (Fuente: Elaboración propia con datos de **INEGI** y **CONABIO**)

6.3. RClimDex y RHtests

RClimDex es desarrollado y mantenido por Xuebin Zhang y Feng Yang del Departamento de Investigación Climática del Servicio Meteorológico de Canadá. Su desarrollo inicial fue financiado por la Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional a través del Proyecto de Cambio Climático de la Cooperación Canadá–China (C5). Lisa Alexander, Francis Zwiers, Byron Gleason, David Stephenson, Albert Klan Tank, Mark New, Lucie Vincent, y Tom Peterson hicieron importantes contribuciones al desarrollo y prueba del paquete.

RClimDex está diseñado para proporcionar una interfase amigable para calcular índices de extremos climáticos. Calcula los 27 índices básicos recomendados por el Equipo de Expertos de **CCI/CLIVAR** para “Climate Change Detection Monitoring and Índices” (**ETCCDMI**) así como también otros índices de temperatura y precipitación con límites definidos por el usuario.

RClimDex incluye un procedimiento de control de calidad de datos, el cual es un requisito previo para el cálculo de los índices. El control de calidad que RClimDex desarrolla es el siguiente:

- 1) Cambia todos los datos faltantes (actualmente codificados como -99.9) en un formato interno que reconoce R (i.e. NA, no available).
- 2) Cambia todos los valores no razonables por NA. Estos valores incluyen:
 - a) Cantidades de precipitación diaria menores que cero.
 - b) Temperatura máxima diaria menor que temperatura mínima diaria.

Además, el análisis de calidad de datos identifica valores atípicos (“outliers”) en temperatura máxima y mínima diaria. Los valores atípicos son valores diarios que se encuentran fuera del intervalo definido por el usuario. Actualmente este intervalo se define como la media más/menos **n** veces la desviación estándar del valor para el día. Donde la desviación estándar para el día y **n** es una entrada del usuario, y la media se calcula a partir de la climatología del día (Zhang y Yang, 2004).

A la **BD** diaria de 30 estaciones climatológicas se aplicó el software RClimDex, se consideraron las variables de **PCP**, **Tmáx** y **Tmín**, del periodo 1991-2014. Para cada estación climatológica el software genera en la carpeta **Log** los archivos 29003 Atlanga_prcpPLOT.pdf, 29003 Atlanga_tmaxPLOT.pdf, 29003 Atlanga_tminPLOT.pdf y, los cuales se utilizaron para analizar si la serie de tiempo tiene un comportamiento extraño y ver la factibilidad de detectar un valor extremo.

En la misma carpeta el software también genera cuatro archivos en formato cvs, los cuales son: 29003 Atlanga_nastatistic.cvs, 29003 Atlanga_prcpQC.cvs, 29003 Atlanga_tempQC.cvs y 29003 Atlanga_tepstdQC.cvs. El primer archivo contiene la información de datos faltantes de las tres variables, éste muestra la variable a evaluar, el año y los datos faltantes en cada mes. Posteriormente, se realiza la estadística de la serie de tiempo para calcular la cantidad de datos faltantes de cada una de las variables. El segundo y tercer archivo proporciona información de valores como, precipitación negativa o un valor muy alto de precipitación diaria y casos en que la **TMÍN** sea mayor que la **TMÁX**, mientras que el cuarto archivo nos permite revisar aquellos valores que considera el software como valores extremos, los cuales se tienen que revisar y validar, o en su defecto si esto no es posible se tienen que colocar como dato faltante, los cuales se identifican con -99.9.

Por último, las estaciones climatológicas seleccionadas deben cumplir con los siguientes parámetros:

- 1) Que tuvieran menos del 10 % de datos faltantes.
- 2) Que del periodo 1991-2015 tuvieran al menos 15 años de datos.

El objetivo de la homogeneización de datos climáticos es ajustar las observaciones, si es necesario, para que las variaciones temporales en los datos ajustados sean causadas sólo por procesos climáticos, el software RHtests permite realizar esta homogenización (ETCCDI, 2017).

A la **ST** diaria de las 19 estaciones climatológicas seleccionadas, se les aplicó el software RHtestsV4.r, se consideró la variable de **PCP** del periodo 1961-2014. El

software genera el archivo **29002 Apizaco_prcpMLY1mm_U.pdf**, el cual nos permite visualizar gráficamente si la **ST** es homogénea.

6.4. Periodo de crecimiento

Se calculó el periodo de crecimiento (**PC**) a escala pentadal (cada cinco días), utilizando la metodología propuesta por Bernal *et al.* (2017). La cual consiste en asegurar un método objetivo y sistemático para determinar el periodo de crecimiento, aplicando la descomposición de una función discreta en sus $\frac{n}{2}$ armónicos, debido a que la variable de precipitación tiene alta variabilidad y fuerte intermitencia, pues no necesariamente llueve a escala diaria en forma continua, en esta escala pentadal tendremos del orden de $\frac{73}{2}$ armónicos.

El **PC** es el número de días durante el año en el que existen condiciones propicias de temperatura y humedad para el desarrollo del cultivo (**FAO**, 1997).

El inicio del **PC** se considera cuando la **PCP** es mayor o igual a 0.5 de la evapotranspiración de referencia (**ET_o**), es decir, **PCP** = 0.5 **ET_o**. Esto indica, que la cantidad de agua es suficiente para la germinación de semillas de los cultivos. En el **PC** puede o no haber un periodo húmedo, éste se define como el intervalo en el que la **PCP** > **ET_o**. Cuando se presenta un periodo húmedo, se satisfacen tanto las demandas de evapotranspiración de los cultivos, como el déficit de humedad en el perfil del suelo. El **PC** finaliza cuando la **PCP** ≤ 0.5 **ET_o**, después del período húmedo (Pájaro y Ortiz, 1992).

Para calcular el **PC** se requiere tener el valor de la **ET_o**, para esto se consideró la recomendación del panel de expertos de la **FAO**, (2006). El cual es un nuevo procedimiento estándar denominado, método combinado de Penman-Monteith para la evapotranspiración de referencia.

Se han desarrollado procedimientos y recomendaciones para la utilización del método de la **FAO** Penman-Monteith con datos climáticos limitados, eliminando por lo tanto la necesidad de utilizar otros métodos para la estimación de la

evapotranspiración y creando una base consistente y transparente para una estandarización universal de los cálculos de los requerimientos de agua de los cultivos.

No se recomienda el uso de otras denominaciones como **ET** potencial, debido a las ambigüedades que se encuentran en su definición. Una excepción posible es el método de Hargreaves que se desarrolló en 1985, el cual ha producido resultados razonables de **ET_o** con cierta validez global.

La ecuación general **FAO** Penman-Monteith que se utilizó para calcular la **ET_o** es:

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

Donde:

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).

R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹).

G = Flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹).

T = Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C).

u_2 = Velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹).

e_s = Presión de vapor de saturación (kPa).

e_a = Presión real de vapor (kPa).

$(e_s - e_a)$ = Déficit de presión de vapor (kPa).

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹).

γ = Constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

Una vez calculada la **ET_o** con la ecuación (1) se calculó a escala pentadal (cada cinco días) el **PC**, estas pentadas son acumuladas para las variables de **PCP** y **ET_o**, mientras que para las variables de **T_{máx}** y **T_{mín}** son promedios, para un año de datos diarios le corresponden 73 pentadas.

6.5. Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica

Se utilizó la Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica, para obtener las áreas potenciales del maíz de temporal. Este enfoque es útil ya que permite evaluar múltiples variables, las cuales son ponderadas de acuerdo a su importancia relativa en las condiciones óptimas de crecimiento del maíz de temporal. El objetivo es encontrar soluciones a los problemas de toma de decisiones caracterizados por múltiples alternativas que pueden ser evaluadas mediante criterios de decisión (Kihoro *et al.* 2013).

En la Figura 1, se esquematiza la metodología utilizada, tomando como base el objetivo principal que es determinar las zonas potenciales de maíz de temporal, las cuales poseen las mejores condiciones edafoclimáticas, en función de los requerimientos para el desarrollo del maíz de temporal.

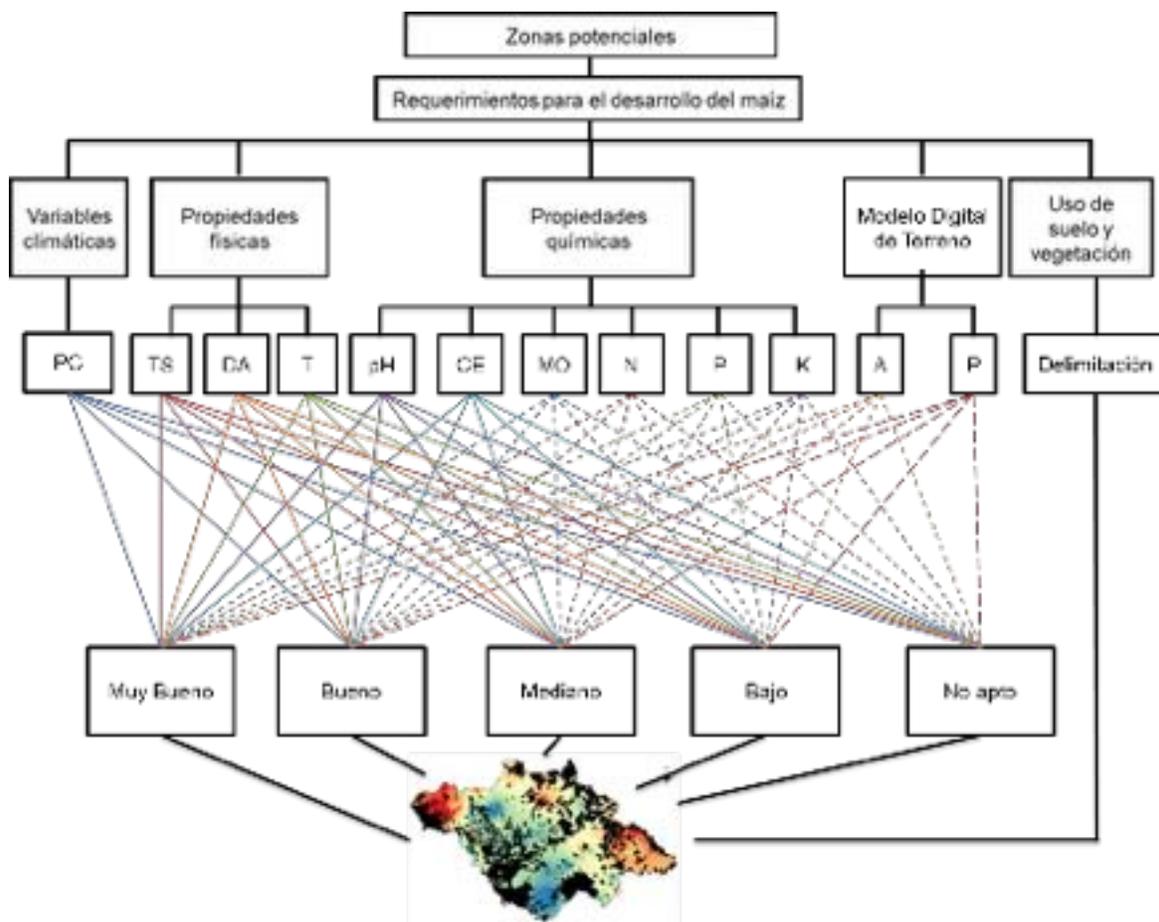


Figura 1. Esquematización de la Metodología (Fuente: Elaboración propia)

Se realizó el análisis de calidad de datos, de las variables climáticas y del suelo. Las variables consideradas son:

- a) El periodo de crecimiento (**PC**) para la variable climática.
- b) El tipo de suelo (**TS**), densidad aparente (**DA**) y textura (**T**) para las propiedades físicas del suelo.
- c) pH, conductividad eléctrica (**CE**), materia orgánica (**MO**), cantidad de nitrógeno (**N**), fósforo (**P**) y potasio (**K**) para las propiedades químicas del suelo.
- d) Altitud (**A**) y pendiente (**PDT**) para el modelo digital del terreno.

Se interpolaron las variables climáticas y del suelo, con el método de ponderación inversa a la distancia, en éste los puntos de muestreo se ponderan durante la interpolación de tal manera que la influencia de un punto en relación con otros, disminuye con la distancia desde el punto desconocido que se desea crear (**QGIS**, 2017).

Como todas las variables consideradas tienen diferentes unidades, se estandarizó la información mediante el procedimiento Fuzzy (0: menor aptitud y 1: mayor aptitud) mediante la ecuación (Voogd, 1982):

$$X_{std} = \frac{X_i - V_{mín} X_i}{V_{máx} X_i - V_{mín} X_i} \dots\dots\dots \text{ecuación (2)}$$

Donde:

X_{std} = Valor estandarizado.

X_i = Valor de cada dato de la variable a estandarizar, así como:

$V_{mín} X_i$ = Valor mínimo de la variable.

$V_{máx} X_i$ = Valor máximo de la variable.

Una vez que se obtiene el valor estandarizado de cada variable con la ecuación (2), al valor resultante se multiplica por 100, y el valor de 0 corresponde a menor aptitud y 100 a mayor aptitud, esto con la finalidad de que al convertir de formato **raster** a **vectorial** con el software Quantum **GIS (QGIS)**, se tenga una

representación igual que si se tomaran los valores originales de la variable evaluada.

En esta investigación la ponderación de las variables, así como la clasificación de las cinco categorías (muy bueno, bueno, mediano, bajo y no apto) de aptitud del maíz a evaluar, se realizó con base en la revisión bibliográfica, (Ceballos *et al.* 2003, Ceballos *et al.* 2008, Ibarra *et al.* 2008, SIAP, 2016 y Sotelo *et al.* 2016), la cual consistió en determinar la importancia relativa de cada variable considerando su significado en términos de aptitud del terreno para el maíz. Es decir, cada variable se definió asignándole valores de 0 a 100 de menor a mayor importancia, respectivamente, Tabla III y IV.

Tabla III. Ponderación de las variables

Variable	Valores	Ponderación
Periodo de crecimiento	115 – 175	100
Altura	2 200– 4 200	90
Tipos de suelo	11	85
Propiedades físicas	3	30
Propiedades químicas	6	30
Textura del suelo	7	20
Pendiente	0 – 18	10

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

Tabla IV. Ponderación de las cinco categorías

Categoría	Ponderación
Muy Bueno	100
Bueno	90
Mediano	75
Bajo	20
No apto	10

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

Una vez que se realiza la ponderación, considerando los requerimientos para el cultivo de maíz, para cada variable se obtiene un mapa con zonas potenciales de muy bueno hasta no apto, para obtener el mapa general que integra las zonas potenciales de todas las variables se determina para cada pixel la aptitud del

terreno para el maíz mediante la combinación lineal ponderada con la ecuación mencionada en Sotelo *et al.* (2016):

$$A = \sum_{i=1}^n W_i X_i \dots\dots\dots \text{ecuación (3)}$$

Donde:

A = Aptitud potencial para el cultivo de maíz.

W_i = Ponderación de la variable i .

X_i = Valor estandarizado de la variable i para cada pixel.

Para llevar a cabo esto, se utilizó el Structured Query Language (**SQL**), el cual es un lenguaje de programación estándar e interactivo para la obtención de información desde una base de datos, en un ambiente **SIG** a partir de los atributos de los mapas criterio, se van obteniendo las zonas potenciales para el cultivo del maíz, las cuales poseen las mejores condiciones edafoclimáticas en función de los requerimientos para el desarrollo del maíz.

Por último, se delimitan las áreas potenciales mediante las cartas de uso de suelo y vegetación para obtener las zonas potenciales de maíz de temporal, ya que las zonas de agricultura de riego, bosques, asentamientos humanos, cuerpos de agua, matorrales, pastizal, pradera de alta montaña, sin vegetación aparente, vegetación secundaria, son importantes, pero no son propicias para la agricultura (Lasso *et al.* 2010).

Es importante mencionar que se utilizó software disponible como son: el paquete estadístico R versión 3.3.1 (2016-06-21) plataforma: x86_64-w64-mingw32/x64 (64-bit), ClimDex para el análisis de calidad de datos, Htests para la homogenización de los datos y Quantum GIS versión 2.14.3 Essen el cual es un sistema de información geográfica libre y de código abierto que permite visualizar, analizar y editar todo tipo de datos georreferenciados.

7. RESULTADOS

7.1. Análisis de los datos de maíz de temporal

En la Tabla V, se presenta los datos del rendimiento del maíz, si consideramos el rendimiento promedio del periodo evaluado, Españita y Tetla de la Solidaridad (renglón en color negro) presentan el mayor rendimiento con 2.7 t/ha, mientras que el de menor rendimiento es El Carmen Tequexquitla con 1.9 t/ha (sombreado el renglón en color rojo). Si consideramos el mejor rendimiento por año destaca San Pablo del Monte (2014) con un rendimiento de 3.7 t/ha y con 3.6 t/ha San Lucas Tecopilco (2016), Chiautempan (2014) y Sanctorum de Lázaro Cárdenas (2012) (rendimiento/año en color azul). Es importante destacar que los mejores rendimientos de un año en particular se han presentado recientemente. Un año que sería interesante analizar es 2011, en el cual se presentaron heladas en el altiplano mexicano (6-11 septiembre) y que en el estado de Tlaxcala el impacto fue diferenciado, debido a que se presentaron rendimientos de 3.2 t/ha y en algunos municipios como El Carmen Tequexquitla se perdió toda la cosecha.

Tabla V. Rendimientos de maíz (t/ha)

Municipio	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Chiautempan	1.9	1.9	1.1	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.6	3.5	3.5
El Carmen Tequexquitla	2.0	2.3	0.4	2.0	1.8	3.0	0.9	2.5	0.0	2.3	2.3	3.0	0.9	3.1
Españita	2.4	2.9	2.7	2.8	3.1	3.1	2.6	2.6	1.9	3.0	2.6	2.7	2.5	2.3
Papalotla de Xicohténcatl	1.9	1.9	1.0	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.2	2.3	2.0	2.5	3.5	3.0
San Lucas Tecopilco	1.9	1.9	1.1	2.0	2.0	1.7	2.0	2.0	2.9	2.0	2.0	3.2	3.4	3.6
San Pablo del Monte	1.9	1.9	1.0	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.0	2.3	2.0	3.7	2.5	3.0
Sanctorum de Lázaro Cárdenas	2.6	2.6	2.7	2.6	2.9	3.2	2.6	2.6	0.6	3.6	2.6	2.8	2.7	2.4
Tetla de La Solidaridad	2.5	2.4	2.9	2.5	2.8	3.1	2.6	2.5	2.2	3.4	2.7	2.7	2.5	2.3

Fuente: Elaboración propia con datos del **SIAP**

7.2. Análisis de calidad de datos con RClmDex

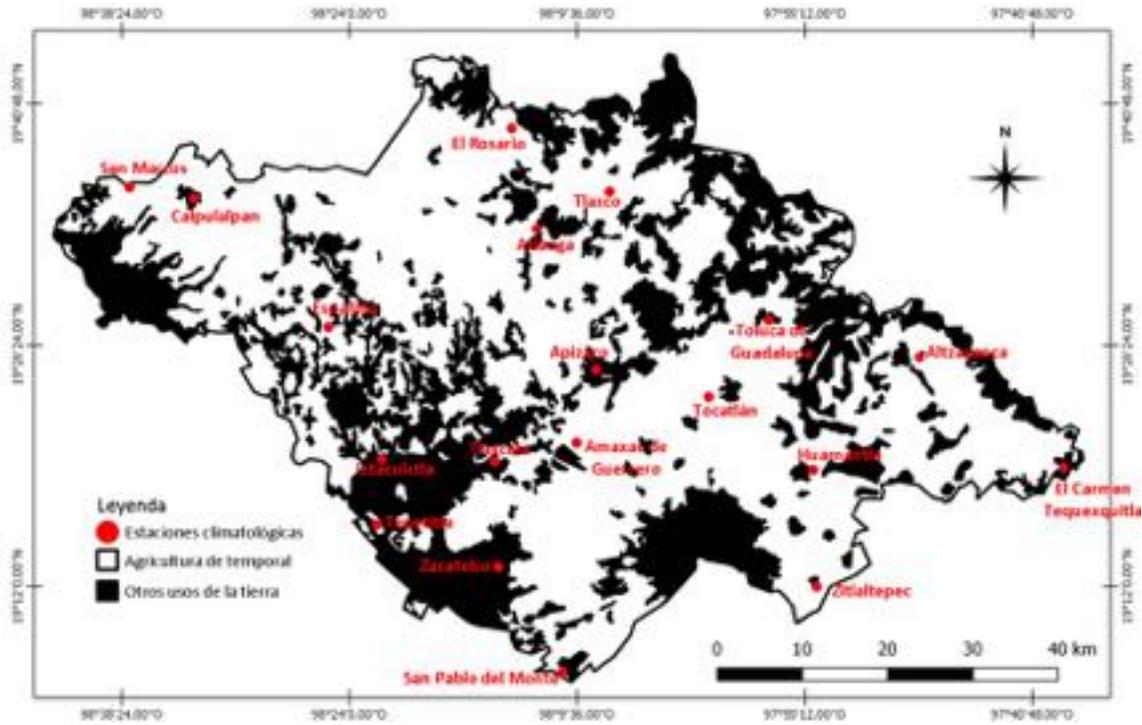
Después de realizar el análisis de calidad de datos se seleccionaron 19 estaciones climatológicas, que cumplieron con los parámetros establecidos. En la Tabla VI, se presenta el porcentaje de datos faltantes de las estaciones evaluadas. Las estaciones climatológicas resaltadas en negritas tienen datos faltantes > 10%.

Tabla VI. Porcentaje de datos faltantes, 1991-2014

Estación	PCP	Tmáx	Tmín
29002	0.11%	0.24%	0.13%
29003	0.06%	0.11%	0.02%
29004	32.63%	32.67%	32.63%
29005	25.92%	26.39%	26.34%
29007	4.22%	4.28%	4.22%
29010	33.77%	33.79%	33.79%
29011	0.23%	1.05%	0.91%
29014	99.65%	99.65%	99.65%
29016	49.37%	49.39%	49.38%
29025	1.32%	1.64%	1.33%
29026	4.20%	4.44%	4.19%
29027	4.55%	4.92%	4.89%
29030	0.31%	0.63%	0.38%
29032	0.07%	0.11%	0.06%
29034	23.14%	26.52%	26.48%
29035	2.33%	9.87%	9.88%
29040	5.07%	5.98%	6.22%
29041	1.25%	0.49%	0.40%
29042	1.11%	1.14%	1.07%
29043	33.92%	33.89%	33.86%
29047	1.37%	1.84%	1.63%
29050	4.85%	12.35%	12.11%
29051	1.44%	4.05%	4.10%
29052	0.84%	7.93%	7.72%
29151	2.08%	2.29%	2.05%
29161	3.63%	18.18%	18.16%
29162	12.13%	12.31%	11.94%
29165	5.42%	15.10%	14.70%
29169	3.81%	4.22%	3.94%
29170	1.78%	1.92%	1.81%

Fuente: Elaboración propia con datos de salida del software RClimDex

En el Mapa 7, se presenta la ubicación de las 19 estaciones climatológicas seleccionadas una vez que pasaron el análisis de calidad de datos. Antes de realizar el análisis de calidad de datos, se actualizó la información hasta el año 2014. En el Anexo B, se realiza el procedimiento para el análisis de calidad de datos con el software RClimDex de la estación climatológica 29002 Apizaco que cumple con los parámetros del análisis de calidad de datos.



Mapa 7. Ubicación de las estaciones (Elaboración propia con datos de INEGI y SMN)

7.3. Análisis de homogeneidad con RHtestsV4.r

Para cada **ST** diaria de las estaciones climáticas seleccionadas, se analiza el archivo con terminación **_prcpMLY1mm_U.pdf** el cual nos permite visualizar gráficamente si la **ST** es homogénea. Se analiza el archivo **29002 Apizaco_prcpMLY1mm_U.pdf**, donde vemos que la **ST** es homogénea, Figura 2.

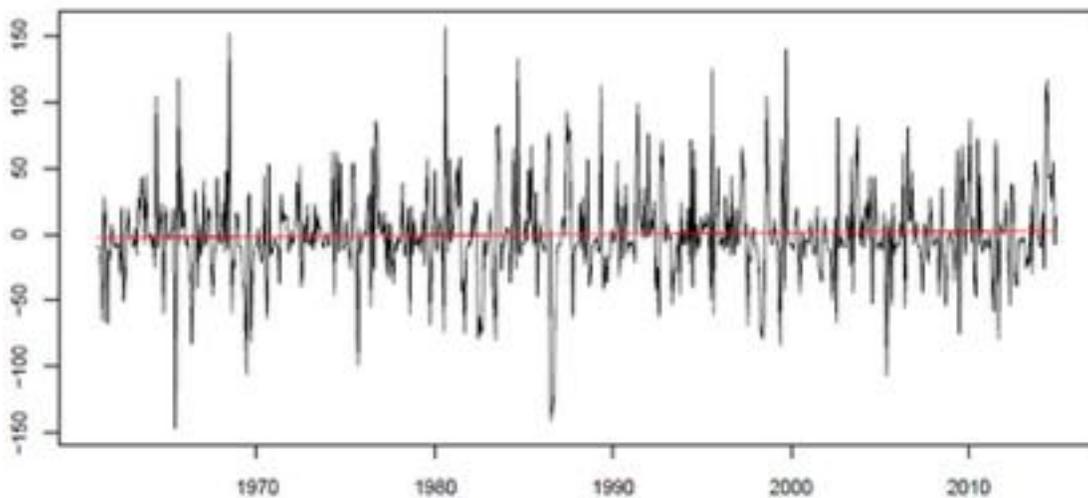


Figura 2. Serie de tiempo homogénea 29002 Apizaco (Fuente: Salida del software)

En la Tabla VII, se visualiza si las estaciones evaluadas cumplieron con la prueba de homogeneidad. En el Anexo C, se realiza el procedimiento para el análisis de homogeneidad con el software RHtestsV4.r de la estación climatológica 29002 Apizaco.

Tabla VII. Prueba de homogeneidad, 1961-2014

Estación	Nombre	Homogénea
29002	Apizaco	Si
29003	Atlanga	Si
29007	El Carmen Tequexquitla	Si
29011	Huamantla	Si
29025	San Marcos Huaquilpan	Si
29026	Zitlaltepec	Si
29027	Tocatlán	Si
29030	Tlaxcala de Xicohténcatl (DGE)	Si
29032	Tlaxco	Si
29035	Calpulalpan	Si
29040	Ixtacuixtla	Si
29041	Tepetitla	Si
29042	Amamaxac de Guerrero	Si
29047	Españita	Si
29051	Toluca de Guadalupe	Si
29052	El Rosario	Si
29151	Altzayanca	Si
29169	Zacatelco	Si
29170	San Pablo del Monte	Si

Fuente: Elaboración propia con datos de salida del software RHtestsV4

Una vez que se realizó el análisis de calidad y la homogenización de las series de tiempo, se identificó el periodo de crecimiento.

7.4. Periodo de crecimiento

Para las 19 estaciones climatológicas se calculó el **PC** a escala pentadal. En la Figura 3, se presenta el **PC** de la estación 29002 Apizaco para el periodo 1991-2014. La duración es de 155 días, inicia del 21 al 25 de mayo y finaliza del 18 al

22 de octubre. Sobresalen dos lapsos húmedos en el **PC**, siendo el primer lapso relativamente mayor al segundo lapso húmedo. La canícula se presenta a finales de julio y principios de agosto, siendo el primer máximo de **PCP** mayor al segundo máximo, esta condición se presenta en 14 estaciones climatológicas evaluadas, mientras que en tres de ellas se presenta en forma inversa, y en las dos estaciones restantes los dos máximos de **PCP** son relativamente iguales. La canícula o sequía de medio verano es una disminución de la precipitación en pleno verano generalmente, entre julio y agosto.

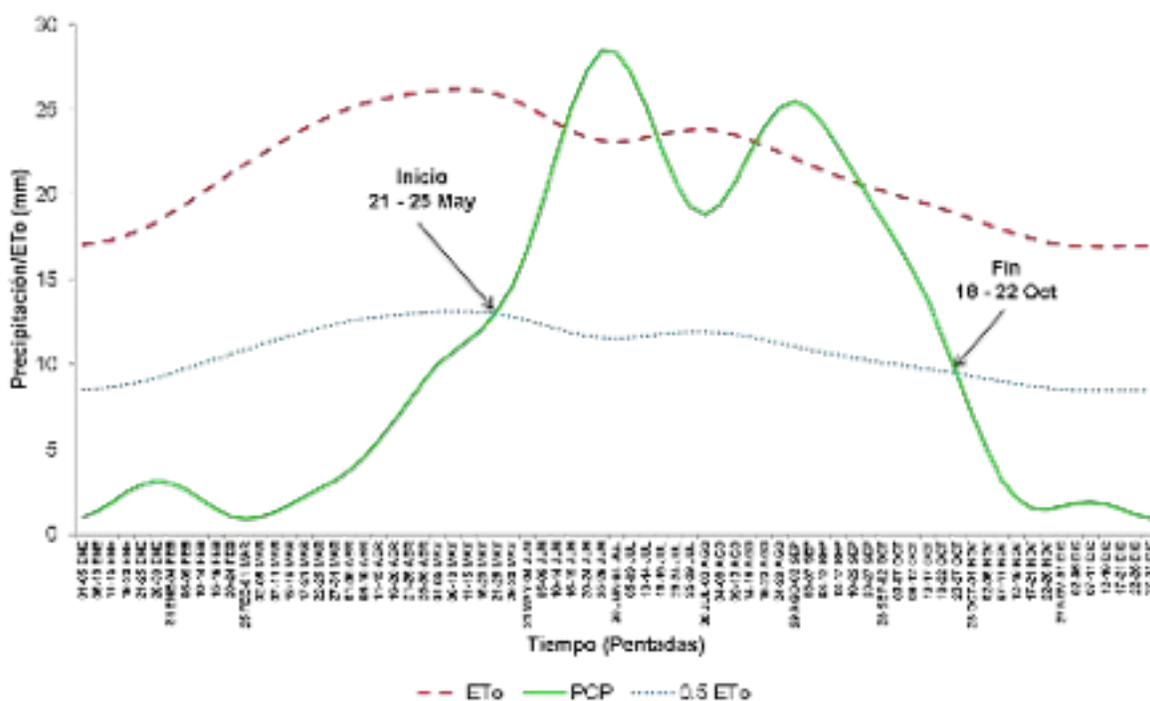


Figura 3. Periodo de crecimiento, 29002 Apizaco (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 4, se presenta el **PC** de la estación 29003 Atlanga considerando el periodo más reciente. Se identifica la duración del **PC** con 145 días iniciando del 31 de mayo al 04 de junio y finaliza del 18 al 22 de octubre. Se visualizan dos periodos húmedos, siendo el segundo periodo relativamente mayor al primero. La canícula se presenta a finales de julio y principios de agosto, siendo el primer máximo de **PCP** relativamente mayor al segundo máximo.

En la Figura 5, se presenta el **PC** de la estación 29011 Huamantla para el periodo 1991-2014. El cuál tiene una duración de 150 días, con una fecha de inicio del 21

al 25 de mayo y finaliza del 13 al 17 de octubre. En esta estación se presenta ligeramente un periodo húmedo. Se presenta la canícula a finales de julio y principios de agosto donde el primer máximo de **PCP** es relativamente mayor, al segundo máximo.

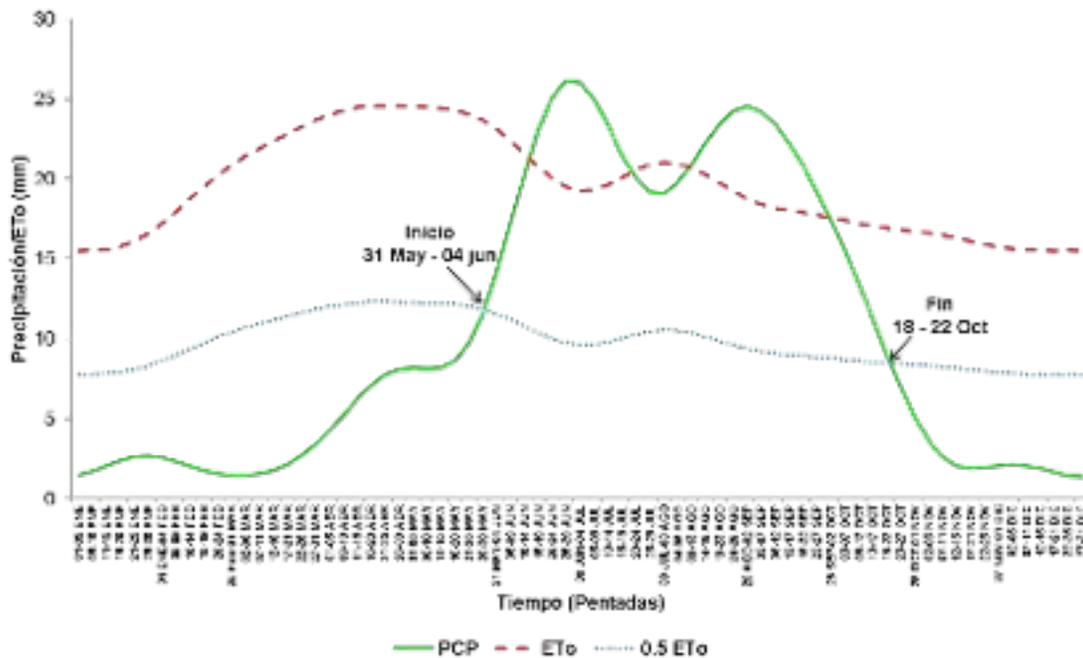


Figura 4. Periodo de crecimiento, 29003 Atlanga (Fuente: Elaboración propia)

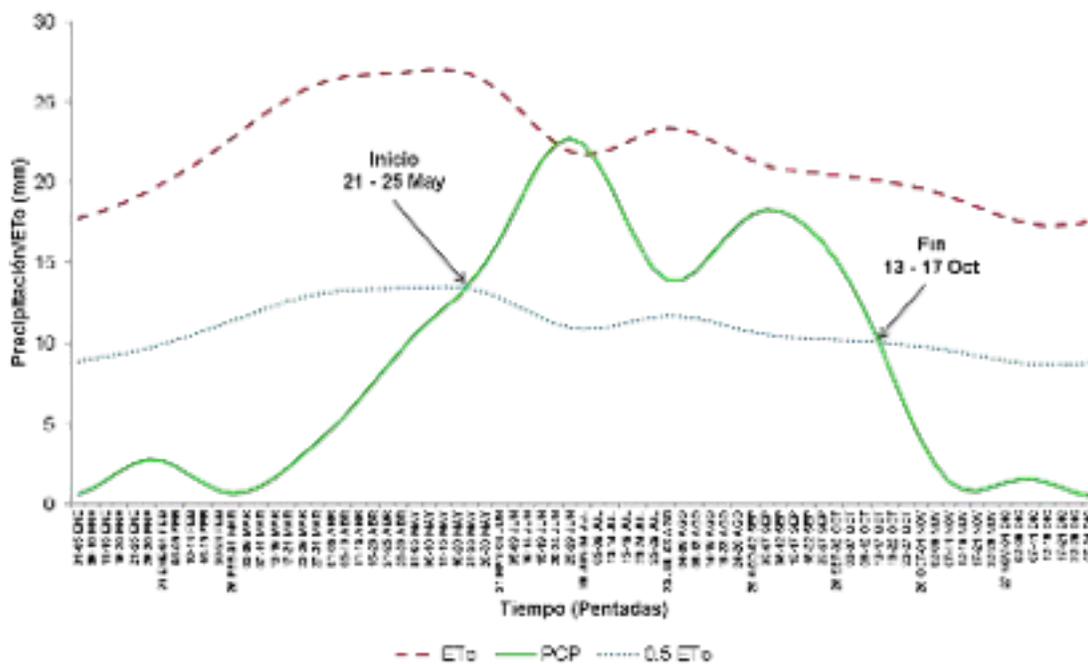


Figura 5. Periodo de crecimiento, 29011 Huamantla (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 6, se presenta el **PC** de la estación 29030 Tlaxcala para el periodo más reciente. Se identifica el inicio del periodo del 26 al 30 de mayo y finaliza del 18 al 22 de octubre, con un total de 150 días. Destacan dos lapsos húmedos, relativamente similares. Se presenta la canícula a finales de julio y principios de agosto, siendo el primer máximo de **PCP** relativamente mayor al segundo máximo.

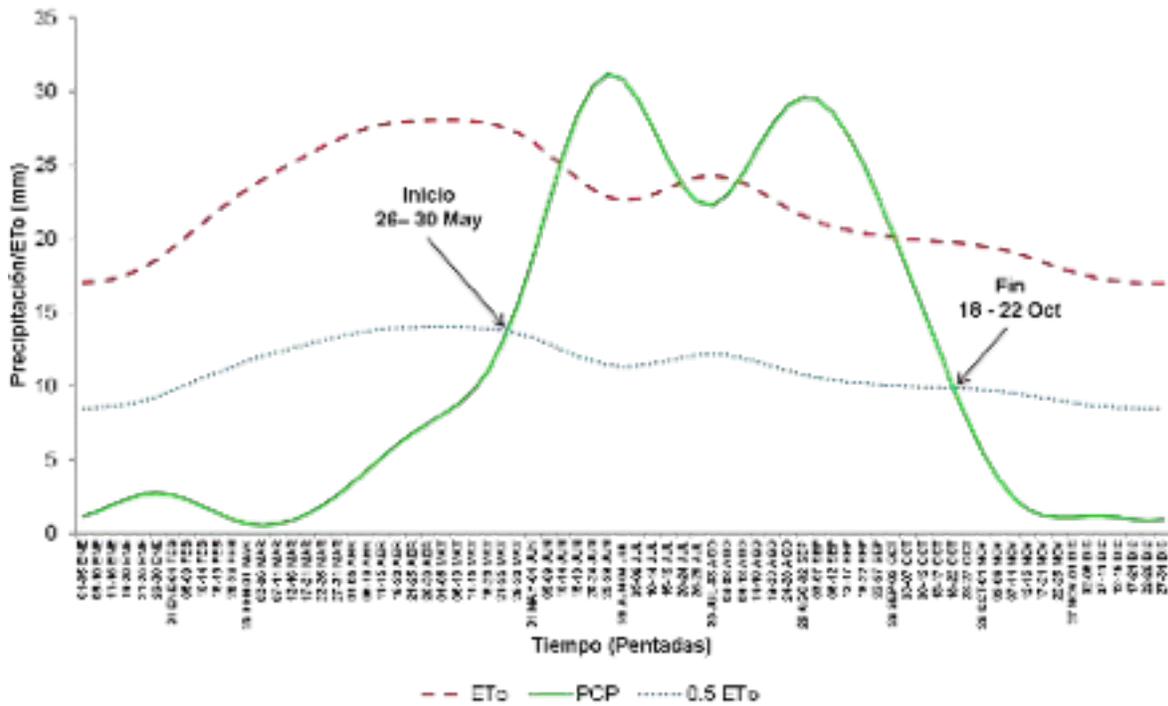


Figura 6. Periodo de crecimiento, 29030 Tlaxcala (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 7, se presenta el **PC** de la estación 29032 Tlaxco para el periodo 1991-2014. Se identifica el inicio del periodo del 31 de mayo al 04 de junio y finaliza del 13 al 17 de octubre, con una duración de 140 días. Se presenta ligeramente un periodo húmedo en el primer máximo de **PCP**. Se presenta la canícula siendo el primer máximo de **PCP** relativamente mayor que el segundo máximo, esta se presenta a finales de julio y principios de agosto.

En la Figura 8, se presenta el **PC** de la estación 29007 El Carmen Tequexquitta para el periodo más reciente. El cuál tiene una duración de 115 días, con una fecha de inicio del 05 al 09 de junio y finaliza del 23 al 27 de septiembre. Esta estación no presenta periodos húmedos. Se presenta una canícula seca a finales

de julio y principios de agosto, donde el segundo máximo de **PCP** es relativamente mayor, al primer máximo.

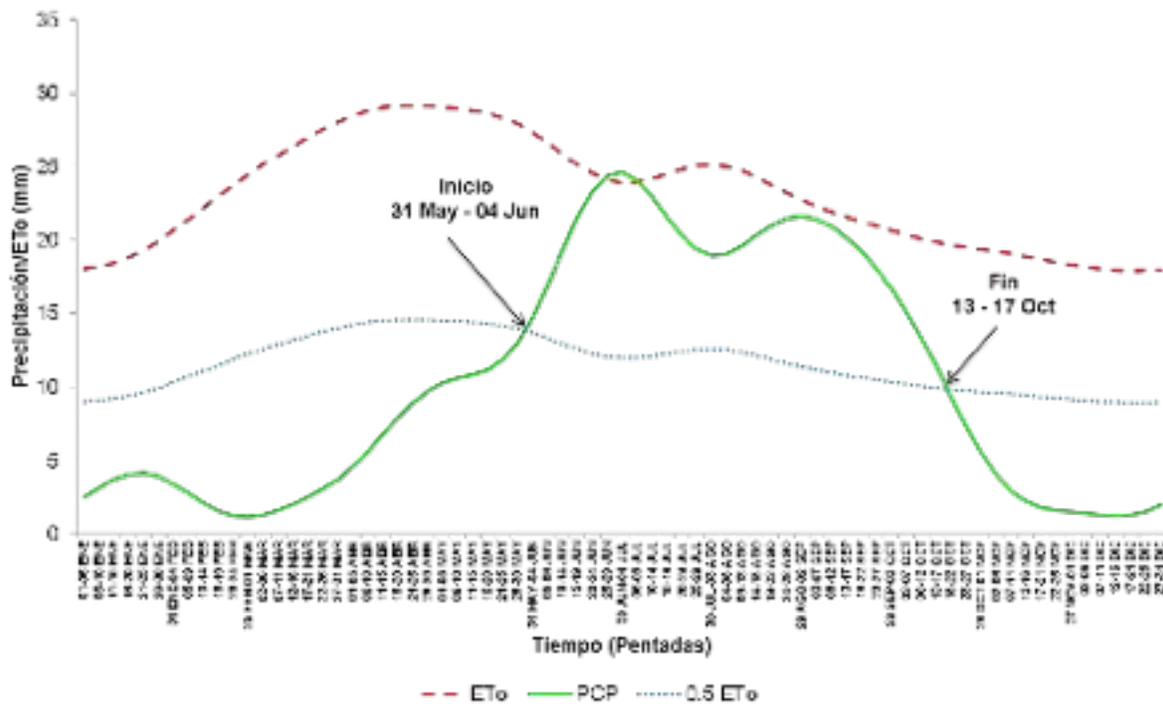


Figura 7. Periodo de crecimiento, 29032 Tlaxco (Fuente: Elaboración propia)

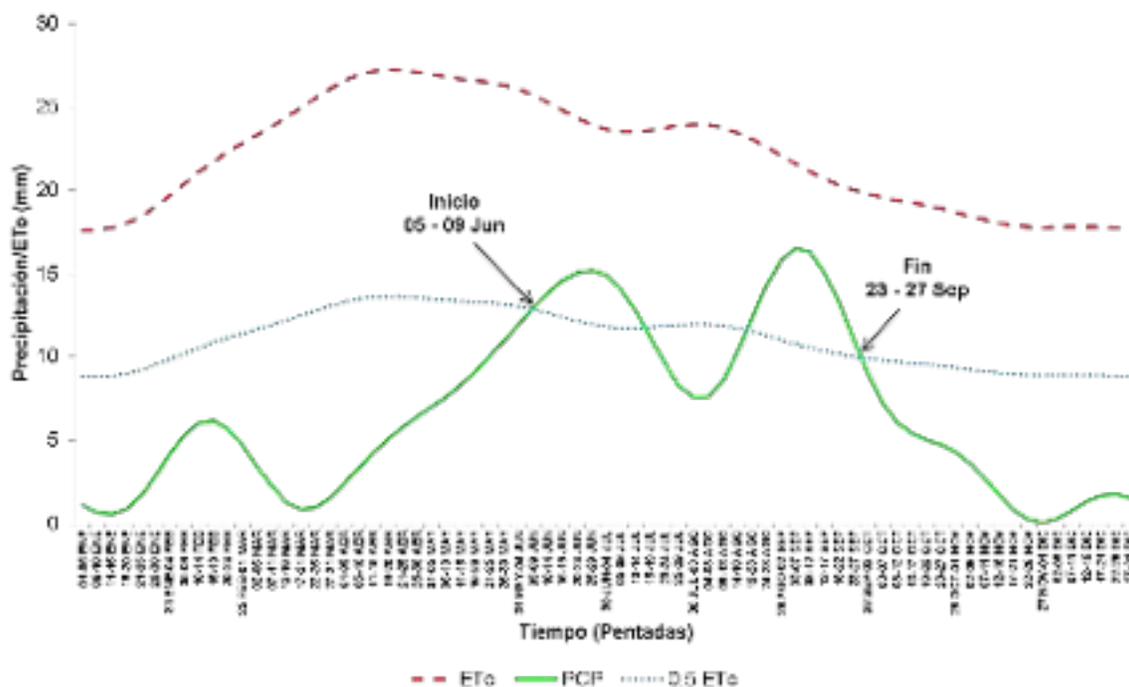


Figura 8. Periodo de crecimiento, 29007 El Carmen Tequexquitta (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 9, se presenta el **PC** de la estación 29025 San Marcos Huaquilpan para el periodo 1991-2014. Se identifica el inicio del periodo del 05 al 09 de junio y finaliza del 13 al 17 de octubre, con un total de 135 días. No se presentan periodos húmedos. Se presenta la canícula siendo el primer máximo de **PCP** relativamente mayor que el segundo máximo, ésta se presenta a finales de julio y principios de agosto.

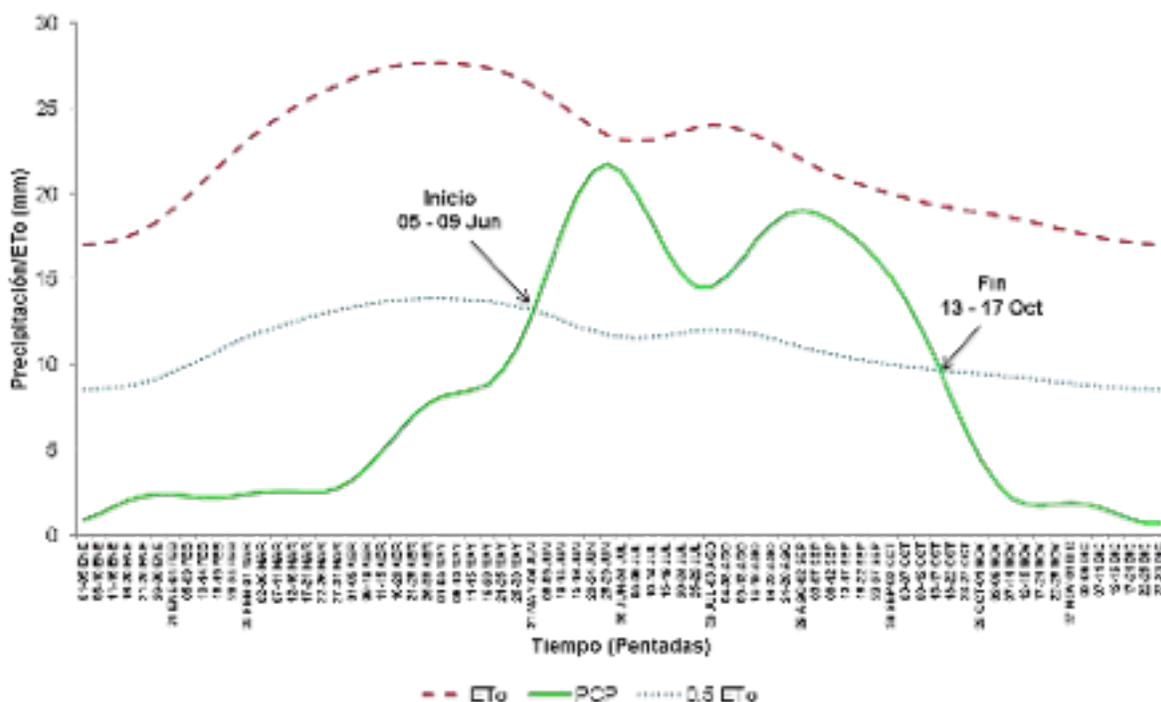


Figura 9. Periodo de crecimiento, 29025 San Marcos Huaquilpan (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 10, se presenta el **PC** de la estación 29026 Zitlaltepec para el periodo más reciente. El cuál tiene una duración de 175 días, con una fecha de inicio del 01 al 05 de mayo y finaliza del 18 al 22 de octubre. Se presentan dos periodos húmedos. Se presenta la canícula a finales de julio y principios de agosto, donde el primer máximo de **PCP** es relativamente mayor al segundo máximo.

En la Figura 11, se presenta el **PC** de la estación 29027 Tocatlán para el periodo 1991-2014. Se identifica el inicio del periodo del 21 al 25 de mayo y finaliza del 08 al 12 de octubre, con un total de 145 días. Se presentan dos periodos húmedos.

También se ve la canícula donde el primer máximo de **PCP** es relativamente mayor que el segundo máximo, ésta se presenta a finales de julio y principios de agosto.

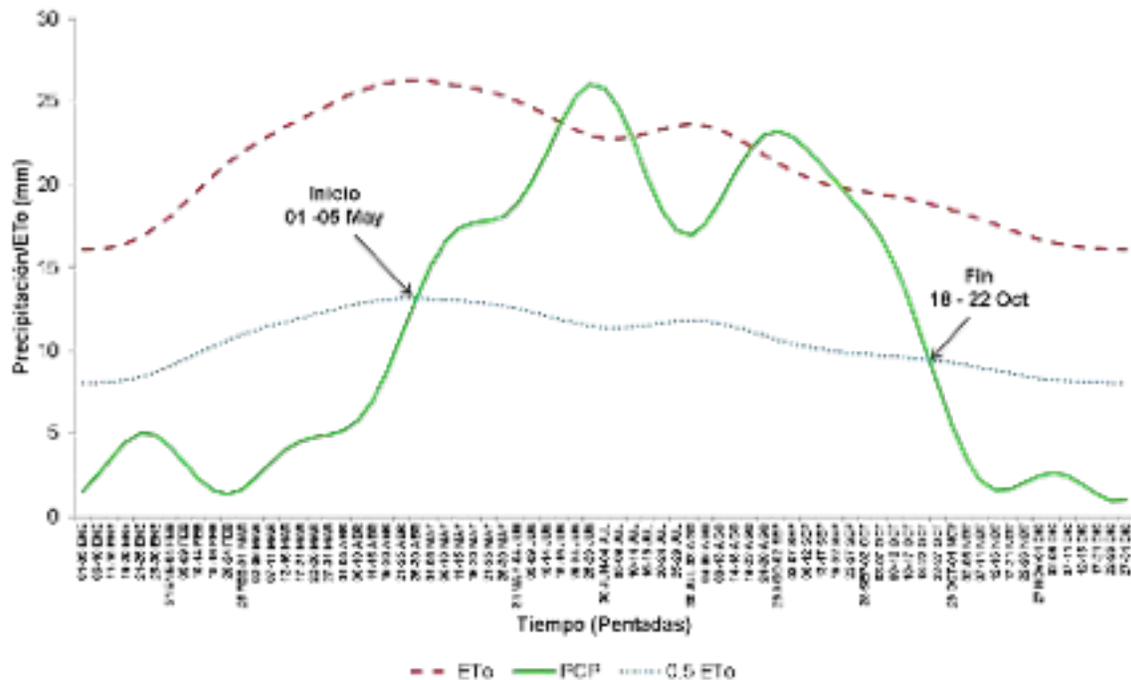


Figura 10. Periodo de crecimiento, 29026 Zitlaltepec (Fuente: Elaboración propia)

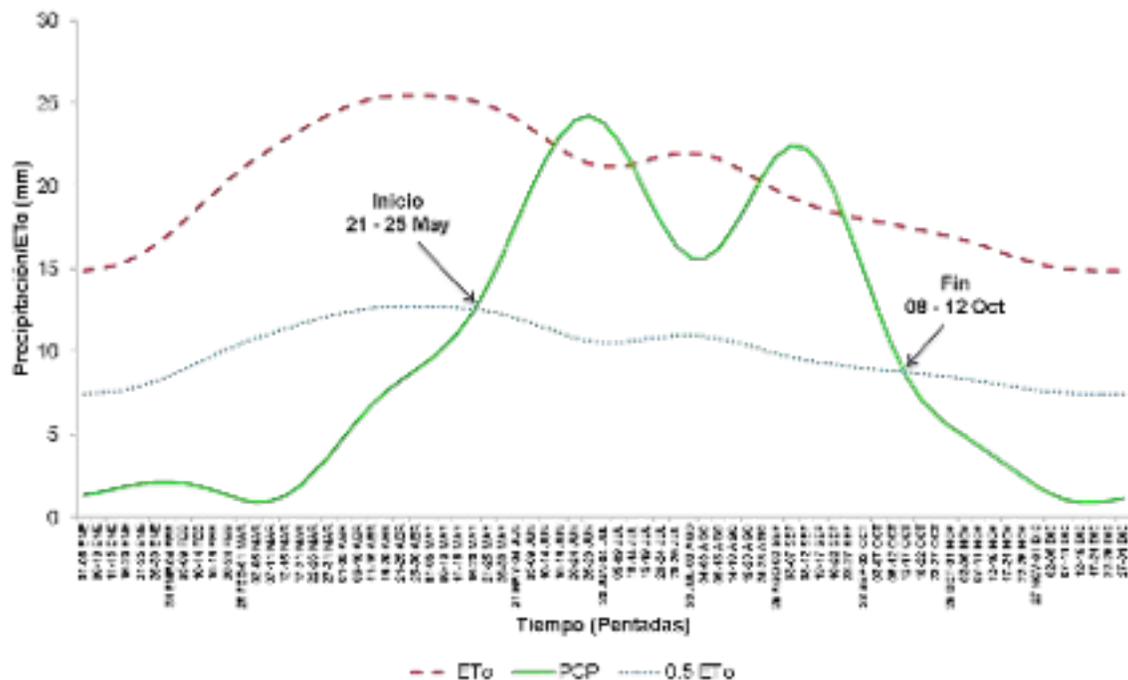


Figura 11. Periodo de crecimiento, 29027 Tocatlán (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 12, se presenta el **PC** de la estación 29035 Calpulalpan para el periodo más reciente. El cuál tiene una duración de 135 días, con una fecha de inicio del 31 de mayo al 04 de junio y finaliza del 08 al 12 de octubre. En esta estación se presenta un periodo húmedo en el primer máximo de **PCP**. Se presenta la canícula a finales de julio y principios de agosto, donde el primer máximo de **PCP** es relativamente mayor, al segundo máximo.

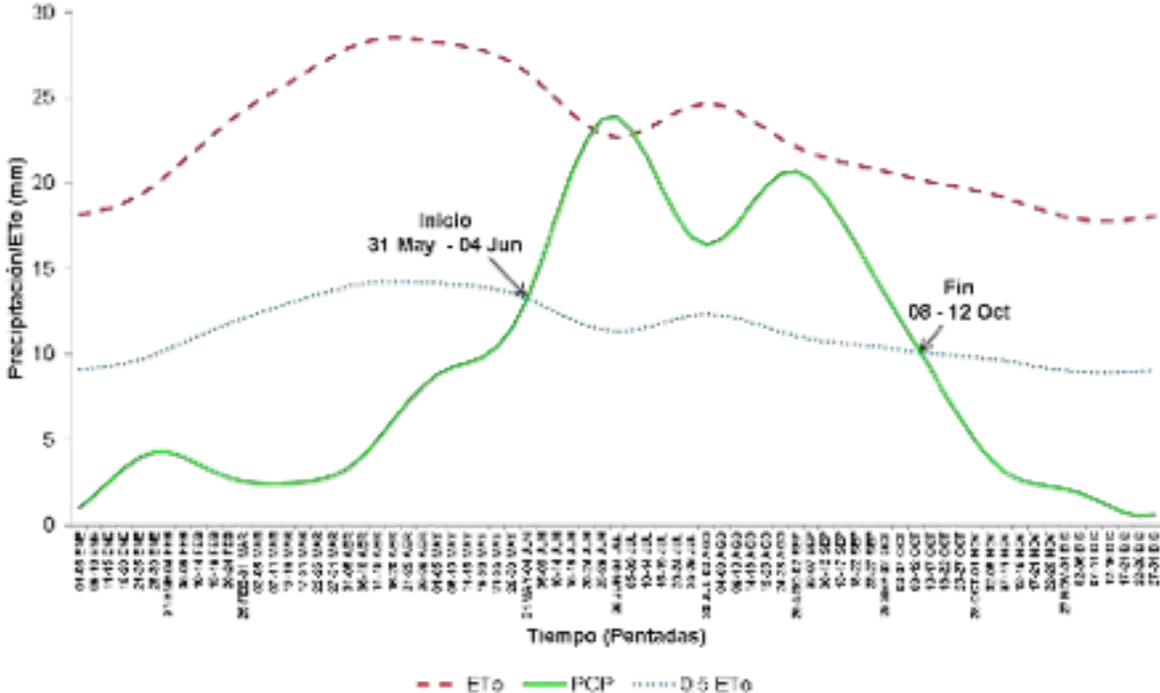


Figura 12. Periodo de crecimiento, 29035 Calpulalpan (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 13, se presenta el **PC** de la estación 29040 Ixtacuixtla para el periodo 1991-2014. Se identifica el inicio del periodo del 26 al 30 de mayo y finaliza del 08 al 12 de octubre, con un total de 140 días. Se presenta un periodo húmedo en el segundo máximo de **PCP**. Se presenta la canícula a finales de julio y principios de agosto, siendo el segundo máximo de **PCP** relativamente mayor que el primer máximo.

En la Figura 14, se presenta el **PC** de la estación 29041 Tepetitla para el periodo más reciente. El cuál tiene una duración de 145 días, con una fecha de inicio del 26 al 30 de mayo y finaliza del 13 al 17 de octubre. Se presentan dos periodos húmedos, siendo el segundo lapso relativamente mayor al primer lapso húmedo.

Se presenta la canícula a finales de julio y principios de agosto, donde el segundo máximo de **PCP** es relativamente mayor, al primer máximo.

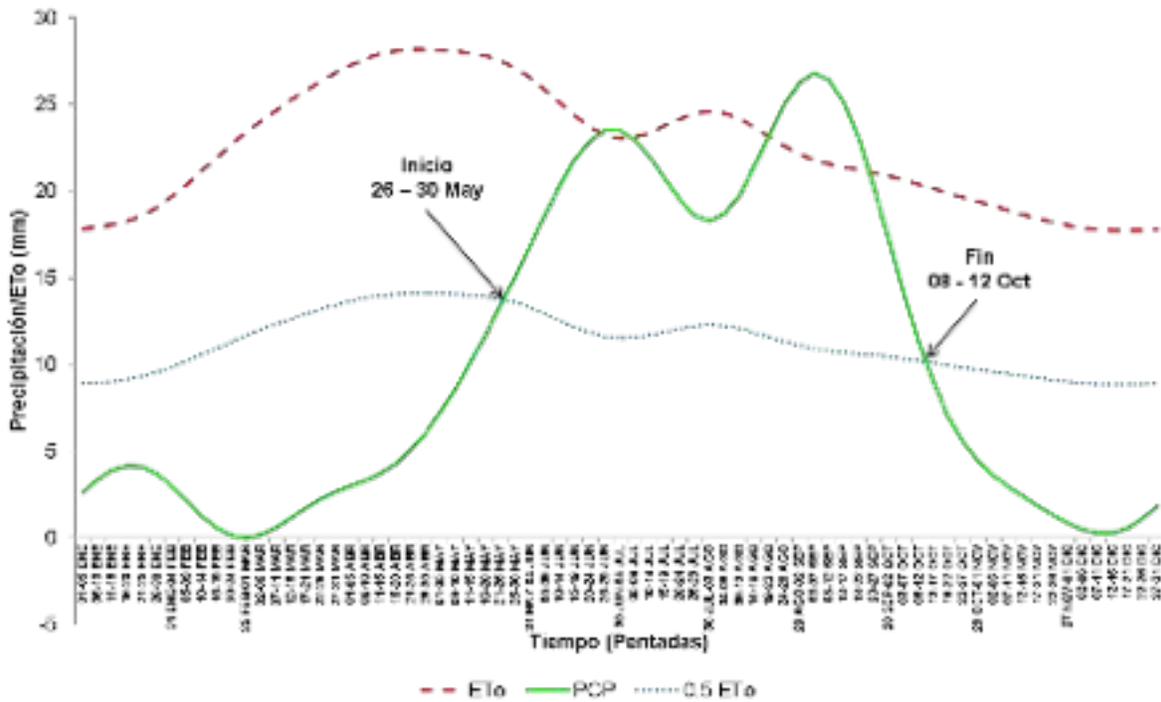


Figura 13. Periodo de crecimiento, 29040 Ixtacuixtla (Fuente: Elaboración propia)

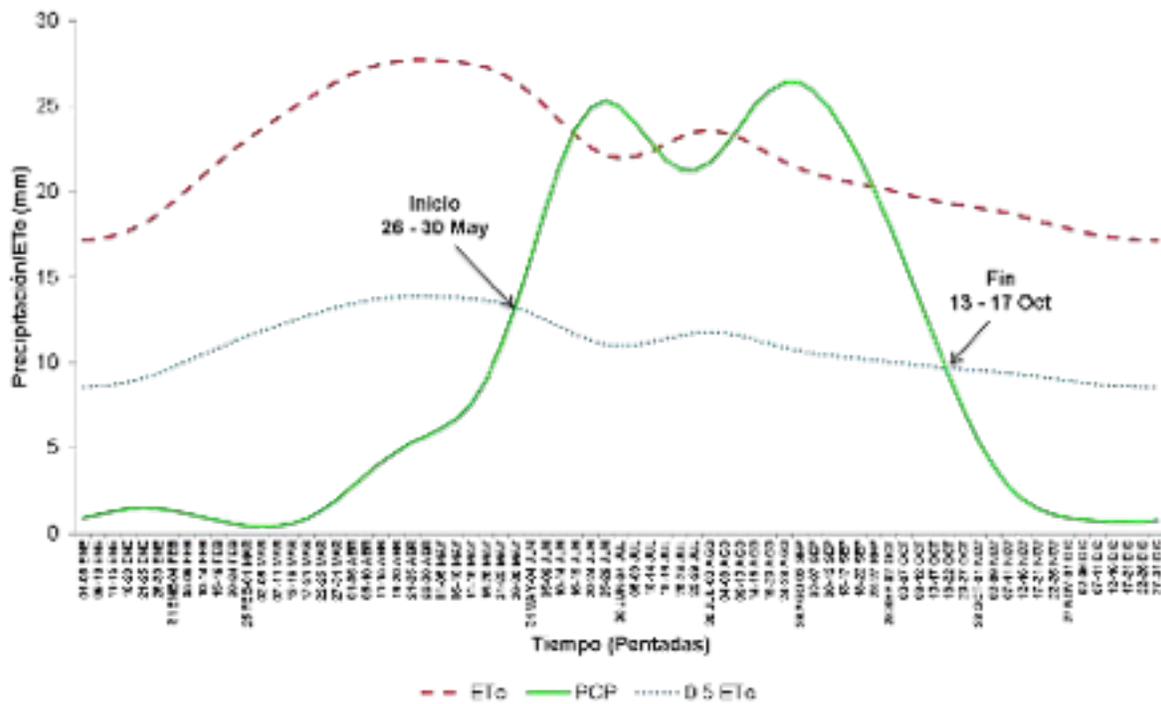


Figura 14. Periodo de crecimiento, 29041 Tepetitla (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 15, se presenta el **PC** de la estación 29042 Amaxac de Guerrero para el periodo 1991-2014. Se identifica el inicio del periodo del 26 al 30 de mayo y finaliza del 18 al 22 de octubre, con un total de 150 días. Se presentan dos periodos húmedos. Se presenta la canícula siendo el primer máximo de **PCP** relativamente mayor que el segundo máximo, ésta se presenta a finales de julio y principios de agosto.

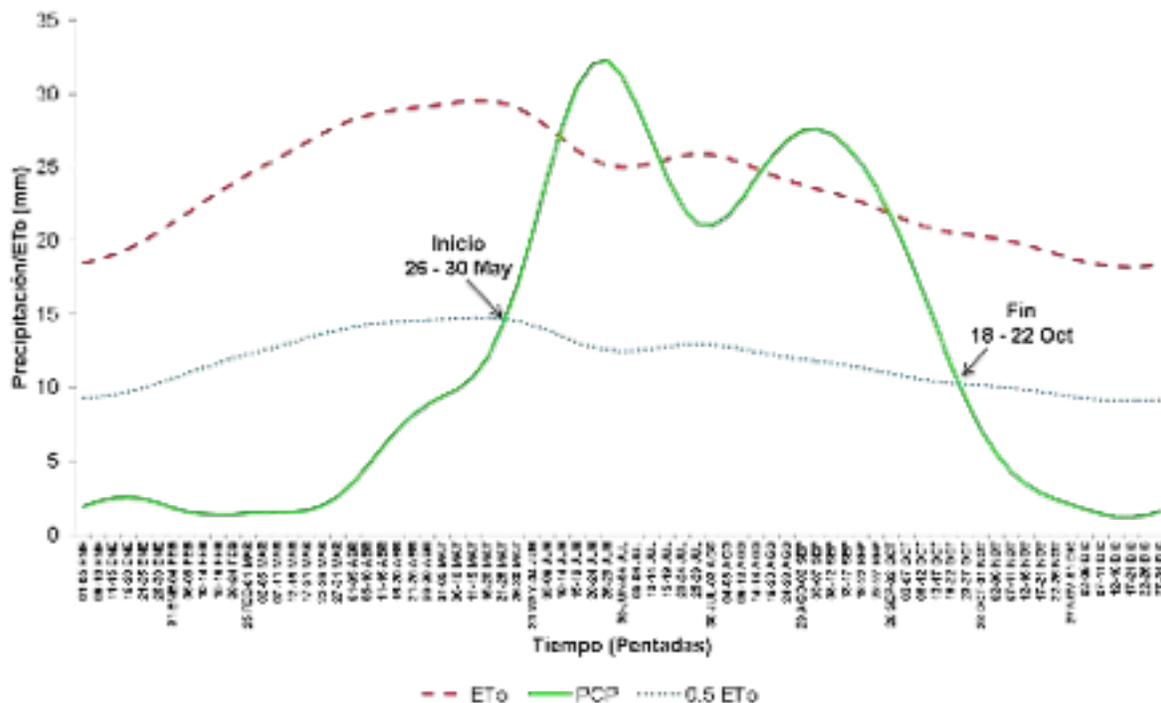


Figura 15. Periodo de crecimiento, 29042 Amaxac de Guerrero (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 16, se presenta el **PC** de la estación 29047 España para el periodo más reciente. El cuál tiene una duración de 165 días, con una fecha de inicio del 16 al 20 de mayo y finaliza del 23 al 27 de octubre. Destaca esta estación ya que relativamente todo el **PC** es húmedo. Se presenta una canícula húmeda a finales de julio y principios de agosto, siendo los dos máximos de **PCP** relativamente iguales.

En la Figura 17, se presenta el **PC** de la estación 29051 Toluca de Guadalupe para el periodo 1991-2014. Se identifica el inicio del periodo del 21 al 25 de mayo y finaliza del 18 al 22 de octubre, con una duración de 155 días. Se presentan dos

periodos húmedos. Se presenta la canícula siendo el primer máximo de **PCP** relativamente mayor que el segundo máximo, ésta se presenta a finales de julio y principios de agosto.

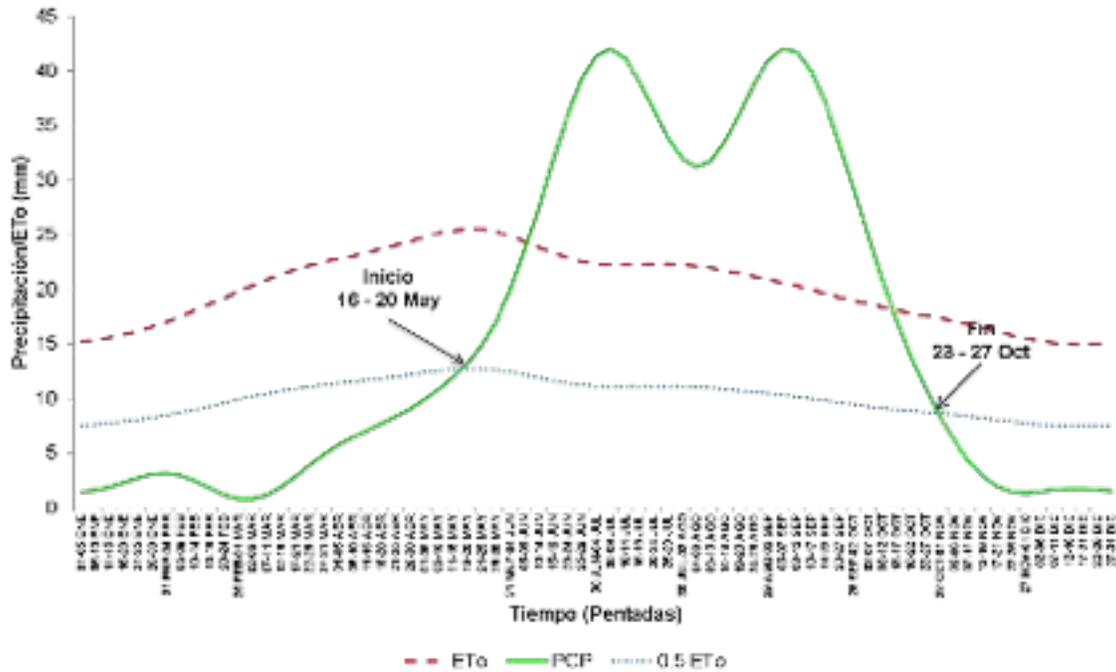


Figura 16. Periodo de crecimiento, 29047 España (Fuente: Elaboración propia)

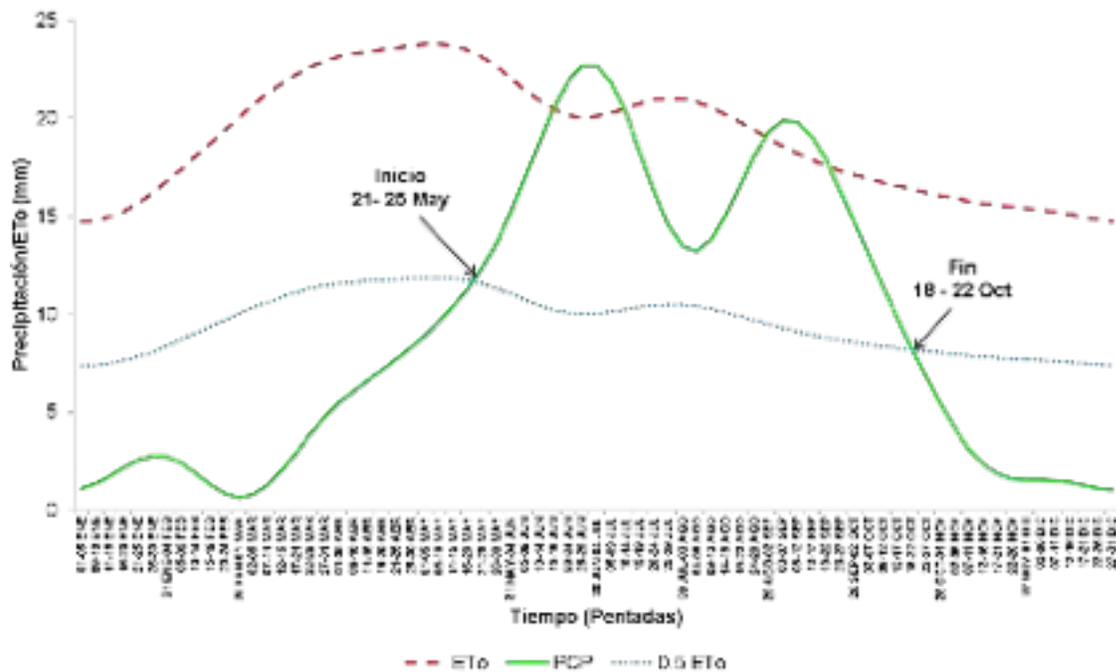


Figura 17. Periodo de crecimiento, 29051 Toluca de Guadalupe (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 18, se presenta el **PC** de la estación 29052 El Rosario para el periodo más reciente. El cuál tiene una duración de 145 días, con una fecha de inicio del 31 de mayo al 04 de junio y finaliza del 18 al 22 de octubre. Se presentan dos periodos húmedos. Se presenta la canícula a finales de julio y principios de agosto, donde el primer máximo de **PCP** es relativamente mayor, al segundo máximo.

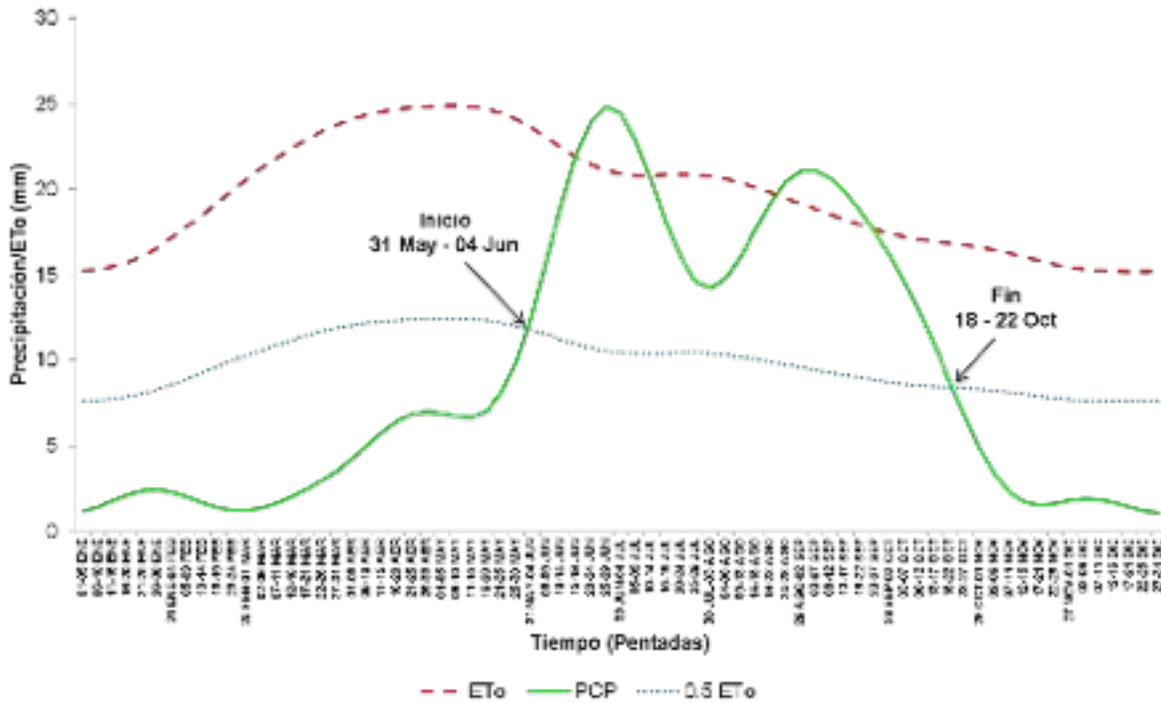


Figura 18. Periodo de crecimiento, 29052 El Rosario (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 19, se presenta el **PC** de la estación 29151 Alzayanca para el periodo 1991-2014. Se identifica el inicio del periodo del 26 al 30 de mayo y finaliza del 03 al 07 de octubre, con una duración de 135 días. No se presentan periodos húmedos. Se presenta la canícula seca a finales de julio y principios de agosto, siendo el primer máximo de **PCP** relativamente mayor que el segundo máximo.

En la Figura 20, se presenta el **PC** de la estación 29169 Zacatelco para el periodo más reciente. El cuál tiene una duración de 150 días, con una fecha de inicio del 21 al 25 de mayo y finaliza del 13 al 17 de octubre. Se presentan dos periodos húmedos. Se presenta una canícula húmeda a finales de julio y principios de

agosto, donde el primer máximo de **PCP** es relativamente mayor, al segundo máximo.

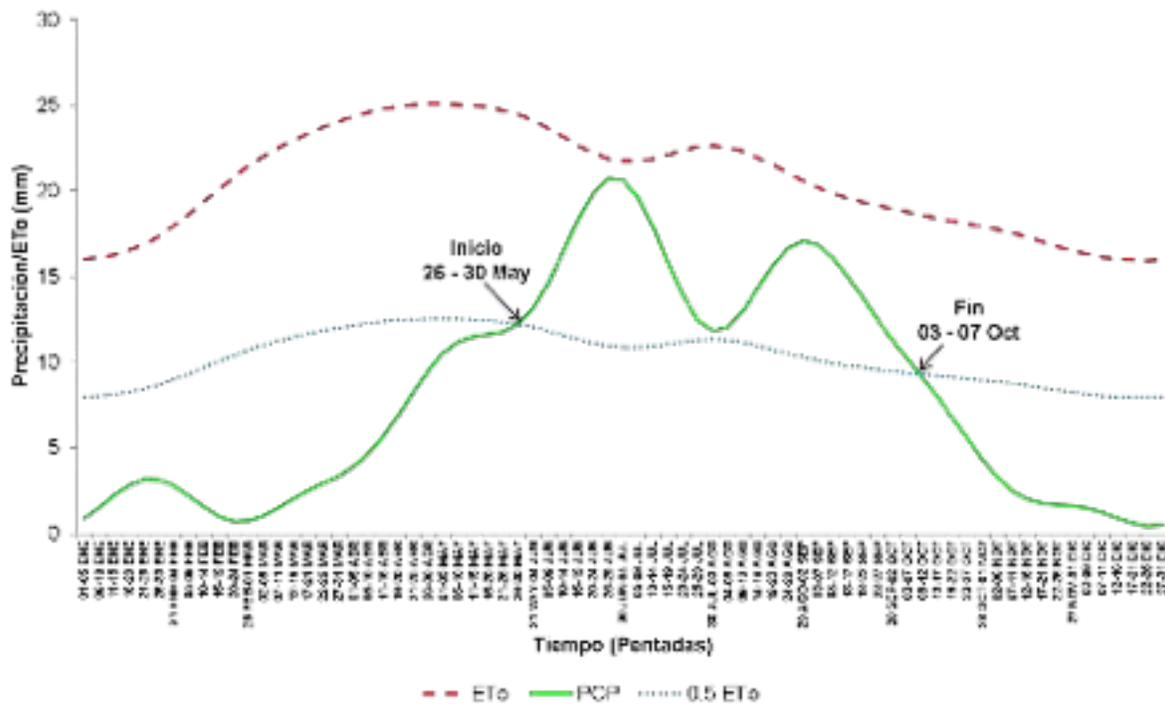


Figura 19. Periodo de crecimiento, 29151 Altzayanca (Fuente: Elaboración propia)

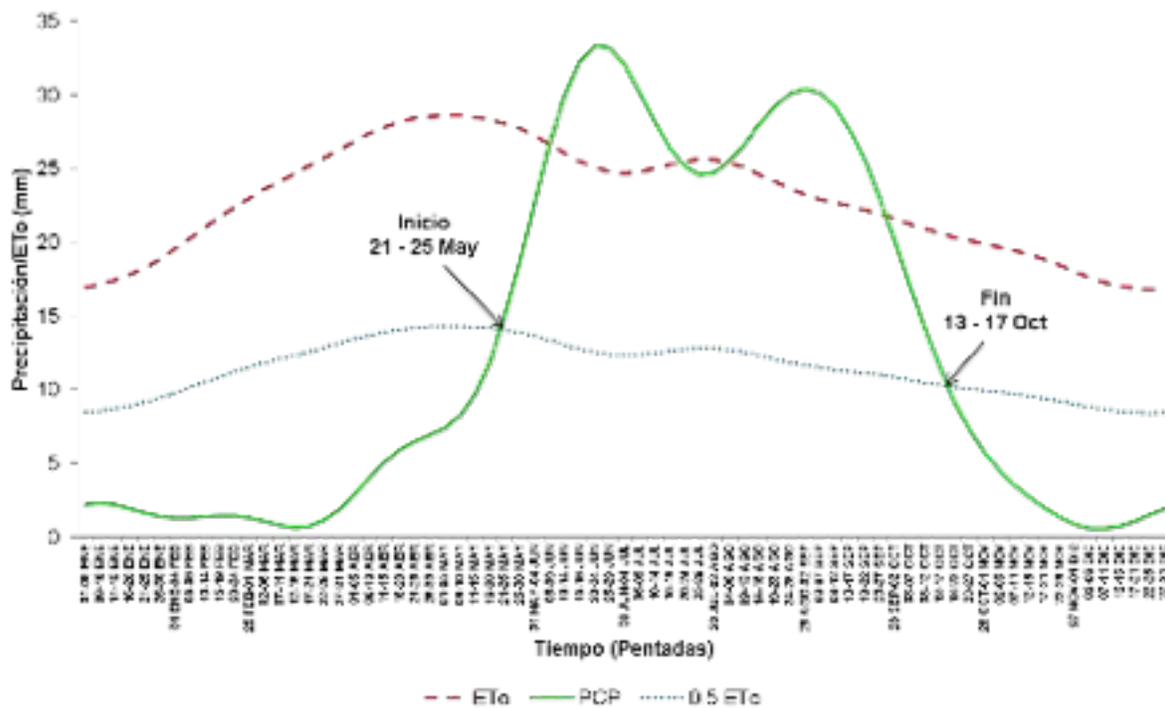


Figura 20. Periodo de crecimiento, 29169 Zacatelco (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 21, se presenta el **PC** de la estación 29170 San Pablo del Monte para el periodo 1991-2014. Se identifica el inicio del periodo del 06 al 10 de mayo y finaliza del 18 al 22 de octubre, con una duración de 170 días. Se presentan dos periodos húmedos. Se presenta la canícula a finales de julio y principios de agosto, siendo los dos máximos de **PCP** relativamente iguales.

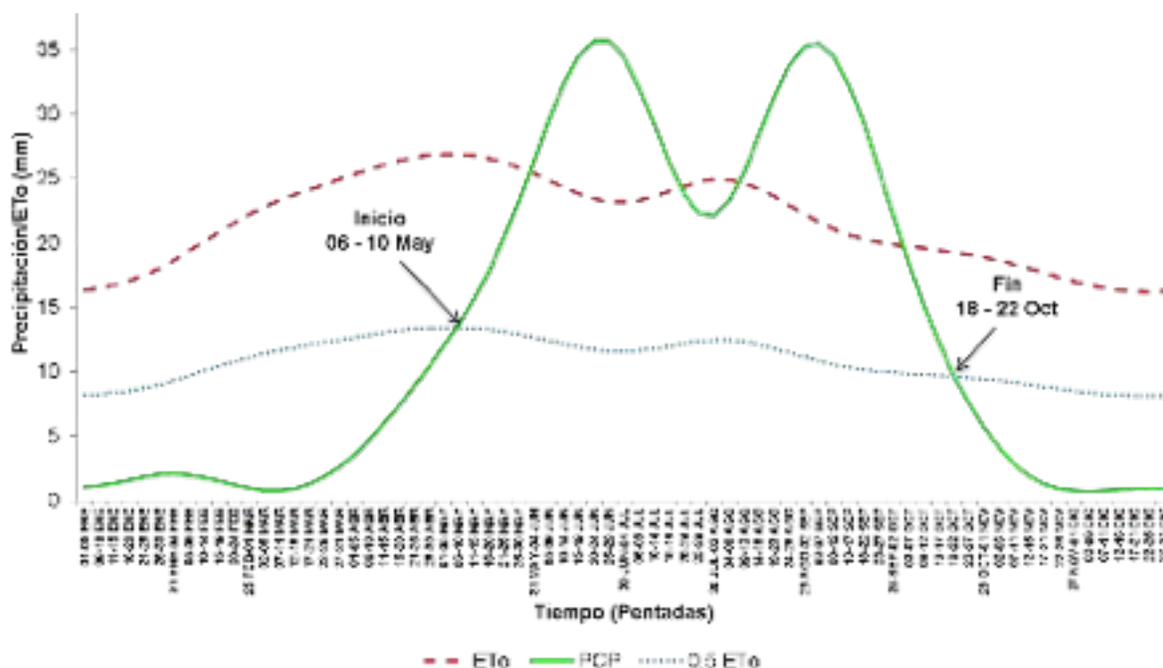


Figura 21. Periodo de crecimiento, 29170 San Pablo del Monte (Fuente: Elaboración propia)

En la Tabla VIII, se presenta el concentrado de los periodos de crecimiento para las 19 estaciones climatológicas evaluadas, considerando el periodo 1991-2014, se aprecia un impacto diferenciado y se determinan la duración, las fechas de inicio y final del **PC**.

Tabla VIII. Periodo de crecimiento 1991-2014

CÓDIGO	ESTACIÓN	FECHA DE INICIO	FECHA FINAL	DURACIÓN
29002	Apizaco	21 - 25 MAY	18 - 22 OCT	155
29003	Atlanga	31 MAY - 04 JUN	18 - 22 OCT	145
29007	El Carmen Tequexquitla	05 - 09 JUN	23 - 27 SEP	115
29011	Huamantla	21 - 25 MAY	13 - 17 OCT	150
29025	San Marcos Huaquilpan	05 - 09 JUN	13 - 17 OCT	135

Fuente: Elaboración propia

Tabla VIII. Periodo de crecimiento 1991-2014 continuación...

CÓDIGO	ESTACIÓN	FECHA DE INICIO	FECHA FINAL	DURACIÓN
29027	Tocatlán	21 - 25 MAY	08 - 12 OCT	145
29030	Tlaxcala	26 - 30 MAY	18 - 22 OCT	150
29032	Tlaxco	31 MAY - 04 JUN	13 - 17 OCT	140
29035	Calpulalpan	31 MAY - 04 JUN	08 - 12 OCT	135
29040	Ixtacuixtla	26 - 30 MAY	08 - 12 OCT	140
29041	Tepetitla	26 - 30 MAY	13 - 17 OCT	145
29042	Amamax de Guerrero	26 - 30 MAY	18 - 22 OCT	150
29047	Españita	16 - 20 MAY	23 - 27 OCT	165
29051	Toluca de Guadalupe	21 - 25 MAY	18 - 22 OCT	155
29052	El Rosario	31 MAY - 04 JUN	18 - 22 OCT	145
29151	Altzayanca	26 - 30 MAY	03 - 07 OCT	135
29169	Zacatelco	21 - 25 MAY	13 - 17 OCT	150
29170	San Pablo del Monte	06 - 10 MAY	18 - 22 OCT	170

Fuente: Elaboración propia

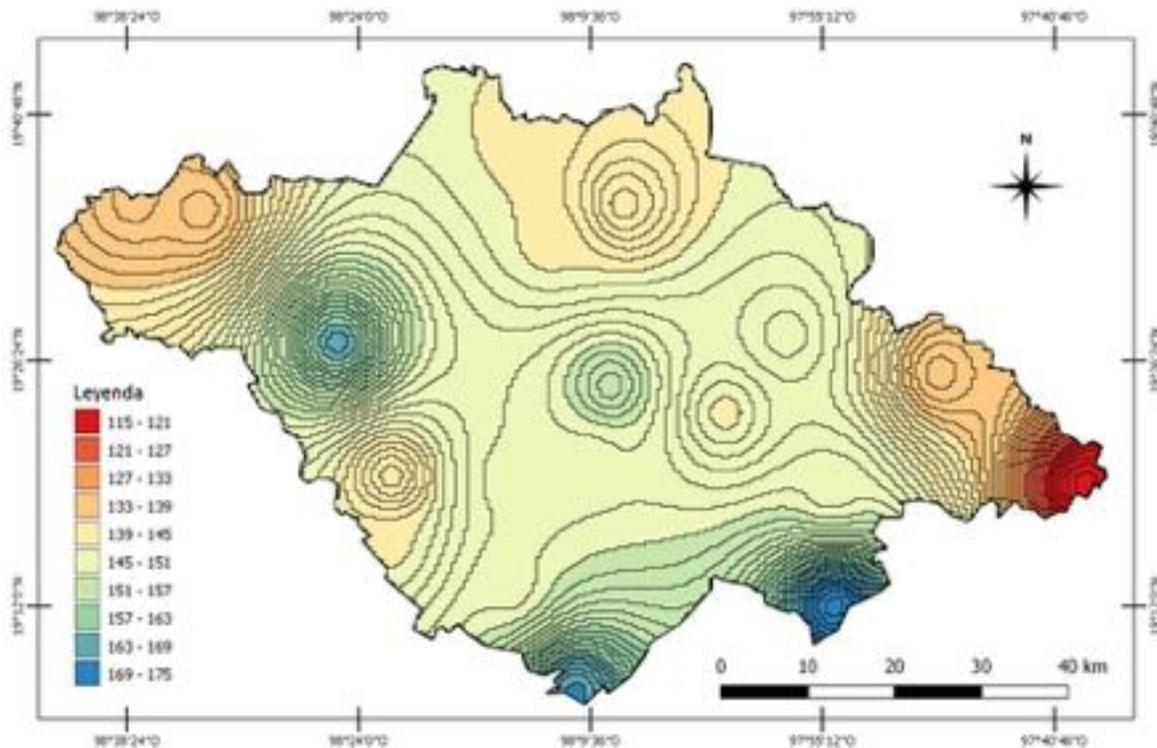
En el Mapa 8, se presenta el **PC** en el estado de Tlaxcala, el cual nos permite visualizar en que zonas se pueden cultivar las variedades de ciclo largo (H-70, AZ-60 y H-161), intermedio (H-40, H-48, H-50) y precoz (H-72 y H-74). Si solo se considera esta variable, las mejores zonas para las variedades de ciclo largo son los municipios de Españita, San Pablo del Monte y Zitlaltepec, mientras que las zonas en las que se deberían sembrar variedades de ciclo precoz son El Carmen Tequexquitla, Altzayanca, Calpulalpan y San Marcos Huaquilpan.

En la Tabla IX. Se presenta la clasificación del periodo de crecimiento, considerando las cinco categorías evaluadas.

Tabla IX. Categorías para la aptitud potencial del periodo de crecimiento

Periodo de crecimiento	Categoría
163 – 175	Muy bueno
151 – 162	Bueno
139 – 150	Mediano
127 – 138	Bajo
115 – 126	No apto

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica



Mapa 8. Período de crecimiento, estado de Tlaxcala (Fuente: Elaboración propia)

7.5. Propiedades físicas del suelo

7.5.1. Tipo de suelo

En la Tabla X, se presenta la clasificación de las cinco categorías que se evaluaron.

Tabla X. Categorías para la aptitud potencial para el tipo de suelo

Clasificación	Tipo de suelo
Muy bueno	Andosol y Phaeozem
Bueno	Vertisol
Mediano	Fluvisol, Cambisol y Regosol
Bajo	Luvisol, Litosol y Rendzina
No apto	Solonchak y Gleysol

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

7.5.2. Textura

A continuación, se presenta la clasificación de las categorías de aptitud que se evaluaron, Tabla XI.

Tabla XI. Categorías para la aptitud potencial para el tipo de textura

Textura	Categoría
Media	Muy bueno
Fina	Bueno
Gruesa	Mediano

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

7.5.3. Densidad aparente

En la Tabla XII, se presenta la relación general de la **DA** del suelo con el crecimiento radicular basado en la textura del suelo (USDA-NRCS, 2014).

Tabla XII. Relación de la densidad aparente con el crecimiento radicular

Textura del suelo	DA ideal para el crecimiento de la planta (g/cm³)	DA que afecta el crecimiento de la planta (g/cm³)	DA que restringe el crecimiento de la planta (g/cm³)
Arena, Areno-Franco	< 1.60	1.69	> 1.80
Franco-Arenosa, Franco	< 1.40	1.63	> 1.80
Franco-Arcillo-Arenoso, Franco-Arcillosa	< 1.40	1.60	> 1.75
Limo, Franco-Limosa	< 1.40	1.60	> 1.75
Franco-Limosa, Franco-Arcillo-Limosa	< 1.40	1.55	> 1.65
Franco-Arcillosa (35-45% arcilla)	< 1.10	1.49	> 1.58
Arcilla (>45 % arcilla)	< 1.10	1.39	> 1.47

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

En la Tabla XIII, se presenta la clasificación de las cinco categorías de aptitud considerada.

Tabla XIII. Categorías para la aptitud potencial de la densidad aparente

Densidad aparente (g/cm³)	Categoría
< 1.05	Muy bueno
1.05 - 1.15	Bueno
1.15 - 1.24	Mediano
1.24 - 1.34	Bajo
> 1.34	No apto

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

7.6. Propiedades químicas del suelo

7.6.1. pH

En la Tabla XIV, se presenta la clasificación del pH, la denominación y los efectos esperados en la disponibilidad de los elementos.

Tabla XIV. Efectos del pH en la disponibilidad de los nutrimentos

Rango de pH	Denominación	Efectos esperables
< 4.5	Extremadamente ácido	Condiciones muy desfavorables.
4.5 – 5.5	Fuertemente ácido	Posible toxicidad por Al y exceso de Co, Cu, Fe, Mn, Zn. Deficiencia de Ca, K, N, Mg, Mo, P, S.
5.6 – 6.0	Medianamente ácido	Intervalo adecuado para la mayoría de los cultivos.
6.1 – 6.5	Ligeramente ácido	Máxima disponibilidad de nutrimentos.
6.6 – 7.3	Neutro	Mínimos efectos tóxicos.

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

La clasificación de las cinco categorías de aptitud se presenta en la Tabla XV.

Tabla XV. Categorías para la aptitud potencial del pH

pH	Categoría
6.1 - 6.5	Muy bueno
6.6 - 7.3	Bueno
5.6 - 6.0	Mediano
4.5 - 5.5	Bajo
< 4.5 y >7.4	No apto

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

7.6.2. Conductividad eléctrica (CE)

La Tabla XVI muestra la clase de salinidad del suelo y las respuestas generales de cultivos. El maíz está considerado como moderadamente sensible, es decir, a valores de la **CE** > 1.40 dS/m (USDA, 2001).

Tabla XVI. Clases de salinidad y respuesta de los cultivos

CE (dS/m a 25 °C)	Clase de salinidad	Respuesta cultivos
0 – 0.98	No salino	Efectos casi despreciables
0.98 – 1.71	Muy ligeramente salino	Se restringen los cultivos muy sensibles
1.71 – 3.16	Ligeramente salino	Se restringen la mayoría de los cultivos
3.16 – 6.07	Moderadamente salino	Sólo cultivos tolerantes
>6.07	Fuertemente salino	Sólo cultivos muy tolerantes

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

En la Tabla XVII, se presenta la clasificación de las cinco categorías de aptitud consideradas.

Tabla XVII. Categorías para la aptitud potencial de la Conductividad Eléctrica

Conductividad eléctrica	Categoría
0.000 - 0.294	Muy bueno
0.295 - 0.588	Bueno
0.589 - 0.882	Mediano
0.883 - 1.176	Bajo
1.177 - 1.470	No apto

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

7.6.3. Materia orgánica

En la Tabla XVIII, se presenta la clasificación de las cinco categorías de aptitud consideradas.

Tabla XVIII. Categorías para la aptitud potencial de la materia orgánica

Materia orgánica (%)	Categoría
> 2.320	Muy bueno
1.546 - 2.319	Bueno
0.773 - 1.545	Mediano
0.131 - 0.772	Bajo
0.000 - 0.130	No apto

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

7.6.4. Nitrógeno

En la Tabla XIX, se presenta la clasificación de las cinco categorías de aptitud.

Tabla XIX. Categorías para la aptitud potencial del Nitrógeno

Nitrógeno	Categoría
> 448	Muy bueno
336 - 447	Bueno
224 - 335	Mediano
112 - 223	Bajo
0 - 111	No apto

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

7.6.5. Fósforo

En la Tabla XX, se presenta la clasificación de las cinco categorías de aptitud.

Tabla XX. Categorías para la aptitud potencial del Fósforo

Fósforo	Categoría
> 224	Muy bueno
168 - 223	Bueno
112 - 167	Mediano
56 - 111	Bajo
0 - 55	No apto

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

7.6.6. Potasio

En la Tabla XXI, se presenta la clasificación de las cinco categorías de aptitud consideradas.

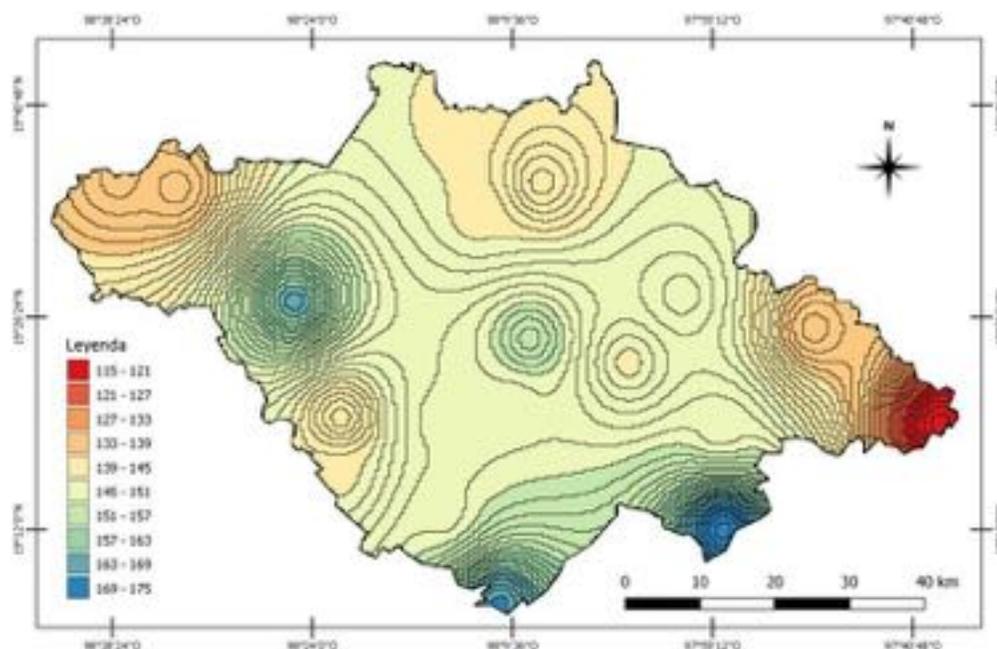
Tabla XXI. Categorías para la aptitud potencial del Potasio

Potasio	Categoría
> 216	Muy bueno
162 – 215	Bueno
108 – 161	Mediano
54 – 107	Bajo
0 – 53	No apto

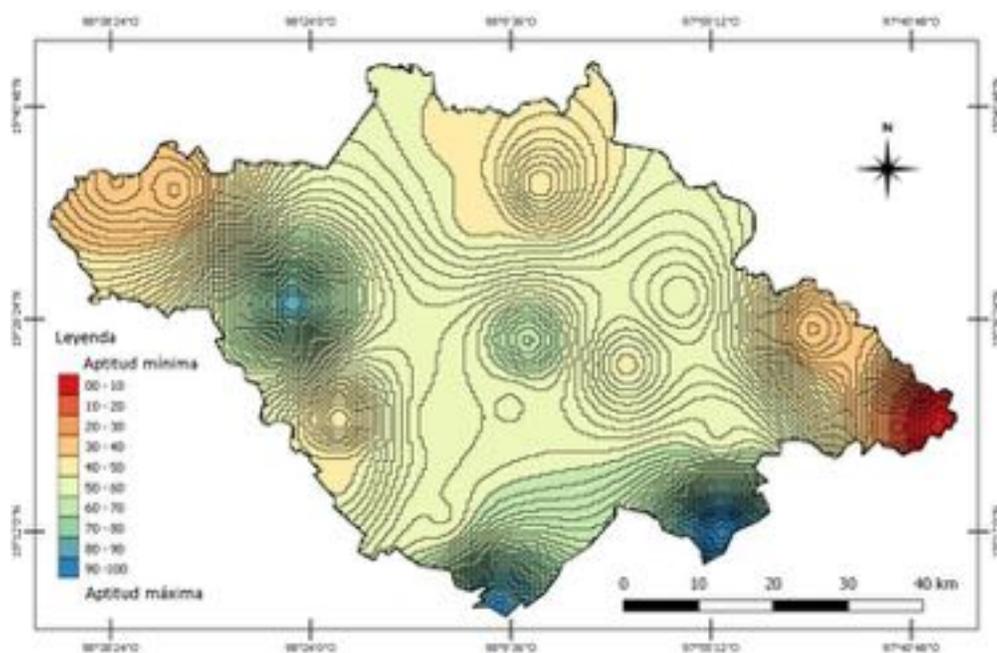
Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

7.7. Superficies aptas para el cultivo de maíz de temporal

En el Mapa 9 se presenta el **PC** interpolado, mientras que en el Mapa 10, se visualiza el **PC** estandarizado. Al comparar ambos mapas vemos que hay similitud en los mapas, éste último se utilizó para estimar las zonas potenciales.



Mapa 9. Interpolación del periodo de crecimiento (Fuente: Elaboración propia)



Mapa 10. Estandarización del periodo de crecimiento (Fuente: Elaboración propia)

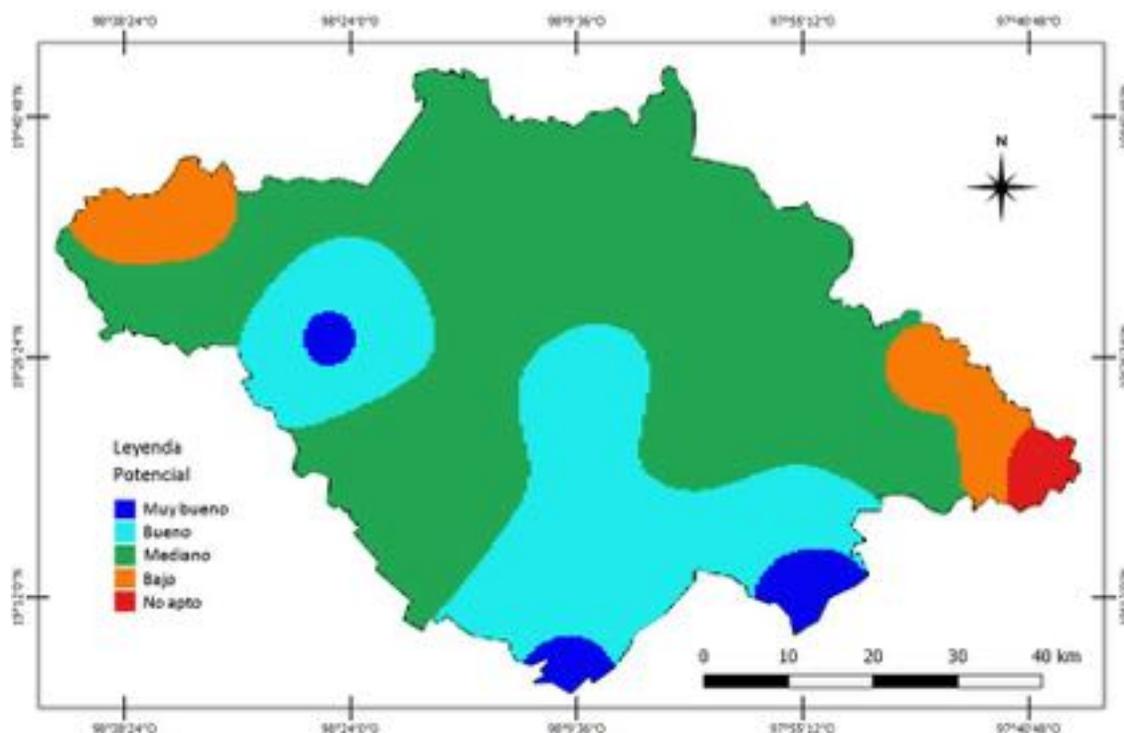
La ponderación para el **PC** que se utilizó se presenta en la, Tabla XXII.

Tabla XXII. Ponderación para el periodo de crecimiento

Categoría	Ponderación	Periodo de crecimiento
Muy Bueno	100	163 – 175
Bueno	90	151 – 162
Mediano	75	139 – 150
Bajo	20	127 – 138
No apto	10	115 – 126

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

En el Mapa 11 se visualiza el periodo de crecimiento ponderado, donde se identifican las zonas potenciales de aptitud, para el cultivo del maíz. Si solo se considera esta variable para identificar las mejores zonas potenciales del maíz, con base al ciclo vegetativo de las diferentes variedades, para las de ciclo largo las mejores zonas serían, la parte centro-norte del estado y unas zonas de los municipios de Ixtacuixtla, Españita, San Pablo del Monte, Ixtenco y Zitlaltepec, mientras que las zonas en las que se deberían sembrar variedades de ciclo precoz serían Altzayanca, Cuapiaxtla, Calpulalpan y El Carmen Tequexquitla.



Mapa 11. Zonas de aptitud potencial para el periodo de crecimiento (Fuente: Elaboración propia)

Para cada una de las variables consideradas, se realiza el mismo procedimiento, para identificar las zonas de aptitud potencial para el cultivo del maíz de temporal, considerando los requerimientos del desarrollo del maíz, así como la ponderación tanto por la variable, como de las diferentes categorías evaluadas. Donde se visualiza un efecto diferenciado, dependiendo de la variable a considerar. A continuación se presentan los mapas ponderados de acuerdo a las cinco categorías, para la aptitud potencial de las demás variables evaluadas.

Altitud

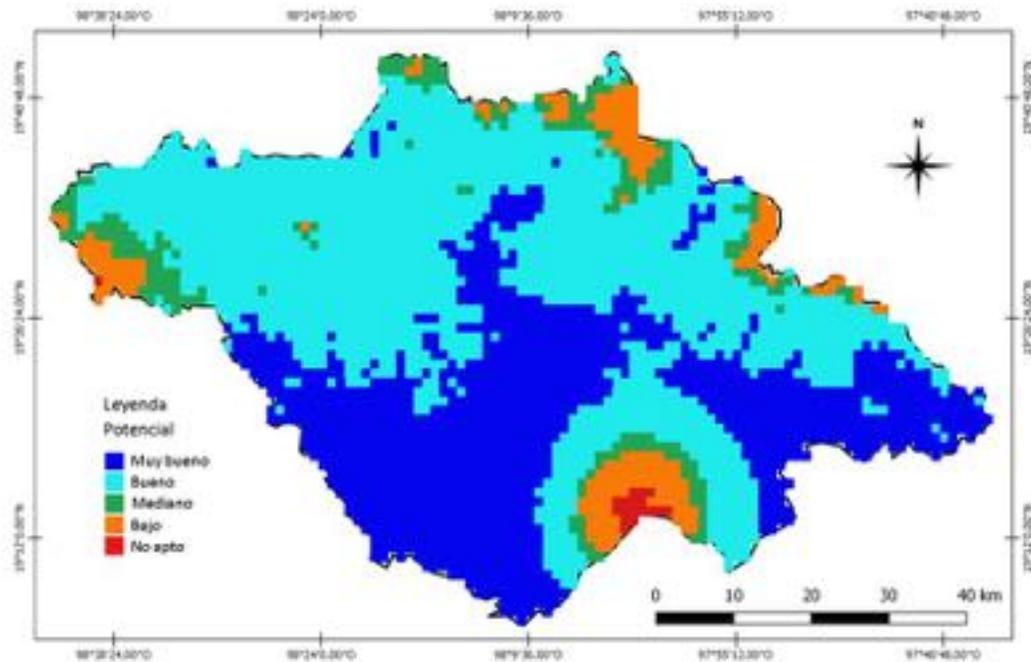
En la Tabla XXIII, se visualiza la ponderación de la altitud, que se utilizó para las cinco categorías.

Tabla XXIII. Ponderación para la altitud

Categoría	Ponderación	Altitud
Muy Bueno	90.0	2 200 – 2 500
Bueno	81.0	2 500 – 2 800
Mediano	67.5	2 800 – 2 950
Bajo	18.0	2 950 -3 500
No apto	9.0	> 3 500

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

En el Mapa 12 se presenta la altitud ponderada, donde se identifican las zonas potenciales de aptitud, para el cultivo del maíz. Las cuales no necesariamente, coinciden con las zonas identificadas en el **PC**. Las mejores zonas para la altitud serían la parte sur-oeste del estado y curiosamente parte de Cuapiaxtla y El Carmen Tequexquitla, las cuales considerando el **PC** es donde se identificaron condiciones para variedades de ciclo corto de maíz. A partir del análisis de estas dos variables podemos visualizar la importancia de la investigación, ya que al integrar más variables se van a ir delimitando con mayor certeza aquellas zonas potenciales con las mejores condiciones edafoclimáticas para el desarrollo del cultivo del maíz.



Mapa 12. Zonas de aptitud potencial para la Altitud (Fuente: Elaboración propia)

Cabe destacar, la importancia de una buena ponderación, ya que al asignar estos en base a la revisión de la bibliografía (zona del altiplano mexicano), estamos asegurando una buena representatividad y confianza en los resultados obtenidos. Por lo que ya no fue necesario realizar esta ponderación, considerando entrevistas a expertos, productores e investigadores en el estado de Tlaxcala. Aunque sería importante más adelante, recabar esta información pertinente para validar si la ponderación utilizada corresponde a la zona de estudio.

Pendiente

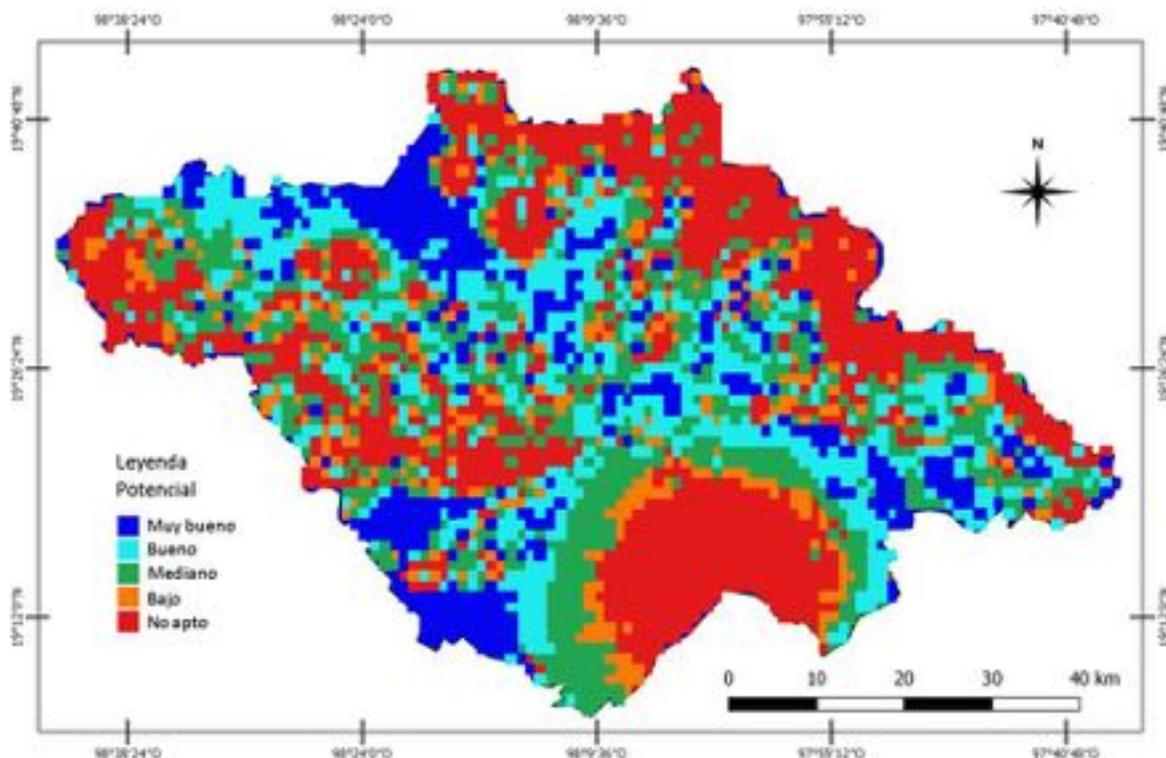
La ponderación de la pendiente, que se utilizó para las cinco categorías, se presenta en la Tabla XXIV.

Tabla XXIV. Ponderación para la pendiente

Categoría	Ponderación	Pendiente
Muy Bueno	10.0	0 – 3
Bueno	9.0	3 – 7
Mediano	7.5	7 – 12
Bajo	2.0	12 – 15
No apto	1.0	> 15

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

En el Mapa 13 se visualiza la pendiente ponderada, donde se identifican las zonas potenciales de aptitud, para el cultivo del maíz. Se identifica que la mitad del estado, relativamente estaría considerado con potencial bueno y muy bueno, seguido de potencial mediano con zonas cercanas a las áreas boscosas.



Mapa 13. Zonas de aptitud potencial para la pendiente (Fuente: Elaboración propia)

Tipo de suelo

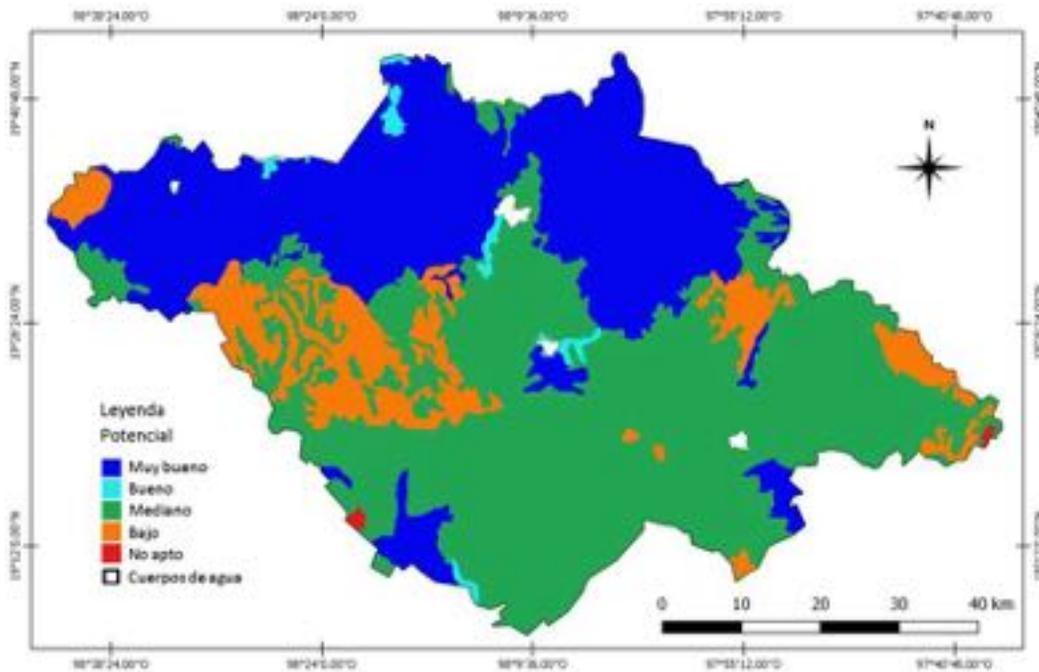
En la Tabla XXV, se visualiza la ponderación para el tipo de suelo, que se utilizó para las cinco categorías.

Tabla XXV. Ponderación para el tipo de suelo

Categoría	Ponderación	Tipo de suelo
Muy Bueno	85.00	Andosol y Phaeozem
Bueno	76.50	Vertisol
Mediano	63.75	Fluvisol, Cambisol y Regosol
Bajo	17.00	Luvisol, Litosol y Rendzina
No apto	8.00	Solonchak y Gleysol

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

En el Mapa 14 se presenta el tipo de suelo ponderado, donde se identifican las zonas potenciales de aptitud, para el cultivo del maíz. El estado en su mayoría estaría considerado como de potencial mediano, seguido de muy bueno. Donde la zona norte, oeste, Apizaco, Ixtenco y Zacatelco, serían de potencial muy bueno, mientras que la zona centro y sur se identifican con potencial mediano para el cultivo del maíz. Destaca una zona no apta para el cultivo del maíz en El Carmen Tequexquitla y Nativitas, y zonas con potencial bajo en Calpulalpan, Españaita, Ixtacuixtla, Terrenate y Alzayanca.



Mapa 14. Zonas de aptitud potencial para el tipo de suelo (Fuente: Elaboración propia)

Textura

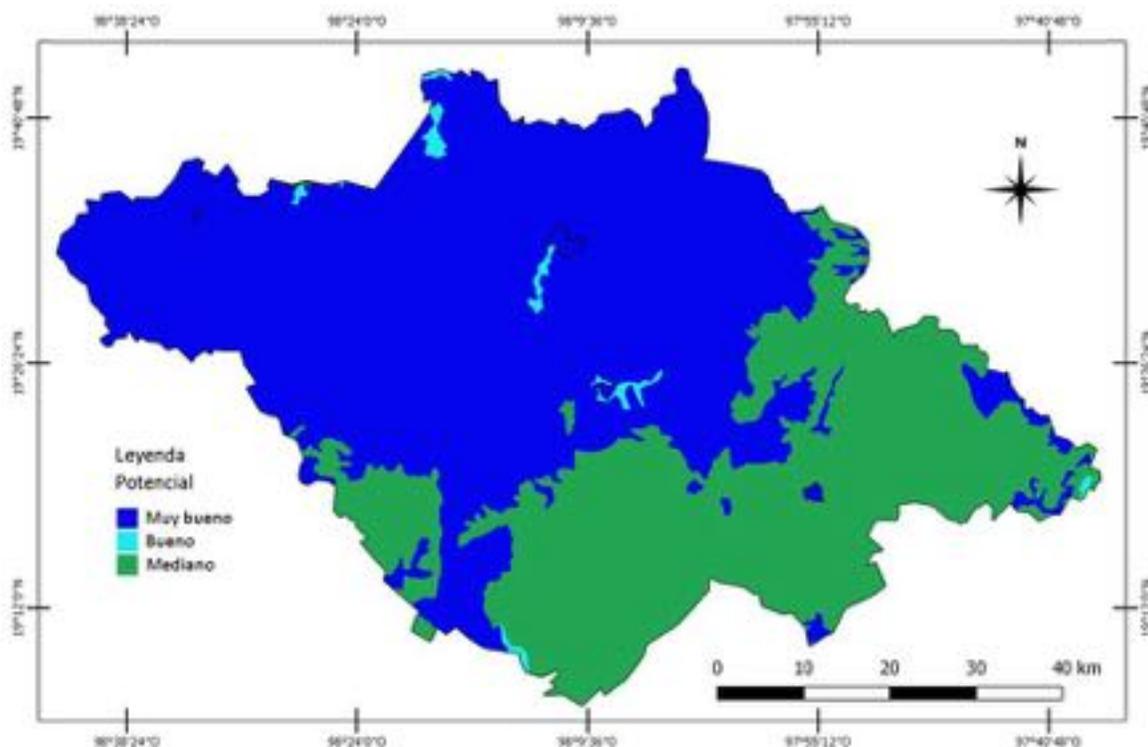
La ponderación de la textura que se utilizó para las cinco categorías se presenta en la Tabla XXVI.

Tabla XXVI. Ponderación para la Textura

Categoría	Ponderación	Textura
Muy Bueno	20.0	Media
Bueno	18.0	Fina
Mediano	15.0	Gruesa

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

En el Mapa 15 se visualiza la textura ponderada, donde se identifican las zonas potenciales de aptitud, para el cultivo del maíz. En la mayor parte del estado se identifican zonas de potencial muy bueno, zona centro, norte, oeste y la zona de Zacatelco y Altzayanca. Mientras que las de potencial mediano se encuentran en la zona sur, este y la zona de Tepetitla.



Mapa 15. Zonas de aptitud potencial para la Textura (Fuente: Elaboración propia)

Densidad Aparente

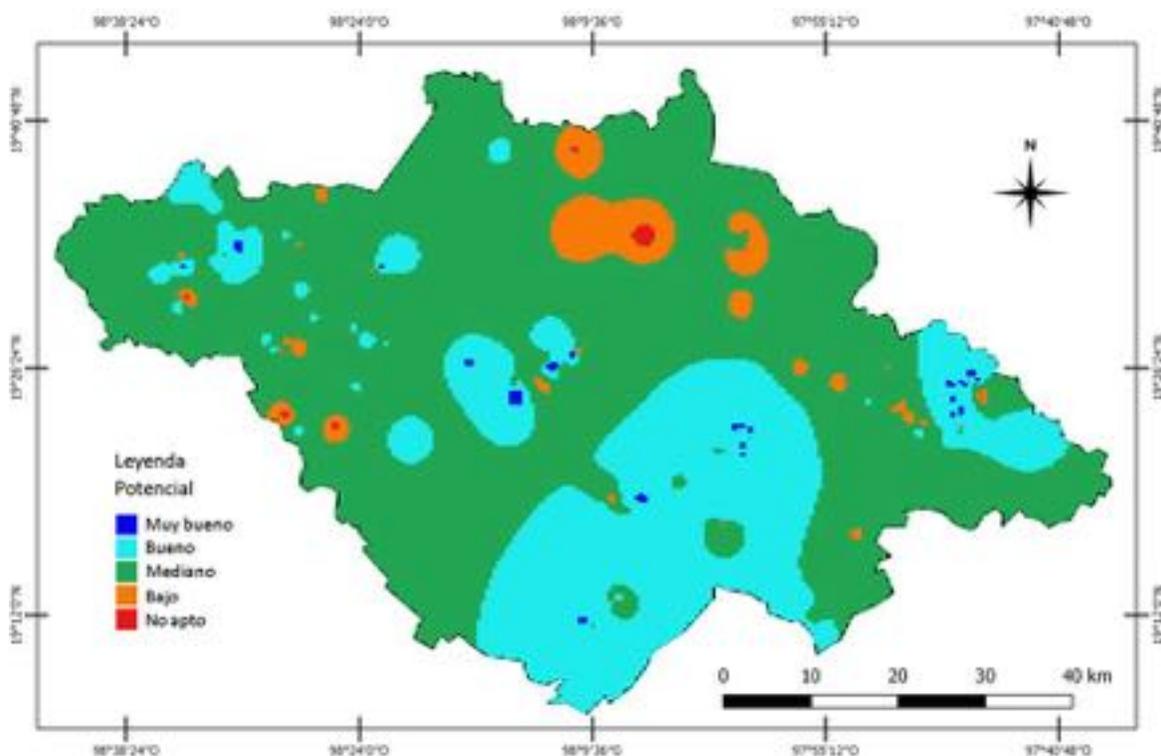
En la Tabla XXVII, se visualiza la ponderación de la densidad aparente, que se utilizó para las cinco categorías.

Tabla XXVII. Ponderación para la densidad aparente

Categoría	Ponderación	Densidad aparente
Muy Bueno	30.0	< 1.05
Bueno	27.0	1-05 - 1.15
Mediano	22.5	1.15 - 1.24
Bajo	6.0	1.24 - 1.34
No apto	3.0	> 1.34

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

En el Mapa 16 se visualiza la densidad aparente ponderada, identificando donde existen las zonas potenciales de aptitud, para el cultivo del maíz. La mayor parte del estado estaría considerado como de potencial mediano, seguido de potencial bueno en las zonas cercanas a la Malinche, Alzayanca, Calpulalpan, Hueyotlipan, Ixtacuixtla y Xaltocan, principalmente.



Mapa 16. Zonas de aptitud potencial para la densidad aparente (Fuente: Elaboración propia)

pH

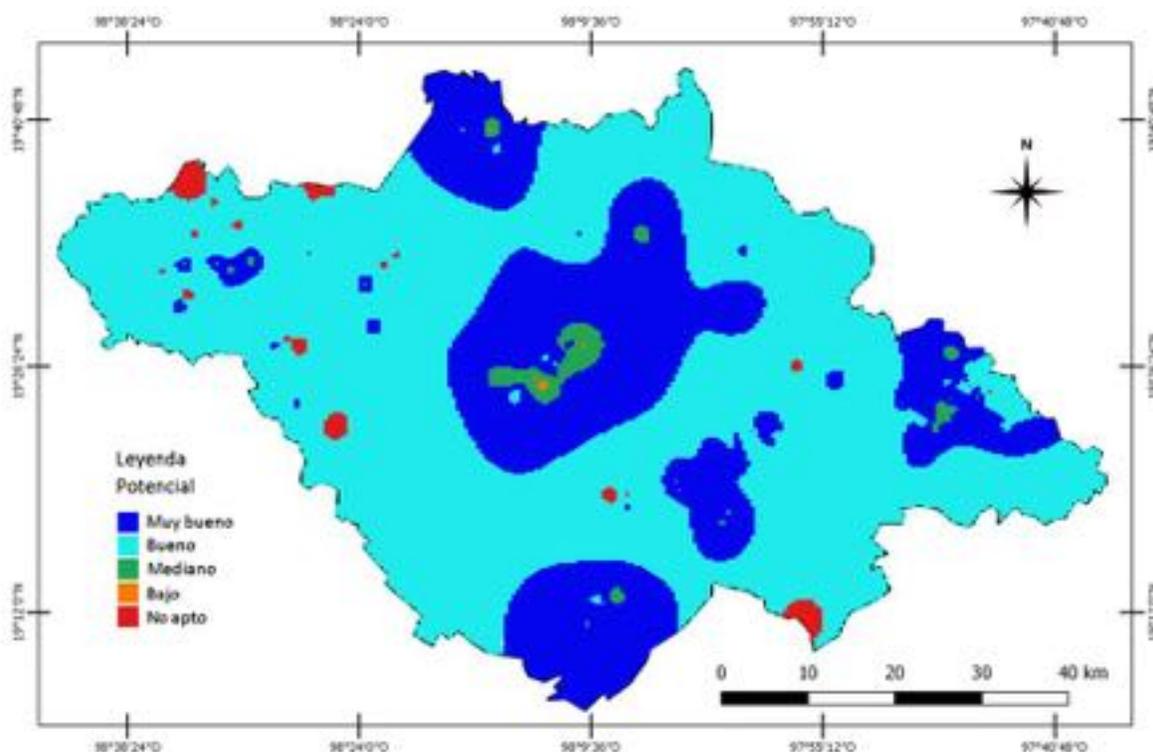
La ponderación que se utilizó para las cinco categorías del pH, se visualiza en la Tabla XXVIII.

Tabla XXVIII. Ponderación para el pH

Categoría	Ponderación	pH
Muy Bueno	30.0	6.1 - 6.5
Bueno	27.0	6.6 - 7.3
Mediano	22.5	5.6 - 6.0
Bajo	6.0	4.5 - 5.5
No apto	3.0	< 4.5 y >7.4

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

En el Mapa 17 se visualiza el pH ponderado, donde se identifican las zonas potenciales de aptitud, para el cultivo del maíz. Con potencial bueno se encuentran la parte central del estado, la zona de Tlaxco, Alzayanca, San José Teacalco y la zona de San Pablo del Monte, principalmente. Mientras que el área restante estaría considerada como de potencial mediano.



Mapa 17. Zonas de aptitud potencial para el pH (Fuente: Elaboración propia)

Conductividad eléctrica

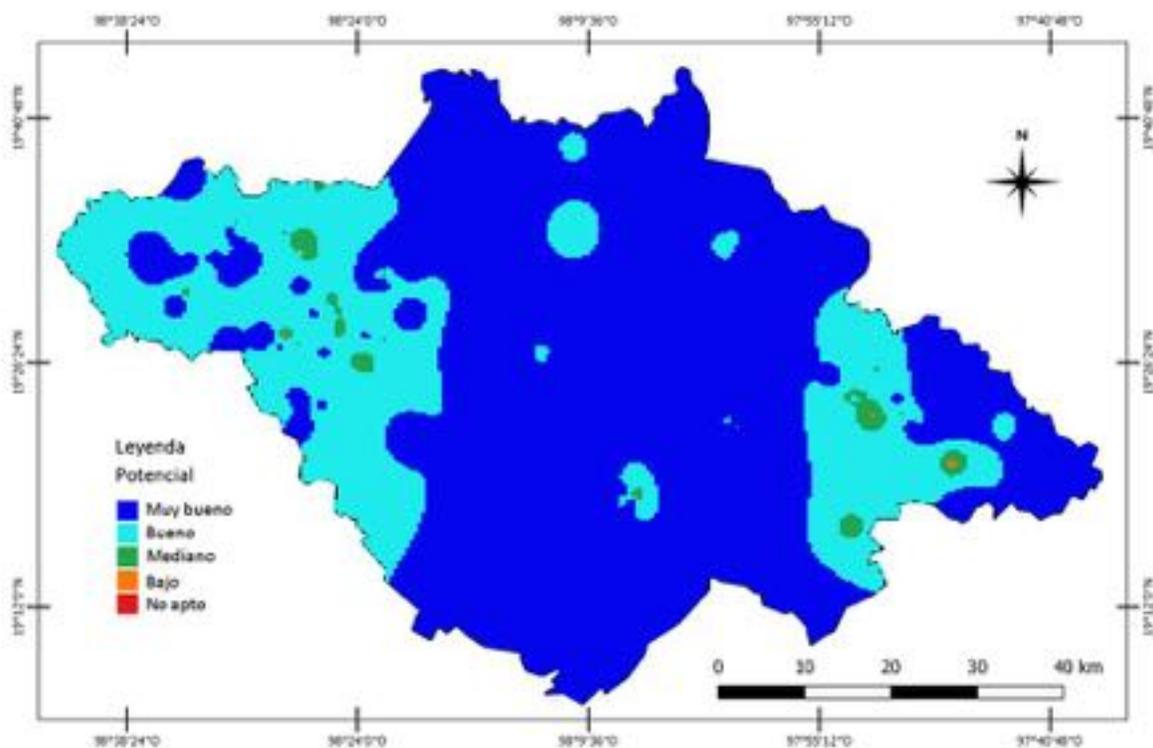
En la Tabla XXIX, se visualiza la ponderación que se utilizó para las cinco categorías de la conductividad eléctrica.

Tabla XXIX. Ponderación para la conductividad eléctrica

Categoría	Ponderación	Conductividad eléctrica
Muy Bueno	30.0	0.000 - 0.294
Bueno	27.0	0.295 - 0.588
Mediano	22.5	0.589 - 0.882
Bajo	6.0	0.883 - 1.176
No apto	3.0	1.177 - 1.470

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

En el Mapa 18 se presenta la ponderación de la conductividad eléctrica, donde se identifican las zonas potenciales de aptitud, para el cultivo del maíz. La mayor parte de estado estaría catalogado como de potencial muy bueno, seguido de potencial bueno.



Mapa 18. Zonas de aptitud potencial para la conductividad eléctrica (Fuente: Elaboración propia)

Materia orgánica

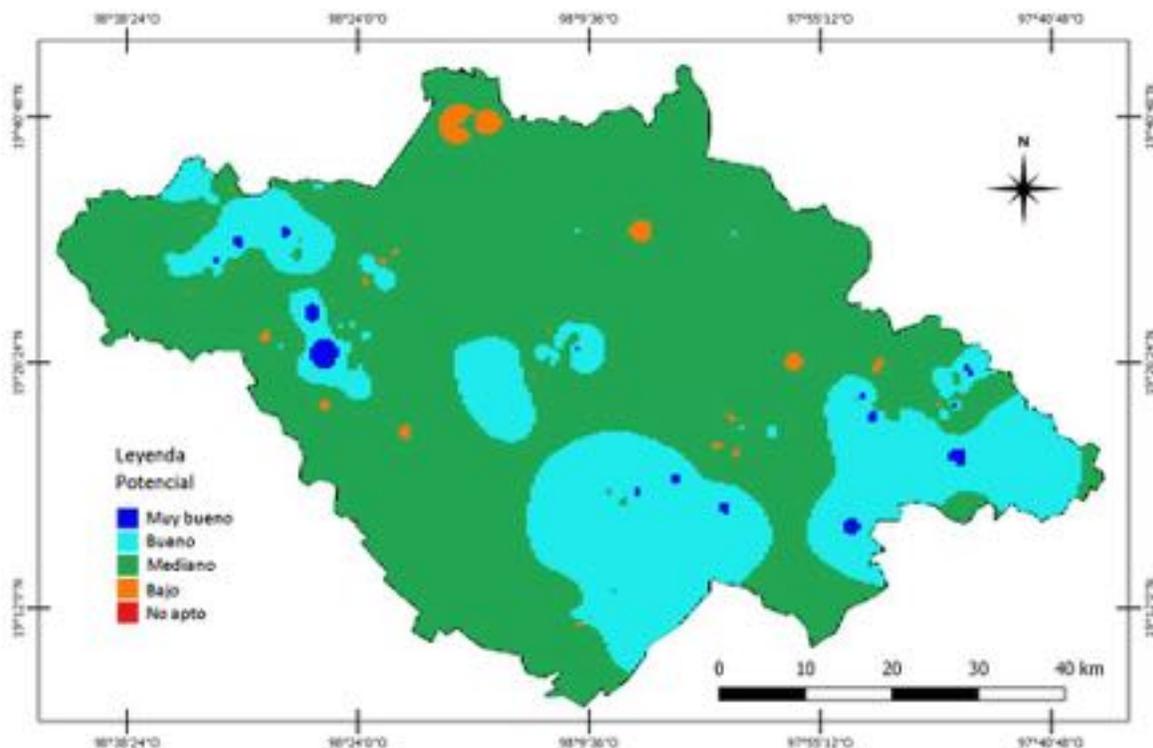
La ponderación de la materia orgánica que se utilizó para las cinco categorías, se visualiza en la Tabla XXX.

Tabla XXX. Ponderación para la materia orgánica

Categoría	Ponderación	Materia orgánica
Muy Bueno	30.0	> 2.320
Bueno	27.0	1.546 - 2.319
Mediano	22.5	0.773 - 1.545
Bajo	6.0	0.131 - 0.772
No apto	3.0	0.000 - 0.130

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

En el Mapa 19 se visualiza la materia orgánica ponderada, identificando donde existen las zonas potenciales de aptitud, para el cultivo del maíz. La mayor parte del estado se identificó como de potencial mediano, seguido de potencial bueno, principalmente, en la zona sur, este, Apizaco, Calpulalpan, Españaita y Xaltocan.



Mapa 19. Zonas de aptitud potencial para la materia orgánica (Fuente: Elaboración propia)

Nitrógeno

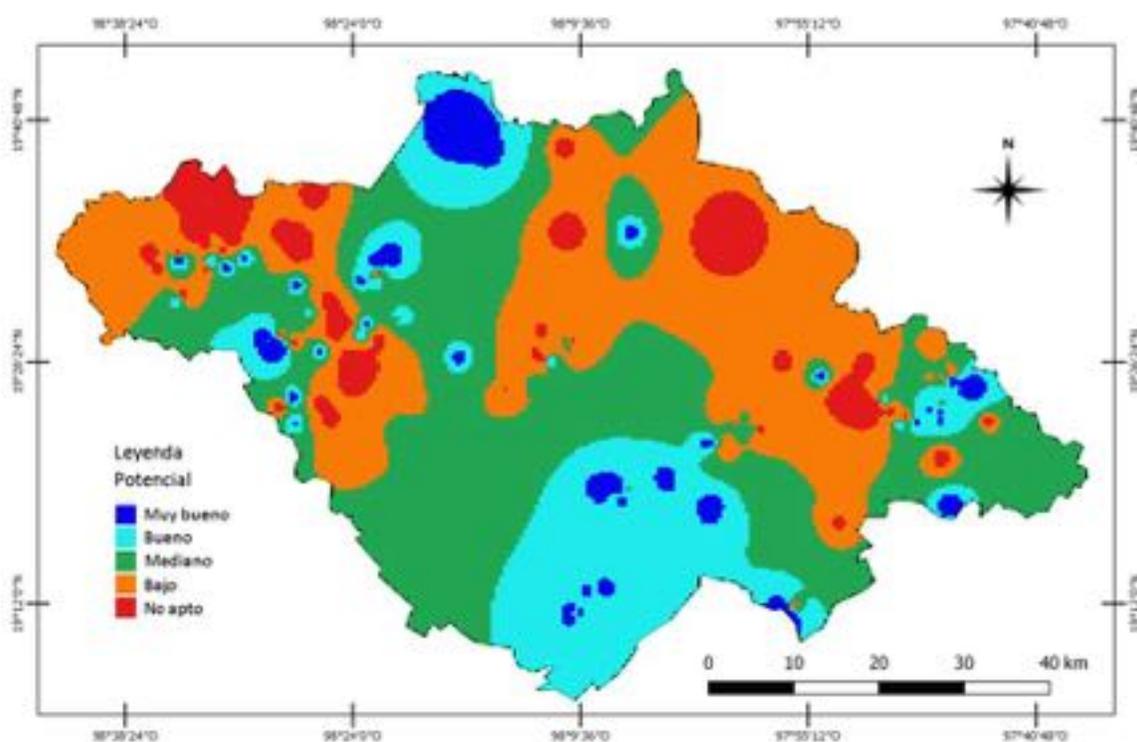
En la Tabla XXXI, se presenta la ponderación que se utilizó para las cinco categorías del Nitrógeno.

Tabla XXXI. Ponderación para el Nitrógeno

Categoría	Ponderación	Nitrógeno
Muy Bueno	30.0	> 448
Bueno	27.0	336 - 447
Mediano	22.5	224 - 335
Bajo	6.0	112 - 223
No apto	3.0	0 - 111

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

En el Mapa 20 se visualiza el Nitrógeno ponderado, donde se identifican las zonas potenciales de aptitud, para el cultivo del maíz. Se identifican con potencial mediano, principalmente, la zona centro-norte del estado, Españita y Nanacamilpa. Mientras que las zonas con potencial bajo y no apto, se identifican en Calpulalpan, Huamantla, Ixtacuixtla, Terrenate y Tlaxco, principalmente.



Mapa 20. Zonas de aptitud potencial para el Nitrógeno (Fuente: Elaboración propia)

Fósforo

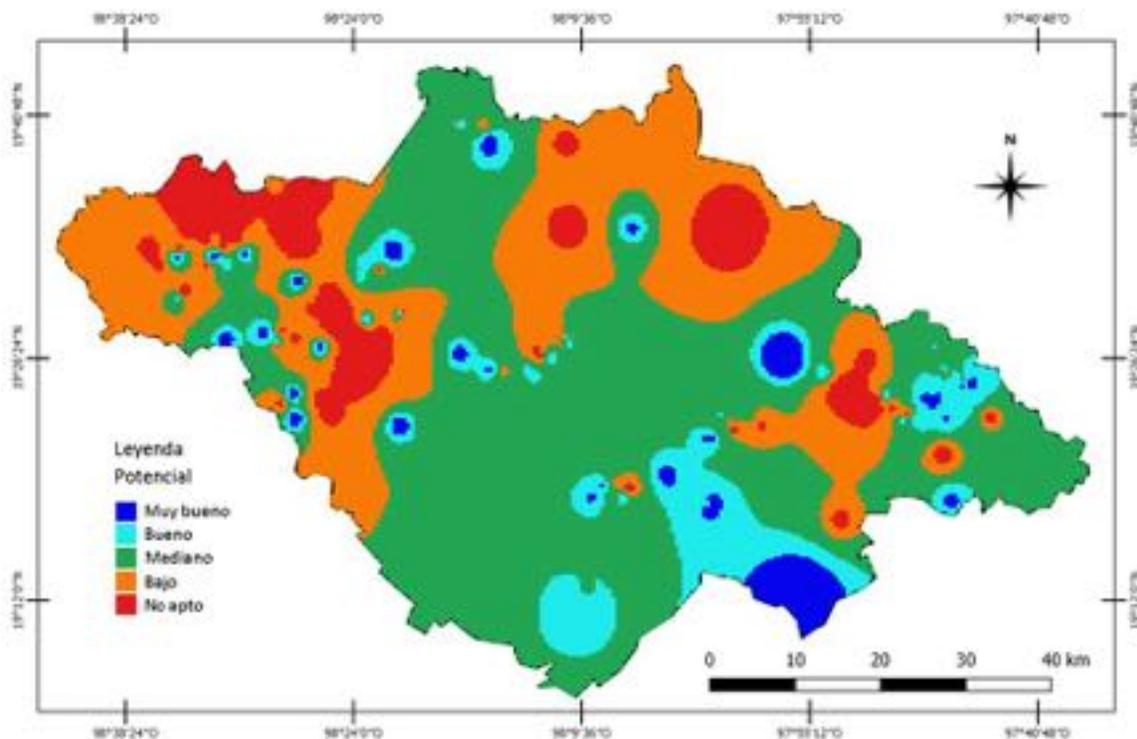
La ponderación que se utilizó para las cinco categorías del Fósforo, se visualiza en la Tabla XXXII.

Tabla XXXII. Ponderación considerada para el Fósforo

Categoría	Ponderación	Fósforo
Muy Bueno	30.0	> 224
Bueno	27.0	168 – 223
Mediano	22.5	112 – 167
Bajo	6.0	56 - 111
No apto	3.0	0 - 55

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

En el Mapa 21 se presenta el Fósforo ponderado, donde se identifican las zonas potenciales de aptitud, para el cultivo del maíz. Hay una similitud relativa con el Nitrógeno, en cuanto a las zonas con bajo y no apto potencial. Mientras que las zonas con mediano potencial se incrementan y disminuyen las de potencial bueno.



Mapa 21. Zonas de aptitud potencial para el Fósforo (Fuente: Elaboración propia)

Potasio

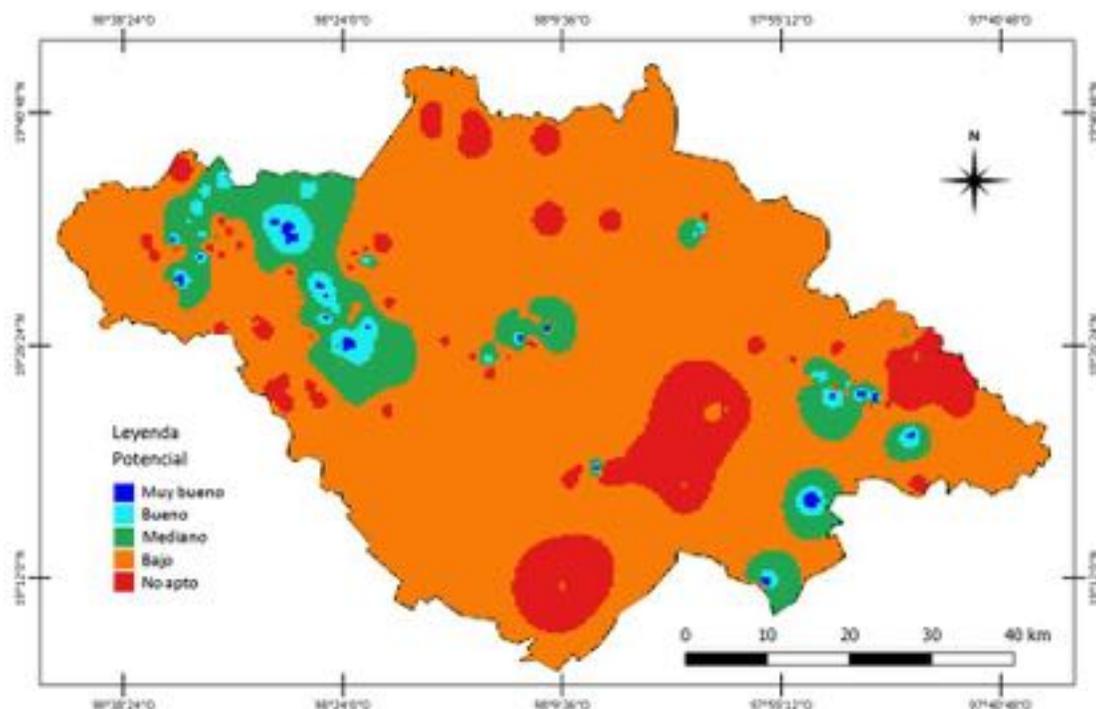
En la Tabla XXXIII, se presenta la ponderación del potasio, que se utilizó para las cinco categorías.

Tabla XXXIII. Ponderación para el Potasio

Categoría	Ponderación	Potasio
Muy Bueno	30.0	> 216
Bueno	27.0	162 – 215
Mediano	22.5	108 – 161
Bajo	6.0	54 – 107
No apto	3.0	0 – 53

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión bibliográfica

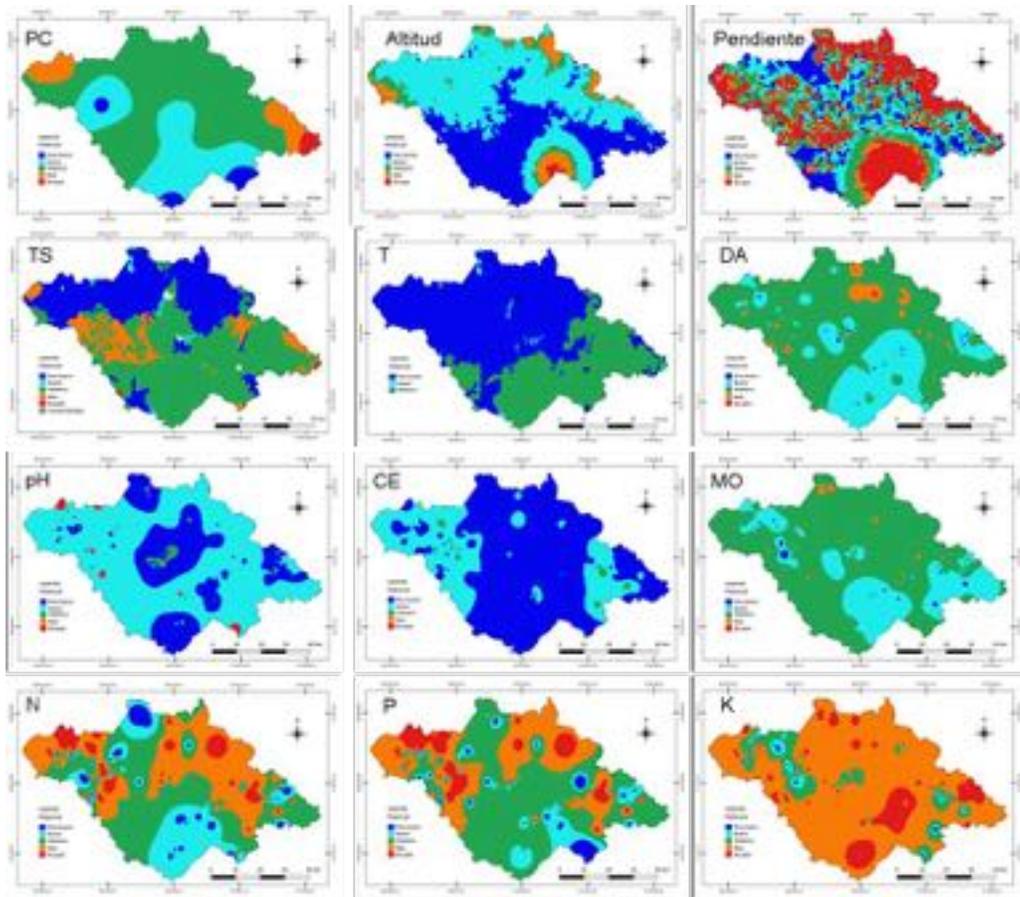
En el Mapa 22 se visualiza el Potasio ponderado, donde se identifican las zonas potenciales de aptitud, para el cultivo del maíz. Esta es la única variable donde la mayor parte del estado presenta condiciones de potencial bajo y no apto, destacan zonas con potencial mediano en Apizaco, Calpulalpan, Españaita, Sanctórum, Huamantla, Ixtenco, Xaltocan y Zitlaltepec, principalmente.



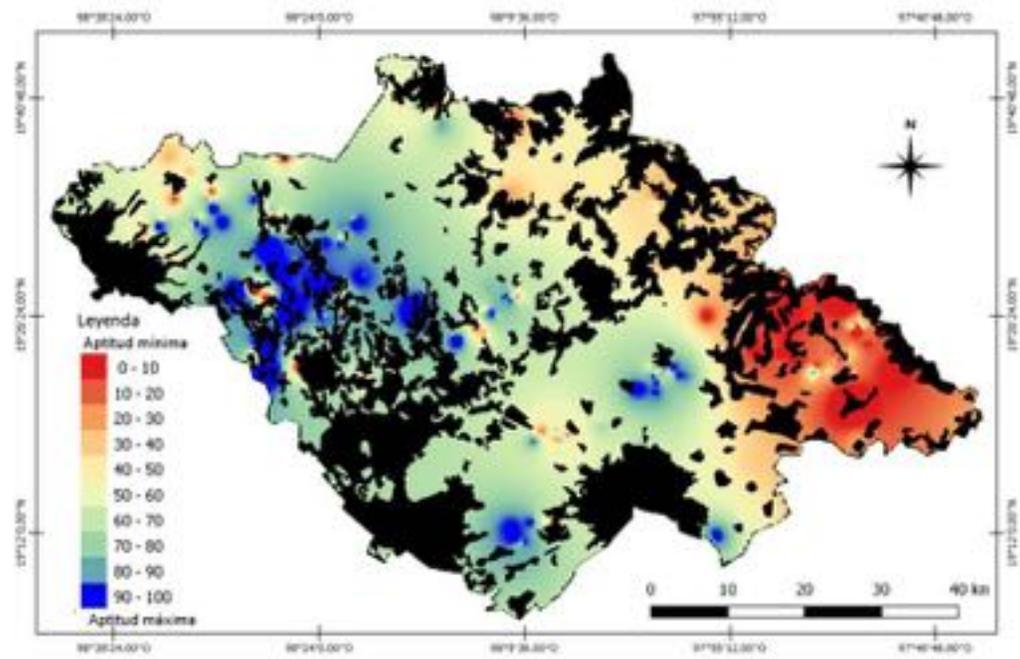
Mapa 22. Zonas de aptitud potencial para el Potasio (Fuente: Elaboración propia)

Se identifica un impacto diferenciado en cada una de las variables, al determinar las zonas de aptitud potencial para el cultivo de maíz de temporal, Mapa 23, por lo que resulta importante integrar la mayor información disponible, para identificar con mayor certeza las diferentes zonas de aptitud potencial. Finalmente, se obtiene el mapa que integra las zonas potenciales del maíz de temporal considerando todas las variables, las cuales poseen las mejores condiciones edafoclimáticas, en función de los requerimientos para el desarrollo del maíz.

En el Mapa 24, se visualizan las zonas potenciales del maíz de temporal, una vez que se han delimitado mediante las cartas de uso de suelo y vegetación (sombreado de color negro). Ya que estas zonas son importantes pero no son propicias para la agricultura.

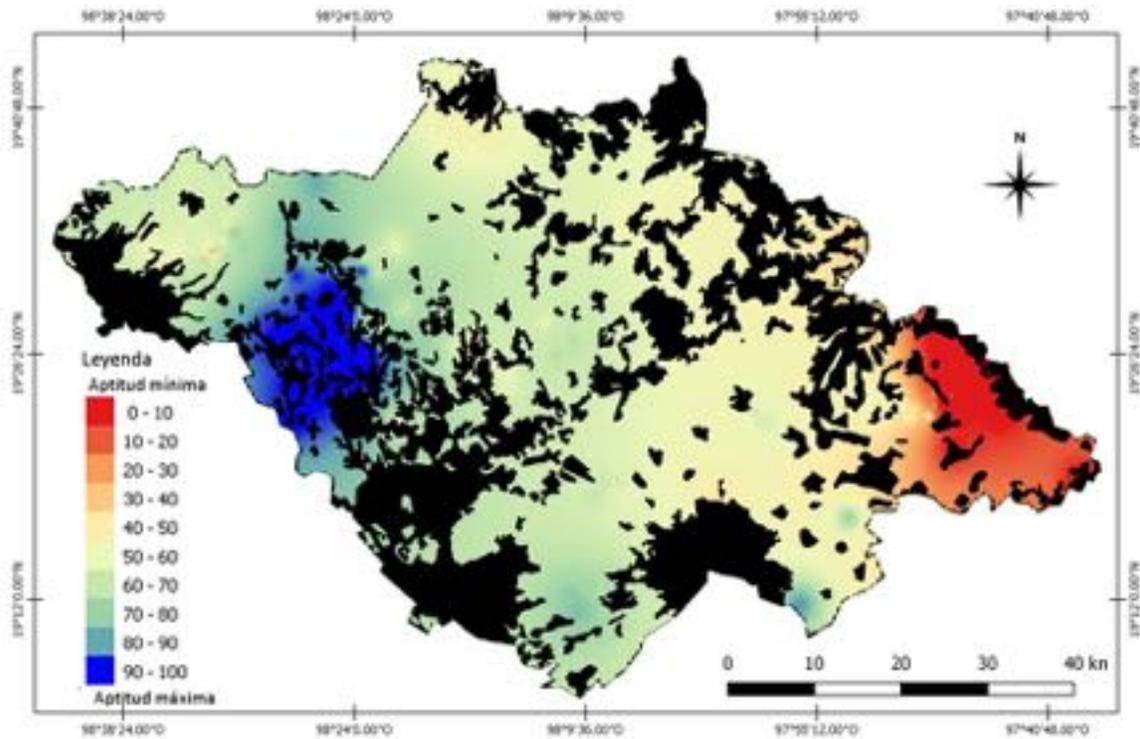


Mapa 23. Zonas de aptitud potencial de las variables evaluadas (Fuente: Elaboración propia)



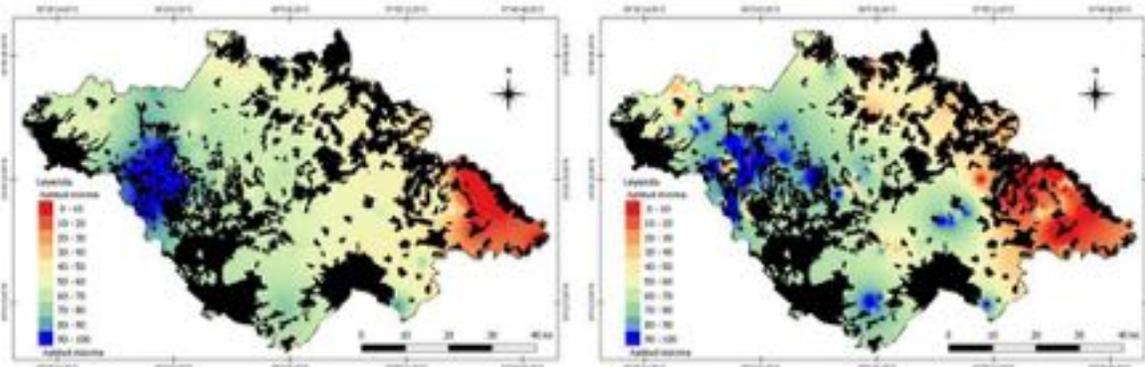
Mapa 24. Zonas de aptitud potencial para el maíz de temporal (Fuente: Elaboración propia)

Se realizó un experimento considerando las tres principales variables (periodo de crecimiento, altitud y tipo de suelo), para identificar si hay una diferencia al comparar cuando se consideran todas las variables. En el Mapa 25 se presentan las zonas potenciales del maíz de temporal, considerando solo las tres variables.



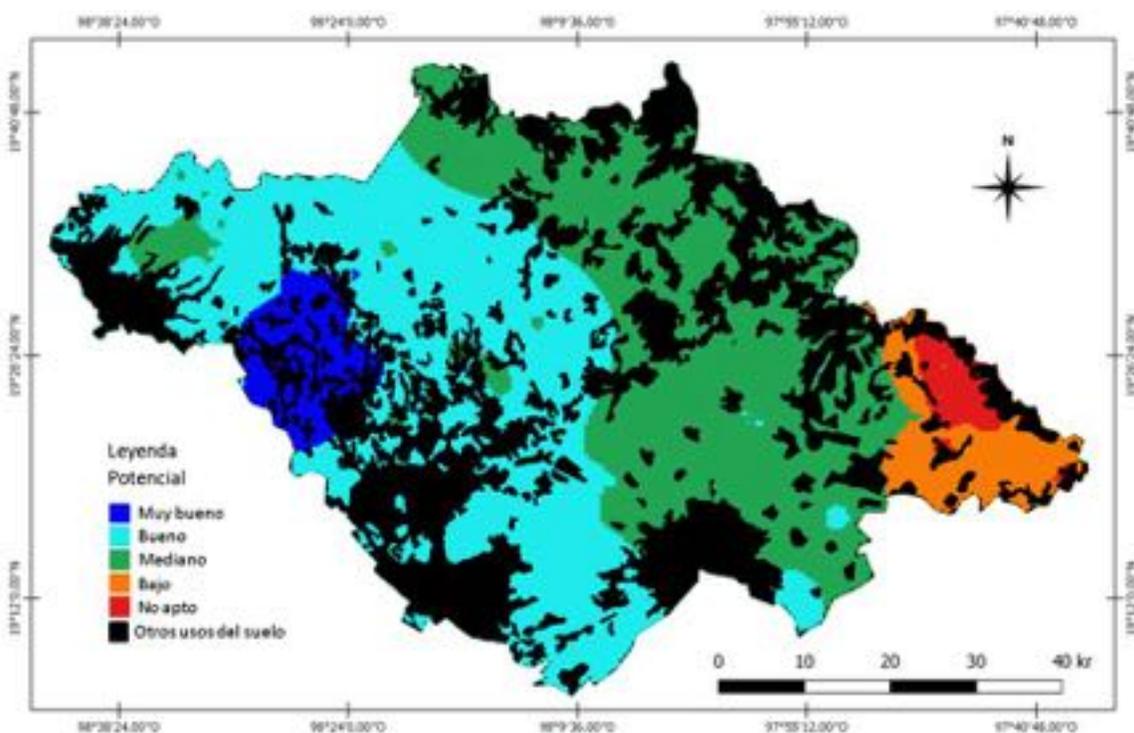
Mapa 25. Zonas de aptitud potencial PC, Altitud y TS (Fuente: Elaboración propia)

Al comparar las zonas potenciales considerando solo las tres variables con todas las variables, se aprecia que hay cierta similitud al comparar los resultados. En el Mapa 26 se comparan las zonas potenciales considerando las tres variables (lado izquierdo) y las zonas potenciales integrando todas las variables (lado derecho). Se aprecia un cambio en las zonas con aptitud máxima, las cuales se representan de mejor forma y en otros sitios ubicados en la periferia de la Malinche, cuando se consideran todas las variables, lo que permite identificar con mayor certeza las zonas potenciales para el cultivo del maíz. Esta diferencia se aprecia mejor, mejor cuando se definen las zonas potenciales, considerando las cinco categorías evaluadas.



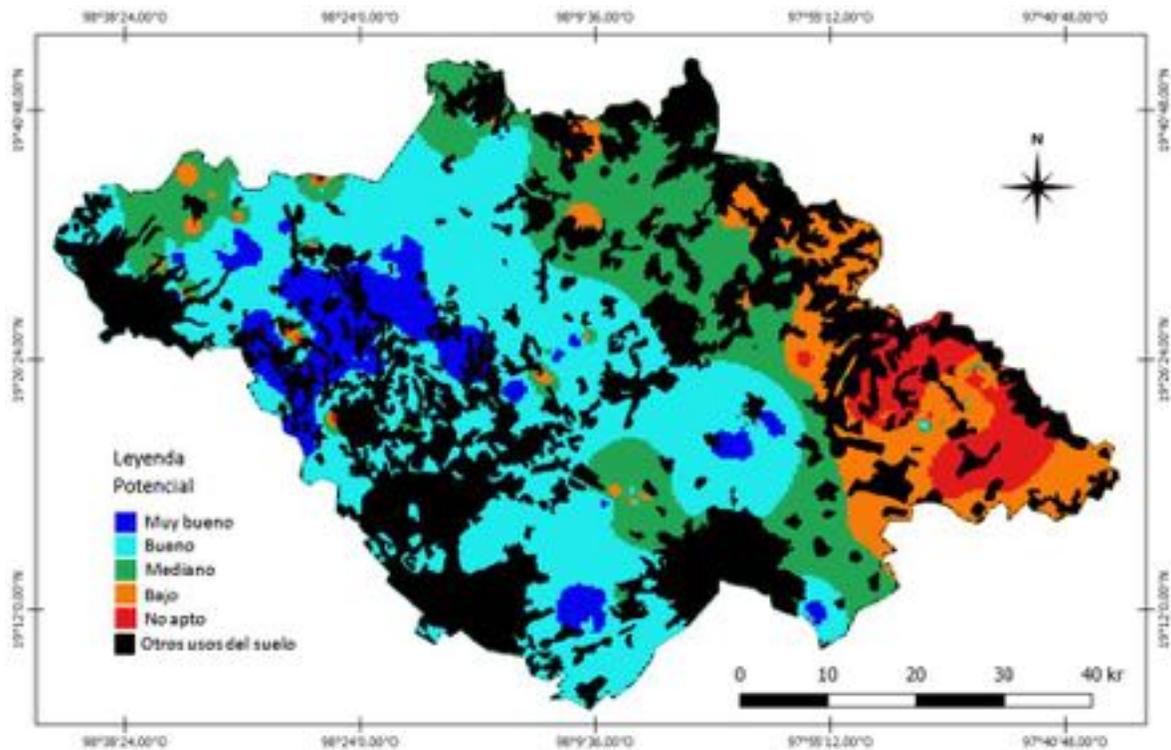
Mapa 26. Comparativo zonas de aptitud potencial (Fuente: Elaboración propia)

En el Mapa 27 se presenta las zonas potenciales por categoría considerando las tres variables principales, las cuales se compararán con las zonas potenciales integrando todas las variables.



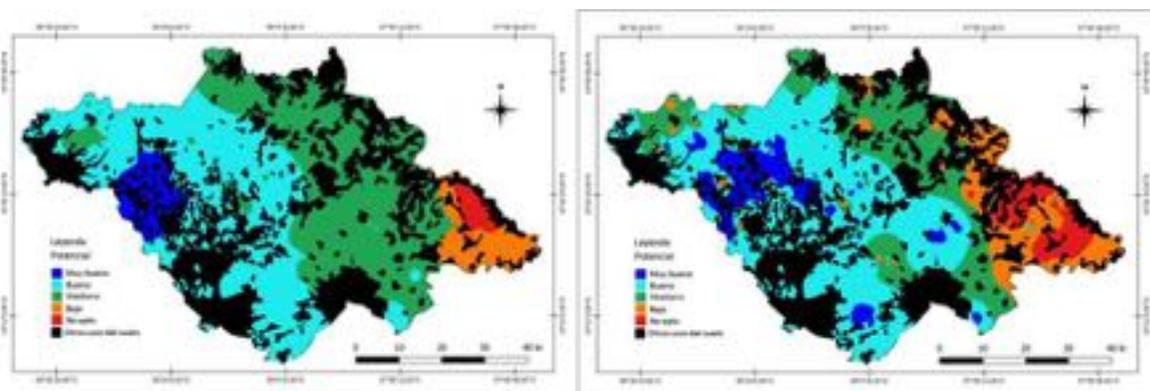
Mapa 27. Zonas de aptitud potencial PC, Altitud y TS por categoría (Fuente: Elaboración propia)

En el Mapa 28 se presentan las zonas potenciales al integrar todas las variables evaluadas, considerando las cinco zonas potenciales, lo que permite identificar con mayor certeza las mejores condiciones edafoclimáticas para el cultivo de maíz de temporal.



Mapa 28. Zonas de aptitud potencial todas las variables por categoría (Fuente: Elaboración propia)

Al intercomparar las zonas potenciales, Mapa 29, se aprecia una diferencia considerable, que si sólo se consideran las tres variables principales (lado derecho), aumentan las zonas potenciales de muy bueno y bueno, mientras que disminuyen las zonas de mediano potencial y las zonas con condiciones no propicias “no apto” y las de bajo potencial aumentan, relativamente, aunque las de potencial bajo y “no apto”, se presentan en otras zonas.



Mapa 29. Comparativo zonas de aptitud potencial por categoría (Fuente: Elaboración propia)

8 DISCUSIÓN

La agricultura seguirá siendo el impulso del crecimiento y desarrollo rural, por ende, la productividad agrícola será un factor determinante para satisfacer la creciente demanda de alimento de la población (Osorio *et al.* 2012). Por lo que resalta la importancia de esta investigación al identificar las zonas potenciales del maíz de temporal, lo que permitirá potencializar este cultivo.

Los resultados indican que hay un impacto diferenciado en cada una de las variables, al determinar las zonas de aptitud potencial para el cultivo de maíz de temporal, por lo que sería importante integrar información adicional más adelante, que nos permita actualizar esta investigación, para generar nuevos mapas de las áreas con potencial productivo de mayor resolución y precisión, por ejemplo, radiación solar, humedad del suelo y profundidad del suelo, entre otros, como lo mencionan Kihoro *et al.* (2013), además, proponen seleccionar un mayor número de factores como el suelo, el clima, las instalaciones de riego y los factores socioeconómicos que influyen en el uso sostenible de la Tierra. Por su parte, Kazemi *et al.* (2016) recomiendan que estudios similares utilicen otros parámetros como la humedad relativa, la velocidad del viento y la radiación solar.

Para integrar algunas de las variables que se mencionan, hace falta instalar estaciones climatológicas con sensores específicos en lugares próximos a las áreas de cultivo, para complementar las estaciones de la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas del estado de Tlaxcala las cuales están instaladas en las zonas urbanas, éstas son importantes, ya que a pesar de encontrarse en la ciudad permite considerar la información para una mejor interpolación y estimar datos donde no haya estaciones climatológicas. No se recomienda reubicar éstas, ya que son parte primordial de un Sistema de Alerta Temprana que proveerá información relevante a la sociedad.

En esta investigación las variables que presentaron mayor importancia relativa, de acuerdo a la ponderación aplicada, son el periodo de crecimiento, altura y tipo de suelo, las cuales coinciden con estudios similares realizados en la región del

altiplano mexicano, para la identificación de las zonas potenciales de los cultivos, están los de Sotelo *et al.* 2016, donde las variables que consideran con mayor peso son la temperatura, altura, precipitación y tipo de suelo. Ya que la temperatura y precipitación están implícitas en el periodo de crecimiento.

Por su parte, Ceballos *et al.* 2008 consideran el índice precipitación/evaporación, altitud y profundidad de suelo como las más importantes. En relación a esta investigación sólo coinciden las dos primeras, debido a que no se consideró la profundidad del suelo.

Por otro lado, María y Volke 1999 para la zona oriente del estado de Tlaxcala, identificaron que la precipitación, fecha de siembra, variedad de maíz, pendiente, profundidad y potasio intercambiable, son los factores que afectan el rendimiento de maíz. Comparando con este trabajo, se infiere que la precipitación, fecha de siembra y variedad de maíz, se pueden deducir del periodo de crecimiento.

Es importante complementar esta investigación con la experiencia de campo que tienen los productores, en el **DDR** 165 Huamantla, ya que es trascendental considerar en la fecha de siembra la presencia de una fase de la luna en especial, fase creciente que es cuando se deben sembrar los cultivos “sin enterrar” a profundidad prescrita, de lo contrario comentan los productores “se pudre la semilla”.

Cabe destacar que algunas variedades de maíz a pesar de las condiciones climáticas y edáficas cambiantes, se han ido adaptando a través del tiempo de forma natural. Challinor *et al.* (2016) mencionan que el desarrollo de variedades de cultivos que se adapten mejor a las nuevas condiciones climáticas es vital para la producción de alimentos en el futuro, debido a que los aumentos en la temperatura media aceleran el desarrollo de los cultivos, lo que resulta en duraciones más cortas de los cultivos y reduce el tiempo para acumular biomasa y rendimiento. El proceso de nuevas variedades de maíz puede demorar hasta 30 años. Por lo que la adaptación inducida toma un papel preponderante para acelerar este proceso.

Smith *et al.* (2014) anticipan una mayor ganancia genética para el 2015 y años subsiguientes para el maíz de temporal, siempre que continúen las inversiones en mejoramiento de maíz y no haya cambios sustanciales en la economía de la producción de maíz, además el uso más eficaz de la diversidad genética y el manejo de los cultivos permitirá a los mejoradores de maíz y a los agricultores adaptarse al cambio climático.

Por otra parte, en México el maíz cacahuacintle se produce principalmente, en ciertas regiones del Estado de México, Puebla y Tlaxcala. Con el conocimiento empírico, la observación y la experiencia de los agricultores que cultivan maíz cacahuacintle, se ha logrado un mejoramiento en la productividad y en la adaptabilidad de la semilla a los diferentes tipos de suelo que predominan en las regiones donde se siembra. Se han llevado una serie de programas para mejorar la producción, aplicando tecnologías agrícolas convencionales como mejoramiento genético por métodos de hibridación y selección donde el mejoramiento va encaminado a obtener un maíz de buen tamaño, color e incremento en la productividad (Salinas, 2013).

Ruiz *et al.* (2008) en su investigación concluyen que en México “existen recursos genéticos de maíz adaptadas a condiciones de sequía y que pueden contribuir a la generación de variedades adaptables a condiciones hídricas menos favorables por la presencia del cambio climático”.

Malczewski (2006) menciona que en los últimos 15 años se ha evidenciado un notable progreso en la cantidad y calidad de la investigación, al integrar los sistemas de información geográfica y el análisis de decisión multicriterio, el cual ha sido vital en el avance en dos áreas principales: soporte de decisión espacial y sistemas de información geográfica participativa.

Sotelo *et al.* (2016) mencionan que “las diferentes metodologías para la identificación y delimitación de las zonas potenciales para el maíz dependen de la información disponible y del detalle de la misma; el modelado de la información se facilita con el uso de los sistemas de información geográfica” y concluyen “que la

presente metodología es una buena alternativa para conocer las zonas con las mejores condiciones de suelos, clima y fisiografía para el desarrollo y producción del maíz de temporal en el Estado de México; los resultados obtenidos con esta metodología, superan a todos los presentados por otros investigadores y metodologías”.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se identificaron las zonas potenciales para el cultivo del maíz de temporal, con base en la relación suelo-clima utilizando 12 capas de información. Sobresaliendo el **DDR** 163 Calpulalpan, los valles que rodean la Malinche, así como la parte central del estado, por tener un potencial de muy bueno y bueno, principalmente.

Se avanzó en la identificación de factores involucrados en la dinámica de la relación suelo-clima, lo que permitió determinar las zonas potenciales para el cultivo del maíz de temporal en el estado de Tlaxcala.

Uno de los principales retos será establecer el cultivo del maíz, en las zonas identificadas con potencial muy bueno y bueno, y con la aplicación de paquetes tecnológicos, fertilización orgánica eficiente, variedades idóneas, fechas de siembra y prácticas agrícolas adecuadas a cada sitio, se buscaría potencializar el rendimiento del maíz de temporal, lo que conllevará a disminuir el número de hectáreas sembradas actualmente, y en consecuencia, incrementar el volumen de producción (t/ha).

La contribución principal fue proponer una metodología nueva para identificar el periodo de crecimiento; así como integrar resultados de los análisis de suelo. Además, se acoplaron metodologías, para realizar el análisis de calidad de datos, la homogenización, cálculo de la evapotranspiración, así como la evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica.

En particular, cabe destacar que el procedimiento aplicado identificó que en el sur y la zona centro-sur del estado se encuentran las regiones potenciales para el maíz de temporal, con potencial de muy bueno y bueno. Con base en los resultados, se podrán planificar las actividades agrícolas y potencializar el cultivo del maíz.

A pesar de que hay zonas identificadas como de potencial bajo y no apto, esto no implica que no se pueda sembrar, sino que la inversión debe ser mayor, aunado a

los bajos rendimientos, por no tener las condiciones propicias para el cultivo del maíz.

Esta investigación proporciona información que servirá para identificar áreas de oportunidad, para realizar trabajos que permitan en muchos de los casos, cambiar zonas de potencial bajo a potencial mediano, por medio de prácticas agrícolas para mejorar los suelos.

Trabajos futuros

Se podrá mejorar esta investigación, si se consideran datos de apoyo de estaciones climatológicas y estudios de suelo, de estados vecinos para que la interpolación sea más precisa en la frontera del Estado. También se podrían realizar estudios de suelo, en aquellas zonas donde no hay datos, los cuales servirán para validar y en su caso actualizar las zonas de aptitud potencial para el cultivo del maíz de temporal.

Sería importante evaluar el posible efecto del cambio climático en las variables consideradas en esta investigación, y a su vez identificar las zonas con cambios de aptitud potencial del maíz de temporal, asociados a los escenarios climáticos.

Cabe destacar la importancia de una buena ponderación, ya que al asignar esta en base a la revisión de la bibliografía (zona del altiplano mexicano), estamos asegurando una representatividad y confianza en los resultados obtenidos. Por lo que en esta investigación ya no fue necesario realizar esta ponderación, considerando entrevistas a expertos, productores e investigadores en el estado de Tlaxcala. Así que sería importante, más adelante, recabar esta información pertinente, para validar si la ponderación utilizada, corresponde a la zona de estudio.

Es necesario socializar la información para dar a conocer las zonas potenciales del maíz de temporal, con los productores del estado, y a nivel de tomadores de decisiones.

10 LITERATURA CITADA

- Aguilar-Rivera, N., Galindo-Mendoza, G., Fortanelli-Martínez, J. y Contreras-Servin, C. 2010. Multicriteria evaluation and agro-climatic suitability of growing sugar cane in the Huasteca region of Mexico. *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 11(2): 144-154.
- Altieri, M. A. y Nicholls, C. I. 2009. Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas. *LEISA Revista de agroecología*. 1-4.
- Goma-Bedawi A., Abdul-Rashid, M. S., Siva-Kumar, B. y Ahmad-Fikri bin, A. 2016. Agriculture land suitability analysis evaluation based multi criteria and GIS approach. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 37: 1-8.
- Bagaram, B.M., Mounir, F., Lahssini, S. y Ponette, Q. (2016). Site Suitability Analysis for Cork Oak Regeneration Using GIS Based Multicriteria Evaluation Techniques in Maamora Forest-Morocco. *Open Access Library Journal*. 3: e2483.
- Bernal-Morales, R., Morales-Acoltzi, T., Hernández-Vázquez, M., Orozco-Flores, S. y Jiménez-López, J. 2017. IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL PERIODO DE CRECIMIENTO APLICANDO NO-LINEALIDAD, TLAXCALA, MÉXICO. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* sometido a revisión.
- Castillo-Alvarez, M., Nikolskii-Gavrilov, L. Ortiz-Solorio, C. A., Vaquera-Huerta, H., Cruz-Bello, G., Mejía-Sáenz, E. y González-Hernández, A. 2007. Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad agrícola. *Interciencia*. 32:368-376.
- Ceballos-Silva, A. y López-Blanco, J. 2003. Delineation of suitable areas for crops using a Multi-Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping: a case study in Central Mexico. *Agricultural Systems* 77:117–136.
- Ceballos-Silva, A., López-Blanco, J., Trujillo-Campos, A. y Gutiérrez-Del Valle, A. 2008. Zonas potenciales para la producción de maíz en el estado de Morelos: Utilización de un modelo multicriterio y SIG. Recuperado el 29 de octubre del 2016, de: <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3021/ZONASPOTENCIALESMAIZ.pdf?sequence=1>
- Challinor, A. J., Koehler, A. -K., Ramirez-Villegas, J., Whitfield, S. y Das, B. 2016. Current warming will reduce yields unless maize breeding and seed systems adapt immediately. *NATURE CLIMATE CHANGE*. 6: 954-960.
- Conde, C., Ferrer, R. M., Araujo, R., Gay, C. Magaña, V, Pérez, J. L., Morales, T. y Orozco, S. 2004. 4. El niño y la Agricultura. En: Magaña R.V.O. (Comp.). *Los impactos del niño en México*. 103-136.

- CONABIO**, 2016. Guevara, M., Arroyo-Cruz, C. E., (31/05/2016). 'Modelo digital de elevaciones resolución 1km', escala: 1:4000000. edición: 1. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, México. Recuperado el 17 de julio del 2017, de: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Da Silva, C. J. y Cardozo, O. D. (2015): "Evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica aplicados a la definición de espacios potenciales para uso del suelo residencial en Resistencia (Argentina)", *GeoFocus (Artículos)*, nº 16, p. 23-40. ISSN: 1578-5157.
- De Pietri, D., Dietrich, P., Mayo, P. y Carcagno, A. 2011. Evaluación multicriterio de la exposición al riesgo ambiental mediante un sistema de información geográfica en Argentina. *Rev Panam Salud Pública*. 30(4):377–387.
- Eastman, J. R. 2003. IDRISI Kilimanjaro. Versión 14.00. Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Clark Labs. Clark University. EUA. 312 p.
- ETCCDI**, 2017. Expert Team on Climate Change Detection and Indices. Climate Data Homogenization. Recuperado el 18 de julio del 2017, de: <http://etccdi.pacificclimate.org/homogenization.shtml>
- FAO**, 1993. Erosión de suelos en América Latina. Tema 2: Erosión y pérdida de fertilidad del Suelo. Recuperado el 04 de noviembre del 2016, de: <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S06.htm>
- FAO**, 1997. Zonificación agro-ecológica. Guía general. Boletín de suelos Núm. 73. Roma, Italia.
- FAO**, 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. BOLETÍN DE TIERRAS Y AGUAS DE LA **FAO** Núm. 8. Roma, Italia.
- FAO**, 2001. EL MAÍZ EN LOS TRÓPICOS: Mejoramiento y producción. Roma, Italia.
- FAO**, 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE. 56.
- FAO**, 2007. Agricultura y Desarrollo Rural Sostenible (**ADRS**) Sumario de política 11.
- FAO**, 2012. Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo – Alcance, causas y prevención. Roma, Italia.
- FAO**, 2015. Los suelos ayudan a combatir y adaptarse al cambio climático. Año Internacional de los Suelos, 2015. Recuperado el 17 de septiembre del 2015, de: <http://www.fao.org/3/a-i4737s.pdf>

- FAO**, 2015a. El suelo es un recurso no renovable. Año Internacional de los Suelos, 2015. Recuperado el 17 de septiembre del 2015, de: <http://www.fao.org/3/a-i4373s.pdf>
- FAO**, 2015b. Agroecology to reverse soil degradation and achieve food security. 2015 International Year of Soils. Recuperado el 02 de octubre del 2015, de: <http://www.fao.org/3/a-i4803e.pdf>
- FAO**, 2015c. Construyendo una visión común para la agricultura y alimentación sostenibles. **FAO**, Roma.
- FAO**, 2016. Estadísticas sobre seguridad alimentaria. Recuperado el 04 de noviembre del 2016, de: <http://www.fao.org/economic/ess/ess-fs/es/>
- FAO**, 2017. **GAEZ** - Global Agro-Ecological Zones. Recuperado el 07 de Julio del 2017, de: <http://www.fao.org/nr/gaez/es/>
- FAO-UNESCO**, 1976. Mapa mundial de suelos 1: 5 000 000 Volumen III México y América Central. Roma, Italia.
- FAO** y **OPS**, 2016. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (**FAO**) y la Organización Panamericana de la Salud (**OPS**). América Latina y el Caribe. Panorama de la Seguridad Alimentaria y Nutricional. Sistemas alimentarios sostenibles para poner fin al hambre y la malnutrición.
- FIRA**, 2016. Fideicomisos instituidos en relación con la Agricultura. Panorama Agroalimentario. Maíz 2016.
- Galacho-Jiménez, F. B. y Ocaña-Ocaña, C. 2006. Tratamiento con SIG y técnicas de evaluación multicriterio de la capacidad de acogida del territorio para usos urbanísticos: residenciales y comerciales. El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas. 1509-1525.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M.L., Montanarella, L., Muñiz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M.I., Vargas, R. (eds), 2014. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg, 176 pp.
- Gil, A. y M. Álvarez N. 2007. El maíz criollo en la alimentación de las familias campesinas de Santiago Xalitzintla, Puebla. Colegio de Postgraduados Campus Puebla, Cholula.
- Guevara, M. y Arroyo-Cruz, C. E., 2016. 'Pendiente', escala: 1:4000000. edición: 1. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, México.

- HLPE**, 2012. La seguridad alimentaria y el cambio climático. Un informe del Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición del Comité de Seguridad Alimentaria Mundial. Roma, Italia.
- Ibarra-Castillo, D., Ruiz-Corral, J. A., González-Eguiarte, D. R. y Flores-Garnica, J. G. 2008. Clasificación espacial de la textura de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco. Avances en la investigación científica en el **CUCBA**. XIX Semana Nacional de la Investigación Científica. Zapopan, Jalisco, México.
- INEGI**, 1986. Síntesis de Información Geográfica Estatal.
- INEGI**, 2004. Guías para la Interpretación de Cartografía: Edafología.
- INEGI**, 2013. 'Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación escala 1:250 000, serie V (capa unión)', escala: 1:250000. edición: 2a. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Aguascalientes. Recuperado el 17 julio del 2017, de: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- INEGI**, 2014. Anuario estadístico y geográfico de Tlaxcala 2014 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México: **INEGI**, c2014.
- IUSS** Working Group **WRB**, 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106.
- IPCC**, 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 págs. (en árabe, chino, español, francés, ruso e inglés).
- Jaramillo-Jaramillo, D.F. 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, FACULTAD DE CIENCIAS, MEDELLÍN, COLOMBIA.
- Kihoro, J., Bosco-Njoroge J. y Murage, H. 2013. Suitability analysis for rice growing sites using a multicriteria evaluation and GIS approach in great Mwea region, Kenya. SpringerPlus. 2:265.
- Kazemi, H., Sadeghi, S. y Akinci, H. 2016. Developing a land evaluation model for faba bean cultivation using geographic information system and multi-criteria analysis (A case study: Gonbad-Kavous region, Iran). Ecological Indicators 63:37–47.

- Lafitte, H.R. 1994. Identifying Production Problems in Tropical Maize. Mexico, D.F.: CIMMYT.
- Lara-Romero E. S. 2015. Modelo de evaluación de la capacidad de acogida territorial de los usos urbanísticos potenciales en la ciudad interior de Toluca. Tesis de Maestría en Análisis Espacial y Geoinformática. Universidad Autónoma del estado de México, Facultad de Geografía.
- Lasso-Benítez, L., Cruz-Espinoza, G. y Haro-Prado, R. 2010. Zonificación agroecológica de tres cultivos estratégicos (Maíz, *Zea mays* L.; Arroz, *Oryza sativa* L.; caña de azúcar *Saccharum officinarum* L.) en 14 cantones de la cuenca baja del río guayas.
- Malczewski, J. 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*. 20(7): 703-726.
- 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.
- MasAgro, 2016. Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional /Conservation Earth. **SAGARPA-CIMMYT**. Recuperado el 17 de julio del 2016 de: <http://104.239.241.61:8080/MasAgroTTF/v2/Estado/TLX/>.
- Medina-García, G., Cabañas-Cruz, B., Ruiz-Corral, J. A., Madero-Tamargo, J., Rubio-Díaz, S., Rumayor-Rodríguez, A., Luna-Flores, M., Gallegos-Vázquez, C., Gutiérrez-Sánchez, R. y Bravo-Lozano, A. G. 2003. Potencial productivo de especies agrícolas en el estado de Zacatecas. INIFAP-CEZAC.
- Myagmartseren, P., Buyandelger, M. y Brandt, S. A. 2017. Implications of a Spatial Multicriteria Decision Analysis for Urban Development in Ulaanbaatar, Mongolia. Hindawi Publishing Corporation. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017:1-16.
- Naciones Unidas. 2017. Desarrollo agrícola, seguridad alimentaria y nutrición. Informe del Secretario General. Naciones Unidas, Nueva York.
- Osorio-García, N., López-Sánchez, H., Gil-Muñoz, A., Ramírez-Valverde, B., Gutiérrez-Rangel, N., Crespo-Pichardo, G. y Montero-Pineda, A. 2012. Utilización, oferta y demanda de tecnología para producción de Maíz en el valle de Puebla, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. 9(1): 55-69.
- Ortiz, S., C. A. 1981. Evaluación de la aptitud de las tierras de México para la producción de maíz, frijol y sorgo en condiciones de temporal. Centro de Edafología. Colegio de Posgraduados. Chapingo, México.

Pájaro-Huertas, D. y Ortiz-Solorio, C. A. 1992. Estimación del periodo de crecimiento por disponibilidad de agua y libre de heladas para la República Mexicana. *Revista de Geografía Agrícola*. 119-125.

QGIS, 2017. **QGIS** User Guide. Publicación 2.14.

Rawson, H. M. y Gómez-Macpherson, Helena. 2001. TRIGO REGADO. Depósito de documentos de la **FAO**. Recuperado el 27 de julio del 2017, de: <http://www.fao.org/docrep/006/x8234s/x8234s08.htm#bm08.3>

Rosado-May, F., Gerritsen, P. R. W., y Orozco-Ramírez, Q. 2015. Historia de la agroecología en México. *Agroecología*. 10: 9-17.

Ruiz-Corral, S. A., Sánchez-González, J. J., Hernández-Casillas, J. M., Willcox, M. C., Ramírez-Ojeda, G., Ramírez-Díaz, J. L. y González-Eguiarte, D. R. 2008. Identification of Mexican maize races adapted to moisture deficient conditions using biogeographical data. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 4(6): 829-842.

Salinas, J. 2013, 16 de julio. Mejoran en Chapingo el maíz cacahuacintle. *La Jornada*, México.

Sánchez-Torres, J. D., Ligarreto-Moreno, G. A., y Leiva-Barón, F. R. 2012. Variabilidad del Crecimiento y Rendimiento del Cultivo de Maíz para Choclo (*Zea mays* L.) como Respuesta a Diferencias en las Propiedades Químicas del Suelo en la Sabana de Bogotá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*. 6579-6590.

Smith, S., Cooper, M., Gogerty, J., Löffler, C. Borcharding, D. y Wright, K. 2014. Maize (*Zea mays* L.). *ResearchGate*. 125-171.

SMN, 2010. Servicio Meteorológico Nacional. Manual de usuario. Estaciones climatológicas en Google Earth.

Sotelo-Ruiz, E. D., Cruz-Bello, G. M., González-Hernández, A y Moreno-Sánchez, F. 2016. Determinación de la aptitud del terreno para maíz mediante análisis espacial multicriterio en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7:401-412

SAGARPA, 2017. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Recuperado el 6 de octubre del 2017, de: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>.

SEMARNAT, 2015. Informe de la Situación del Medio Ambiente EN MÉXICO. Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015.

- SEMARNAT**, 2017. Los suelos en México. Recuperado el 09 de octubre del 2017, de http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen/03_suelos/cap3.html#2
- SIAP**, 2016. Atlas Agroalimentario 2016. Primera edición, 2016. © Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Benjamín Franklin 146, Colonia Escandón, Delegación Miguel Hidalgo, C.P. 11800, México, D.F.
- SIAP**, 2017. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Recuperado el 10 de julio del 2017, de: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd Edition. Agric. Handbook 436. Washington, DC, Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture.
- Soil Science Division Staff. 2017. Soil survey manual. C. Ditzler, K. Scheffe, and H.C. Monger (eds.). **USDA** Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Turrent, F. A. 1986. Estimación del potencial productivo actual de maíz y frijol en la República Mexicana. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México.
- Turrent-Fernández, A. 2009. El potencial productivo del maíz. Ciencias 92-93 Octubre 2008 - Marzo 2009. 126-129.
- Turrent-Fernández, A. 2013. "Potencial productivo del campo mexicano para producir maíz no transgénico en los próximos 25 años". En Análisis Plural, segundo semestre de 2012. Tlaquepaque, Jalisco: ITESO. 188-204.
- USDA**, 2001. Soil Quality Test Kit Guide. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Natural Resources Conservation Service. Soil Quality Institute.
- USDA-NRCS**, 2011. Soil Quality Indicators. Particulate Organic Matter.
- USDA-NRCS**, 2014. Soil Health – Bulk Density/Moisture/Aeration. Guides for Educators. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service.
- Voogd, J.H. 1982. Multicriteria evaluation for urban and regional planning. Delft: Delftsche Uitgevers Maatschappij.
- Wang, X. L. and Y. Feng, published online July 2013: RHtestsV4 User Manual. Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology

Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada. 28 pp.
[Available online at <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>]

Zhang, Xuebin y Yang, Feng. 2004. RClimDex (1.0) User Manual. Climate
Research Branch Environment Canada Downsview, Ontario Canada.

11 ANEXOS

ANEXO A. Rendimientos de maíz (t/ha)

Municipio	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Acuamanala de Miguel Hidalgo	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.0	2.5	2.0	2.6	2.4	3.0
Amaxac de Guerrero	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	1.2	2.1	2.0	3.0	2.8	3.0
Apetatitlán de Antonio Carvajal	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	1.5	1.5	2.0	3.0	2.8	3.0
Apizaco	2.4	2.5	2.9	2.7	2.7	3.1	2.6	2.6	0.6	3.1	2.5	2.8	2.2	2.1
Atlangatepec	2.4	2.8	2.6	2.5	3.0	3.2	2.6	2.7	0.5	3.4	2.3	3.0	2.8	2.3
Altzayanca	2.1	2.4	0.4	1.8	1.9	3.0	2.0	2.5	2.3	2.8	2.8	3.0	1.5	3.1
Benito Juárez	2.6	2.8	2.8	2.5	3.0	3.1	2.6	2.6	0.6	3.2	2.6	2.6	2.7	2.4
Calpulalpan	2.7	2.7	2.8	2.6	2.9	3.1	2.6	2.6	0.6	3.1	2.7	2.7	2.6	2.3
Chiautempan	1.9	1.9	1.1	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.6	3.5	3.5
Contla de Juan Cuamatzi	1.9	1.9	1.1	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	0.8	1.5	2.0	3.0	2.7	3.5
Cuapiaxtla	2.5	2.4	0.4	2.0	1.8	3.0	1.4	2.5	0.3	2.8	3.2	3.0	1.8	3.1
Cuaxomulco	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	0.8	1.5	2.0	3.0	2.8	3.0
El Carmen Tequexquitla	2.0	2.3	0.4	2.0	1.8	3.0	0.9	2.5	0.0	2.3	2.3	3.0	0.9	3.1
Emiliano Zapata	2.2	2.4	0.5	2.1	1.9	2.9	1.7	2.5	1.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2
Españita	2.4	2.9	2.7	2.8	3.1	3.1	2.6	2.6	1.9	3.0	2.6	2.7	2.5	2.3
Huamantla	2.5	2.4	0.6	2.0	1.7	3.0	1.9	2.5	2.4	2.9	3.0	3.0	2.4	3.1
Hueyotlipan	2.4	2.7	2.8	2.6	2.9	3.2	2.6	2.7	1.7	3.0	2.6	2.7	2.5	2.4
Ixtacuixtla de Mariano Matamoros	1.3	1.9	1.8	2.0	1.9	1.7	2.0	2.0	2.3	1.4	2.0	2.6	2.5	3.0
Ixtenco	2.4	2.4	1.0	2.2	2.5	3.0	2.7	2.5	2.5	2.9	2.8	3.0	2.5	3.1
La Magdalena Tlaltetelulco	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	1.7	1.5	2.0	3.5	3.0	3.0
Lázaro Cárdenas	2.4	2.4	0.5	2.0	1.8	3.0	1.1	2.5	0.4	2.9	3.0	3.0	3.1	3.2
Mazatecochco de José María Morelos	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.2	2.5	2.0	2.5	2.0	3.0
Muñoz de Domingo Arenas	2.5	2.5	2.8	2.6	2.8	3.2	2.6	2.6	1.8	3.4	2.5	2.6	2.5	2.3
Nanacamilpa de Mariano Arista	2.7	3.0	2.9	2.4	3.1	3.2	2.6	2.5	0.6	3.2	2.6	2.7	2.6	2.3
Nativitas	1.2	1.9	1.8	2.0	2.0	1.7	2.0	2.0	2.6	2.5	2.0	2.4	2.5	3.0
Panotla	1.6	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	2.3	2.0	2.0	2.0	2.5	3.0
Papalotla de Xicohténcatl	1.9	1.9	1.0	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.2	2.3	2.0	2.5	3.5	3.0
San Damián Texoloc	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.7	2.0	2.0	2.5	2.3	2.0	2.3	2.5	3.0
San Francisco Tetlanohcan	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	1.7	1.2	2.0	3.5	2.5	3.0
San Jerónimo Zacualpan	1.7	1.9	1.8	2.0	2.0	1.7	2.0	2.0	2.0	1.3	2.0	2.2	2.3	3.0
San José Teacalco	2.4	2.4	0.9	2.2	2.4	3.0	2.9	2.5	1.0	2.8	3.4	3.0	3.1	3.2
San Juan Huactzinco	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.2	2.3	2.0	2.4	2.5	3.0
San Lorenzo Axocomanitla	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.0	2.5	2.0	2.6	2.5	0.0
San Lucas Tecopilco	1.9	1.9	1.1	2.0	2.0	1.7	2.0	2.0	2.9	2.0	2.0	3.2	3.4	3.6
San Pablo del Monte	1.9	1.9	1.0	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.0	2.3	2.0	3.7	2.5	3.0
Sanctorum de Lázaro Cárdenas	2.6	2.6	2.7	2.6	2.9	3.2	2.6	2.6	0.6	3.6	2.6	2.8	2.7	2.4
Santa Ana Nopalucan	1.4	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	2.6	2.5	2.0	2.5	2.6	3.0

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP

Rendimientos de maíz (t/ha) continuación...

Municipio	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Santa Apolonia Teacalco	1.8	1.9	1.8	2.0	2.0	1.7	2.0	2.0	2.5	2.5	2.0	2.5	2.1	3.0
Santa Catarina Ayometla	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.0	2.5	2.0	2.4	2.5	3.0
Santa Cruz Quilehtla	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.0	2.5	2.0	2.4	2.5	3.0
Santa Cruz Tlaxcala	1.9	1.9	1.1	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	0.9	1.2	2.0	3.5	2.5	3.5
Santa Isabel Xiloxotla	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.2	2.5	2.0	2.4	2.5	3.0
Tenancingo	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.0	2.5	2.0	2.5	2.6	3.0
Teolocholco	1.9	1.9	1.1	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	1.4	1.3	2.0	3.0	2.8	3.5
Tepetitla de Lardizábal	1.8	1.9	1.8	2.0	2.0	1.7	2.0	2.0	2.6	2.5	2.0	2.6	2.5	3.0
Tepeyanco	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.0	2.5	2.0	2.5	2.5	3.0
Terrenate	2.4	2.4	0.5	2.1	0.8	3.0	2.0	2.5	0.0	2.8	3.0	3.0	3.1	3.2
Tetla de La Solidaridad	2.5	2.4	2.9	2.5	2.8	3.1	2.6	2.5	2.2	3.4	2.7	2.7	2.5	2.3
Tetlatlahuca	1.0	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	2.4	2.0	2.0	2.4	2.5	3.0
Tlaxcala	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	2.0	2.2	2.0	2.2	3.0	3.0
Tlaxco	2.4	2.8	2.8	2.3	2.9	3.5	2.6	2.7	1.0	3.0	2.3	2.8	2.4	2.3
Tocatlán	2.5	2.4	1.0	2.2	1.9	3.0	2.8	2.5	0.4	2.9	3.2	3.0	3.1	3.2
Totolac	1.7	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	2.0	2.3	2.0	2.3	2.4	3.0
Tzompantepec	2.6	2.4	1.0	2.0	2.1	3.0	2.9	2.5	0.5	2.9	3.0	3.0	3.1	3.2
Xaloztoc	2.5	2.4	0.7	2.0	1.9	3.0	1.8	2.5	0.4	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2
Xaltocan	1.1	1.9	1.1	2.0	2.0	1.7	2.0	2.0	1.5	2.0	2.0	3.0	2.9	3.5
Xicohtzinco	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.2	2.5	2.0	2.4	2.5	3.0
Yauhquemehcan	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.7	2.0	2.0	0.5	2.0	2.0	2.8	2.6	3.5
Zacatelco	1.9	1.9	1.8	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	3.0	1.5	2.0	2.5	2.6	3.0
Ziltaltepec de Trinidad Sánchez Santos	2.4	2.4	1.1	2.0	2.5	3.0	2.7	2.5	0.9	2.8	2.8	3.0	2.6	3.1

Fuente: Elaboración propia con datos del **SIAP**

ANEXO B. Análisis con RClmDex

A continuación se presenta el procedimiento para el análisis de calidad de datos, para cada una de las estaciones seleccionadas.

1) A la base de datos de la estación 29003 Atlanga, se le da el formato requerido por el software RClmDex, el cual es: Año, Mes, Día, Precipitación, Temperatura máxima y Temperatura mínima, Tabla I. Y se guarda como archivo de texto, 29003 Atlanga.txt.

Tabla I. Formato requerido por el software RClmDex

1961	1	1	0	20	0
1961	1	2	0	24	-1.5
1961	1	3	0	22	-1.5
1961	1	4	0	19	1
1961	1	5	0	21	2
1961	1	6	0	22	2
1961	1	7	0	21	2
1961	1	8	0	20	1

2) Se abre la plataforma **R**, Figura 1.

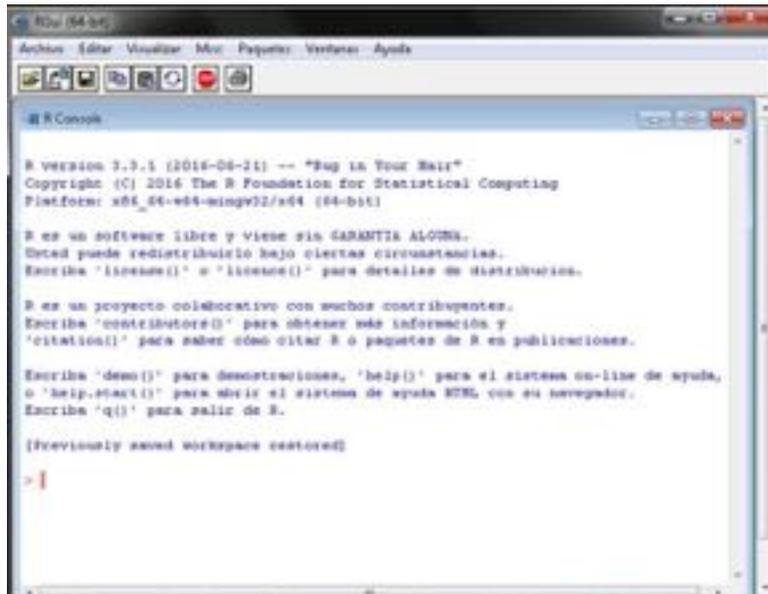


Figura 1. Plataforma **R**

3) Se abre el archivo Rclimindex.r con el que se realiza el análisis de calidad de datos, se da un click en el menú archivo, a continuación otro click en la opción Interpretar código fuente R..., y se selecciona el archivo Rclimindex.r, Figura 2.

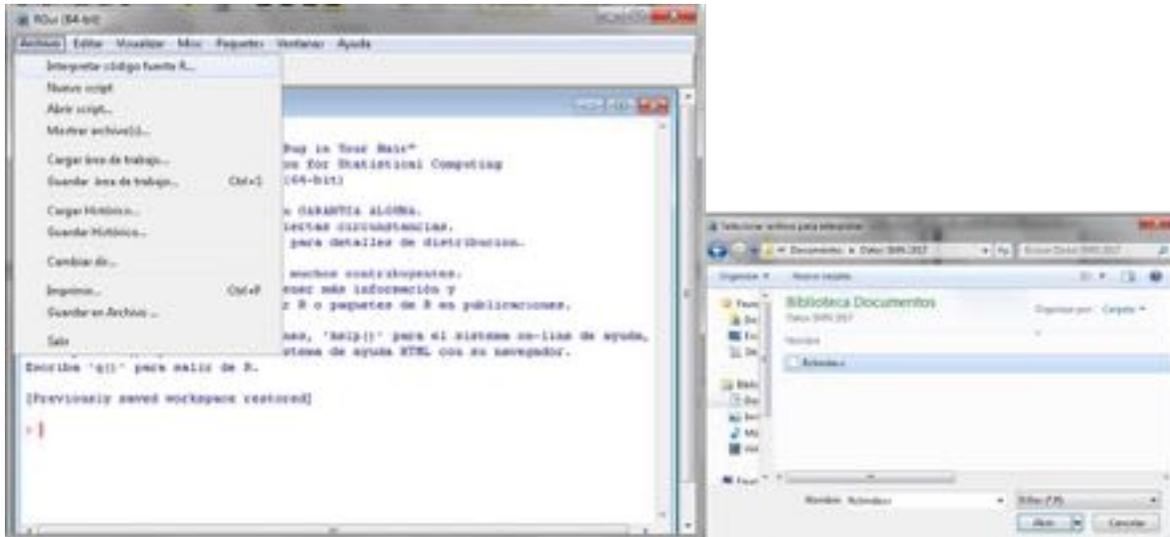


Figura 2. Procedimiento para abrir el archivo Rclimindex.r

4) Una vez que se le da opción de abrir en el Figura 2, aparece la siguiente ventana, Figura 3, y se procede a abrir el archivo 29003 Atlanga dando un click en **Load Data and Run QC**, para realizar el análisis de calidad de datos.

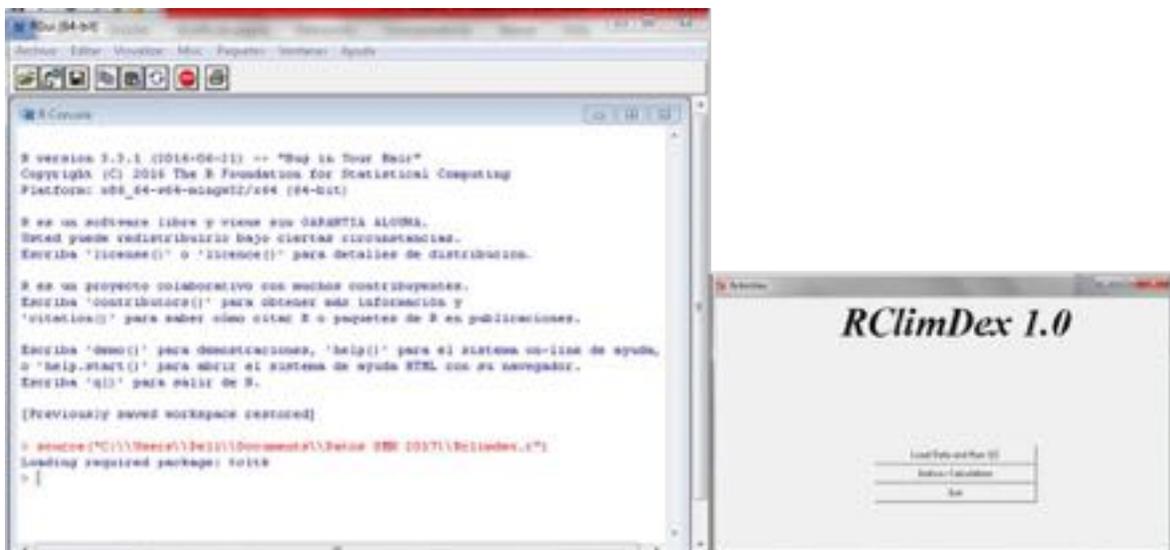


Figura 3. Procedimiento para abrir el archivo 29003 Atlanga

5) Una vez que se le da click en la opción **Load Data and Run QC**, se elige el archivo **29003 Atlanga.txt**, y se da click en abrir, y si tiene el formato requerido aparece la leyenda **Data (29003 Atlanga) loaded, click OK to continue**, y al dar click en aceptar aparece otra ventana que dice **Set Parameters for Data QC**, que es donde se dan los parámetros de calidad para la temperatura y la precipitación, así como el nombre de la estación, el cual se puede dejar en blanco ya que el software utiliza el que tiene el archivo abierto, por default tiene 3 desviaciones estándar y 200 mm/día, los cuales se pueden cambiar dependiendo de la estación, para ésta la lluvia máxima registrada en un día es de 106.5 mm, por lo que se puede cambiar el parámetro a 106.5 mm/día, o en su defecto dejar el que tiene. Para el caso de la temperatura, el análisis de calidad de datos identifica valores atípicos (“outliers”) en temperatura máxima y mínima diaria. Los valores atípicos son registros diarios que se encuentran fuera del rango definido por el usuario. Actualmente este rango se define como la media más o menos **n** veces la desviación estándar del valor para el día, es decir, [media +/- n*desviación estándar], Figura 4.

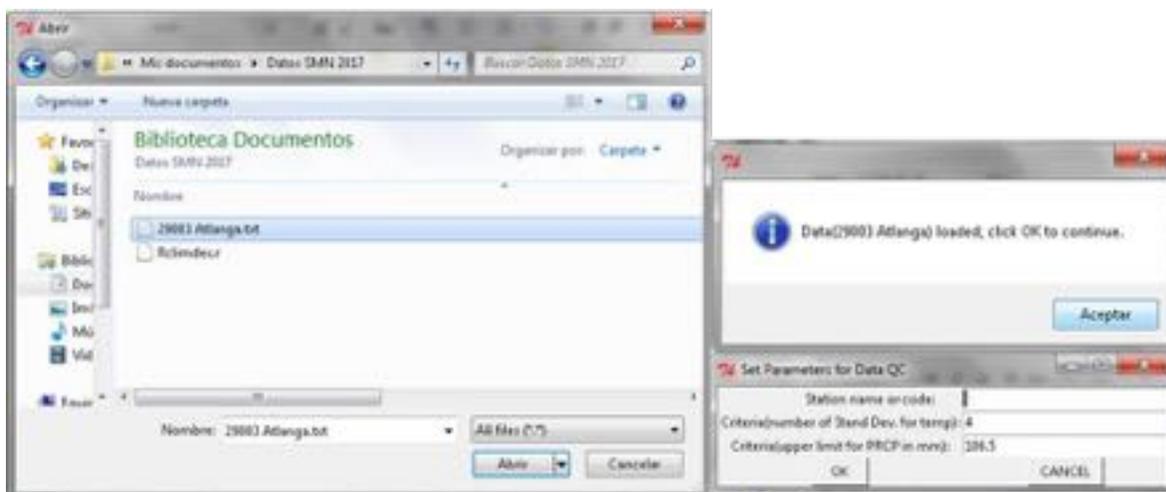


Figura 4. Procedimiento para los parámetros del análisis de calidad de datos

6) Una vez que le uno un click en **OK** en el Figura 4, aparece la ventana **Data QC (29003 Atlanga) may take a few minutes, click OK to continue**, al dar un click en aceptar, aparece otra ventana donde menciona que encontró valores extremos y pide que revisemos el archivo **29003 Atlanga_tepstdQC.cvs**, para validar los

valores extremos o en su caso cambiarlos o colocar el valor -99.9 que el software reconoce como dato faltante. Al dar click en aceptar, aparece otra ventana donde una vez que revisamos los valores extremos y se hacen los cambios pertinentes, estos se deben realizar en el archivo **29003 Atlangaindcal.csv**, el cual utilizará el software para calcular los parámetros, Figura 5.



Figura 5. Procedimiento para revisar los valores extremos

7) En el paso anterior, el software genera cuatro carpetas y el archivo 29003 Atlangaindcal.csv. La carpeta que nos interesa revisar es la denominada **Log**, que es donde se encuentra el archivo **29003 Atlanga_tepstdQC.csv** (valores extremos) y hacer los cambios pertinentes en el archivo **29003 Atlangaindcal.csv** (calcula los índices), Figura 6.

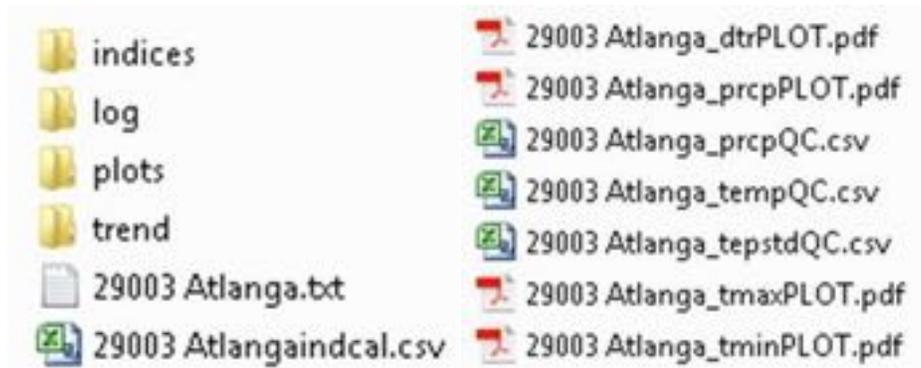


Figura 6. Carpetas generadas (izquierdo) y archivos en la carpeta Log (derecho)

8) Una vez que el archivo **29003 Atlangaindcal.csv** es revisado, se procede a calcular los índices climáticos, se da click en **Indices Calculation**, Figura 7.

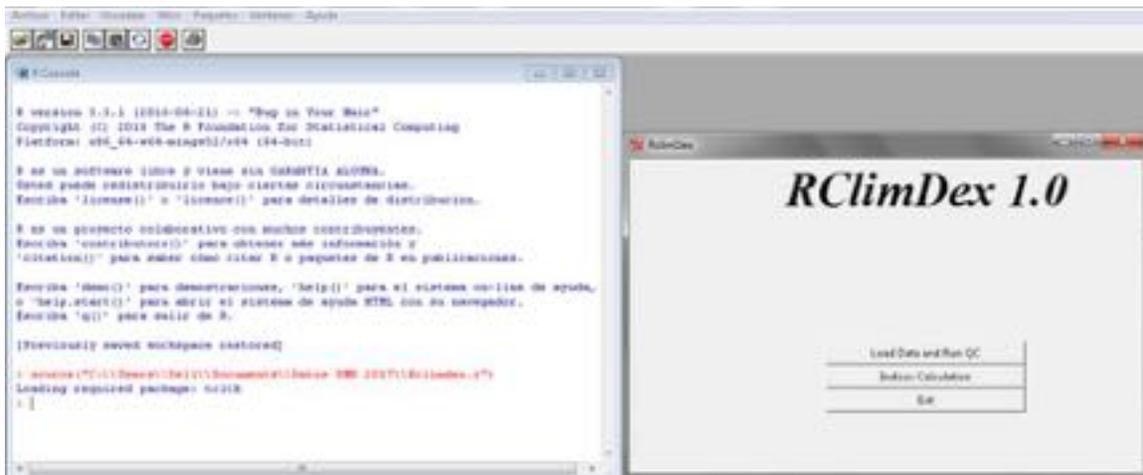


Figura 7. Procedimiento para calcular los índices

9) Una vez que se da click en **Indices Calculation**, aparece la ventana donde se definen los parámetros para calcular los índices, Figura 8.



Figura 8. Parámetros para calcular los índices

10) Una vez que se establecen los parámetros, Figura 9, se da click en **OK** y aparece la ventana que nos indica que índices queremos calcular, Figura 10. Generalmente, seleccionamos todos y damos click en **OK**.

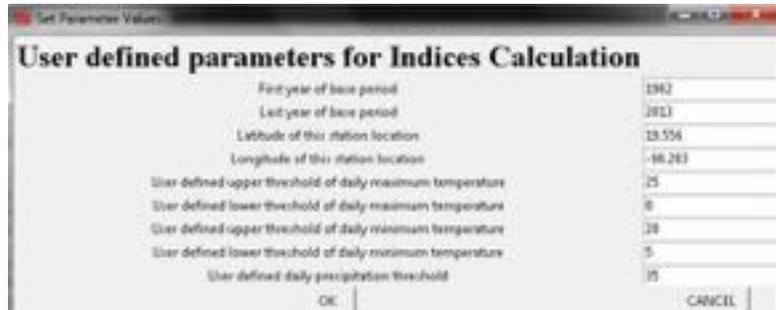


Figura 9. Parámetros establecidos para calcular los índices

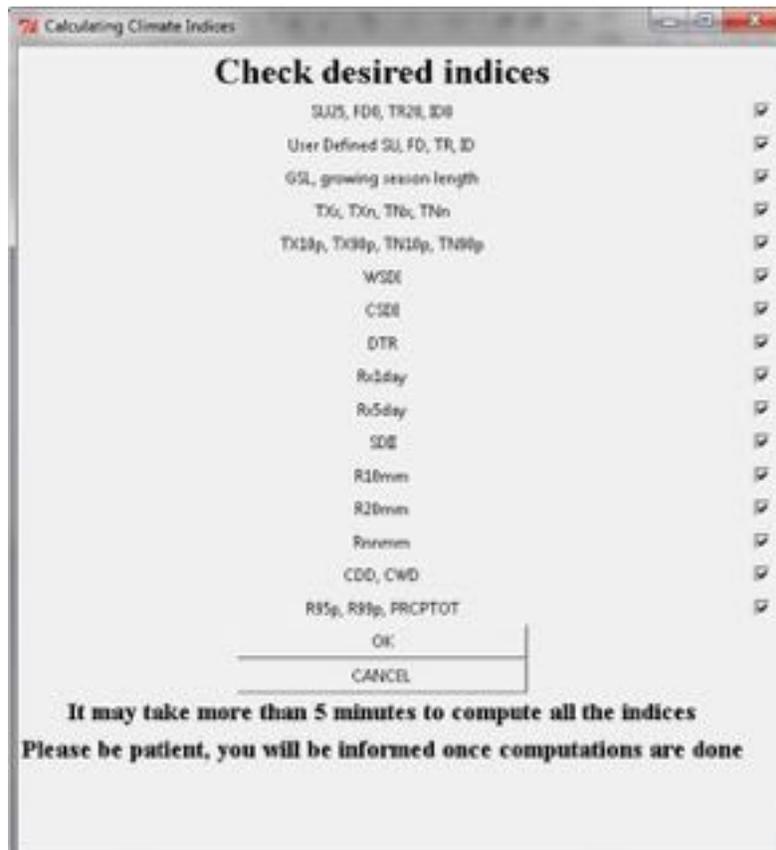


Figura 10. Cálculo de los índices

11) En el Figura 11, se presenta la ventana que aparece una vez que finaliza el procedimiento, por lo que sólo queda dar click en **OK**, cerrar la plataforma R y revisar los archivos de nuestro interés.

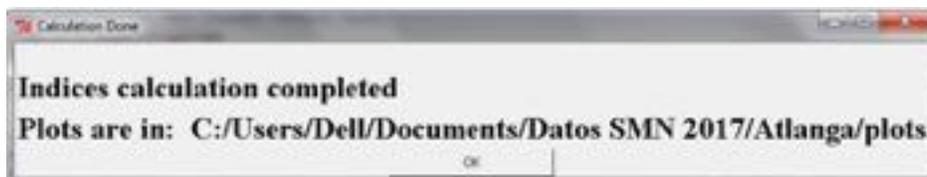


Figura 11. Fin del procedimiento

12) Una vez que hemos cerrado la plataforma, se abre el archivo **29003_nastatistic.csv**, ubicado en la carpeta **Log**, el cual indica los datos faltantes de la serie de tiempo analizada, Figura 12..

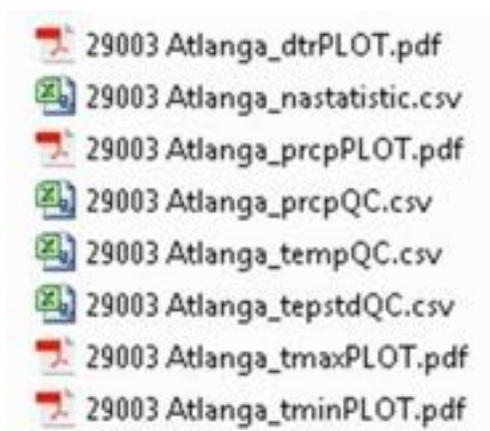


Figura 12. Ubicación del archivo 29003_nastatistic.csv

13) En la Tabla II, se presentan los datos al abrir el archivo **29003_nastatistic.csv**, éste muestra la variable a evaluar, el año, los datos faltantes en cada mes, como ejemplo se colocó sólo dos años y uno de ellos con datos faltantes (30 días en noviembre). Se realiza la estadística de la serie de tiempo para estimar la cantidad de datos faltantes de cada una de las variables (**PRCP, TMÁX y TMÍN**).

Tabla II. Datos contenidos en el archivo 29003_nastatistic.csv

TITLE	YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
PRCP	1977	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	30
TMAX	1977	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	30
TMIN	1977	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	30
PRCP	1978	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TMAX	1978	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TMIN	1978	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

14) Se tienen que revisar los archivos ubicados en la carpeta **Log**, para analizar si la serie de tiempo tiene un comportamiento extraño y ver la factibilidad de detectar un valor extremo. Los archivos son: 29003 Atlanga_dtrPLOT.pdf, 29003 Atlanga_prcpPLOT.pdf, 29003 Atlanga_tmaxPLOT.pdf, y 29003 Atlanga_tminPLOT.pdf. Estos archivos muestran la variabilidad diaria, así como los datos faltantes identificados con líneas de color rojo. En el Figura 13, se presenta el archivo Atlanga_tminPLOT.pdf.

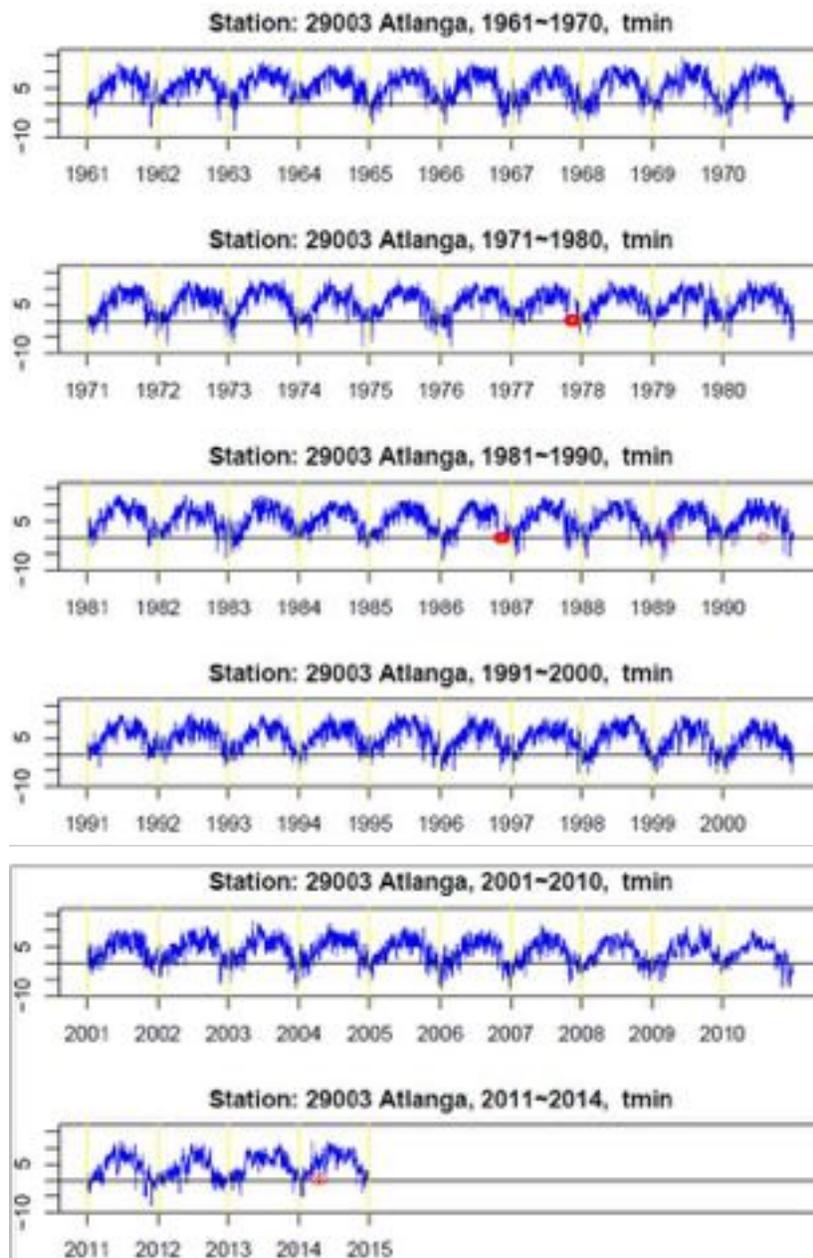


Figura 13. Variabilidad diaria 29003 Atlanga_tminPLOT.pdf

ANEXO C. Análisis con RHtestsV4

A continuación se presenta el procedimiento para el análisis de homogeneidad de los datos, para cada una de las estaciones seleccionadas, siguiendo a (Wang, X. L. and Y. Feng, 2013).

1) Se utiliza el mismo archivo **29002 Apizaco**, una vez que se realizó el análisis de calidad de datos, el cual es: Año, Mes, Día, Precipitación, Temperatura máxima y Temperatura mínima, Tabla III.

Tabla III. Formato utilizado en RClimDex

1961	1	1	0	18	2
1961	1	2	0	21	1
1961	1	3	0	20	1
1961	1	4	0	21	2
1961	1	5	0	21	1
1961	1	6	0	22	1
1961	1	7	0	21	2
1961	1	8	0	21	1

2) Se abre la plataforma **R**, Figura 14.

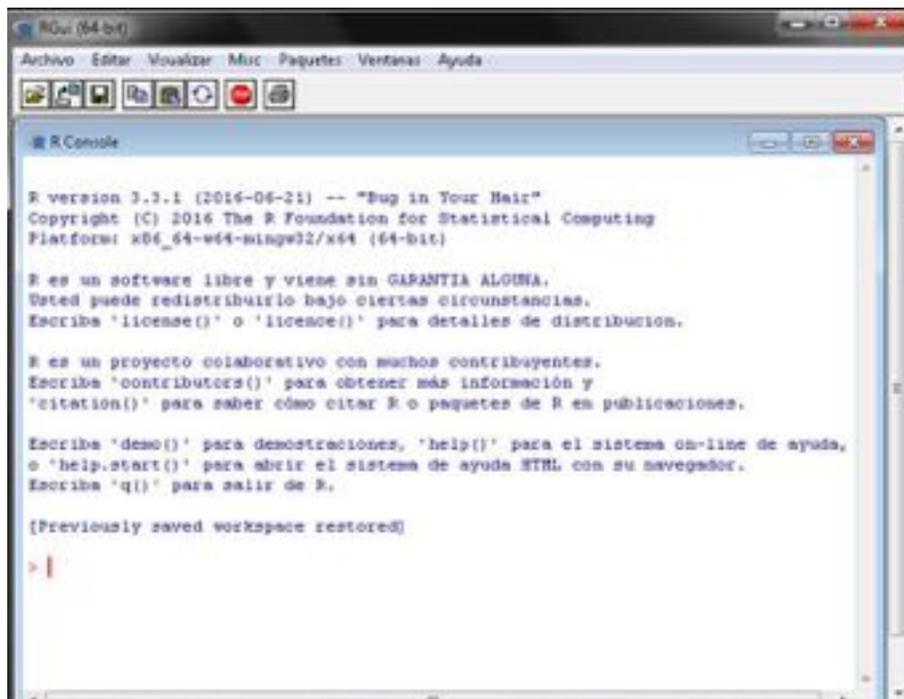


Figura 14. Plataforma **R**

3) Se abre el archivo RHtestsV4_20130719.r con el que se realiza el análisis de homogeneidad de datos, se da un click en el menú archivo, a continuación otro click en la opción Interpretar código fuente R... (lado izquierdo), y se selecciona el archivo RHtestsV4_20130719.r (lado derecho), Figura 15.

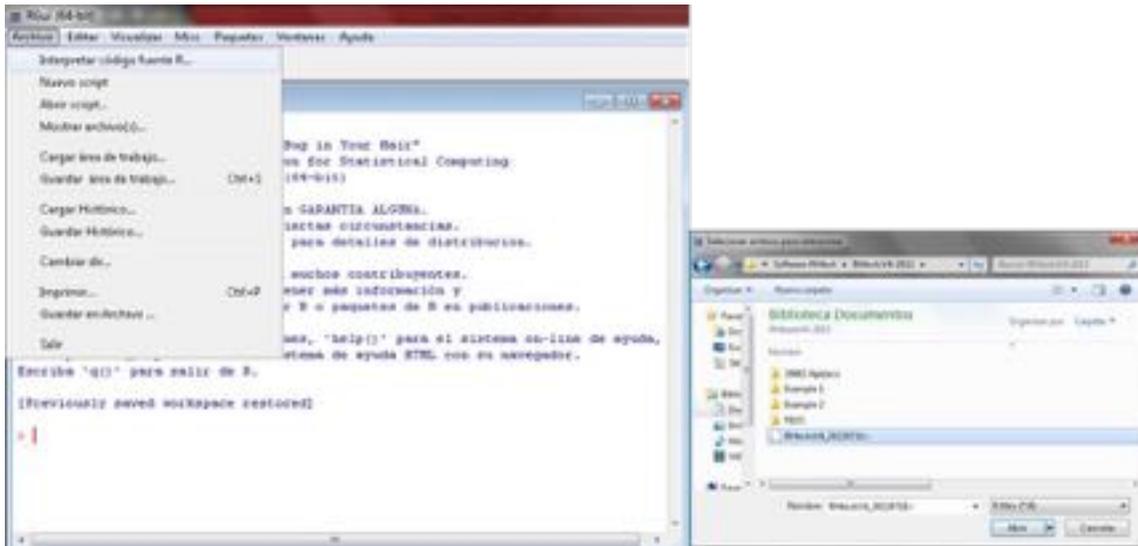


Figura 15. Procedimiento para abrir el archivo RHtestsV4_20130719.r

4) Una vez que se le da opción de abrir en el Figura 15, aparece la siguiente ventana (lado izquierdo), Figura 16, y se procede a escribir en el prompt de R: **StartGUI()** (lado derecho), misma Mapa, y se presiona la tecla enter.

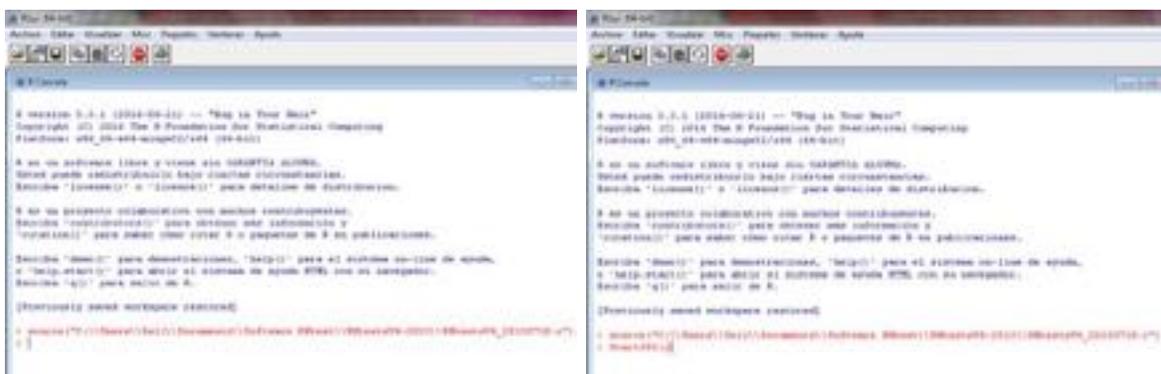


Figura 16. Procedimiento para abrir el archivo RHtestsV4_20130719.r

5) Una vez que se tecléa enter, aparece la siguiente ventana Figura 17 y se da click en **I Agree**.



Figura 17. Aceptación de la licencia del software

6) Una vez que se da click en **I Agree**, aparece la ventana **RHtestsV4**, con el cual se va a efectuar la prueba de homogeneidad, Figura 18.

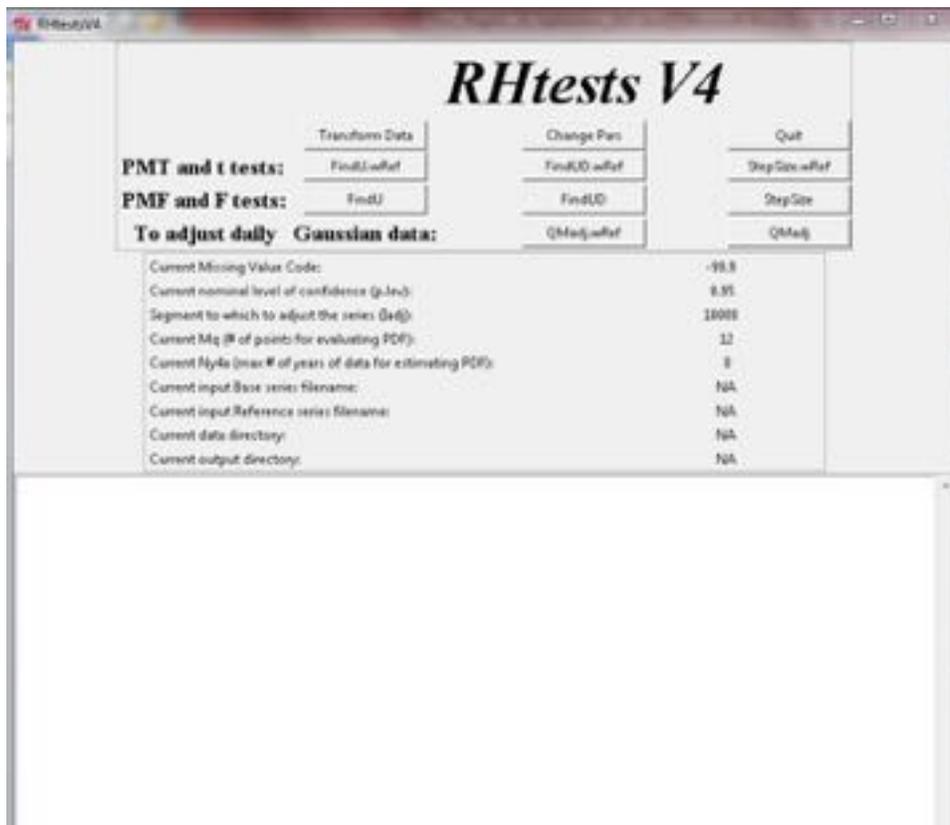


Figura 18. RHtestsV4, para homogeneidad de datos

7) En el Figura 18 de un click en **Transform Data** y seleccione el archivo 29002 Apizaco, para convertir la serie de datos diarios, en el formato estándar de **RHtestsV4** y al dar click en Abrir (lado izquierdo), aparece la ventana (lado derecho), Figura 19.

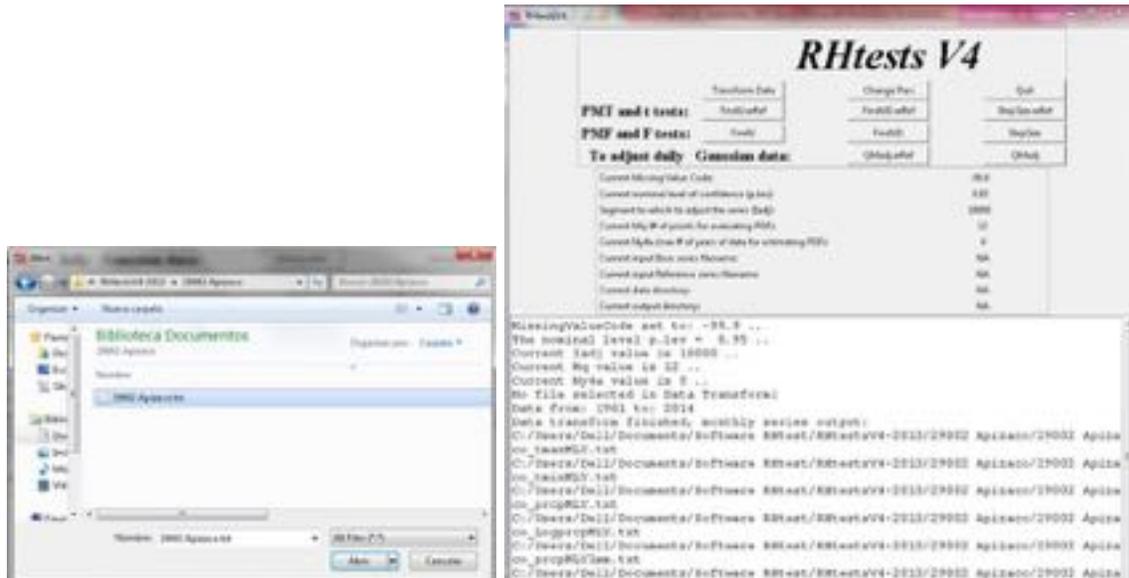


Figura 19. Convertir datos en el formato estándar de **RHtestsV4**

8) Se generan nueve archivos, Figura 20. Donde el prefijo **DLY** y **MLY** representa valores diarios y mensuales, respectivamente, y **MLY1mm** el total mensual cuando la precipitación diaria ≥ 1 mm.

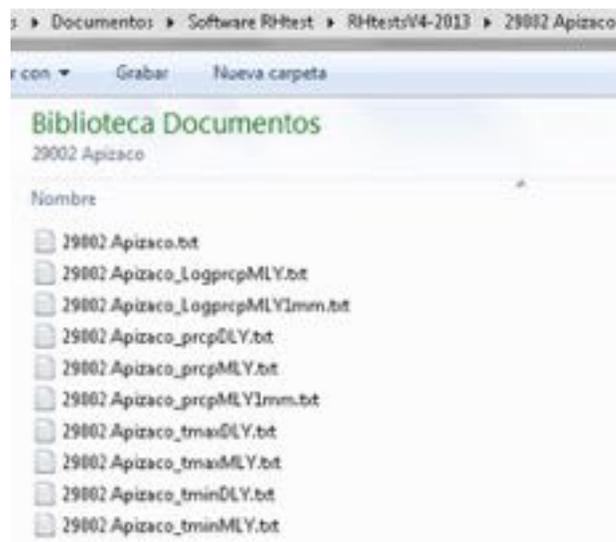


Figura 20. Archivos generados durante el proceso

8) Se da click en **FindU**, aparece la ventana (lado izquierdo), Figura 21, y se da click en **Change** para seleccionar el archivo **29002 Apizaco_prpcMLY1mm.txt**, ventana (lado derecho), Figura 21.

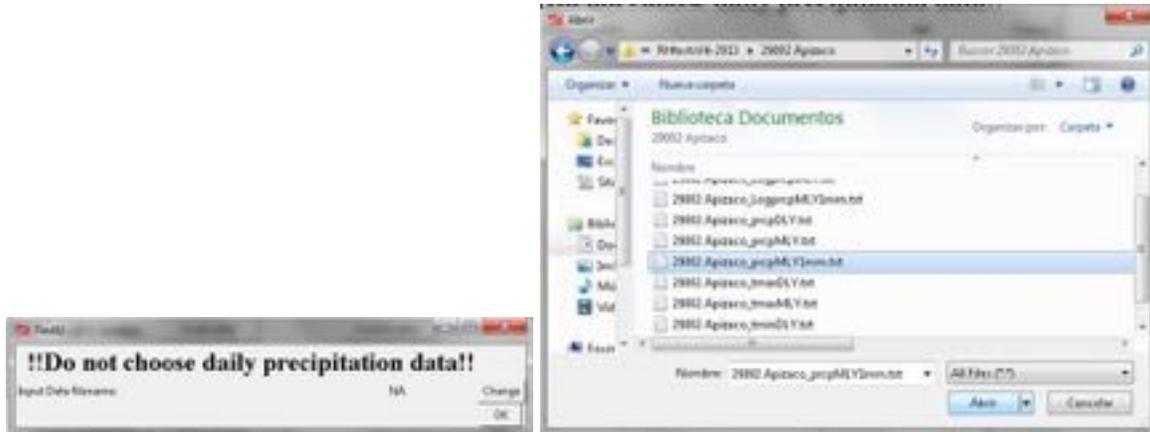


Figura 21. Procedimiento para abrir 29002 Apizaco_prpcMLY1mm.txt

9) Al dar click en **abrir**, aparece la ventana, Figura 22 (lado derecho), y a continuación se da click en **OK** apareciendo la ventana, Figura 22 (lado izquierdo), donde se observa el siguiente mensaje en el recuadro:

FindU finished successfully...

Modify C:/Users/Dell/Documents/Software RHtest/RHtestsV4-2013/29002 Apizaco/output/29002 Apizaco_prpcMLY1mm_mCs.txt for further calculation...



Figura 22. Procedimiento para abrir 29002 Apizaco_prpcMLY1mm.txt

10) Esto producirá cinco archivos en el directorio de salida, Figura 23. Una copia del archivo **29002 Apizaco_prcpMLY1mm_1Cs.txt**, también se guarda en el directorio de salida denominado **29002 Apizaco_prcpMLY1mm_mCs.txt**, el cual enumera todos los puntos de cambio que podrían ser significativos.

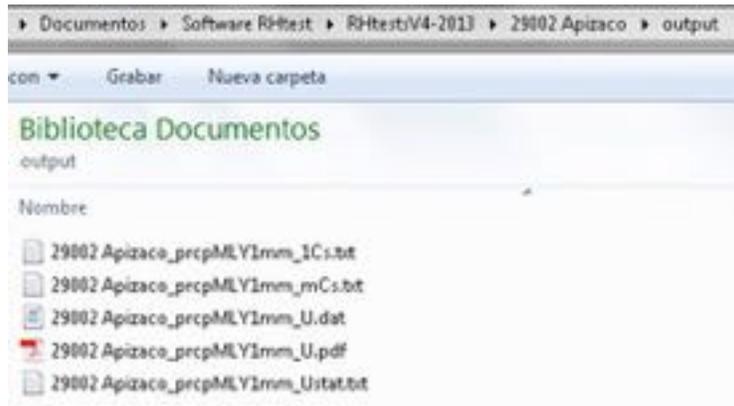


Figura 23. Archivos generados durante el proceso

11) A continuación se abre el archivo **29002 Apizaco_prcpMLY1mm_mCs.txt**, Figura 24, para analizar si hay puntos de cambio, y si estos son significativos. Para la estación 29002 Apizaco no hay puntos de cambio, por lo que podemos concluir que es homogénea.

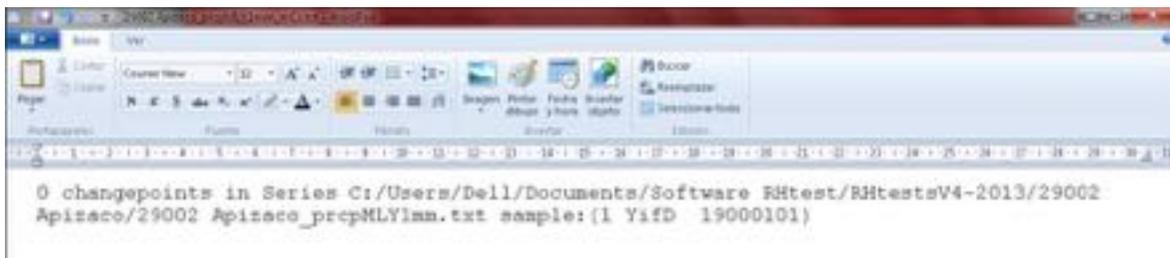


Figura 24. Datos del archivo de salida 29002 Apizaco_prcpMLY1mm.txt

12) Se cierra la plataforma **R** y se procede a revisar el archivo **29002 Apizaco_prcpMLY1mm_U.pdf**, el cual nos permite visualizar gráficamente si la serie de tiempo es homogénea, Figura 25, con lo que se confirma que la serie de tiempo de la estación 29002 Apizaco es homogénea.

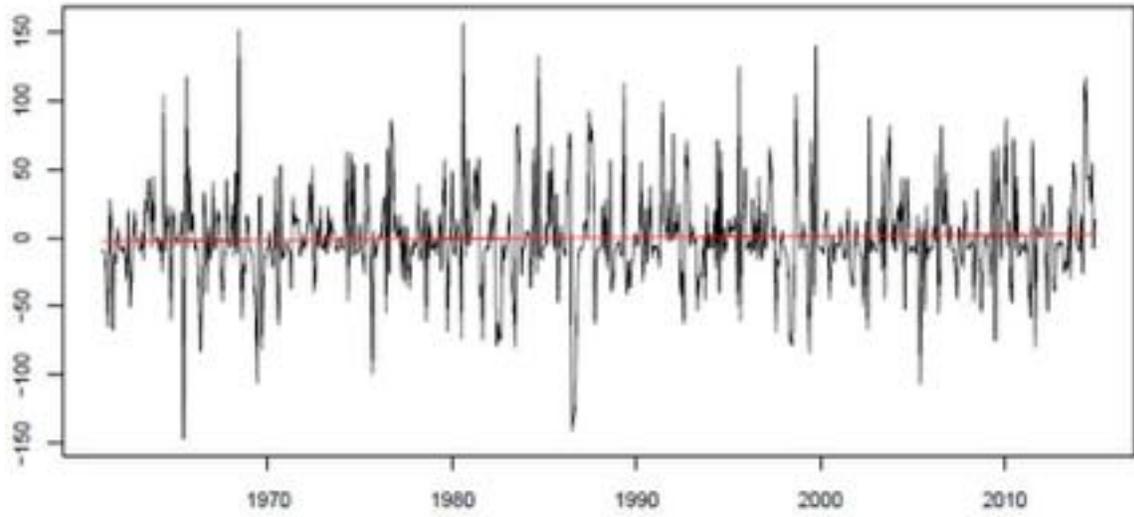


Figura 25. Serie de anomalías base y ajuste de regresión 29002 Apizaco_prcpMLY1mm.txt