



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y
USO INTEGRAL DEL AGUA**

**DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN EL ESTADO DE
SAN LUIS POTOSÍ**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y

USO INTEGRAL DEL AGUA

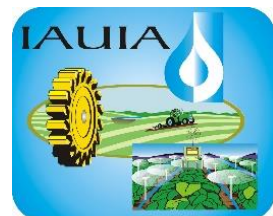


DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

PRESENTA:

JESÚS GALLEGOS CEDILLO

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2015.



**DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN EL ESTADO DE
SAN LUIS POTOSÍ**

Tesis realizada por Jesús Gallegos Cedillo, bajo la dirección del Comité Asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener
el grado de:

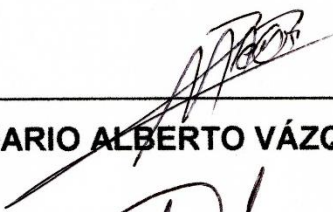
**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA
ORIENTACIÓN USO INTEGRAL DEL AGUA**

DIRECTOR:



DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

ASESOR:



DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

ASESOR:



M.I. JUAN JUÁREZ MÉNDEZ

DEDICATORIA

A mis padres: Evodio Gallegos Zúñiga y Juana Cedillo Contreras, por ser mis mejores amigos y compartir conmigo, experiencias y consejos. Gracias por ser la fuente de inspiración para seguir adelante. Por su apoyo incondicional y por la confianza depositada en mí.

A mis hermanos: Mauricio, Josefát, Susana, Gilberto, Víctor Manuel, Leslie Verónica, Marielena y Juan Carlos, fieles amigos que han sido mi inspiración y ejemplo, por estar conmigo siempre. Por todo el apoyo incondicional que me han brindado.

A mis abuelos: Manuel Gallegos✠, Francisca Zúñiga✠, Alberto Cedillo✠ y Ma. Joel Contreras, por todo el cariño brindado, por sus consejos y esperanzas.

A María Guadalupe González Ramírez, por estar a mi lado siempre, en las buenas y en las malas. Por mostrarme que hay esperanza para alcanzar nuestros sueños, gracias amor.

A mis Cuñados y Sobrinos, que me inspiran cariño, admiración y me impulsan a seguir preparándome: Federico V., Raquel G., Cinthia N., Marina V.; María José, Glendy Estefany, Yosefat Eduardo, Enrique, Camila Damar, Narecxi Naomi, Ainhoa Maité, Juan Guadalupe y Valentina Guadalupe.

Con Respeto, Admiración y Cariño: Jesús Gallegos Cedillo.

AGRADECIMIENTOS

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado para realizar estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo, que ha sido la base de mi formación profesional.

Al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, por el apoyo brindado al realizar la maestría.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez por todo el apoyo brindado al dirigir la presente investigación, por creer en mí y brindarme su amistad en todo momento, por sus consejos, paciencia, y por todas las contribuciones que hizo a mi formación académica, profesional y personal.

Al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña por su apoyo, colaboración y sus valiosas aportaciones en ésta investigación.

Al M.I. Juan Juárez Méndez por su disposición y recomendaciones para llevar a cabo ésta investigación.

A la familia Lara Arredondo; Ing. Felipe de Jesús Lara Nava y Lic. María Teresa Arredondo, por confiar en mí y por brindarme un lugar en su corazón en momentos difíciles, gracias por su apoyo incondicional, por la infinidad de buenos consejos que me han regalado y las atenciones brindadas durante todo este tiempo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Jesús Gallegos Cedillo, nació el 26 de diciembre de 1986 en Matehuala, San Luis Potosí. Actualmente radica en Villa de Arista, San Luis Potosí.

En el período 1993-1999 estudió en la escuela primaria Emiliano zapata, turno vespertino; de 1999 al año 2002 estudió en la Escuela Secundaria Técnica N°30. De los años 2002-2005 realizó estudios en el Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario N°119 (CBTA 119). Se tituló como: Técnico en Informática Agropecuaria.

En 2007 realizó estudios de propedéutico en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA), en Bermejillo, Durango. En 2008 se trasladó a la Universidad Autónoma Chapingo, ubicada en el municipio de Texcoco en la Ciudad de México, donde continuó sus estudios profesionales en el Departamento de Irrigación. En 2012 obtuvo el título de Ingeniero en Irrigación, con la tesis titulada: “Disponibilidad del recurso hídrico en el altiplano potosino”.

De agosto de 2013 a junio de 2015, realizó estudios de Maestría en el Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua en la Universidad Autónoma Chapingo.

DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ

AVAILABILITY OF WATER RESOURCES IN THE STATE OF SAN LUIS POTOSÍ

Jesús Gallegos Cedillo¹ y Ramón Arteaga Ramírez²

RESUMEN

El agua es un recurso invaluable para todas las naciones y a medida que aumenta la competencia por la misma, se degradan los recursos naturales, aumenta la escasez, el desperdicio y la contaminación, a tal grado que se le considera recurso limitante del desarrollo. El objetivo principal fue determinar la disponibilidad y distribución del recurso hídrico en el estado de San Luis Potosí. Se analizaron 108 estaciones climatológicas con 27 y 16 años de información diaria de precipitación (+85%), temperatura máxima y mínima respectivamente. Se calcularon los datos faltantes con el método del U.S. National Weather Service. Se definió la estación de crecimiento (EC) de acuerdo a las fechas del calendario juliano, con el programa Instat v.3.37, los criterios fueron: cuando se presenten más de 20 mm de precipitación en 1 o 2 días consecutivos después del primero de: Enero, marzo, Abril, mayo o junio, sin sequía de 9 días o más dentro de los siguientes 30 días consecutivos; fin de la estación de crecimiento (FEC): después del primero de agosto o septiembre, donde la humedad en el suelo es cero. La duración se obtuvo de la diferencia FEC-IEC. También, se determinó con el balance hídrico simple. Se obtuvo el número total de días lluviosos, precipitación total durante la EC, precipitación máxima en 24 horas (P24) y el día juliano de la P24. Con la distribución normal se determinaron las probabilidades al 20, 40, 60 y 80%. Se generó cartografía que representa la información de manera temporal y espacial, esencial para la planeación de agricultura de temporal. El sur del estado concentra alto potencial de adaptación. Las condiciones de menor potencial se presentan al norte, noroccidente y centro de San Luis Potosí.

Palabras clave: balance hídrico, estación de crecimiento, Instat, distribución normal, cartografía.

¹Autor de la tesis.

²Director de la tesis.

ABSTRACT

Water is an invaluable resource for all nations. As the competition for it increases, natural resources are degraded, and scarcity, pollution and waste increase to the point that it is considered a limiting resource for development. The main goal was to determine the availability and distribution of the hydric resource in San Luis Potosi state. 108 weather stations were analyzed with 27 and 16 years of daily precipitation (+85%) and maximum and minimum temperature information respectively. The missing data were calculated with the US National Weather Service method. The growing season was defined in accordance with the Julian calendar dates, with the Instat v.3.37 program. The criteria were: start of the growing season: when more than 20 mm of precipitation are presented in 1 or 2 consecutive days after the first day of: January, March, April, May, or June, without 9 days or more of drought in the following 30 consecutive days; end of the growing season: after the first day of August or September, where the soil moisture content is zero. The duration was obtained from the difference between the start and the end of the growing season. The water balance was also determined. The total number of rainy days was obtained, as well as the total precipitation during the growing season, maximum precipitation in 24 hours (P24) and the Julian day of the P24. With the normal distribution the probabilities were determined at 20, 40, 60, and 80%. Mapping was generated representing the information in a temporal and spatial way, essential to agricultural planning in rain-fed agriculture. The south of the state concentrates high adaptation potential. The conditions of less potential are in the north, northwest, and center of San Luis Potosi.

Keywords: water balance, growing season, Instat, normal distribution, cartography.

¹Thesis author.

²Thesis advisor.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
DATOS BIOGRÁFICOS	IV
RESUMEN.....	V
ABSTRACT	V
TABLA DE CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE CUADROS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL.....	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
LITERATURA CITADA	8
CAPÍTULO 2.....	11
CÁLCULO DE DATOS DIARIOS FALTANTES EN REGISTROS DE PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA MÁXIMA Y MÍNIMA EN.....	11
SAN LUIS POTOSÍ.....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
2.1. Descripción del área de estudio.....	16
2.2. Bases de datos climatológicas.....	17
2.3. Métodos utilizados en la estimación de datos faltantes	21
2.4. Índices estadísticos para evaluar la estimación del error.....	22
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
4. CONCLUSIONES.....	28
5. LITERATURA CITADA	29

CAPÍTULO 3.....	32
ESTACIÓN O PERÍODO DE CRECIMIENTO, SU VARIABILIDAD EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ.....	32
1. INTRODUCCIÓN.....	34
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
2.1. Localización del área de estudio.....	36
2.2. Registros de información climatológica.....	36
2.3. Información edafológica.....	37
2.4. Software Instat v. 3.37	38
2.5. Determinación del inicio de la estación de crecimiento (IEC)	38
2.6. Determinación del fin de la estación de crecimiento (FEC)	39
2.7. Determinación de la duración de la estación de crecimiento (DEC)	39
2.8. Modelos para la estimación de la duración de la EC	40
2.9. Análisis probabilístico de las componentes del período de crecimiento	40
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
3.1. Inicio de la estación de crecimiento (IEC).....	41
3.2. Fin de la estación de crecimiento (FEC)	43
3.3. Duración de la estación de crecimiento (DEC)	43
3.4. Tratamiento probabilístico de las componentes de la EC	44
3.5. Representación espacial de las componentes de la EC	48
3.6. Modelos representativos de la relación DEC versus PTDEC, PTA, Inicio y Fin de la EC	53
3.7. Modelo matemático que relaciona las variables PTA y PTDEC	57
4. CONCLUSIÓN.....	59
5. LITERATURA CITADA	59
CAPÍTULO 4.....	62

ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA Y BALANCE HÍDRICO EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ.....	62
1. INTRODUCCIÓN.....	64
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	69
2.1. Zona de estudio	69
2.2. Datos climatológicos	69
2.3. Datos de suelo	69
2.4. Determinación de la Evapotranspiración de referencia (ET _o).....	71
2.5. Determinación Balance hídrico Agroclimático.....	72
2.6. Análisis probabilístico de las fechas de inicio de la estación de crecimiento	72
2.7. Análisis probabilístico de la fechas de fin de la estación de crecimiento	73
2.8. Tratamiento probabilístico para las variables: Duración, número total de días lluviosos y precipitación total durante la estación de crecimiento	74
2.9. Determinación de áreas con potencial de adaptación, cultivos: maíz y frijol	74
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	76
3.1. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (CAAS)	76
3.2. Evapotranspiración	76
3.3. Balance hídrico simple.....	78
3.4. Representatividad espacial de las variables; Inicio, Fin, Duración, NTDLL y PTDEC	83
3.5. Áreas potenciales para el establecimiento de maíz y frijol.....	88
3.6. Modelos representativos de la relación DEC versus PTDEC, PTA, NTDLL, Inicio y Fin de la EC.....	92
4. CONCLUSIÓN.....	97

5. LITERATURA CITADA	98
CAPÍTULO 5.....	103
PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS EN EL ESTADO DE SAN LUIS	
POTOSÍ	103
1. INTRODUCCIÓN.....	105
2. MATERIALES Y MÉTODOS	106
2.1. Descripción del área de estudio.....	106
2.2. Bases de datos climatológicas.....	107
2.3. Determinación de la precipitación máxima en 24 horas	108
2.4. Procesamiento estadístico de lluvias máximas diarias	108
2.5. Prueba de bondad de ajuste.....	108
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	109
3.1. Precipitación máxima diaria	109
3.2. Probabilidad de precipitación máxima diaria.....	112
3.3. Prueba Kolmogorov-Smirnov.....	114
3.4. Período de retorno	116
3.5. Representación espacial del evento extremo	117
4. CONCLUSIONES	119
5. LITERATURA CITADA	120
CAPÍTULO 6.....	122
CONCLUSIONES GENERALES.....	122

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 2	Página
Cuadro 1. Distancia entre las estaciones analizadas y auxiliares (km).	21
Cuadro 2. Resumen de estadísticos del ajuste de los métodos que estiman los registros faltantes de datos de precipitación.	23
Cuadro 3. Índices estadísticos del ajuste de los métodos que estiman los registros faltantes con datos de temperatura máxima.	26
Cuadro 4. Resumen de estadísticos del ajuste de los métodos que estiman los registros faltantes de datos de temperatura mínima.	28
CAPÍTULO 3	Página
Cuadro 1. Inicio de la EC (día juliano), estación 24004.	41
Cuadro 2. Fin de la EC (día juliano) en la estación 24004.	43
Cuadro 3. Duración de la EC (días), estación 24004.	43
Cuadro 4. Probabilidad de las componentes de la EC, estación 24004.	44
Cuadro 5. Ecuación de regresión polinómica de segundo grado y coeficiente de determinación por nivel de probabilidad analizado.	56
Cuadro 6. Ecuación de regresión y coeficiente de determinación por nivel de probabilidad analizado.	57
Cuadro 7. Modelos matemáticos y coeficiente de determinación por nivel de probabilidad.	58
CAPÍTULO 4	Página
Cuadro 1. Criterios para definir áreas con potencial en el establecimiento de los cultivos de maíz y frijol.	75
Cuadro 2. Evapotranspiración promedio diaria (mm) para la estación 24165, San José de Coronado, Real de Catorce, SLP.	77
Cuadro 3. BHS del año 1995 de la estación 24094, Venegas, SLP.	79

Cuadro 4. BHS del año 1997 de la estación 24069, San Luis Potosí.	80
Cuadro 5. BHS para la estación 24006 y para el año 2008.	81
Cuadro 6. Balance hídrico simple para el año 1992 de la estación 24087.	82
Cuadro 7. Porcentaje de ocurrencia mensual del inicio y fin de la EC por nivel de probabilidad (%).	83
Cuadro 8. Combinaciones posibles de adaptación.	89
Cuadro 9. Ecuación de regresión cuadrática y coeficiente de determinación por nivel de probabilidad analizado.	95
Cuadro 10. Ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación (r^2).	96

CAPÍTULO 5

Página

Cuadro 1. Valores críticos (d) para la prueba Kolmogorov-Smirnov de bondad del ajuste.	109
Cuadro 2. Lluvia máxima en 24 horas (P24) y día juliano del evento (DP24), estación 24071, San Nicolás Tolentino, San Luis Potosí.	112
Cuadro 3. Probabilidades de lluvia para diferentes distribuciones, estación 24071, San Nicolás Tolentino, San Luis Potosí.	112
Cuadro 4. Lectura probabilística de precipitación máxima, estación 24071, San Nicolás Tolentino.	114
Cuadro 5. Valores absolutos de la diferencia entre la probabilidad observada y la estimada, estación 24071, San Nicolás Tolentino, SLP.	114
Cuadro 6. Número y Porcentaje de estaciones climatológicas que se ajustan a las distribuciones analizadas para los valores de P24.	115
Cuadro 7. Número y Porcentaje de estaciones climatológicas que se ajustan a las distribuciones analizadas para las fechas de DP24.	116
Cuadro 8. Cuantiles de P24 en la estación 24071.	116

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2	Página
Figura 1. Porcentaje de información histórica por estación climatológica...	19
Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y de la red de estaciones climatológicas.	20
Figura 3. Comparación entre el valor estimado y el valor observado de precipitación.....	24
Figura 4. Comparación entre el valor estimado y el valor observado de temperatura máxima.....	25
Figura 5. Comparación entre el valor estimado y el valor observado de temperatura mínima.....	27
CAPÍTULO 3	Página
Figura 1. Ubicación de la zona de estudio y de la red de estaciones climatológicas.	37
Figura 2. Diagrama para el cálculo de la fracción volumétrica de agua aprovechable (Norero, 1976, citado por Arteaga y Vázquez, 2001).	38
Figura 3. Niveles de probabilidad para las componentes de la EC, estación 24004 (a) y 24145 (b).	46
Figura 4. Niveles de probabilidad para las componentes de la EC, estación 24195 (c) y 24065 (d).	47
Figura 5. Precipitación total anual al 20, 40, 60 y 80% de probabilidad.....	48
Figura 6. Inicio de la EC con 20, 40, 60 y 80% de probabilidad.	49
Figura 7. Distribución espacial del Fin de la EC al 20, 40, 60 y 80% de probabilidad.	50
Figura 8. Duración de la EC con diferentes niveles de probabilidad.....	51

Figura 9. Duración de la EC con el modelo desarrollado por Pájaro (1984), al 80, 60, 40 y 20% de probabilidad.....	52
Figura 10. Diagrama de dispersión entre DEC y la PTDEC, PTA, INICIO y FIN de la EC al 80% de probabilidad.....	55
Figura 11. Diagrama de dispersión entre la PTA y PTDEC al 80% de probabilidad.....	58

CAPÍTULO 4

Página

Figura 1. Diagrama para el cálculo de la fracción volumétrica de agua aprovechable (Norero, 1976, citado por Arteaga y Vázquez, 2001).	70
Figura 2. Perfiles de suelo del área de estudio.....	71
Figura 3. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (mm).....	76
Figura 4. Evapotranspiración de referencia media anual.....	78
Figura 5. Distribución espacial del inicio de la EC al 80, 60, 40 y 20% de probabilidad.	84
Figura 6. Distribución espacial del fin de la EC con diferentes niveles de probabilidad.	85
Figura 7. Distribución espacial de la duración de la EC con diferentes niveles de probabilidad.	86
Figura 8. Distribución espacial del número total de días lluviosos durante la EC con diferentes niveles de probabilidad.....	87
Figura 9. Distribución espacial de la Precipitación total durante la EC con diferentes niveles de probabilidad.	88
Figura 10. Áreas potenciales de adaptación del cultivo de maíz.	91
Figura 11. Áreas potenciales de adaptación del cultivo de frijol.	92
Figura 12. Diagrama de dispersión entre la DEC y la PTDEC, PTA, NTDLL, INICIO y FIN de la EC al 80% de probabilidad.	94

CAPÍTULO 5

Página

Figura 1. Zona de estudio y red de estaciones climatológicas.....	107
Figura 2. Precipitación diaria del año 1992 y 1993, Estación 24071 y 24067 respectivamente.	110
Figura 3. Precipitación diaria en las estaciones 24033 (año 1991) y 24037 (año 1993).	111
Figura 4. Curvas de probabilidad de P24 en la estación 24071, San Nicolás Tolentino, San Luis Potosí.	113
Figura 5. Período de retorno vs precipitación máxima diaria.	117
Figura 6. Distribución espacial de la precipitación máxima en 24 horas al 20, 40, 60 y 80% de probabilidad.	118
Figura 7. Distribución espacial del día juliano en que se presenta la precipitación máxima diaria al 20, 40, 60 y 80% de probabilidad.	119

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El panorama del agua en México y en el mundo, es de escasez, desperdicio y contaminación, a tal grado que se le considera como un recurso limitante del desarrollo. Según el Consejo Consultivo del Agua (CCA, 2014), los recursos hídricos de un país se miden con base en la disponibilidad natural media de agua por habitante en un año. Únicamente se considera el agua de lluvia que se transforma en escurrimiento de agua superficial y en recarga de acuíferos (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2004). Actualmente la mitad de los países del mundo tienen una disponibilidad promedio baja y la tercera parte de ellos ya padece escasez. Las tendencias para México hacia el año 2020 no son alentadoras, al tomar en cuenta que tiene una disponibilidad promedio baja. El agua es un recurso invaluable para todas las naciones, y a medida que aumenta la competencia por el agua, aumenta la utilidad de la información hidrológica (Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1994).

En México, el Servicio Meteorológico nacional (SMN) es el organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en el país, así como instalación, operación, desarrollo y mantenimiento de redes meteorológicas. Al área representativa de una región dotada de equipo meteorológico, en la que; observan, miden, registran, concentran y procesan los

diferentes elementos del tiempo o del clima, comúnmente se le denomina estación meteorológica (Nájera y Arteaga, 1998). Aparicio (2007) y Campos (1998), mencionan que es común que los registros de información de un cierto período estén incompletos en las estaciones meteorológicas, debido a la ausencia o sustitución del operador, fallas del aparato registrador y/o negligencia operacional. Según la OMM (2011), la planificación y ejecución de los proyectos de los usuarios no puede aplazarse hasta que se cuente con suficientes observaciones meteorológicas o climatológicas. Por lo tanto, se utiliza la estimación para ampliar, rellenar y/o completar un conjunto de registros de datos. Así mismo, recomienda que el período de estudio de información climática debe ser de 30 años mínimo (Ruíz *et al.*, 2012a). Algunos métodos de estimación son: el método de la Relación Normalizada (RN), el método Racional Deductivo (RD) y el método del Cuadrado Inverso de la Distancia o del U. S. National Weather Service (WS). Cuando se tienen series de registros completos, se analiza la información y se utiliza en la elaboración de mapas climáticos, zonificación agrícola, estudios de impacto ambiental, investigación aplicada y como herramienta auxiliar en la toma de decisiones operacionales.

México es un país tradicionalmente agrícola que cuenta potencialmente con 30 millones de hectáreas con vocación agrícola, que constituye 15% de su superficie total (INEGI, 2009). Anualmente se cultivan en promedio, cerca de 20 millones de hectáreas que representan el 70% de la superficie agrícola potencial, con un rango de variación anual de 60% a 85% de dicha superficie. La mayor parte de la agricultura se practica bajo condiciones de temporal, se totaliza el 75% de la

superficie anualmente establecida. La agricultura representa una actividad esencial para el desarrollo del país y seguridad alimentaria, donde el factor limitante de la producción agrícola es el agua. La estimación espacial y temporal de los recursos hídricos disponibles de una región agrícola es la base para una planificación sustentable (Íñiguez *et al.*, 2014). Su aplicación contribuye a asegurar la eficacia de la planificación de cultivos, optimizar los recursos, minimizar riesgos y maximizar estrategias para una mejor producción, en base a la disponibilidad de agua (Toro *et al.*, 2015).

El balance de agua en el suelo cuantifica la disponibilidad de humedad en éste para los cultivos en un punto en el tiempo y espacio. Es decir, el balance hídrico simple analiza la entrada (precipitación) y salida (Evaporación y transpiración) de agua al suelo, determina las cantidades necesarias a suplir en áreas con riego, por lo que es una herramienta útil para estimar la disponibilidad de agua en cualquier región, apoya a la planeación de la agricultura de temporal y uso del agua (Sánchez *et al.*, 2011). Así mismo, numerosos científicos han estudiado y desarrollado diversos trabajos, con el fin de conocer la duración, fechas de inicio y fin de la estación de crecimiento en una región determinada, se consideran períodos de sequía, probabilidades de ocurrencia y su distribución en tiempo y espacio (Ruíz *et al.*, 2012b). La estación de crecimiento se define como el período del año donde las características de cantidad y distribución de la precipitación son adecuadas para la germinación, establecimiento y desarrollo pleno del cultivo (Odekunle, 2004; FAO, 1997).

En México el período de crecimiento es variado por las condiciones geográficas, orográficas y climáticas del país. Su estudio es importante dado que la actividad agrícola es parte importante de la economía, por lo que es vulnerable a los cambios en el clima y a sufrir el impacto de los desastres. Los rendimientos de los cultivos en zonas de temporal, son fuertemente dependientes de la aleatoriedad de la precipitación y la presencia de altas temperaturas, lo que influye en la disponibilidad de agua en el suelo (Sánchez *et al.*, 2011).

La agricultura tanto de riego como de temporal, depende directamente de las condiciones climatológicas y meteorológicas de una región, ya que determinan el potencial agrícola del lugar (Arteaga *et al.*, 2004) y está expuesto a fenómenos naturales o eventos extremos que afectan directamente la producción. Un evento extremo meteorológico, es un fenómeno particular de un lugar y época del año, que se encuentra por encima o por debajo del percentil 90 o 10 de la función de probabilidad observada. A menudo hay que saber el riesgo de los eventos extremos, particularmente los que son perjudiciales, como: fuertes lluvias, caudales altos en los ríos, vientos fuertes o temperaturas extremas (Stern *et al.*, 2006). Con el análisis de frecuencia, se pueden tomar medidas o decisiones para reducir daños y riesgos ocasionados por lluvias extremas, permite a los ingenieros realizar diversos diseños y construir obras hidráulicas, que permitan captar, controlar y conducir el incremento continuo de volumen de agua de lluvia (Ibáñez *et al.*, 2011).

El estado de San Luis Potosí se encuentra localizado en la altiplanicie central mexicana; sus coordenadas geográficas extremas son: al norte 24°29', al sur

21°10' de latitud norte, al este 98°20', al oeste 102°18' de longitud oeste. Su superficie constituye el 3.2% del área total del país. Políticamente la entidad está dividida en 58 municipios (INAFED, 2010). En el estado de San Luis Potosí, como en algunos otros de la república mexicana, existe cierta diversidad de ambientes climáticos y morfológicos, situación que divide la unidad territorial del estado en cuatro regiones: Altiplano, Centro, Media y Huasteca (INEGI, 2007). En las regiones con climas que van de áridos a semiáridos, el agua subterránea es la mayor fuente de abastecimiento del recurso hídrico; y en ocasiones la única.

De acuerdo a la SEDECO (2014), la zona Centro es esencialmente manufacturera, comercial y de servicios, estas actividades generan el 89.5% del valor bruto de la producción. Su extensión territorial es de 8,999.36 km², que equivale al 14.44% de la superficie del estado. Las alturas de la zona centro varían entre los 1640 y 2160 msnm. La zona Huasteca es fundamentalmente agropecuaria y frutícola, aquí se genera el 5.6% del valor bruto de la producción manufacturera. El principal subsector manufacturero es la industria alimentaria. Su extensión territorial es de 11,409.46 km², que equivale a 18.31% de la superficie del estado. Las alturas varían entre los 20 y 600 msnm. La zona Altiplano es tradicionalmente minera y comercial, aquí se genera el 2.9% del valor bruto de la producción manufacturera. Su extensión territorial es de 29,119.80 km², que equivale a 46.74% de la superficie del estado. Las alturas varían entre los 1570 y 2680 msnm. La zona Media es fundamentalmente agrícola. La producción manufacturera que se genera es el 2.0% del valor bruto. Su territorio

es de 12,776.12 km², que equivale a 20.51% de la superficie del estado. Las alturas de la zona media varían entre los 840 y 1460 msnm.

El clima que predomina en todo el Altiplano y gran parte de la Sierra Madre Oriental, ocupa el 73.84% de la superficie de la entidad, es tipo seco, con una temperatura media anual entre 16 y 18°C y una precipitación media anual de 410 a 500 mm, con lluvias principalmente en verano y muy escasas en el resto del año (SGM, 2011). El estado de San Luis Potosí tiene, en la mayor parte de su territorio, poca vegetación debido al predominio de climas de tipo seco caracterizados por una escasa precipitación pluvial. En toda la parte norte, noroccidental y central está bien representada por el tipo matorral con un 64% del territorio. Una pequeña porción, en el extremo sureste del estado, queda comprendida dentro de la subprovincia de llanuras y lomeríos, caracterizados por un paisaje monótono con predominio de llanuras planas. En las partes altas del altiplano de la Sierra Madre Oriental, se presentan bosques de pinos, de encinos o de ambos. En la región Huasteca, caracterizada por recibir abundantes lluvias, predomina la selva baja caducifolia. En algunas áreas restringidas del altiplano se presentan pastizales naturales, combinados con matorrales desérticos y cactáceas y en la Huasteca se presentan pastizales cultivados.

La hidrología del estado se nutre de una precipitación pluvial que varía desde 410 a más de 2,000 mm anuales, con la época principal de lluvias en verano y otra de menor importancia en invierno, que generan corrientes intermitentes en la mayor parte de la entidad y corrientes perennes en la región oriental y suroriental.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la disponibilidad y distribución del recurso hídrico en el estado de San Luis potosí.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar y comparar los métodos: Racional Deductivo (RD), de la Relación Normalizada (RN) y el Cuadrado del Inverso de la Distancia o del U. S. National Weather Service (WS), y seleccionar el mejor para calcular los registros de datos diarios faltantes de la variable precipitación, temperatura máxima y mínima en las estaciones climatológicas ubicadas en el área de estudio.
- Determinar la variabilidad de la estación de crecimiento en el estado de San Luis Potosí, con el análisis de información meteorológica, identificando las fechas de inicio y fin de la temporada de lluvia, así como su duración al 20, 40, 60 y 80 por ciento de probabilidad. Así mismo, definir un modelo matemático (empírico-estadístico) para estimar la duración y la precipitación total durante la estación de crecimiento.
- Definir zonas o áreas con propiedades y características agroclimáticas similares, mediante la determinación de las componentes del período de crecimiento, número total de días lluviosos y precipitación total durante la estación de crecimiento a partir del balance hídrico simple, para diferentes niveles de probabilidad. Así mismo, realizar una zonificación para los cultivos de maíz y frijol. Y finalmente obtener un modelo matemático para

estimar la duración de la estación de crecimiento en el estado de San Luis Potosí.

- Representar de manera temporal y espacial la precipitación máxima en 24 horas, analizada con cinco funciones de distribución al 20, 40, 60 y 80 por ciento de probabilidad en el estado de San Luis Potosí.

Estructura del trabajo de tesis

En el capítulo uno, se menciona la problemática desde un panorama general de la disponibilidad y distribución del agua, así como, de los aspectos relevantes en la investigación. En el capítulo dos, se describen métodos y procedimientos relacionados a la deducción de registros de datos faltantes para series continuas y basadas en postulados de normalidad. En el tercer capítulo, se analiza las componentes de la estación o período de crecimiento, así como su comportamiento y distribución dentro de los límites del estado de San Luis Potosí. El cuarto tiene que ver con definir zonas con propiedades y características agroclimáticas similares, determinadas con el balance hídrico simple, se utiliza el programa Instat v. 3.37. En el quinto capítulo, se muestra de manera temporal y espacial la precipitación máxima en 24 horas, definida para el área de estudio. Finalmente, en el capítulo seis, se realizan las conclusiones generales de acuerdo a los objetivos planteados y analizados en el presente trabajo.

LITERATURA CITADA

- Aparicio, M. F. J. 2007. Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa. DF. México. 304 p.
- Arteaga, R. R.; Tijerina, C. L.; Valdez, C. R. D.; Vázquez, P. M. A.; Mejía, S. E. 2004. Representatividad temporal y espacial de la información de

- temperaturas extremas de una red de estaciones meteorológicas en Guanajuato, México. Ingeniería hidráulica en México, 19(2), 53-64.
- Campos, A. D. F. 1998. Procesos del ciclo hidrológico (3ª ed.). Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí. México. 529 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2004. Estadísticas del agua en México. Situación de los recursos hídricos. México, D. F. 143 p.
- Consejo Consultivo del Agua. A.C. (CCA). 2014. Situación del agua. Consultado el 11 Junio de 2014: <http://www.aguas.org.mx/sitio/index.html>.
- Ibáñez, C. L. A.; Lorenzo, C. A.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A. 2011. Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia de la lluvia registrada en Chapingo, México. Revista Ingeniería Agrícola y Biosistemas, 3(1), 25-32.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2007. Regiones agropecuarias de San Luis Potosí. 69 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI). 2009. Censo Agropecuario 2007. VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Aguascalientes, México, D. F.
- Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal (INAFED). 2010. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México; San Luis Potosí.
- Íñiguez, C. M.; Ojeda, B. W.; Días, D. C.; Sifuentes, I. E. 2014. Análisis de cuatro variables del período de lluvias asociadas al cultivo maíz de temporal. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 5(1), 101-114.
- Nájera, M. N. L.; Arteaga, R. R. 1998. Antología Agroclimatología. Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria (DGETA). México. 230 p.
- Odekunle, T. O. 2004. Rainfall and the length of the growing season in Nigeria. International Journal of Climatology. 24(4), 467-479.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación (FAO). 1997. Zonificación Agro-ecológica: Guía general. N°73. Roma. 96 p.

- Organización Meteorológica Mundial (OMM). 1994. Guía de prácticas hidrológicas: Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. No 168, 818 p.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). 2011. Guía de prácticas climatológicas. No100. Ginebra, Suiza. 128 p.
- Ruíz, O. A.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A.; Ontiveros, C.R. E.; López, L. R. 2012a. Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México. Universidad y Ciencia, trópico húmedo, 28(1), 1-14.
- Ruíz, O. A.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A.; Ontiveros, C.R. E.; López, L. R. 2012b. Inicio de la estación de crecimiento y períodos secos en Tabasco, México. Tecnología y Ciencia del Agua, 3(2), 85-102.
- Sánchez, C. I.; Esquivel, A. G.; López, S. A.; Inzunza, I. M. A.; Catalán, V. E. A. 2011. Balance hídrico como fundamento para toma de decisiones en agricultura de temporal. Relación Agua Suelo Planta - Agrofaz, 2(1), 55-63.
- Secretaria de Desarrollo Económico de San Luis Potosí (SEDECO). 2014. El Estado de San Luis Potosí. 27 p.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2011. Panorama Minero del estado de San Luis Potosí. 70 p.
- Stern, R.; Rijks, D.; Dale, I.; Knock, j. 2006. Instat climatic guide. Tercera edición. Reading, UK. Universidad de Reading. 330 p.
- Toro, T. A. M.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A.; Ibáñez, C. L. A. 2015. Relleno de series de Precipitación, Temperatura mínima, máxima de la región norte del Urabá Antioqueño. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 6(2), 577-588.

CAPÍTULO 2
CÁLCULO DE DATOS DIARIOS FALTANTES EN REGISTROS DE
PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA MÁXIMA Y MÍNIMA EN
SAN LUIS POTOSÍ

Jesús Gallegos Cedillo¹, Ramón Arteaga Ramírez¹, Mario Alberto Vázquez
Peña¹, Juan Juárez Méndez²

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. ²Departamento de
Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco.

C.P. 56230. Chapingo, México. Email: gallegosjc_1@hotmail.com

RESUMEN

En las estaciones meteorológicas es común que los registros de información de un cierto período estén incompletos, por la ausencia o sustitución del operador, fallas del aparato registrador, cambio de ubicación de la estación o negligencia operacional, lo que limita la realización de estudios agroclimáticos e hidrológicos. El objetivo fue determinar y comparar los métodos Racional Deductivo (RD), de la Relación Normalizada (RN) y el Cuadrado del Inverso de la Distancia o U. S. National Weather Service (WS), y seleccionar el mejor para calcular los registros de datos diarios faltantes de las variables precipitación, temperatura máxima y mínima de las estaciones climatológicas ubicadas en el estado de San Luis Potosí. Se analizaron seis estaciones que se les eliminó el 15% (1489 datos de

9862) de información de precipitación y 25% (1489 datos de 5844) de temperatura máxima y mínima. Los datos faltantes se generaron con los métodos WS, RD y RN. Con los índices estadísticos RMSE e Índice de Willmott (d) se realizó la evaluación de los métodos. De acuerdo a los indicadores estadísticos, el WS presenta el índice de Willmott cercano a uno y el error estándar promedio cercano a cero, por consecuencia se utilizó para estimar los datos faltantes en las 108 estaciones climatológicas del estado de San Luis Potosí.

Palabras Clave: Índices estadísticos, Método de la relación normalizada, Racional deductivo, Método del cuadrado de la distancia recíproca.

ABSTRACT

In the weather stations it is common information records are incomplete a certain period, the absence or replacement operator failures recorder, relocation of the station or operational negligence, which limits the performance of agroclimatic and hydrological studies. The objective was to determine and compare rational deductive methods (RD) of the Normalized Ratio (RN) and the Inverse Square Distance or US National Weather Service (WS), and select the best to calculate the daily data records missing variable precipitation, maximum and minimum temperature of the weather stations in the state of San Luis Potosí. Six stations that were removed 15% (1489 data 9862) information of precipitation 25% (1489 data 5844) Maximum and minimum temperature were analyzed. Missing data were generated with WS, R and RN methods. With statistical indexes and index RMSE Willmott (d) evaluation of methods it was performed. According to statistical indicators, the WS has Willmott index close to one and the average

standard error close to zero, consequently was used to estimate the missing data at 108 weather stations in the state of San Luis Potosi.

Keywords: Statistical indices, Standardized method relationship, Deductive Rational Method reciprocal distance squared.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se han desarrollado gran cantidad de instrumentos, herramientas y técnicas para la medición de los elementos del clima, con la finalidad de conocer el estado del tiempo (Gutiérrez *et al.*, 2007) y brindar información para previsión a corto plazo, análisis estadísticos, apoyo en la agricultura, seguridad en la navegación aérea y marítima, caracterización y clasificación del clima y del estado atmosférico en un momento dado y en un lugar determinado. Un instrumento meteorológico es una combinación de un elemento sensible y un sistema capaz de convertir las indicaciones de este elemento en un valor numérico que representa la variable meteorológica que se está evaluando. Al área representativa de una región dotada de equipo meteorológico, en la que; observan, miden, registran, concentran y procesan los diferentes elementos del tiempo o del clima, comúnmente se le denomina estación meteorológica (Nájera y Arteaga, 1998).

En las estaciones meteorológicas es común que los registros de información de un cierto período estén incompletos, debido a la ausencia o sustitución del operador, fallas del aparato registrador y/o negligencia operacional (Aparicio, 2007; Campos, 1998), lo que ha limitado la realización de estudios agroclimáticos cuyos resultados permitan aumentar la productividad, optimizar los recursos,

reducir los riesgos de pérdida en cosecha, planificación integral de la infraestructura de riego y drenaje, así como predicción climática (Toro *et al.*, 2015). Según la OMM (2011), la planificación y ejecución de los proyectos de los usuarios no pueden aplazarse hasta que se cuente con suficientes observaciones meteorológicas o climatológicas. Por lo tanto, se utiliza la estimación para ampliar, rellenar y/o completar un conjunto de registros de datos. Así mismo, recomienda que el período de estudio de información climática debe ser de 30 años mínimo.

Existen diversos métodos y procedimientos para la estimación de series de datos faltantes, como son: El Método de la relación normalizada (RN), utilizado cuando la precipitación media anual de cualquiera de las estaciones circundantes difiere en más de 10%. Cuando la precipitación media anual difiere en menos del 10%, se estima al hacer un promedio aritmético de los registros en las estaciones circundantes (Alfaro y Pacheco, 2000; McCuen, 1998). Aparicio (2007), recomienda emplear tres estaciones auxiliares como mínimo en ambos casos. La OMM (2011), Campos (2015), Allen *et al.* (2006) y DeGaetano *et al.* (1995) proponen utilizar la regresión lineal (RL) y múltiple (RM), que consiste en obtener una ecuación matemática que expresa la relación de la variable dependiente (Y) con la variable independiente (X) o variables explicativas ($X, X_1, X_2 \dots$ etc.), aunque raras veces se observa una relación lineal perfecta debido a que los fenómenos que se estudian en climatología son usualmente multivariantes, por lo que ambos registros deben ser homogéneos, es decir que necesitan representar las mismas condiciones. Cuando no se dispone de estaciones cercanas y circundantes a la

estación incompleta, o bien, las estaciones existentes no cuentan con observaciones en el período analizado. Los valores faltantes que se deducen con el Método racional deductivo (RD) propuesto por Campos (1998), permite estimarlos, con la información que brindan los años completos de la misma serie (Puertas *et al.*, 2011). El método más utilizado en estudios hidrológicos y geográficos es el cuadrado del inverso de la distancia o también conocido como el método del U. S National Weather Service (WS) (Ramírez *et al.*, 2015), donde la influencia de la lluvia en una estación para el cálculo de la misma en cualquier punto, es inversamente proporcional a la distancia comprendida entre la estación y las estaciones auxiliares (OMM, 2011). La ventaja más importante del WS es que se utiliza con datos diarios, agrupados de períodos de cinco o diez días, mensuales o anuales (Teegavarapu y Chandramouli, 2005; Toro *et al.*, 2015). Otros procedimientos mencionados son: El método de medias móviles (Campos, 1998), método autoregresivo, método logarítmico, y método de triangulación, basados en postulados de normalidad. También existen métodos de estimación conocidos como geoestadísticos según la OMM (2011), basados en fundamentos teóricos, supuestos estadísticos y condiciones que deben de cumplirse para que un método pueda utilizarse correctamente. Los más importantes son el Kriging y la interpolación óptima. El Kriging es un método de interpolación espacial que se basa en mostrar la proporción en la que la varianza entre los puntos cambia en el espacio y se expresa en un variograma. Estos procedimientos se ven limitados al requerir una cantidad suficiente de datos para producir un variograma confiable

y adecuado (Toro *et al.*, 2015). Además, Wagner *et al.* (2012) sugiere que estos no reportan mejoría con respecto al método del WS.

Para evaluar y seleccionar el método que mejor se ajusta a la variable analizada, existen diversas pruebas y procedimientos, conocidos como índices estadísticos, que consisten en estimar el error o sesgo, algunos de ellos son; el Error estándar promedio o Raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), el Índice de concordancia de Willmott (d) (Willmott, 1981), el Coeficiente de determinación (r^2) y el Error relativo (RE) (Cervantes *et al.*, 2013; Kelso *et al.*, 2012; Wright, 2001; Cai *et al.*, 2007).

El objetivo de este trabajo fue determinar y comparar los métodos: Racional Deductivo (RD), de la Relación Normalizada (RN) y el Cuadrado del Inverso de la Distancia o del U. S. National Weather Service (WS), y seleccionar el mejor para calcular los registros de datos diarios faltantes de la variable precipitación, temperatura máxima y mínima en las estaciones climatológicas ubicadas en el área de estudio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción del área de estudio

Políticamente el estado de San Luis Potosí está dividido en 58 municipios, San Luis Potosí es la capital del estado. Por las características geográficas, físicas y económicas se integra en cuatro zonas: Altiplano, Centro, Media y Huasteca (INEGI, 2007) (Figura 2). La ciudad capital tiene una altura de 1,860 msnm. El trópico de cáncer lo atraviesa en la zona septentrional, su territorio es de forma

muy irregular; se extiende en más de dos terceras partes del altiplano y es el único estado del país que colinda con 9 estados (INAFED, 2010).

2.2. Bases de datos climatológicas

Se tomaron los registros de información histórica existente de instituciones encargadas del acopio de información climatológica a nivel nacional. Las bases de datos utilizadas fueron, Eric III 2.0 (Extractor rápido de información climatológica) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2009) y la red de estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015), de las que se obtuvo los registros diarios de información de las variables precipitación (período 1984-2010), temperatura máxima y mínima (período 1995-2010).

2.2.1. Análisis previo de la información de las 108 estaciones climatológicas

Para la recolección de datos, se revisó la información histórica existente en la base de datos Eric III. Se descargaron las estaciones climatológicas en archivo *.txt, (archivo de texto simple sin formato) y posteriormente se depuraron en Microsoft Excel.

Dado que no todas las estaciones contienen registros de las variables climatológicas bajo estudio y muchas carecen de información por diversos períodos de tiempo, se seleccionaron aquellas estaciones cuyos registros de precipitación, temperatura máxima y mínima contaban con más del 85% de información. Se eliminaron años sin datos o con pocos registros.

Se actualizaron las series de estudio hasta el año 2010, con las bases de datos obtenidas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN),

EstacionesClimatologicas.kmz, extensión que permite bajar información más actualizada de los registros de los elementos meteorológicos. Finalmente, se consideraron 27 años como período de estudio para precipitación y 16 años de las variables temperatura máxima y mínima.

Del total de 190 estaciones climatológicas, se determinó analizar 81 estaciones pertenecientes al estado de San Luis Potosí, que contaron con la información requerida. También, se depuraron algunas estaciones climatológicas circundantes, correspondientes a los Estados Vecinos (Tamaulipas, Zacatecas, Nuevo León, Querétaro, Guanajuato, Hidalgo y Veracruz), se seleccionaron de éstas un total de 27 estaciones para análisis.

En la Figura 1 se presenta el porcentaje de información diaria obtenida de los registros de las variables precipitación, temperatura máxima y mínima en las 108 estaciones climatológicas. En el caso de la precipitación, se tomaron dos estaciones vecinas al estado con menor cantidad de información de precipitación, para delimitar correctamente el estado de San Luis Potosí. Para los tres casos se tomaron las mismas estaciones seleccionadas, designando mayor peso en importancia a la variable precipitación. Por tal motivo, los datos de temperatura máxima muestran cuatro estaciones con información inferior al 85%. Mientras que los registros de la temperatura mínima presenta la información requerida.

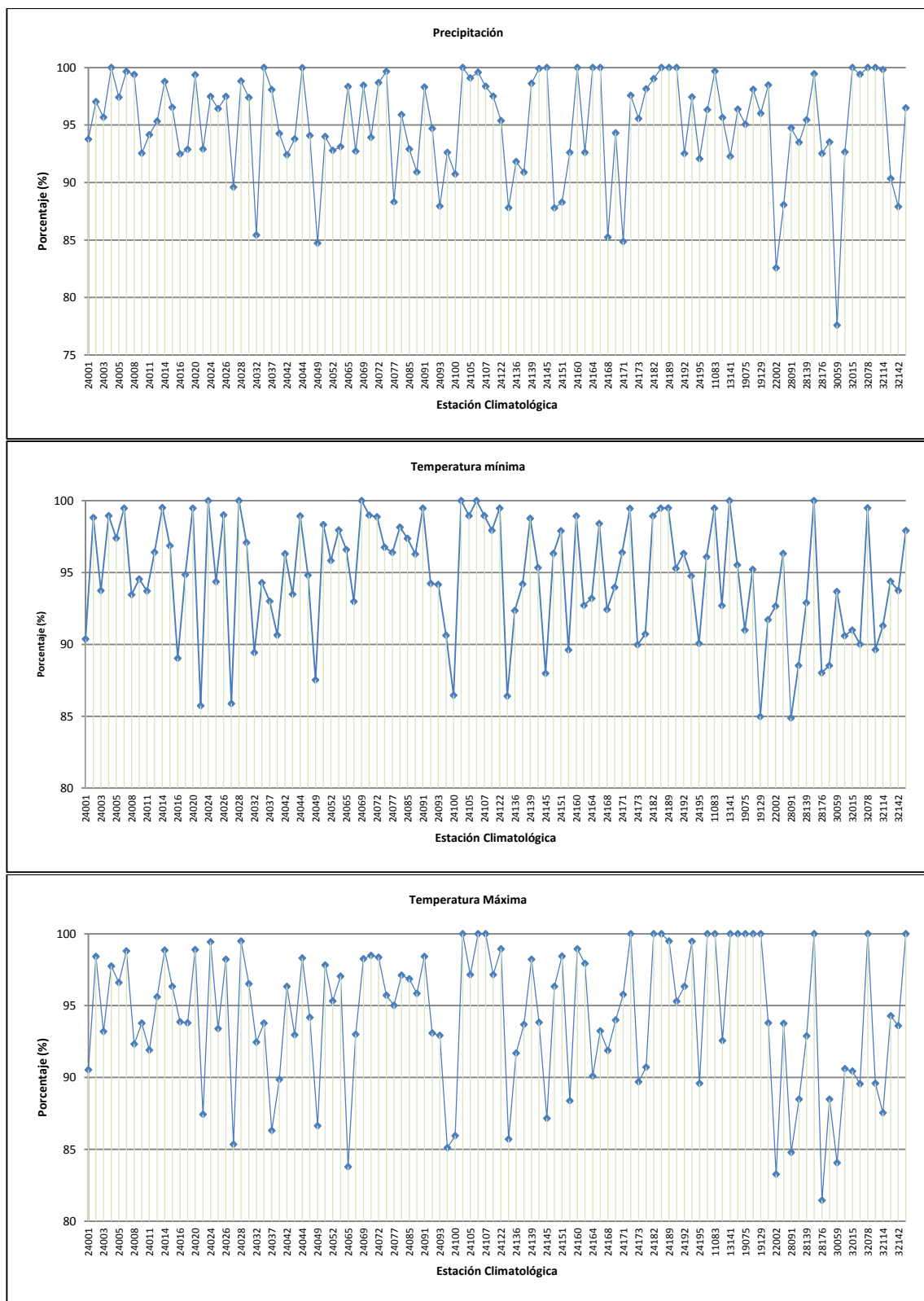


Figura 1. Porcentaje de información histórica por estación climatológica.

En el Figura 2, se presenta la ubicación y distribución de las 108 estaciones climatológicas dentro de la zona de estudio. También, se muestran las estaciones analizadas y auxiliares, para definir el mejor método de estimación de datos faltantes.

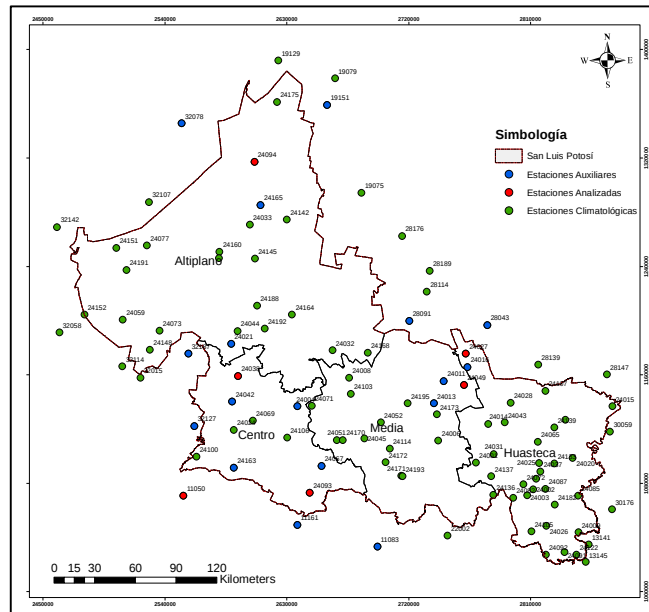


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y de la red de estaciones climatológicas.

2.2.2. Selección de estaciones climatológicas para este estudio

Se seleccionaron seis estaciones climatológicas (Cuadro 1), dos en la región Centro y una dentro de los límites de las regiones Altiplano, Media y Huasteca. Así mismo, se analizó una de las estaciones circundantes al estado, con la finalidad de delimitar y representar el área de estudio. A cada una de estas, se eliminó el 15% de información de precipitación (1489 datos de 9862 de 27 años) y 25% de temperatura máxima y mínima (1489 datos de 5844 de 16 años), para

posteriormente generar los datos faltantes, se utilizaron los registros de las estaciones auxiliares respectivas a cada estación analizada.

En el Cuadro 1, se listan las seis estaciones analizadas y la distancia que existe con sus respectivas estaciones auxiliares.

Cuadro 1. Distancia entre las estaciones analizadas y auxiliares (km).

Estación	Estaciones Auxiliares			
Ocampo, Ocampo, GTO:11050	Pino Suarez, ZAC:	Armadillo de los Infante, SLP:	El Vergel, San Luis de la Paz, GTO:	
Distancia (km)	32127	24004	11161	
	52.34	107.5	87.67	
El Salto, Cd del Maíz, SLP: 24027	Abritas, El Naranjo, SLP:	San Pablo, Tula, TAMPS:	La Boquilla, Ocampo, TAMPS:	
Distancia (km)	24016	28091	28043	
	10.05	48.34	26.33	
Los Pilares, SLP: 24038	Armadillo de los Infante, SLP:	Mexquitic de Carmona, SLP:	El Grito, Moctezuma, SLP:	Espíritu Santo, Pinos, ZAC:
Distancia (km)	24004	24042	24021	32187
	49.64	19.57	24.67	40.86
Papagayos, Cd del Maíz, SLP: 24049	Cd. Del Maíz, SLP:	Abritas, El Naranjo, SLP:	Álvaro Obregón, Cd. Del Maíz, SLP:	
Distancia (km)	24011	24016	24013	
	15.68	13.72	26.17	
Tierranueva, SLP: 24093	Bledos, Villa de Reyes, SLP:	San José Alburquerque, Santa María del Río, SLP:	El Vergel, San Luis de la Paz, GTO:	Xichu, GTO:
Distancia (km)	24163	24067	11161	11083
	59.5	21.56	26.02	64.02
Vanegas, SLP: 24094	San Tiburcio, Mazapil, ZAC:	Las Margaritas, Dr. Arroyo, NL:	San José de Coronado, Real de Catorce, SLP:	
Distancia (km)	32078	19151	24165	
	61.78	68.55	32.58	

2.3. Métodos utilizados en la estimación de datos faltantes

Se emplearon los métodos: Racional Deductivo (RD) propuesto por Campos (1998), el cual se determina a partir de los valores del propio registro. Así mismo, se utilizó el método de la Relación Normalizada (RN) descrito por Aparicio (2007), donde los valores observados en las estaciones auxiliares son ponderados mediante los cocientes de la precipitación media correspondiente. Finalmente, se utilizó el método del Cuadrado del Inverso de la Distancia o U. S. National Weather Service (WS), donde la influencia de la lluvia en una estación para el

cálculo de la misma en cualquier punto, es inversamente proporcional a la distancia entre los dos puntos (Chow *et al.*, 1996). Según Campos (1998), se recomienda utilizar cuatro estaciones auxiliares (las más cercanas) de manera que cada una quede localizada en uno de los cuadrantes que definen unos ejes coordenados que pasan por la estación incompleta, generalmente los ejes norte-sur y oriente-poniente.

2.4. Índices estadísticos para evaluar la estimación del error

Se utilizaron tres índices estadísticos; el índice de Willmott (d) (Willmott, 1981), el error estándar promedio o raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) (Rivas y Carmona, 2010) y el Coeficiente de determinación (r^2) (Cervantes *et al.*, 2013; Kelso *et al.*, 2012; Wright, 2001). Un valor de $RMSE = 0$ y $r^2 = d = 1$, indica un ajuste perfecto. Los resultados son excelentes cuando, $d \geq 0.95$ y $R^2 > 0.80$ (Cai *et al.*, 2007; Ruíz *et al.*, 2012).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2 se resumen los índices estadísticos de los datos estimados de la variable precipitación para cada estación analizada, se muestra que el mejor ajuste es con el método del U. S. National Weather Service (WS), con un RMSE promedio de 38.7 mm. Los valores del índice de Willmott (d) en promedio fueron 0.85, 0.68 y 0.68 para WS, RD y RN respectivamente, lo que indica un mejor ajuste para el primero. Las estaciones 11050, 24027, 24038, 24049 y 24093 muestran un valor de RMSE menor con los métodos WS en comparación a los valores obtenidos con el método RD y RN. Los datos analizados en la estación 24094, según el estadístico RMSE, indica un menor error con el método RD. Los

valores obtenidos con el índice de Willmott indican que el mejor ajuste se obtiene con el método WS. Toro *et al.* (2015), para un estudio realizado en Colombia, reportan valores similares entre los índices estadísticos al analizar la variable precipitación, aunque resaltan un mejor valor del índice de Willmott (d) con el método WS, y lo proponen como el mejor método para el relleno de datos faltantes, situación que se presenta en este estudio, ya que se observa que la mejor estimación es con el método WS, al considerar los dos estadísticos.

Cuadro 2. Resumen de estadísticos del ajuste de los métodos que estiman los registros faltantes de datos de precipitación.

Estación	WS			RD		RN		
	RMSE	d	r ²	RMSE	d	RMSE	d	r ²
Indicadores estadísticos								
Ocampo, Ocampo: 11050	19.5030	0.91661	0.1443	41.6723	0.55618	32.2535	0.86451	0.1655
El Salto, Cd del Maíz: 24027	73.6816	0.91066	0.2162	84.2420	0.86081	80.4767	0.92566	0.3756
Los Pilares, San Luis Potosí :24038	21.0041	0.89017	0.3625	29.5088	0.67184	71.6492	0.58713	0.2709
Papagayos, Cd del Maíz: 24049	61.6655	0.91776	0.2977	97.8645	0.85559	117.6325	0.86907	0.1728
Tierranueva: 24093	28.7280	0.84525	0.3351	42.3895	0.63784	41.6265	0.7282	0.1839
Vanegas : 24094	27.8697	0.61505	0.0296	24.2058	0.48548	78.4526	0.12901	0.0124
Promedio	38.7420	0.84925	0.2309	53.3138	0.67796	70.3485	0.68393	0.1969

Para la variable precipitación se obtuvieron valores del coeficiente de determinación r^2 promedio de: 0.2309, y 0.1969 para el método WS y RN respectivamente.

En la Figura 3, se ilustra la relación entre los valores de precipitación observada y los estimados con los métodos WS y RN en las estaciones climatológicas 24027 Cd del Maíz, 24038 San Luis Potosí y 24049 Papagayos, Cd del Maíz. El método WS presenta en promedio un mejor ajuste de los valores estimados a los valores de precipitación observados.

Teegavarapu y Chandramouli (2005) mencionan que el método WS estima mejor el dato observado, además de que se utiliza en cualquier período de tiempo, es decir, en datos diarios, mensuales y anuales. Hubbard y You (2005); Eischeid *et al.* (2000) y You *et al.* (2008) obtuvieron que el método WS proporciona buenos resultados, lo que concuerda con lo obtenido en este trabajo.

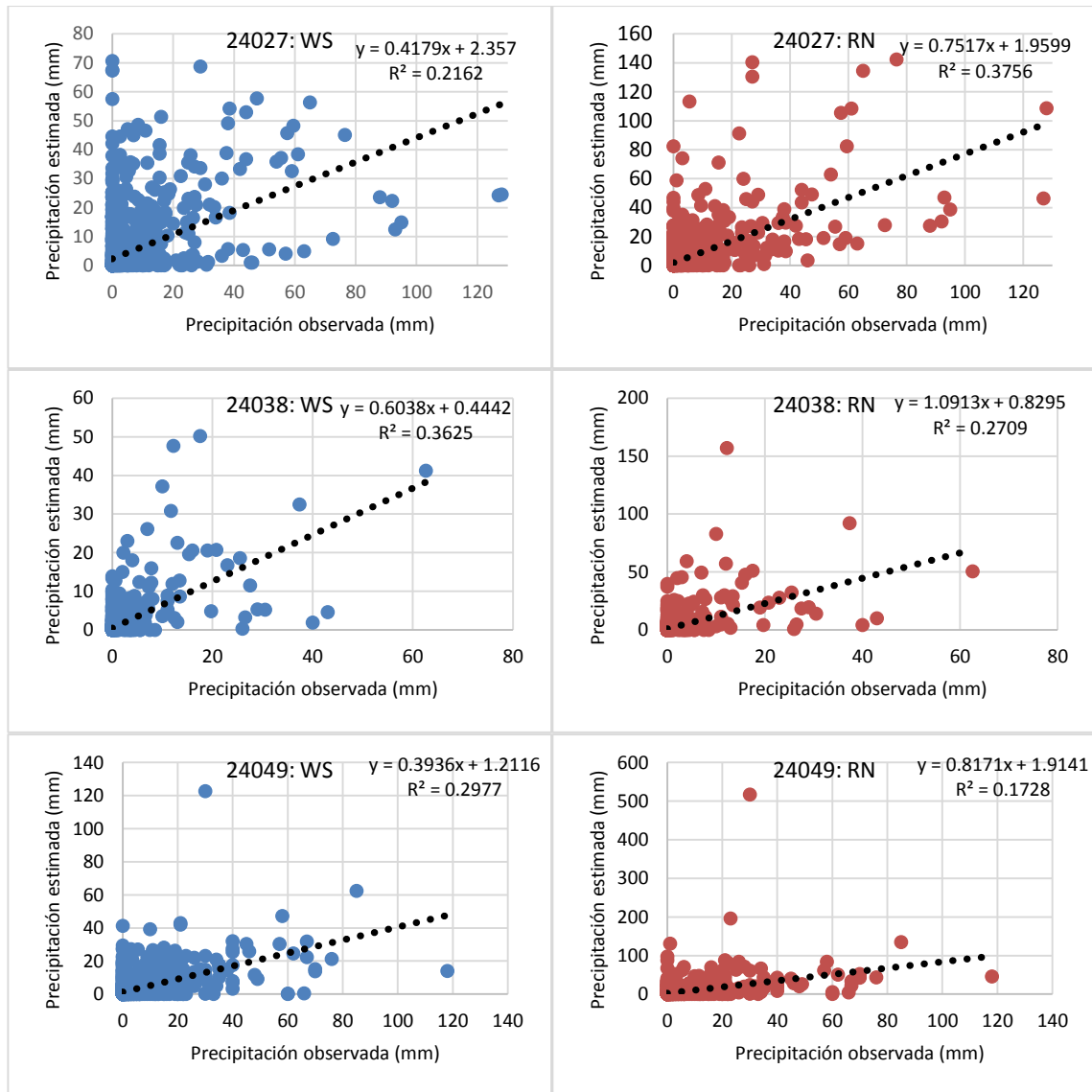


Figura 3. Comparación entre el valor estimado y el valor observado de precipitación.

En la Figura 4 se presenta la relación entre la temperatura máxima observada y la estimada con los métodos WS y RN, ambos métodos tienen un comportamiento similar. La variación es muy poca cuando se habla de temperatura, posiblemente porque la temperatura es una variable más localizada (Toro *et al.*, 2015; You *et al.*, 2008).

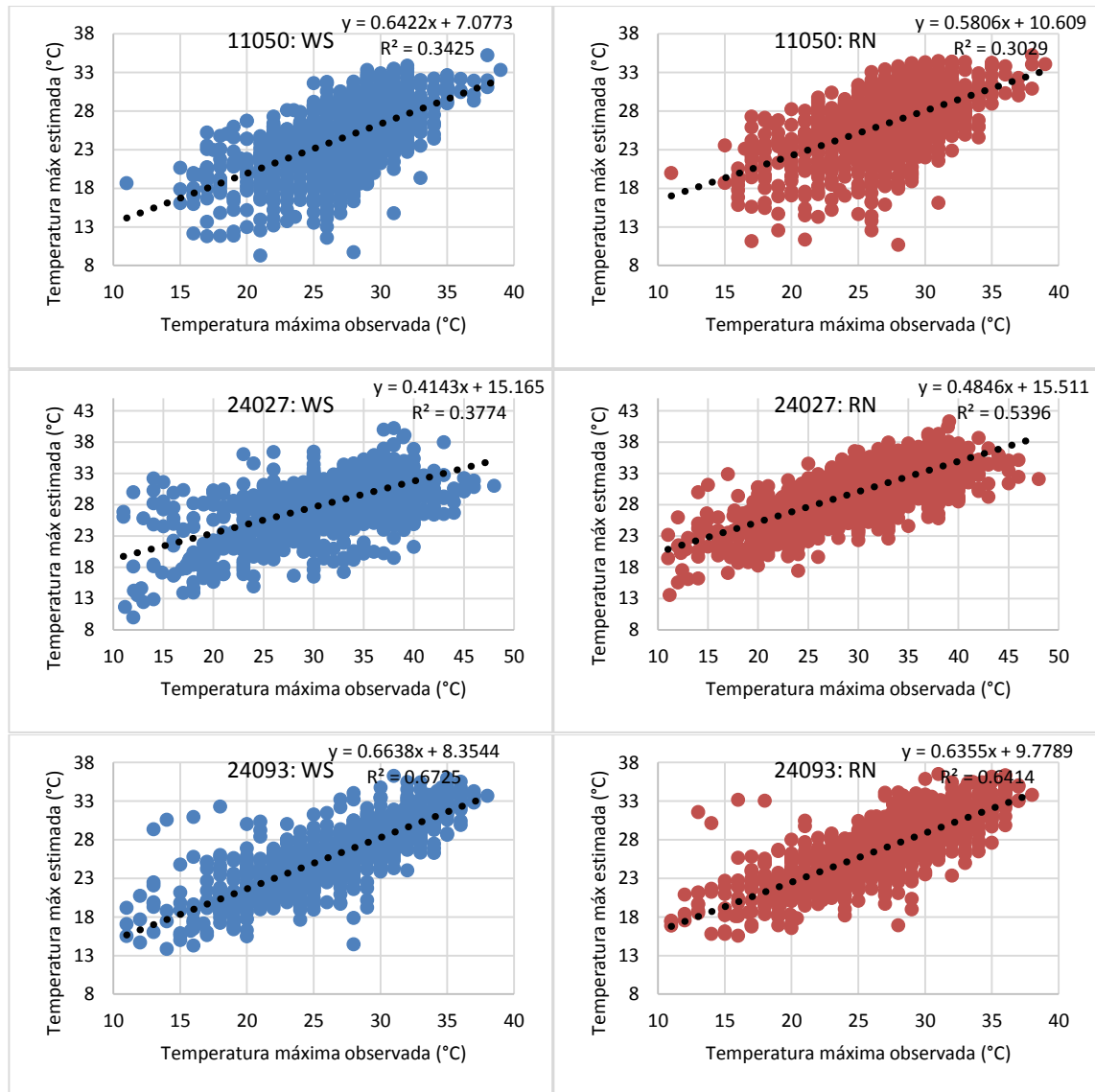


Figura 4. Comparación entre el valor estimado y el valor observado de temperatura máxima.

En el Cuadro 3, se muestran los índices estadísticos calculados para determinar el método que permite estimar los datos faltantes de los registros de temperatura máxima con los tres métodos descritos. Así mismo, se observa que los valores son similares entre sí, aunque los valores de RMSE más grandes se tienen con el método WS, seguido del método RD y los menores se obtuvieron con el método RN. De acuerdo al índice de Willmott el método RN presenta un mejor ajuste dado que se tiene un valor mayor en la mayoría de las estaciones, seguido del método RD y WS respectivamente.

Cuadro 3. Índices estadísticos del ajuste de los métodos que estiman los registros faltantes con datos de temperatura máxima.

Estación	WS			RD		RN		
	RMSE	d	r ²	RMSE	d	RMSE	d	r ²
Indicadores estadísticos								
Ocampo, Ocampo: 11050	3.26435	0.68548	0.3425	3.61988	0.58169	1.76113	0.84275	0.3029
El Salto, Cd del Maíz: 24027	3.74414	0.76888	0.3774	2.69224	0.80303	2.66967	0.87962	0.5396
Los Pilares, San Luis Potosí :24038	3.93813	0.70694	0.4932	2.28151	0.88704	3.24404	0.76867	0.5012
Papagayos, Cd del Maíz: 24049	2.82334	0.75127	0.2506	2.17694	0.84516	1.81617	0.86388	0.2849
Tierranueva: 24093	1.27683	0.93683	0.6725	1.93331	0.88830	1.13335	0.95159	0.6414
Vanegas : 24094	2.90510	0.80103	0.4666	2.19441	0.89074	1.93833	0.89723	0.4626
Promedio	2.99198	0.78000	0.4338	2.14972	0.86599	2.09378	0.86732	0.4554

En las estaciones 11050, 24038, 24049 y 24093 el coeficiente de determinación r^2 es mayor con el método WS y en las otras dos es el método RN. Aunque los r^2 son muy parecidas entre los métodos.

En la Figura 5, se presenta la temperatura mínima estimada con los métodos WS y RN, comparadas con la temperatura mínima observada en las estaciones estudiadas.

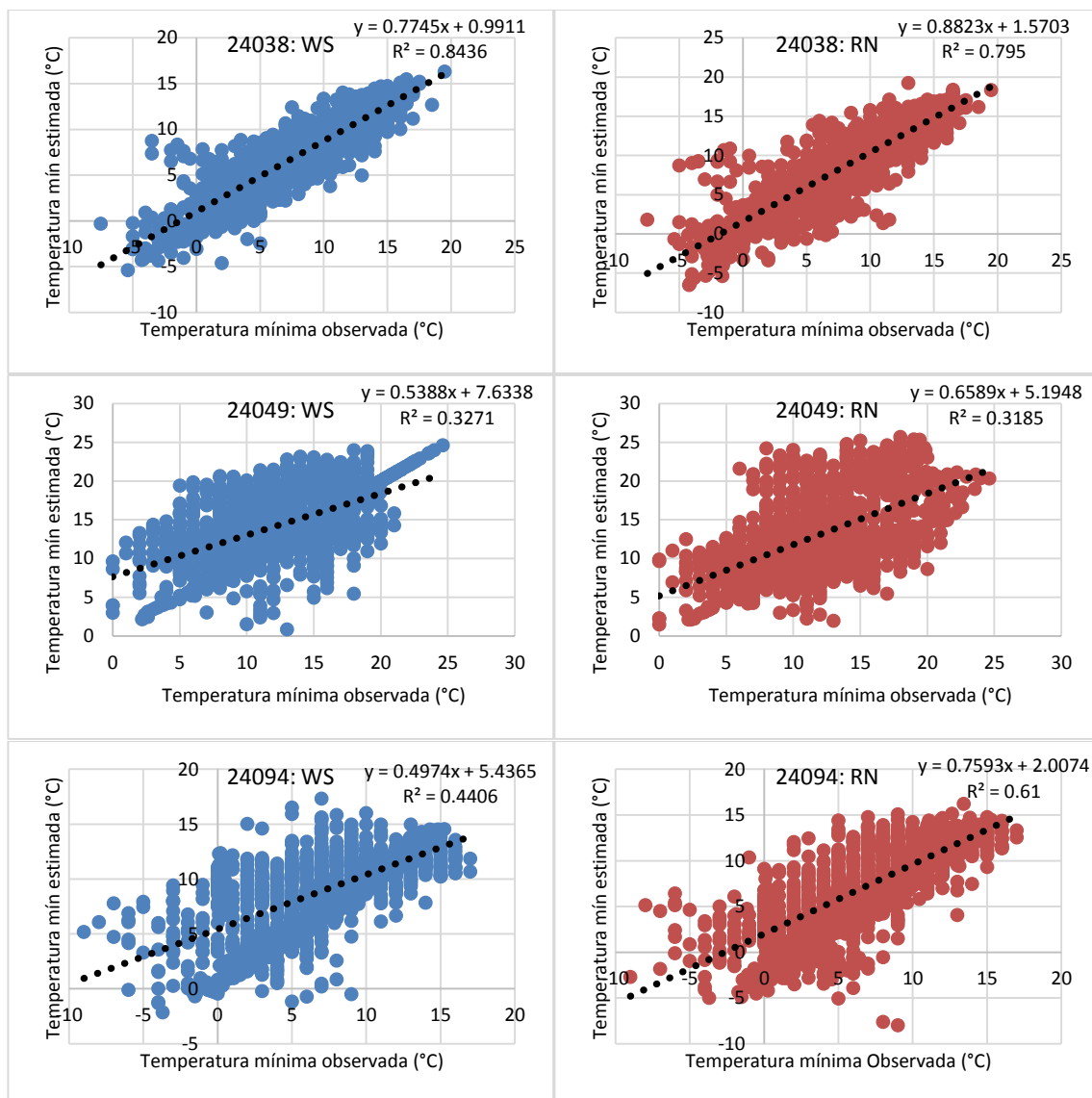


Figura 5. Comparación entre el valor estimado y el valor observado de temperatura mínima.

En el Cuadro 4, se listan los estadísticos que permiten identificar el método que presenta un mejor ajuste a los datos de temperatura mínima. El índice de Willmott es más alto con el método RD en las estaciones 24027, 24049 y 24049, con el método RN en las estaciones 11050 y 24038, y en la estación 24093 con el WS. Así mismo, se identifica que el valor de d varía de manera muy semejante en los

tres métodos. Las estaciones 24027, 24049 y 24094 plasman valores de RMSE menores con el método RD, mientras que las estaciones 24038 y 24093 con el método WS y la estación 11050 con el método RN como se identifica en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Resumen de estadísticos del ajuste de los métodos que estiman los registros faltantes de datos de temperatura mínima.

Estación	WS			RD		RN		
	RMSE	d	R ²	RMSE	d	RMSE	d	R ²
Indicadores estadísticos								
Ocampo, Ocampo: 11050	1.01891	0.97534	0.7940	1.03104	0.96838	0.94410	0.97770	0.7640
El Salto, Cd del Maíz: 24027	3.09699	0.84856	0.4473	1.92065	0.94781	1.97931	0.94441	0.7055
Los Pilares, San Luis Potosí :24038	1.45027	0.96743	0.8436	1.57816	0.96240	1.49391	0.96961	0.7950
Papagayos, Cd del Maíz: 24049	3.70980	0.76117	0.3271	2.66146	0.85428	4.11010	0.75502	0.3185
Tierranueva: 24093	1.26101	0.96914	0.8102	1.83273	0.94188	2.27479	0.92522	0.7106
Vanegas : 24094	3.30739	0.80123	0.4406	1.56936	0.95962	1.82884	0.94698	0.6100
Promedio	2.31789	0.88715	0.6105	1.76557	0.93906	2.10517	0.91982	0.6506

4. CONCLUSIONES

Los métodos utilizados para estimar los datos faltantes de los registros de precipitación, permitieron identificar el método que estima mejor los resultados, de acuerdo a los indicadores estadísticos, es el WS, por lo que, es la mejor alternativa para completar registros de datos faltantes cuando se cuenta con información del mismo período en estaciones auxiliares. Los resultados obtenidos al analizar los datos de temperatura máxima y mínima, indican poca variabilidad de los métodos WS, RN y RD, dado que los datos calculados son similares a los datos observados, por lo tanto, el comportamiento es semejante y los errores son muy semejantes con cualquiera de los métodos. En consecuencia el método U. S. National Weather Service (WS) es la mejor alternativa para completar registros de información de datos faltantes en una serie continua de

datos. Por lo tanto se utilizó el método WS para estimar los datos faltantes en las 108 estaciones climatológicas del estado de San Luis Potosí.

5. LITERATURA CITADA

- Alfaro, R.; Pacheco, R. 2000. Aplicación de algunos métodos de relleno a series anuales de lluvia de diferentes regiones de Costa Rica. *Top. Meteor. Oceanogr.*, 7(1), 1-20.
- Allen, R. G.; Pereira L. S.; Raes D.; Smith M. 2006. *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. N°56 Ed. FAO. Italia, Roma. 323 p.
- Aparicio, M. F. J. 2007. *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa. DF. México. 304 p.
- Cai, J.; Liu, Y.; Lei, T.; Pereira S. L. 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology*. 145(1), 22-35.
- Campos, A. D. F. 1998. *Procesos del ciclo hidrológico* (3ª ed.). Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí. México. 529 p.
- Campos, A. D. F. 2015. Estimación simultanea de datos hidrológicos anuales faltantes en múltiples sitios. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 16(2), 295-306.
- Cervantes, O. R.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A.; Ojeda, B. W.; Quevedo, N. A. 2013. Modelos Hargreaves Priestley-Taylor y redes neuronales artificiales en la estimación de la evapotranspiración de referencia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 16(2), 163-176.
- Chow, V.T; Maidment, D. R. y Mays, L.W. 1996. *Hidrología aplicada*. McGraw Hill. Bogotá. Colombia. 583 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2015. Red de estaciones climatológicas: Estacionesclimatológicas.KML. Servicio Meteorológico Nacional (SMN)-Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México. DF.

- DeGaetano, A. T.; Eggleston, K. L.; Knapp, W. W. 1995. A method to estimate missing daily maximum and minimum temperature observations. *Journal of Applied Meteorology*, 34(2), 371-380.
- Eischeid, J. K.; Pasteris, P. A.; Diaz, H. F.; Plantico, M. S.; Lott, N. J. 2000. Creating a serially complete, national daily time series of temperature and precipitation for the Western United States. *Journal of Applied meteorology*. 39(9), 1580-1591.
- Gutiérrez, L. W.; García, E. M.; Magaña, R. V. O.; Escalante, G. J. A. 2007. Diseño y construcción de un globo meteorológico cautivo instrumentado. *Ingeniería y Ciencia*, 3(5), 29-42.
- Hubbard, K. G.; You, J. 2005. Sensitivity Analysis of Quality Assurance Using the Spatial Regression Approach. A case study of the Maximum/Minimum air temperature. *Journal of Atmospheric and oceanic technology*. 22(10), 1520-1530.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2009. Eric III: Extractor rápido de información climatológica (versión 2.0. Disco). Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-IMTA. Jiutepec, Morelos, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2007. Regiones agropecuarias de San Luis Potosí. 69 p.
- Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal (INAFED). 2010. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México; San Luis Potosí.
- Kelso, B. H. A.; Bâ, K. M.; Sánchez, M. S.; Reyes, L. D. 2012. Calibración del exponente de la ecuación Hargreaves-ET_o en los estados de Chiapas, Oaxaca, Puebla y Veracruz, México. *Agrociencia*. 46(3), 221-229.
- McCuen, R. H. 1998. *Hydrologic Analysis and Design*. Second Edition. Department of Civil Engineering University of Maryland. Ed. Pearson Prentice-Hall. New Jersey. USA. 833 p.
- Nájera, M. N. L.; Arteaga, R. R. 1998. *Antología Agroclimatología*. Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria (DGETA). México. 230 p.

- Organización Meteorológica Mundial (OMM). 2011. Guía de prácticas climatológicas. No100. Ginebra, Suiza. 128 p.
- Puertas, O. O. L.; Carvajal, E. Y.; Quintero, A. M. 2011. Estudio de tendencias de precipitación mensual en la cuenca alta-media del río cauca, Colombia. *Dyna*, 78(169), 112-120.
- Ramírez, C. H.; López, V. O.; Ibáñez, C. L. A. 2015. Estimación mensual de intensidad de la lluvia en 30 minutos a partir de datos pluviométricos. *Terra Latinoamericana* 33(2), 151-159.
- Rivas, R.; Carmona, F. 2010. La ecuación de Priestley-Taylor aplicada a nivel de píxel: una alternativa para estudios detallados de cuencas. *Boletín Geológico y Minero*. 121(4), 401-412.
- Ruíz, O. A.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A.; Ontiveros, C.R. E.; López, L. R. 2012. Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia, trópico húmedo*, 28(1), 1-14.
- Teegavarapu, R. S.; Chandramouli, V. 2005. Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *J. Hydrol.* 312(1-4), 191-206.
- Toro, T. A. M.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A.; Ibáñez, C. L. A. 2015. Relleno de series de Precipitación, Temperatura mínima, máxima de la región norte del Urabá Antioqueño. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(2), 577-588.
- Wagner, D. P.; Fiener, P.; Wilken, F.; Kumar, S.; Schneider, K. 2012. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. *J. Hydrol.* 464-465, 388-400.
- Willmott, C. J. 1981. On the validation of models. *Physical geography*. 2(2), 184-194
- Wright, J. 2001. Correlaciones de la fracción difusa. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 8(1), 15-18.
- You, J. S.; Hubbard, K. G.; Goddard, S. 2008. Comparison of methods for spatially estimating station temperatures in a quality control system. *Int. J. Climatol.* 28(6), 777-787.

CAPÍTULO 3

ESTACIÓN O PERÍODO DE CRECIMIENTO, SU VARIABILIDAD EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ

Jesús Gallegos Cedillo¹, Ramón Arteaga Ramírez¹, Mario Alberto Vázquez

Peña¹, Juan Juárez Méndez²

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. ²Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco.

C.P. 56230. Chapingo, México. Email: gallegosjc_1@hotmail.com

RESUMEN

Definir la época del año donde las condiciones de humedad y temperaturas son ideales para la producción de cultivos, es uno de los principales problemas de la agricultura de temporal. Por lo tanto, el objetivo fue determinar la variabilidad de la estación de crecimiento en el estado de San Luis Potosí, al identificar las fechas de inicio y fin de la temporada de lluvia, así como su duración. El inicio de la estación de crecimiento (IEC) se definió con el criterio: la primera ocasión en que se presenten más de 20 mm de precipitación en un período de 1 o 2 días consecutivos después del: 01 de Enero, 01 de marzo, 01 de Abril, 01 de mayo o 01 de junio, sin un período de sequía de 9 días o más dentro de los siguientes 30 días consecutivos. Para el fin de la estación de crecimiento (FEC): la primera ocasión después del 01 de agosto y 01 de septiembre, donde la humedad en el

suelo se reduce a cero. La duración de la estación de crecimiento (DEC) se obtuvo de la diferencia FEC-IEC. Con la distribución normal se determinaron las probabilidades al 20, 40, 60 y 80% del IEC, FEC y DEC. Se definieron modelos de regresión lineal y cuadrática para estimar la DEC. Se generaron mapas que permiten identificar la distribución temporal y espacial, donde las condiciones de humedad y temperatura son o no favorables para el crecimiento y desarrollo de cualquier cultivo en el estado de San Luis Potosí.

Palabras Clave: Estación de crecimiento, Agricultura de temporal, Instat, Temporada de lluvia

ABSTRACT

Define the time of year where the humidity and temperature are ideal for crop production, it is one of the main problems of rainfed agriculture. Therefore, the objective was to determine the variability of the growing season in the state of San Luis Potosi, to identify the start and end dates of the rainy season and the duration. The start of the growing season (IEC) was defined criteria: the first time they are submitted more than 20 mm of precipitation over a period of 1 or 2 consecutive days after the 01 January, 01 March, 01 April, 01 May and 1 June, without a drought 9 days or more within 30 consecutive days. By the end of the growing season (FEC): the first time after 1 August and 1 September, where the soil humidity is reduced to zero. The duration of the growing season (DEC) was obtained from the difference FEC-IEC. Normal distribution with probabilities of 20, 40, 60 and 80% of IEC, FEC and DEC were determined. Models of linear and quadratic regression to estimate the DEC were defined. Maps that identify the

temporal and spatial distribution, where the humidity and temperature are favorable or not for the growth and development of any crop in the state of San Luis Potosi were generated.

Keywords: Growing season, Rainfed agriculture, Instat, Rainy season

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura representa una actividad esencial para el desarrollo del país y la seguridad alimentaria, por ello, es de interés nacional caracterizar su riesgo frente a la variabilidad climática con el propósito de contar con instrumentos cuantitativos de apoyo para definir políticas públicas que identifiquen las regiones agrícolas de alta vulnerabilidad climática (Íñiguez *et al.*, 2014). El 85% de la superficie agrícola del país es de temporal, por lo que el único recurso hídrico disponible es el agua que la precipitación proporciona, y determina que el factor que limita la producción agrícola es éste. Algunos de los problemas que tienen los planeadores agrícolas y los agricultores de las áreas de temporal son: definir la época con menor riesgo para la siembra, determinar la duración de la temporada de lluvias que permita a los cultivos concluir su ciclo satisfactoriamente y que las bajas temperaturas no sean una limitante. El inicio de la estación de crecimiento se relaciona con el inicio de la temporada de lluvias (primeras lluvias), que determinan la época de siembra (Arteaga *et al.*, 2006). Para Sivakumar (1988), el inicio de las lluvias es después del primero de mayo, cuando durante tres días consecutivos se acumulen por lo menos 20 mm de lluvia y en los treinta días siguientes no se presenten períodos secos de más de siete

días. El final de la temporada de crecimiento se puede definir como la primera vez, después de una fecha determinada, donde la humedad en el suelo se reduce a cero (Stern *et al.*, 2006). La duración del período de crecimiento se define como el tiempo donde las temperaturas permiten un crecimiento del cultivo ($T_{med} \geq 5^{\circ}\text{C}$) y la precipitación más la humedad almacenada en el perfil del suelo superan la mitad de la evapotranspiración potencial (FAO, 1997). Por lo tanto, la estación de crecimiento es la época del año donde las características de distribución de la precipitación son adecuadas para la germinación, establecimiento y desarrollo pleno del cultivo (Odekunle, 2004). Con respecto a la estación de crecimiento, se han realizado numerosos trabajos; sin embargo, cada investigador considera su propio criterio para definir el inicio, fin y duración (Ruíz *et al.*, 2012). En ese sentido, Aviad *et al.* (2004) comentan que el criterio que se emplee dependerá de la orientación y el propósito de la investigación.

El objetivo fue determinar la variabilidad de la estación de crecimiento en el estado de San Luis Potosí, con el análisis de información meteorológica, identificando las fechas de inicio y fin de la temporada de lluvia, así como su duración al 20, 40, 60 y 80 por ciento de probabilidad. Así mismo, definir un modelo matemático (empírico-estadístico) para estimar la duración y la precipitación total durante la estación de crecimiento.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Localización del área de estudio

El estado de San Luis Potosí está situado en la altiplanicie central mexicana (Figura 1); localizado entre los paralelos 21°10' y 24° 32' de latitud norte y entre los 98°20' y 102°18' de longitud oeste. Colinda al norte y noreste con los estados de Nuevo León y Tamaulipas, al sur con los estados de Guanajuato y Querétaro, al sureste con el estado de Hidalgo, al este con los estados Tamaulipas y Veracruz, al oeste y noroeste con Zacatecas, con respecto al estado de Coahuila solamente toca un punto "La mojonera de Peñuelo" que es común de los estados de Zacatecas, San Luis Potosí y Nuevo León, y al suroeste colinda con el estado de Jalisco (INEGI, 2007).

2.2. Registros de información climatológica

Se analizaron 27 años de registros diarios de precipitación del período 1984-2010, 16 años de datos de evapotranspiración de referencia del período 1995-2010, determinada con el método alternativo de Hargreaves (Allen *et al.*, 2006), al considerar datos de temperatura máxima y mínima. Se seleccionaron 81 estaciones climatológicas del estado de San Luis Potosí y 27 pertenecientes a estados vecinos.

Debido a la gran cantidad de información procesada en la investigación, se hace mención a cuatro estaciones climatológicas, una por cada zona geográfica, con la finalidad de ilustrar de mejor manera los resultados del estudio. Las estaciones mencionadas son: Armadillo de los Infante (24004, Centro), Laguna Seca,

Charcas (24145, Altiplano), Las tablas, Ciudad del Maíz (24195, Media) y Ciudad Valles (24065, Huasteca) (Figura 1).

En la Figura 1 se muestran las 108 estaciones climatológicas que abarcan la zona de estudio.

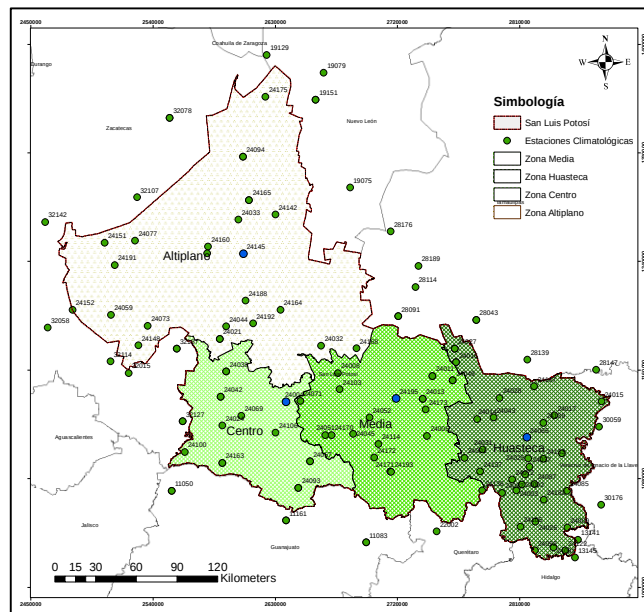


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio y de la red de estaciones climatológicas.

2.3. Información edafológica

La capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (CAAS) se determinó a partir del diagrama de cálculo de la fracción volumétrica de agua aprovechable (Figura 2) y el paquete comercial “Perfiles de suelo v.1.2”, (INEGI, 2007). Se analizaron 974 perfiles con información de textura y profundidad de suelo. Finalmente se obtuvo el área de influencia y el valor del CAAS ponderado, con el método de polígonos de Thiessen.

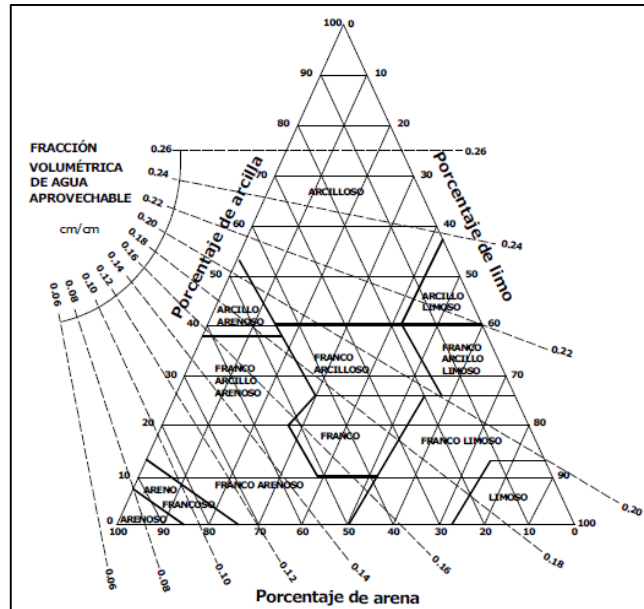


Figura 2. Diagrama para el cálculo de la fracción volumétrica de agua aprovechable (Norero, 1976, citado por Arteaga y Vázquez, 2001).

2.4. Software Instat v. 3.37

Es un conjunto de programas estadísticos para propósito general que cuenta con herramientas específicas para simplificar el análisis de registros climáticos; generado por la universidad de Reading, Inglaterra, y empleado en numerosos trabajos de climatología agrícola (Raes *et al.*, 2004; Stern *et al.*, 2006).

2.5. Determinación del inicio de la estación de crecimiento (IEC)

El programa Instat permite obtener el inicio de la época de siembra, con diversos criterios de acuerdo a variables como la evaporación, precipitación, número mínimo de días con lluvia y/o al considerar no tener un período de días secos inmediatamente posterior al inicio de la EC (Raes *et al.*, 2004; Stern *et al.*, 2006).

El criterio para definir el inicio de la EC fue:

- La primera ocasión en la que se presentan más de 20 mm de precipitación en un período de 1 o 2 días consecutivos después del 01 de Enero, 01 de marzo, 01 de Abril, 01 de mayo o 01 de junio. Sin un período de sequía de 9 días o más dentro de los siguientes 30 días consecutivos.

2.6. Determinación del fin de la estación de crecimiento (FEC)

El programa Instat ofrece dos opciones para definir el fin de la EC, la primera es la opción “Simple”, donde el programa genera una tabla de resumen del balance hídrico de los datos, la segunda es la opción “First”, donde el programa define el fin de la EC a partir de una fecha dada, para ambos casos se requiere información de precipitación, evapotranspiración y capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. Para definir el fin de la EC, se realizó el balance hídrico, con la opción “**First**”, se propuso como fecha posible de corte el día 214 (1 de agosto) y el día 245 (1 de Septiembre). El criterio utilizado se describe como:

- La primera ocasión después del 01 de agosto o 01 de septiembre, donde la humedad en el suelo es igual o menor a cero.

2.7. Determinación de la duración de la estación de crecimiento (DEC)

La duración de la EC, depende de una definición adecuada del inicio de la temporada. Así como, de la definición correcta del fin de la EC con el balance de agua simple (Stern *et al.*, 2006), la duración de la EC, se obtiene de la diferencia entre el inicio y el fin de la EC.

Se empleó el método descrito por Stern *et al.* (2006), y el modelo generado por Pájaro (1984) (Ecuación 1), como lo menciona (Ortiz, 1987).

$$DEC = 0.2408(PT) - 0.0000372(PT)^2 - 33.1019 \dots \dots (1)$$

DEC = Duración del período de crecimiento (días), y PT = Precipitación total anual (mm).

A partir de la expresión anterior, se tiene que:

PT > 3250 mm entonces DEC = 365 días y si PT < 150 mm entonces DEC = 0

2.8. Modelos para la estimación de la duración de la EC

Se realizaron los diagramas de dispersión al relacionar la duración de la estación de crecimiento con las variables precipitación total durante la estación de crecimiento (PTDEC), Precipitación total anual (PTA), Inicio y Fin de la estación de crecimiento con los niveles de probabilidad del 20, 40, 60 y 80%. Se definieron los modelos matemáticos al observar la tendencia de los datos analizados y al aplicar técnicas de regresión lineal y cuadrática o polinómica de segundo grado.

2.9. Análisis probabilístico de las componentes del período de crecimiento

Se obtuvo las probabilidades de las variables inicio (IEC), fin (FEC) y duración de la estación de crecimiento (DEC), con la distribución de probabilidad normal estándar (Infante y Zárate de Lara, 2001). Se estandarizó los datos obtenidos de cada variable con la siguiente ecuación:

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \dots \dots \dots (2)$$

X_i = IEC, FEC o DEC, $\bar{X}$ = media, S = desviación estándar y Z_i = variable estandarizada.

Se obtuvo el valor de la probabilidad $F(Z_i)$, que se afecta por la probabilidad relativa de ocurrencia de la variable analizada, denotado por Co , obtenido del cociente del número de años con valor (Inicio, Fin o Duración) de la EC (Mo) y el

número de años de registro (No), para considerar aquellos años en los que no se define la EC:

$$Co = \frac{Mo}{No} \dots \dots \dots (3)$$

Posteriormente la probabilidad de la componente de la EC, se obtiene con la expresión (4). Finalmente se obtienen los niveles de probabilidad de excedencia al 20, 40, 60, 80%.

$$F(X) = Co * F(Zi) \dots \dots \dots (4)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Inicio de la estación de crecimiento (IEC)

Por la variedad climática, orográfica y geográfica que presenta el estado de San Luis Potosí, se analizaron 5 fechas para definir el inicio de la temporada de lluvias.

En el Cuadro 1, se muestra el inicio de la estación de crecimiento obtenidos a partir de las fechas propuestas en la estación climatológica 24004, Armadillo de los Infante, San Luis Potosí, con 27 años de registro. Así mismo, se distingue la columna del inicio seleccionado para realizar el análisis probabilístico.

Cuadro 1. Inicio de la EC (día juliano), estación 24004.

Año	Enero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	IEC
1984	*	135	135	135	192	135
1985	170	170	170	170	170	170
1986	114	114	114	156	156	156
1987	130	130	130	130	182	130
1988	184	184	184	184	184	184
1989	117	117	117	0	0	117
1990	220	220	220	220	220	220
1991	163	163	163	163	163	163
1992	10	136	136	136	187	136
1993	162	162	162	162	162	162
1994	139	139	139	139	246	139

1995	220	220	220	220	220	220
1996	262	262	262	262	262	262
1997	79	79	177	177	177	177
1998	197	197	197	197	197	197
1999	185	185	185	185	185	185
2000	256	256	256	256	256	256
2001	144	144	144	144	153	144
2002	129	129	129	129	157	129
2003	147	147	147	147	158	147
2004	156	156	156	156	156	156
2005	187	187	187	187	187	187
2006	114	114	114	206	206	206
2007	167	167	167	167	167	167
2008	187	187	187	187	187	187
2009	244	244	244	244	244	244
2010	184	184	184	184	184	184

Durante la obtención del inicio de la estación de crecimiento se observan dos particularidades:

- Cuando al analizar se suman 20 mm como condición dada, pero no cumple con las demás condiciones, es decir, hay más de nueve días secos en los siguientes 30 días consecutivos, Instat vuelve a analizar y si no encuentra dichas condiciones en los días posteriores, coloca un valor de cero al año correspondiente.
- Cuando el año es demasiado seco y no cumple con la suma de los 20 mm de lluvia en dos días consecutivos, Instat coloca un asterisco al año correspondiente.

Cuando se identificaron estas dos particularidades, se verificó con el balance hídrico simple si en realidad no se presentó inicio de estación de crecimiento, con la finalidad de tener mayor precisión en los valores obtenidos.

3.2. Fin de la estación de crecimiento (FEC)

Se propusieron dos fechas (Agosto y Septiembre) a partir de las cuales se define el fin de la estación de crecimiento. En el Cuadro 2, se identifica la fecha seleccionada, así como las fechas obtenidas para el análisis probabilístico.

Cuadro 2. Fin de la EC (día juliano) en la estación 24004.

Año	Agosto	Septiembre	FEC	Año	Agosto	Septiembre	FEC
1984	214	245	245	1998	214	245	245
1985	252	252	252	1999	220	245	245
1986	214	245	245	2000	214	245	312
1987	225	245	245	2001	214	280	280
1988	215	267	267	2002	244	245	245
1989	227	250	250	2003	223	296	296
1990	214	266	266	2004	223	245	245
1991	300	300	300	2005	214	300	300
1992	217	245	245	2006	228	276	276
1993	227	245	245	2007	234	289	289
1994	214	253	253	2008	224	296	296
1995	214	285	285	2009	214	252	252
1996	214	327	327	2010	220	246	246
1997	214	246	246				

3.3. Duración de la estación de crecimiento (DEC)

Se obtuvo de la diferencia de las fechas de inicio y fin de la EC, expresadas en días julianos, obtenidas de los procedimientos realizados con el programa Instat. En el Cuadro 3, se muestra la duración en días para cada uno de los 27 años.

Cuadro 3. Duración de la EC (días), estación 24004.

Año	DEC	Año	DEC
1984	110	1998	48
1985	82	1999	60
1986	89	2000	56
1987	115	2001	136
1988	83	2002	116
1989	133	2003	149
1990	46	2004	89
1991	137	2005	113
1992	109	2006	70
1993	83	2007	122
1994	114	2008	109
1995	65	2009	8
1996	65	2010	62
1997	69		

3.4. Tratamiento probabilístico de las componentes de la EC

Se calculó el 20, 40, 60 y 80% de probabilidad para las variables inicio, fin y duración, con la distribución normal estándar, las estadísticas básicas calculadas son la media y la desviación estándar (DE). Se obtuvo para cada año y estación climatológica analizada. En el Cuadro 4, se observa la probabilidad para cada variable y los 27 datos analizados. La probabilidad relativa de ocurrencia Co , es uno en los tres casos.

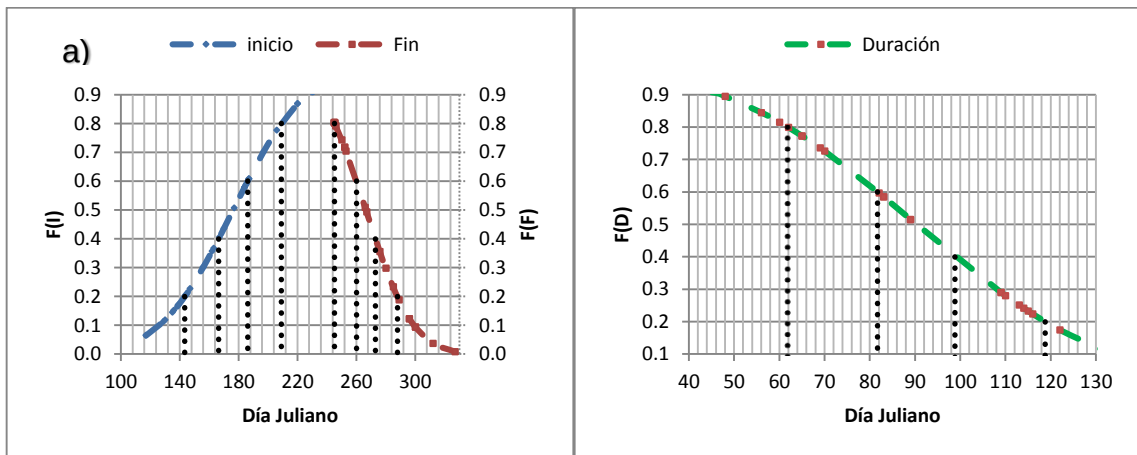
Cuadro 4. Probabilidad de las componentes de la EC, estación 24004.

INICIO					FIN					DURACIÓN				
K_i	X_i	Z_i	$F(Z_i)$	$F(Z_i)Co$	K_F	X_F	Z_F	$F(Z_F)Co$	$1-F(X)$	K_D	X_D	Z_D	$F(Z_D)$	$1-F(X)$
1	117	-1.518	0.065	0.065	1	245	-0.852	0.197	0.803	1	8	-2.434	0.007	0.993
2	129	-1.211	0.113	0.113	2	245	-0.852	0.197	0.803	2	46	-1.310	0.095	0.905
3	130	-1.185	0.118	0.118	3	245	-0.852	0.197	0.803	3	48	-1.251	0.106	0.894
4	135	-1.057	0.145	0.145	4	245	-0.852	0.197	0.803	4	56	-1.014	0.155	0.845
5	136	-1.031	0.151	0.151	5	245	-0.852	0.197	0.803	5	60	-0.896	0.185	0.815
6	139	-0.955	0.170	0.170	6	245	-0.852	0.197	0.803	6	62	-0.837	0.201	0.799
7	144	-0.827	0.204	0.204	7	245	-0.852	0.197	0.803	7	65	-0.748	0.227	0.773
8	147	-0.750	0.227	0.227	8	245	-0.852	0.197	0.803	8	65	-0.748	0.227	0.773
9	156	-0.520	0.302	0.302	9	245	-0.852	0.197	0.803	9	69	-0.630	0.264	0.736
10	156	-0.520	0.302	0.302	10	246	-0.812	0.208	0.792	10	70	-0.600	0.274	0.726
11	162	-0.366	0.357	0.357	11	246	-0.812	0.208	0.792	11	82	-0.245	0.403	0.597
12	163	-0.340	0.367	0.367	12	250	-0.654	0.256	0.744	12	83	-0.216	0.415	0.585
13	167	-0.238	0.406	0.406	13	252	-0.576	0.283	0.717	13	83	-0.216	0.415	0.585
14	170	-0.161	0.436	0.436	14	252	-0.576	0.283	0.717	14	89	-0.038	0.485	0.515
15	177	0.018	0.507	0.507	15	253	-0.536	0.296	0.704	15	89	-0.038	0.485	0.515
16	184	0.197	0.578	0.578	16	266	-0.023	0.491	0.509	16	109	0.553	0.710	0.290
17	184	0.197	0.578	0.578	17	267	0.016	0.506	0.494	17	109	0.553	0.710	0.290
18	185	0.223	0.588	0.588	18	276	0.371	0.645	0.355	18	110	0.583	0.720	0.280
19	187	0.274	0.608	0.608	19	280	0.529	0.702	0.298	19	113	0.671	0.749	0.251
20	187	0.274	0.608	0.608	20	285	0.726	0.766	0.234	20	114	0.701	0.758	0.242
21	197	0.530	0.702	0.702	21	289	0.884	0.812	0.188	21	115	0.731	0.767	0.233
22	206	0.760	0.776	0.776	22	296	1.160	0.877	0.123	22	116	0.760	0.776	0.224
23	220	1.119	0.868	0.868	23	296	1.160	0.877	0.123	23	122	0.938	0.826	0.174
24	220	1.119	0.868	0.868	24	300	1.318	0.906	0.094	24	133	1.263	0.897	0.103
25	244	1.733	0.958	0.958	25	300	1.318	0.906	0.094	25	136	1.352	0.912	0.088
26	256	2.040	0.979	0.979	26	312	1.791	0.963	0.037	26	137	1.381	0.916	0.084
27	262	2.194	0.986	0.986	27	327	2.383	0.991	0.008	27	149	1.736	0.959	0.041
Media =		176.30	Mo =	27	Media =		266.59	Mo =	27	Media =		90.30	Mo =	27
DE =		39.07	No =	27	DE =		25.35	No =	27	DE =		33.81	No =	27

En las Figuras 3 y 4 se ilustra el día juliano en que se presenta el inicio, fin y duración de la estación de crecimiento para los niveles de 80, 60, 40 y 20% probabilidad en las estaciones: Armadillo de los Infante (24004), Laguna Seca, Charcas (24145), Las tablas, Ciudad del Maíz (24195) y San Felipe, Ciudad Valles (24065).

En la Figura 3a), se identifica para la estación 24004, el inicio de la EC al 80% el día 209 (27 de julio), la fecha 186 (4 de julio) al 60%, el día 166 (14 de junio) al 40% y día 143 (22 de mayo) al 20% de probabilidad. También se muestra el fin de la estación de crecimiento al 80% el día 245 (01 de septiembre), el día 260 (16 de septiembre) al 60%, la fecha 273 (29 de septiembre) al 40% y al 20% el día 288 (13 de octubre). Finalmente la duración de la estación de crecimiento al 80, 60, 40 y 20% de probabilidad es de: 62, 82, 99, 119 días respectivamente.

En la Figura 3b) se muestra el inicio de la estación de crecimiento al 80, 60, 40 y 20% de probabilidad los días 217 (04 de agosto), 190 (08 de julio), 166 (14 de junio) y 136 (15 de mayo) respectivamente. Así mismo, se identifica el fin del período de crecimiento los días 233 (20 de agosto), 249 (05 de septiembre), 258 (14 de septiembre), 269 (25 de septiembre) para los niveles de probabilidad del 80, 60, 40 y 20%. La duración de la EC al 80% de probabilidad es de 30 días, 58 al 60%, 82 al 40% y 108 días al 20% de probabilidad.



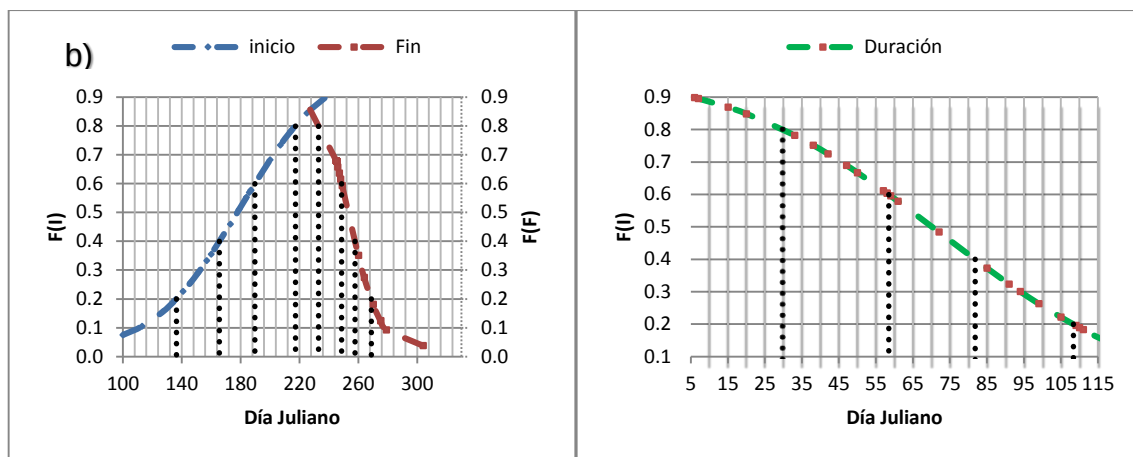
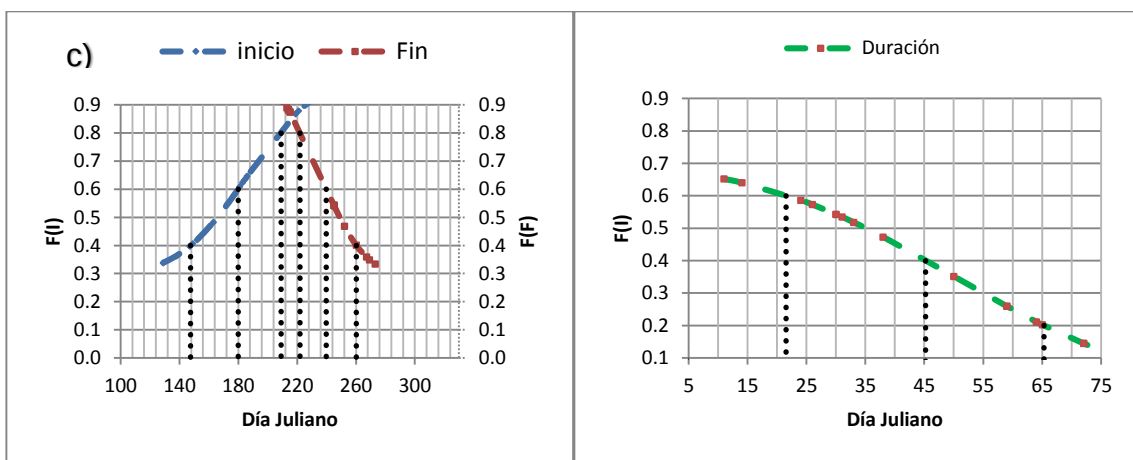


Figura 3. Niveles de probabilidad para las componentes de la EC, estación 24004 (a) y 24145 (b).

En la Figura 4c), la duración de la EC al 60, 40 y 20% de probabilidad es de 22, 45 y 65 días respectivamente. Los datos analizados probabilísticamente no muestran resultados al 80% de probabilidad. El inicio al 80%, se presenta el día 209 (27 de julio), el día 180 (28 de junio) al 60% y el día 148 (27 de mayo) al 40%. El fin de la EC al 80,60 y 40% de probabilidad son los días 222 (9 de agosto), 240 (27 de agosto) y 260 (16 de septiembre) respectivamente. Los valores analizados de inicio y fin de la EC no mostraron fechas de inicio o fin de la EC al 20% de probabilidad.



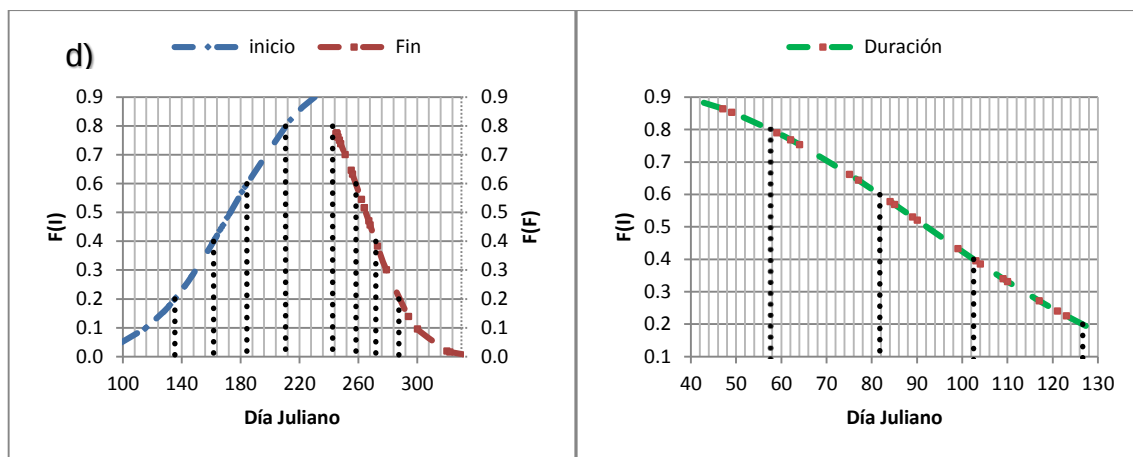


Figura 4. Niveles de probabilidad para las componentes de la EC, estación 24195 (c) y 24065 (d).

En la Figura 4d, el fin de la EC se presenta al 80, 60, 40 y 20%, los días 243 (30 de agosto), 258 (14 de septiembre), 272 (28 de septiembre) y 288 (14 de octubre) respectivamente. La fecha del inicio de la EC al 80% de probabilidad se presenta el día 211 (29 de julio), al 60% el día 184 (2 de julio), al 40% el día 162 (10 de junio) y al 20% el día 135 (14 de mayo). La duración determinada fue de 58, 82, 103 y 127 días, para las probabilidades del 80, 60, 40 y 20%.

De la misma manera, se calculó el 20, 40, 60 y 80% de probabilidad de la precipitación total anual (PTA) en las 108 estaciones climatológicas consideradas en el estudio.

En la Figura 5 se muestra la distribución de la precipitación total anual con los diferentes niveles de probabilidad. La PTA al 80% de probabilidad, varía de 198 a 635 mm en la mayor parte del estado, abarcando las regiones altiplano, centro y media. En la región huasteca que corresponde al sur del estado, las lluvias son

más elevadas con valores que van desde 965 hasta 1950 mm anuales. Aunque en esta región también hay zonas donde la lluvia varía de 370 a 635 mm.

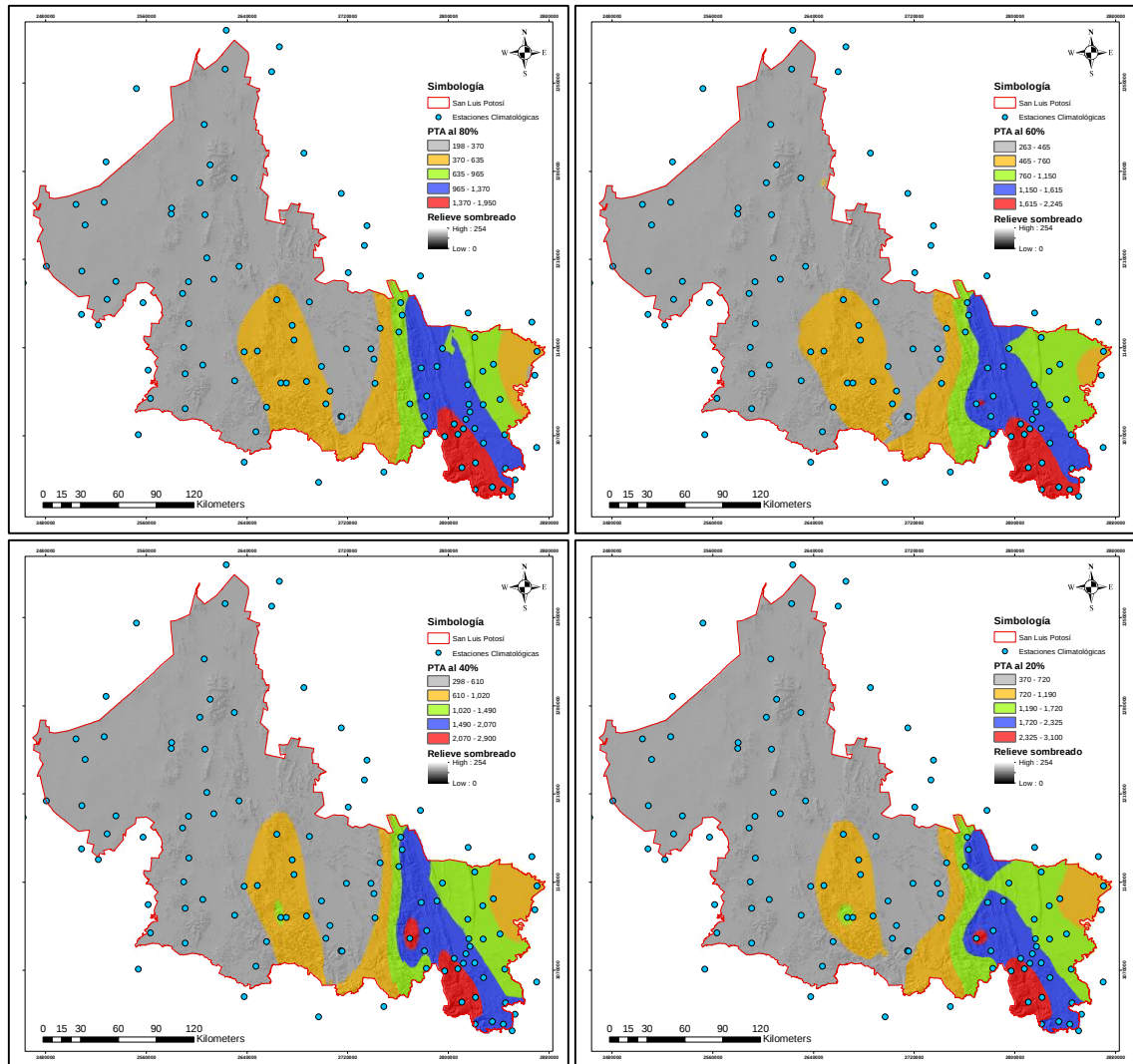


Figura 5. Precipitación total anual al 20, 40, 60 y 80% de probabilidad.

3.5. Representación espacial de las componentes de la EC

En la Figura 6, se muestra el inicio de la EC en los meses de junio, julio y agosto en la mayor parte del estado. Las fechas más tempranas se presentan en algunas áreas de la zona huasteca a partir de mayo, al 80% de probabilidad. Al 60% el

inicio de la EC se define a finales de junio y julio. Mientras que al 40% se tiene en los meses de marzo a junio. Finalmente al 20% de probabilidad, el inicio más temprano se presenta en el mes de febrero y marzo, hacia el sur del estado.

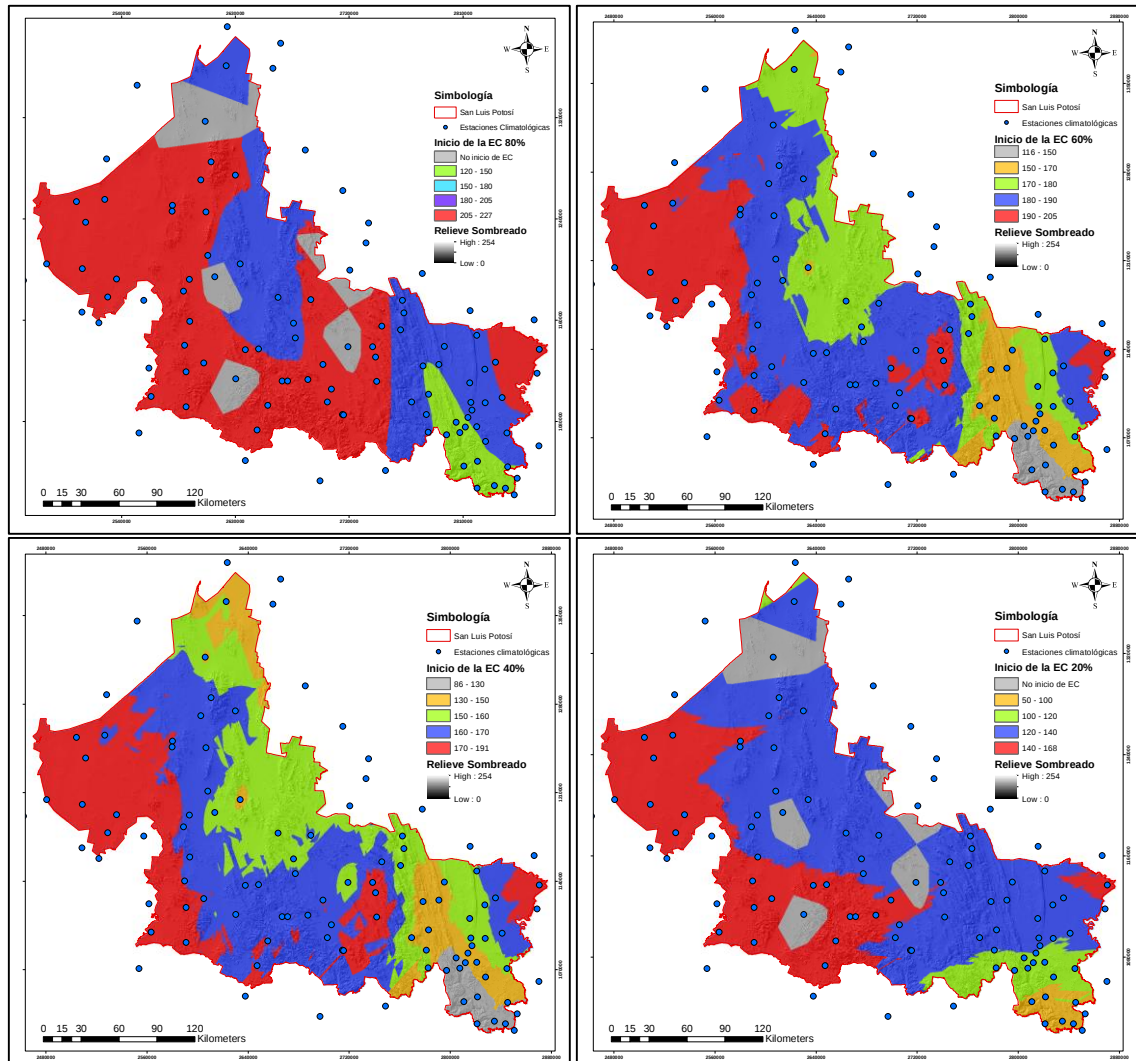


Figura 6. Inicio de la EC con 20, 40,60 y 80% de probabilidad.

En la Figura 7, la distribución espacial del fin de la EC se da en los meses de agosto y septiembre en la región centro, media y altiplano. Mientras que en la huasteca se presenta en los meses de octubre y noviembre, al 80% de probabilidad. Se identifica al 60% el fin de la EC en el mes de septiembre en la

mayor parte del estado. Al 40 y 20% de probabilidad, las fechas de corte más tardías se definen en la zona sur del estado, en los meses de noviembre y diciembre.

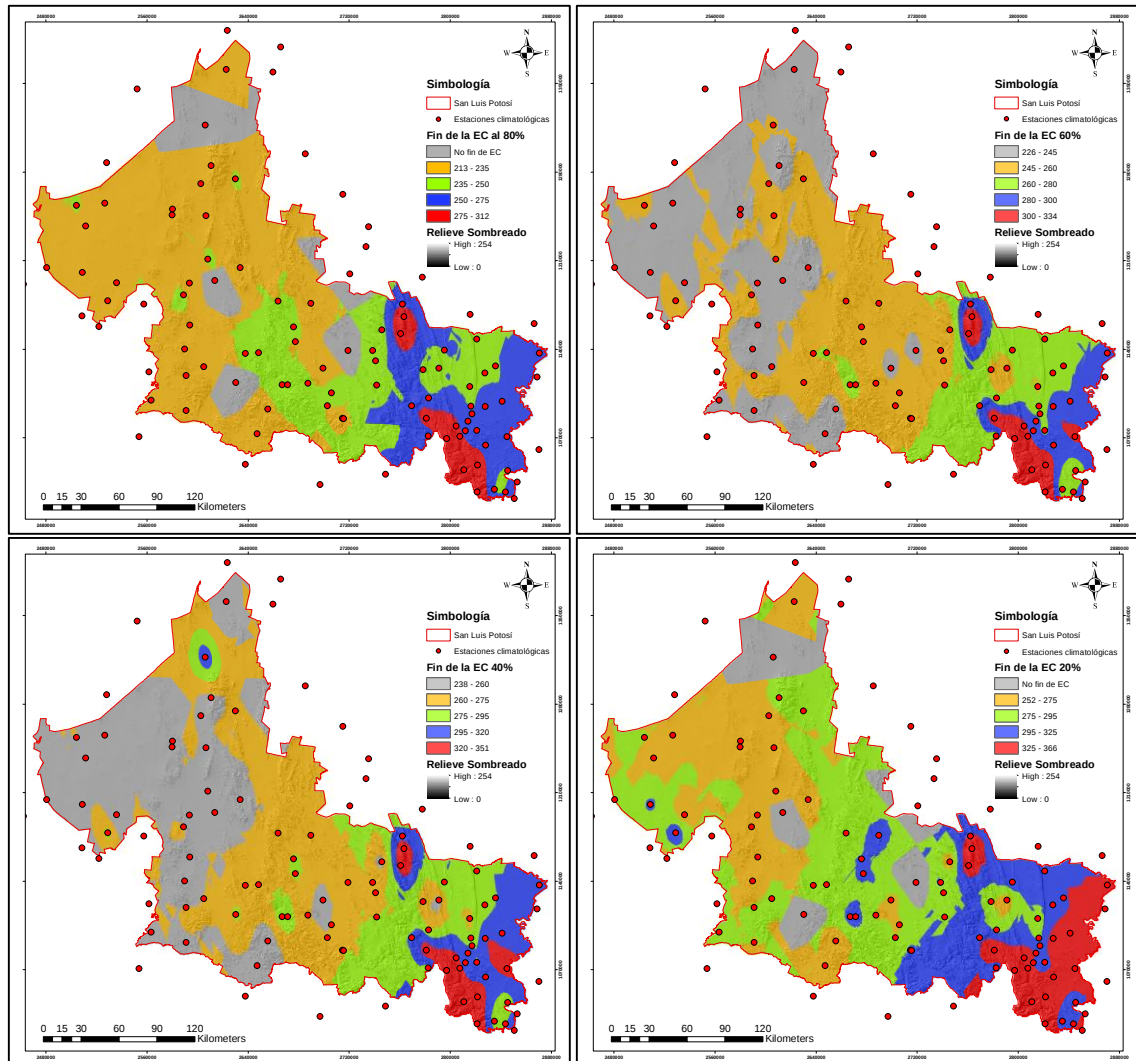


Figura 7. Distribución espacial del Fin de la EC al 20, 40, 60 y 80% de probabilidad.

De acuerdo a las Figuras 6 y 7, la estación de crecimiento se presenta en la mayor parte del estado a partir del día juliano 205 (23 de Julio) hasta el 227 (14 de Agosto) con una duración no mayor a 30 días con probabilidad del 80%.

Cuando las fechas del inicio y del fin de la EC son tempranas y tardías respectivamente con alta probabilidad (80%), se puede aprovechar la duración más larga de la Estación de Crecimiento, proponiendo estrategias adecuadas para el desarrollo y crecimiento de cualquier cultivo, además de permitir minimizar riesgos relacionados con la siembra y/o la selección del cultivo (FAO, 1997). En la Figura 8, se observa que la duración más adecuada se presenta en la zona sur del estado en la región huasteca.

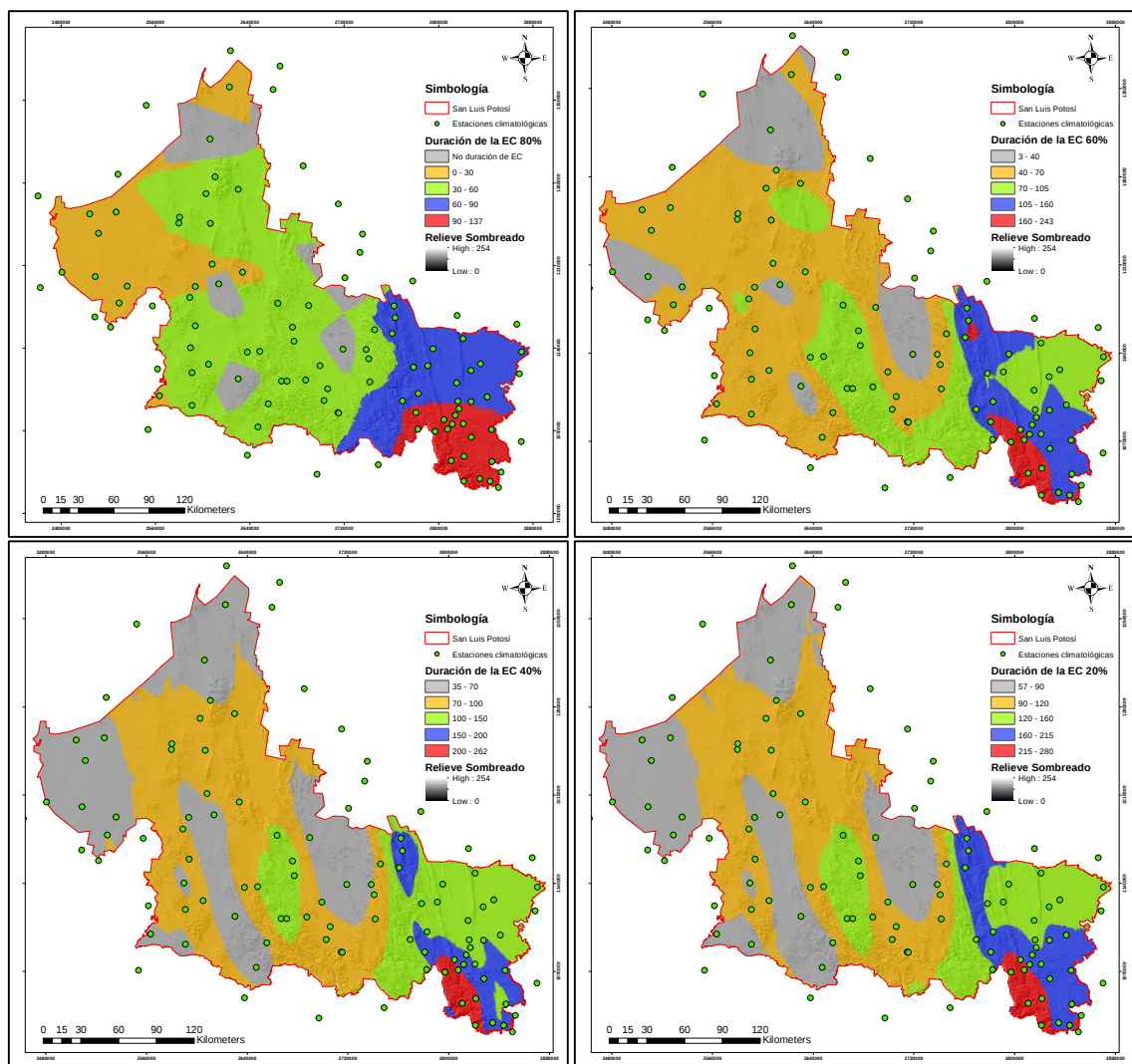


Figura 8. Duración de la EC con diferentes niveles de probabilidad.

En la Figura 9, se observa la distribución de la duración del Período de crecimiento con el modelo desarrollado por Pájaro (1984). Se identifica al 80% de probabilidad que en la zona centro, media y altiplano, la duración es de 13 a 90 días, mientras que la zona huasteca presenta una longitud de 90 a 295 días. Finalmente al 20, 40 y 60% de probabilidad la duración de la EC sigue una tendencia similar a la probabilidad del 80%.

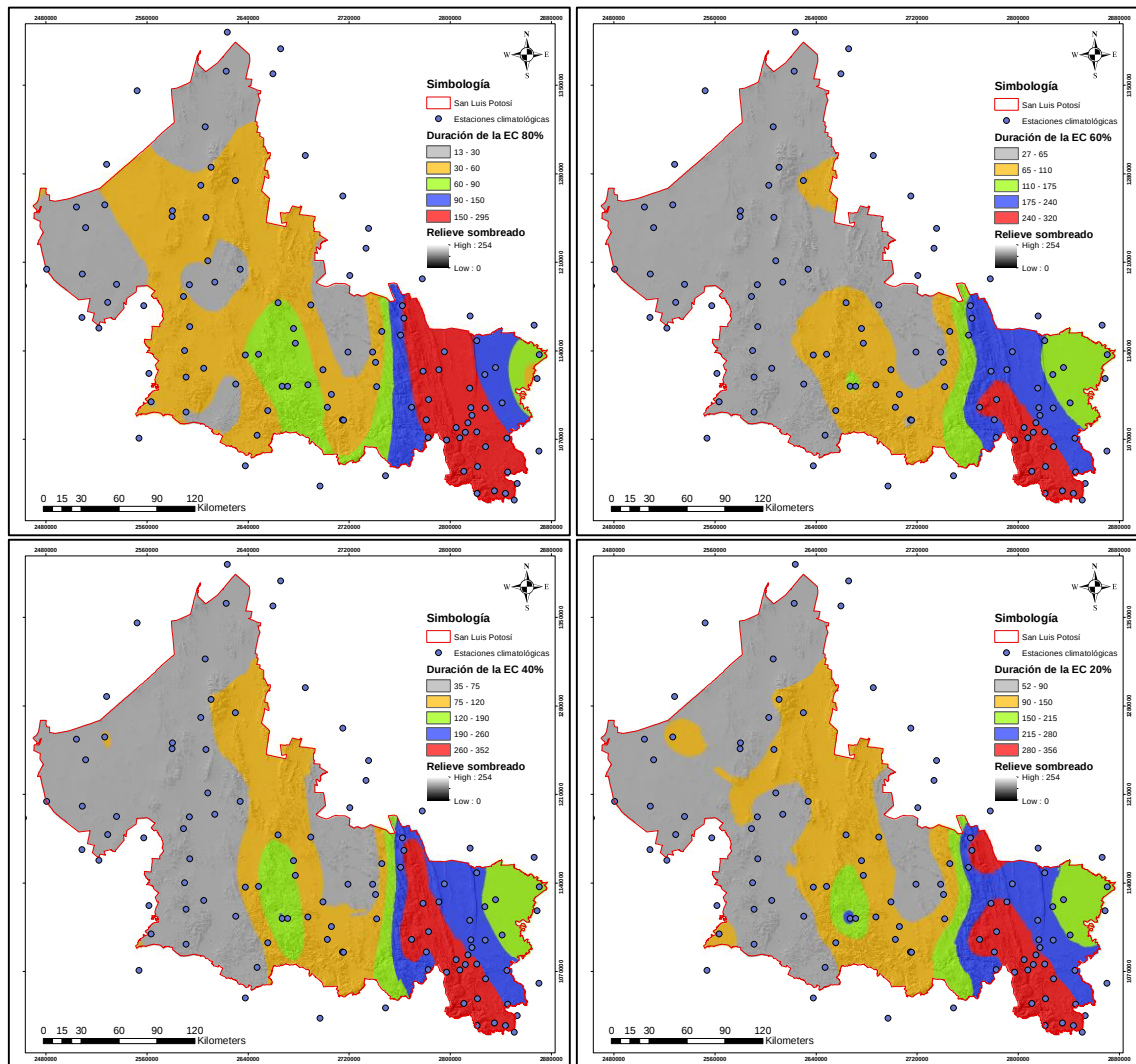


Figura 9. Duración de la EC con el modelo desarrollado por Pájaro (1984), al 80, 60, 40 y 20% de probabilidad.

La duración de la estación de crecimiento obtenido con el programa Instat, es menor en comparación con la duración obtenida con el método desarrollado por Pájaro (1984). El procedimiento realizado con el software, permite utilizar y definir diversos criterios para determinar el inicio, fin y duración de la EC. Mientras que el modelo no considera variables como la evapotranspiración de referencia. Además, presenta el inconveniente de no conocer las fechas de inicio y fin de la EC, valores importantes en el análisis de cultivos adaptables en una región.

3.6. Modelos representativos de la relación DEC versus PTDEC, PTA, Inicio y Fin de la EC

Se realizaron diversos diagramas de dispersión entre la duración de la estación de crecimiento y las variables precipitación total durante la estación de crecimiento (PTDEC), precipitación total anual (PTA), inicio y fin del período de crecimiento, para cada una de las estaciones climatológicas analizadas. En la Figura 10 se identifica una tendencia entre lineal y polinómica de segundo orden, con un coeficiente de determinación semejante en todos los casos. Se determinó el modelo que relaciona los datos con ambas regresiones (lineal y polinómica de segundo orden), en el Cuadro 5 se muestran las ecuaciones obtenidas con la regresión cuadrática o polinómica de segundo orden y en el Cuadro 6 con la regresión lineal, así como, el coeficiente de determinación (r^2). Pájaro y Ortiz (1992) encontraron que los modelos obtenidos en su estudio, son muy útiles, ya que, si se tiene el dato de precipitación total anual, se logra conocer la duración de la estación de crecimiento y a su vez el inicio del período de crecimiento, con un coeficiente de determinación aproximadamente de 0.8. Así mismo, un buen

modelo, se convierte en una herramienta importante en la toma de decisiones cuando solo se conocen los datos de una sola variable. En este estudio los modelos analizados presentan en promedio coeficientes de determinación mayores de 0.8 (Cuadro 5 y 6).

En la Figura 10a) se identifica la relación duración versus precipitación total durante la EC al 80% de probabilidad, el coeficiente de determinación es muy parecido con ambas regresiones, 0.897 con la tendencia polinómica y 0.883 con la regresión lineal. En b) se muestra la relación de la duración de la estación de crecimiento y la precipitación total anual, se obtuvo un valor de 0.845 y 0.844 de r^2 con la regresión polinómica y lineal respectivamente.

En c) la relación de la duración con el Inicio de la EC el coeficiente de determinación fue de 0.694 con la regresión polinómica y 0.687 con la regresión lineal. La relación entre la duración y el Fin del período de crecimiento muestra un coeficiente de determinación de 0.836 con ambos modelos al 80% de probabilidad.

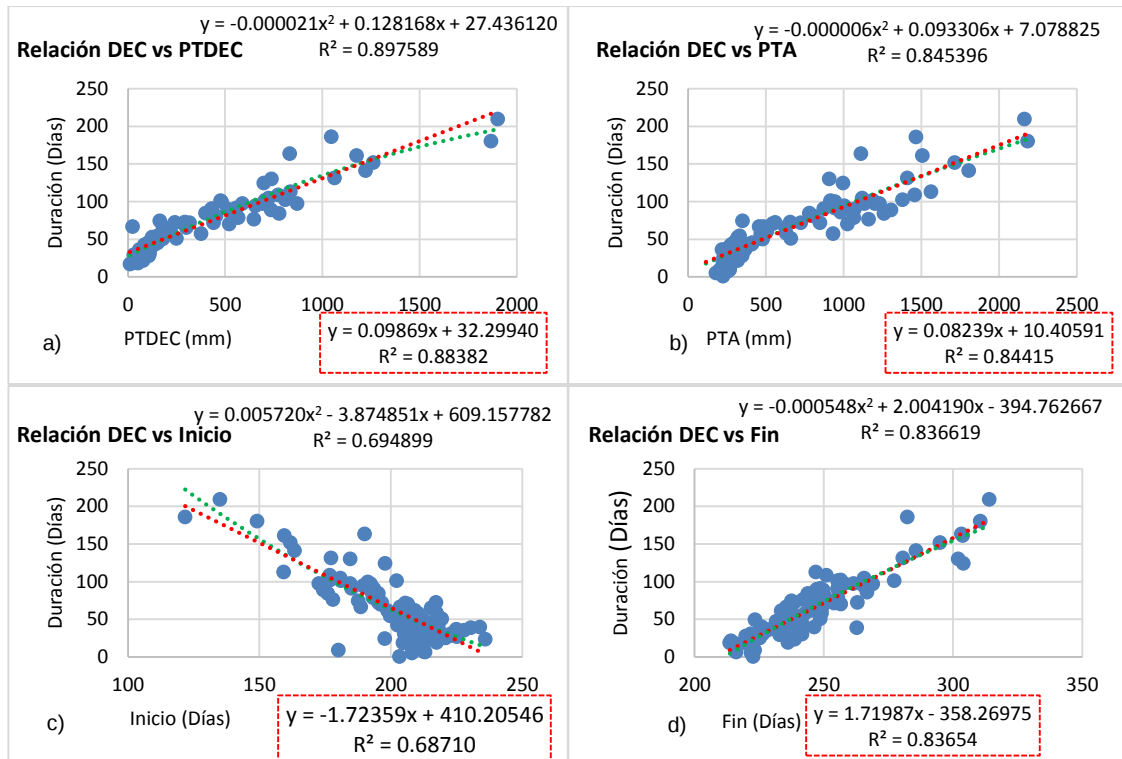


Figura 10. Diagrama de dispersión entre DEC y la PTDEC, PTA, INICIO y FIN de la EC al 80% de probabilidad.

Las ecuaciones obtenidas con la regresión cuadrática o polinómica de segundo orden de la relación entre la precipitación total durante la estación de crecimiento (PTDEC) y la duración del período de crecimiento (DEC), muestran un coeficiente de determinación de 0.897, 0.901, 0.883 y 0.857 al 80, 60, 40 y 20% de probabilidad respectivamente, por lo que el ajuste es bueno (Cai *et al.*, 2007). También, se muestran los modelos obtenidos con la relación precipitación total anual (PTA) y la DEC, donde los coeficientes son mayores a 0.8. Así mismo, se identifica el ajuste de la relación entre el inicio y la DEC, con un r^2 de 0.69, 0.61, 0.50 y 0.57 al 80, 60, 40 y 20% de probabilidad. Los coeficientes de determinación

de los modelos obtenidos de la relación de la DEC versus el Fin de la EC varían de 0.76 a 0.84 (Cuadro 5).

Cuadro 5. Ecuación de regresión polinómica de segundo grado y coeficiente de determinación por nivel de probabilidad analizado.

Relación entre la PTDEC y la duración del período de crecimiento (DEC)			
PROBABILIDAD		ECUACIÓN	r²
80%	DEC=	-0.000021*PTDEC ² +0.128168*PTDEC+27.436120	0.897589
60%	DEC=	-0.000014*PTDEC ² +0.117671*PTDEC+35.406463	0.901005
40%	DEC=	-0.000007*PTDEC ² +0.099494*PTDEC+49.328058	0.883229
20%	DEC=	-0.000003*PTDEC ² +0.086469*PTDEC+65.636880	0.857071
Relación entre la Precipitación total anual (PTA) y la DEC			
80%	DEC=	-0.000006*PTA ² +0.093306*PTA+7.078825	0.845396
60%	DEC=	-0.000005*PTA ² +0.090253*PTA+21.087982	0.855373
40%	DEC=	-0.000001*PTA ² +0.077637*PTA+38.243641	0.849162
20%	DEC=	0.000001*PTA ² +0.069015*PTA+55.346985	0.825429
Relación entre el Inicio de la EC y la DEC			
80%	DEC=	0.005720*INICIO ² -3.874851*INICIO+609.157782	0.694899
60%	DEC=	0.004400*INICIO ² -3.159335*INICIO+505.559072	0.616523
40%	DEC=	0.004409*INICIO ² -2.749779*INICIO+426.102462	0.507215
20%	DEC=	0.001942*INICIO ² -2.054648*INICIO+371.947367	0.573248
Relación de la Duración de la EC versus Fin de la EC			
80%	DEC=	-0.000548*FIN ² +2.004190*FIN-394.762667	0.836619
60%	DEC=	0.003467*FIN ² -0.256298*FIN-88.327897	0.836088
40%	DEC=	0.007074*FIN ² -2.629824*FIN+283.257351	0.760827
20%	DEC=	0.008520*FIN ² -3.860409*FIN+517.156480	0.770748

En el Cuadro 6 se muestran los modelos obtenidos con la regresión lineal, para los niveles de probabilidad del 80, 60, 40 y 20% de probabilidad, también se identifica el coeficiente de determinación (r²) que en promedio es mayor a 0.8. La relación que muestra un mejor valor de r² con respecto a la duración, es la precipitación total durante la estación de crecimiento (PTDEC) dado que el coeficiente de determinación varía de 0.856 a 0.891. Los modelos que tienen un menor valor de r² son los obtenidos en la relación de la duración versus inicio de la EC, con una variación de 0.5 a 0.687, los modelos obtenidos ilustran una pendiente negativa, por lo que, entre más temprano se presenta el inicio de la estación de crecimiento más grande será la duración del período de crecimiento.

Los datos analizados, se pueden interpretar igualmente bien con diferentes ecuaciones, pero conviene elegir siempre aquellas que tengan menor número de parámetros, dado que algunas expresiones son demasiado flexibles y tienden a causar problemas al momento de interpretar o no se les puede dar un significado físico sobre lo que está ocurriendo en el sistema.

Cuadro 6. Ecuación de regresión y coeficiente de determinación por nivel de probabilidad analizado.

Relación entre la Precipitación total durante la EC (PTDEC) y la duración de la EC			
PROBABILIDAD	ECUACIÓN		r²
80%	DEC=	0.09869*PTDEC+32.29940	0.88382
60%	DEC=	0.09315*PTDEC+40.68905	0.89191
40%	DEC=	0.08534*PTDEC+53.21907	0.88022
20%	DEC=	0.07853*PTDEC+68.35496	0.85615
Relación entre la Precipitación total anual (PTA) y la DEC			
80%	DEC=	0.08239*PTA+10.40591	0.84415
60%	DEC=	0.08038*PTA+24.56519	0.85437
40%	DEC=	0.07611*PTA+38.87408	0.84914
20%	DEC=	0.07149*PTA+54.14548	0.82536
Relación entre la Duración de la EC y el Inicio de la EC			
80%	DEC=	-1.72359*INICIO+410.20546	0.68710
60%	DEC=	-1.74657*INICIO+395.43097	0.61107
40%	DEC=	-1.54051*INICIO+347.23494	0.50007
20%	DEC=	-1.63135*INICIO+351.31995	0.57140
Relación de la Duración de la EC y el Fin de la EC			
80%	DEC=	1.71987*FIN-358.26975	0.83654
60%	DEC=	1.65432*FIN-348.65131	0.83267
40%	DEC=	1.50030*FIN-312.47516	0.74720
20%	DEC=	1.43065*FIN-293.93435	0.74641

3.7. Modelo matemático que relaciona las variables PTA y PTDEC

Se realizaron los diagramas de dispersión entre la PTA y la PTDEC para cada uno de los niveles de probabilidad, observándose en todas una tendencia entre lineal y/o cuadrática, en la Figura 11, se presenta el del 80% de probabilidad.

En función a la tendencia observada, se determinaron los modelos matemáticos que relacionan estas variables, en el Cuadro 7 se presentan los modelos obtenidos con ambas regresiones, así como, el coeficiente de determinación r².

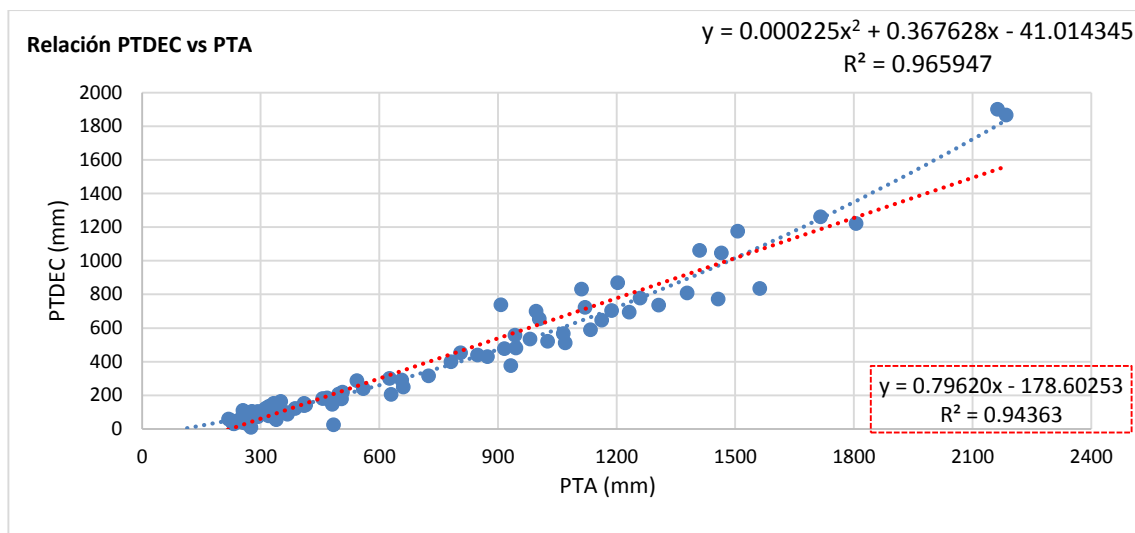


Figura 11. Diagrama de dispersión entre la PTA y PTDEC al 80% de probabilidad.

En el Cuadro 7 se aprecia que los modelos obtenidos con la regresión polinómica de segundo orden tienen un coeficiente de determinación mayor que los obtenidos con la regresión lineal. Todos los modelos obtenidos son altamente significativos con un r^2 mayor a 0.8.

Cuadro 7. Modelos matemáticos y coeficiente de determinación por nivel de probabilidad.

Modelos con regresión cuadrática			
PROBABILIDAD		ECUACIÓN	r^2
80%	PTDEC=	$0.000225*PTA^2 + 0.367628*PTA - 41.014345$	0.965947
60%	PTDEC=	$0.000139*PTA^2 + 0.561317*PTA - 61.072533$	0.980437
40%	PTDEC=	$0.000103*PTA^2 + 0.646987*PTA - 70.243937$	0.983900
20%	PTDEC=	$0.000079*PTA^2 + 0.694565*PTA - 80.455036$	0.984946
Modelos con regresión lineal			
80%	PTDEC=	$0.79620*PTA - 178.60253$	0.94363
60%	PTDEC=	$0.86016*PTA - 166.98531$	0.97132
40%	PTDEC=	$0.89812*PTA - 173.59324$	0.97844
20%	PTDEC=	$0.91836*PTA - 189.28292$	0.98117

4. CONCLUSIÓN

Los variables inicio, fin y duración de la estación de crecimiento, estudiadas con diferentes niveles de probabilidad, permiten identificar la distribución temporal y espacial, donde las condiciones de humedad y temperatura son favorables para el crecimiento y desarrollo de cualquier cultivo en el estado de San Luis Potosí.

Las mejores fechas de inicio y fin de la estación de crecimiento, se presentan en la región huasteca. Donde la duración del período de crecimiento es adecuado para realizar planeación y operación de actividades agrícolas de temporal. La región altiplano, media y centro del estado de San Luis Potosí, presenta menor duración de la EC.

Con los modelos obtenidos se puede determinar la duración de la estación de crecimiento conociendo cualquiera de las variables, Precipitación total durante la estación de crecimiento (PTDEC), Precipitación total anual (PTA), Inicio o Fin de la estación de crecimiento, con alto grado de significancia, con lo que, se puede planificar la agricultura de temporal y mejorar la producción agrícola.

Es factible obtener la Precipitación total durante la estación de crecimiento con la Precipitación total anual, dado que se tiene una buena relación de acuerdo al coeficiente de determinación r^2 .

5. LITERATURA CITADA

Allen, R. G.; Pereira L. S.; Raes D.; Smith M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. N°56 Ed. FAO. Italia, Roma. 323 p.

- Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A. 2001. Componentes del balance hídrico y metodologías para su cálculo. En: Curso Internacional de Ingeniería de Drenaje Agrícola III. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.
- Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A.; Coras, M. P. M.; Ángeles, M. V. 2006. Componentes de la estación de crecimiento, variación temporal y espacial en Chapingo, México. *Ingeniería Hidráulica en México*. 21(2), 57-68.
- Aviad, Y.; Kutiel, H.; Lavee, H. 2004. Analysis of beginning, end, and length of the rainy season along a Mediterranean-arid climate transect for geomorphics purposes. *Journal of Arid Environments*. 18(2), 189-204.
- Cai, J.; Liu, Y.; Lei, T.; Pereira S. L. 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology*. 145(1), 22-35.
- Infante, G. S.; Zárate de Lara, G. P. 2001. *Métodos Estadísticos*. 2da. Ed. México, DF. Trillas. 643 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2007. *Regiones agropecuarias de San Luis Potosí*. 69 p.
- Íñiguez, C. M.; Ojeda, B. W.; Días, D. C.; Sifuentes, I. E. 2014. Análisis de cuatro variables del período de lluvias asociadas al cultivo maíz de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5(1), 101-114.
- Odekunle, T. O. 2004. Rainfall and the length of the growing season in Nigeria. *International Journal of Climatology*. 24(4), 467-479.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación (FAO). 1997. *Zonificación Agro-ecológica: Guía general*. N°73. Roma. 96 p.
- Ortiz, S. C. A. 1987. *Elementos de agrometeorología cuantitativa, con aplicaciones en la república mexicana*. Tercera edición. Departamento de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 326 p.
- Pájaro, H. D.; Ortiz, S. C. A. 1992. Estimación del período de crecimiento por disponibilidad de agua y libre de heladas para la República Mexicana. *Revista de Geografía Agrícola*. 17(1), 119-125.

- Raes, D.; Sithole, A.; Makarau, A.; Milford, J. 2004. Evaluation of first planting dates recommended by criteria currently used in Zimbabwe. *Agricultural and Forest Meteorology*. 125(3-4), 177-185.
- Ruíz, O. A.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A.; Ontiveros, C.R. E.; López, L. R. 2012. Inicio de la estación de crecimiento y períodos secos en Tabasco, México. *Tecnología y Ciencia del Agua*, 3(2), 85-102.
- Sánchez, C. I.; Esquivel, A. G.; López, S. A.; Inzunza, I. M. A.; Catalán, V. E. A. 2011. Balance hídrico como fundamento para toma de decisiones en agricultura de temporal. *Relación Agua Suelo Planta - Agrofaz*, 2(1), 55-63.
- Sivakumar, K. 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and forest meteorology*. 42(4), 295-305.
- Stern, R.; Rijks, D.; Dale, I.; Knock, J. 2006. *Instat climatic guide*. Tercera edición. Reading, UK. Universidad de Reading. 330 p.

CAPÍTULO 4
ZONIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA Y BALANCE HÍDRICO EN EL ESTADO
DE SAN LUIS POTOSÍ

Jesús Gallegos Cedillo¹, Ramón Arteaga Ramírez¹, Mario Alberto Vázquez

Peña¹, Juan Juárez Méndez²

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. ²Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco.

C.P. 56230. Chapingo, México. Email: gallegosjc_1@hotmail.com

RESUMEN

En la agricultura de temporal, los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas tienen como uno de los principales factores limitantes la disponibilidad de humedad en el suelo, donde la fuente de abastecimiento de agua es la lluvia. El objetivo del presente trabajo fue definir zonas o áreas con propiedades y características agroclimáticas similares, mediante la determinación de las componentes del período de crecimiento, número total de días lluviosos y precipitación total durante la estación de crecimiento a partir del balance hídrico simple. Realizar una zonificación para los cultivos de maíz y frijol, y obtener modelos matemáticos para estimar la duración de la estación de crecimiento. Se determinó: el balance hídrico simple, la estación de crecimiento, y sus componentes: Inicio, Fin y Duración. Se estudiaron 108 estaciones climatológicas

con información (+85%) de precipitación, temperatura máxima y mínima con un período de estudio 1984-2010 y 1995-2010, respectivamente. La estación de crecimiento se determinó de las tablas del balance hídrico simple. También, se obtuvo el número total de días lluviosos, precipitación total durante el período de crecimiento. A la información generada se le determinaron las estadísticas básicas y se analizaron mediante la distribución normal al 20, 40, 60, y 80% de probabilidad. Con los mapas generados que representan la información de manera temporal y espacial, se detallan zonas que sirven como punto de referencia para potencializar la agricultura de temporal y minimizar riesgos de producción.

Palabras clave: Período de Crecimiento, Estaciones Climatológicas, Instat, Agricultura de Temporal.

ABSTRACT

In rainfed agriculture, the processes of growth and development of plants are one of the main limitations to the availability of moisture in the soil, where the source of water is rainfall factors. The objective of this study was to define zones or areas with similar properties and characteristics agroclimatic, by determining the components of the growth period, total number of rainy days and total precipitation during the growing season from the simple water balance. Making a zoning for corn and beans, and get mathematical models to estimate the length of the growing season. It is determined: simple water balance, the growing season, and its components: Home, End, and Duration. 108 climatological stations with information (+ 85%) of precipitation, maximum and minimum temperature with a

period of 1984-2010 and 1995-2010, respectively study were studied. The growing season is determined from tables simple water balance. The total number of rainy days, total precipitation are also obtained during the growth period. The information generated will be determined basic statistics and analyzed by the normal distribution at 20, 40, 60, and 80% probability. With the generated maps depicting the temporal and spatial information so areas that serve as a benchmark to potentiate seasonal agriculture and minimize production risks are detailed.

Keywords: Growing Period, Climatological Stations, Instat, Temporary Agriculture.

1. INTRODUCCIÓN

La identificación de zonas o unidades de áreas pequeñas delimitadas con el balance hídrico agroclimático, permite compaginar varias unidades con propiedades similares, donde los procesos de crecimiento y desarrollo de los cultivos en la agricultura de temporal, cuentan o no con la disponibilidad de humedad de suelo y temperaturas idóneas para la producción de los cultivos (FAO, 1997). Es importante conocer en la agricultura de temporal, el régimen hídrico de una región, dado que permite minimizar riesgos en los procesos de producción, zonificar cultivos, caracterizar sequias, determinar épocas de siembra, programar riego e identificar las necesidades de drenaje (Ruíz *et al.*, 2012a). Los rendimientos de los cultivos en zonas de temporal, son fuertemente dependientes de la aleatoriedad de la precipitación y la presencia de altas temperaturas, lo que influye en la disponibilidad de agua en el suelo (Sánchez *et al.*, 2011). El conocimiento del balance de agua en el suelo, permite discernir

sobre la fecha más indicada para establecer el período de siembra y considerar o no, tener una obra de captación de agua que ayude a mejorar la condición de los cultivos que se vea reflejada en los rendimientos. El concepto de balance hídrico, se refiere a la entrada y salida de agua por lluvia y evapotranspiración en un sistema, al aplicar la ley de conservación de la materia (Pereira, 2005; Amador *et al.*, 2011). El método más utilizado es el de Thornthwaite y Mather (1955), aplicado en diferentes estudios (Ferguson, 1996; Pereira, 2005; Tamarís y López, 2006; Ruíz *et al.*, 2012a), utilizando variables de precipitación y evapotranspiración, permite una relación directa con la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, los excesos y déficit para la zona radicular del cultivo (Pereira, 2005).

Instat v. 3.37, es un software que permite el análisis de los componentes del balance hídrico simple (BHS), de manera rápida y eficiente, permite variar las condiciones del BHS (Stern *et al.*, 2006). Ruíz *et al.* (2012b), propone utilizar el método descrito por Raes *et al.* (2004) y Stern *et al.* (2006), con el programa Instat. Rivera *et al.* (2012), proponen definir zonas con alto potencial productivo, mediante la combinación de suelo, fisiografía y características climáticas, con la metodología desarrollada por la FAO (1997). La zonificación se refiere a una clasificación de tierras en unidades más pequeñas, que comparte iguales o características similares, adecuadas para el desarrollo óptimo y en diferentes niveles de alguna especie vegetal o animal. González *et al.* (2011), describen tres criterios para determinar áreas potenciales para el establecimiento de frijol en condiciones de temporal, de acuerdo a la duración de la estación de crecimiento,

y son: marginal < 80 días, subóptima de 80 a 95 días y óptima > 95 días. Larios y Nuño (1995), definieron clases de aptitud agroclimática para el cultivo de maíz, a partir del porcentaje en rendimiento real respecto al máximo sin impedimentos y manejando el criterio: Muy apta (80-100%), Apta (40-80%), Marginalmente apta (20-40%) y No apta (Menor al 20%).

Los cultivos básicos más importantes en México son el maíz y el frijol. A nivel nacional el grano que más se produce es el maíz, esto debido a que constituye la principal fuente de energía para la dieta alimenticia y por otro lado se utiliza como forraje para el consumo animal. El frijol es producido en casi todos los estados, aunque destacan las regiones templada-semiárida y cálida con invierno seco, tanto por la superficie sembrada, como por el valor de la producción (González *et al.*, 2008). Aproximadamente el 70% de la producción nacional de frijol se concentra en seis estados que son: Zacatecas, Sinaloa, Durango, Chiapas, Nayarit y Chihuahua. De acuerdo a la FAOSTAT (2015), la producción mundial de maíz es de 1018 millones de toneladas de grano en aproximadamente 185 millones de hectáreas y de frijol es de 22.8 millones de toneladas en aproximadamente 290 millones de hectáreas. En México, la producción de frijol es de 1.3 millones de toneladas de grano en 1.8 millones de hectáreas. Las áreas cultivadas de maíz son de 7 millones de hectáreas y una producción de 22.6 millones de toneladas de grano. En el estado de San Luis Potosí, la producción de maíz para el año 2009 fue de 139,875.5 toneladas en aproximadamente una superficie cosechada de 182,230.0 hectáreas. Así mismo, el frijol contó con una

superficie cosechada de 102,374.2 hectáreas y una producción de 43,963.9 toneladas de grano (SAGARPA, 2009).

El ciclo vegetativo del frijol varía de 85 a 90 días (Crispin y Miranda, 1978), de 90 a 120 días (Doorenbos y Kassam, 1979), depende del hábito de crecimiento y de la región y época de cultivo. Se adapta a altitudes de 0 - 2400 m (Lépiz, 1983). Las necesidades de agua durante el período son de 300 a 500 mm (INECC, 2009). Puede permitirse hasta un agotamiento de 40 a 50% del total de agua disponible en el suelo durante el desarrollo del cultivo (Doorenbos y Kassam, 1979). El ciclo vegetativo del maíz es de 100 a 140 días (Doorenbos y Kassam, 1979), 80 a 140 días (Benacchio, 1982), 90 a 150 días (Ruiz, 1985), de 100 a 180 días (Villalpando, 1989). Se adapta a una altitud de 0 a 3300 m (González, 1984). De la siembra a la madurez requiere de 500 a 800 mm, dependiendo de la variedad y del clima, prefiere regiones donde la precipitación anual va de 700 a 1100 mm (INECC, 2009). Las estimaciones de las necesidades de agua en el maíz oscilan entre 500 y 600 mm, dependiendo de la fecha de siembra, ciclo del cultivar y condiciones climáticas del año (INTA, 2015). Durante el período de maduración puede llegarse a un agotamiento del 80% o más (Doorenbos y Kassam, 1979).

Para obtener una buena cosecha de maíz, la duración de la estación de crecimiento en regiones de temporal debería de ser al menos de 100 días en zonas tropicales y de 120 días o más en regiones templadas (Larios y Nuño, 1995). La época de siembra debe coincidir con el establecimiento de la temporada de lluvias, que ocurre generalmente en la segunda quincena de junio

(SARH, 1977). En fechas más tardías, corre el riesgo de que el cultivo sea dañado por heladas tempranas. El uso de variedades mejoradas incrementa los rendimientos y ayuda a reducir las pérdidas, debidas a daños causados por la alta incidencia de enfermedades y plagas, los efectos de falta o excesos de lluvia, y las condiciones marginales de los suelos (Rosas, 2003). El éxito de producción depende notablemente en la elección correcta de las variedades, así como, del período de crecimiento y la finalidad con que el cultivo es cultivado (INECC, 2009).

El estado de San Luis Potosí es un área geográfica altamente diferenciada, que permite dividirlo en cuatro zonas naturales: centro, huasteca, altiplano y media (Vázquez, 2011). El clima que predomina es seco y semiseco, se presenta en el 71% de la superficie del estado, localizado en las regiones conocidas como el Salado, el 15% es cálido subhúmedo, situado en la parte este de la Sierra Madre Oriental, el 10% es cálido húmedo y se localiza hacia la Llanura Costera del Golfo, el 2.5% es muy seco localizado en la Mesa del Centro, el 1.5% es templado subhúmedo y se sitúa en las llanuras que se encuentran entre las sierras, también se presenta clima templado húmedo en un porcentaje muy pequeño del 0.2% hacia el sureste del estado. La actividad agrícola se realiza principalmente en la zona huasteca (INEGI, 2012).

El objetivo del presente trabajo fue definir zonas o áreas con propiedades y características agroclimáticas similares, mediante la determinación de las componentes del período de crecimiento, número total de días lluviosos y precipitación total durante la estación de crecimiento a partir del balance hídrico

simple, para diferentes niveles de probabilidad. Así mismo, realizar una zonificación para los cultivos de maíz y frijol. Y finalmente obtener un modelo matemático para estimar la duración de la estación de crecimiento en el estado de San Luis Potosí.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

El estado de San Luis Potosí se localiza en la parte centro norte de la república mexicana entre los paralelos 21° 09'35" y 24°33'09" de latitud norte y los meridianos 98°19'52" y 102°17'51" de longitud al oeste de Greenwich. La superficie de la entidad es de 62,304.74 km², que representa el 3.11% del total de la extensión del país (INEGI, 2007).

2.2. Datos climatológicos

Se utilizaron 108 estaciones climatológicas que contaban con más del 85% de registros de información diaria, 81 estaciones corresponden al estado de San Luis Potosí, y 27 contiguas al área de estudio. Se obtuvo de las bases de datos climatológicos, Eric III 2.0 (IMTA, 2009) y Red de estaciones climatológicas, (CONAGUA, 2015), información diaria de precipitación (período 1984-2010), temperatura máxima y mínima (período 1995-2010).

2.3. Datos de suelo

La capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (CAAS), se determinó con el diagrama de cálculo de la fracción volumétrica de agua aprovechable (Figura 1) y el paquete comercial "Perfiles de suelo v.1.2", (INEGI, 2007), que cuenta con información edafológica de toda la República Mexicana.

Se tomaron un total de 1419 perfiles de suelo que cubren el área de estudio y se seleccionaron 974 que cuentan con información de Textura y Valores de Profundidad total del perfil de suelo (Figura 2). Se utilizó el método de polígonos de Thiessen para determinar el área de influencia de cada Perfil y obtener el CAAS ponderado.

La determinación del valor de la FVAA se realizó a partir de la siguiente relación:

$$FVAA = PS * fvaau \dots \dots \dots (1)$$

FVAA = Fracción volumétrica de agua aprovechable en el perfil (cm), PS = Profundidad efectiva del suelo (cm), fvaau = fracción volumétrica de agua aprovechable unitaria (cm/cm).

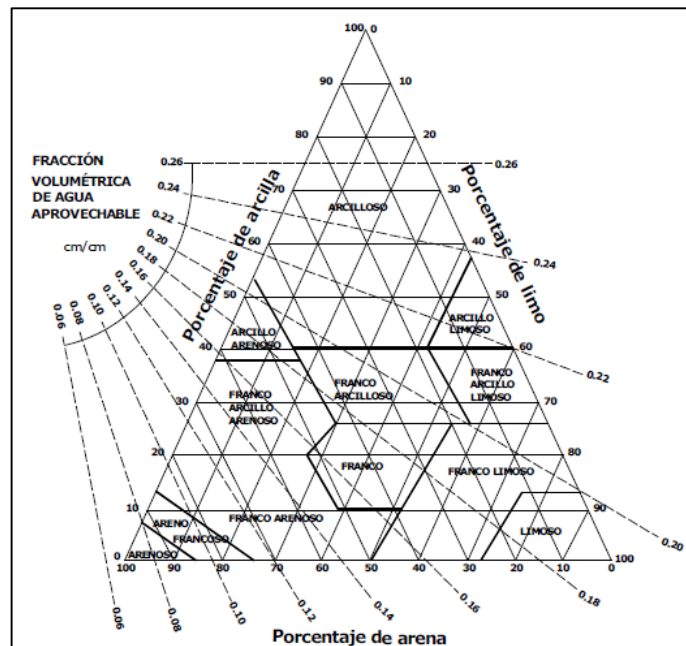


Figura 1. Diagrama para el cálculo de la fracción volumétrica de agua aprovechable (Norero, 1976, citado por Arteaga y Vázquez, 2001).

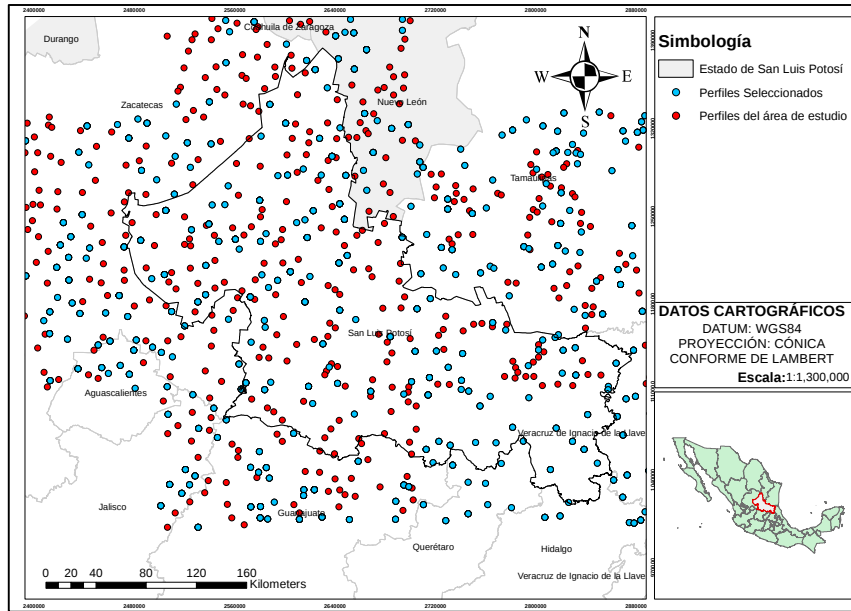


Figura 2. Perfiles de suelo del área de estudio.

2.4. Determinación de la Evapotranspiración de referencia (ET_o)

La evapotranspiración de referencia es el agua evaporada desde el suelo y el agua transpirada por las plantas, es fundamental para la toma de decisiones en la planeación y el manejo del agua (Chávez *et al.*, 2013). Se empleó el método alternativo Hargreaves propuesto por Allen *et al.* (2006) y utilizado por Ruíz *et al.* (2012a) y Demin (2014). La expresión matemática del método Hargreaves, es la siguiente (Allen *et al.*, 2006):

$$ET_o = 0.0023 * (T_{media} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} * R_a \dots \dots (2)$$

ET_o = evapotranspiración de referencia diaria (mm día⁻¹), T_{media} = temperatura media (°C), T_{min} = temperatura mínima (°C), T_{max} = temperatura máxima (°C), R_a = Radiación extraterrestre (mm día⁻¹).

La R_a está dada por la siguiente expresión (Allen *et al.*, 2006):

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} * G_{SC} * d_r * [W_s * \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \sin W_s] \dots (3)$$

Gsc= Constante solar ($0.082, \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$), dr= Distancia relativa inversa Tierra-Sol, Ws= Angulo de radiación a la puesta de sol (Rad), ϕ = Latitud (Rad) y δ = Declinación solar (Rad).

2.5. Determinación Balance hídrico Agroclimático

El programa Instat + v3.37, es un software que incorpora un paquete estadístico y un apartado especial sobre análisis climático con herramientas y aplicaciones a la agricultura (Raes *et al.*, 2004; Stern *et al.*, 2006). Los datos necesarios para realizar el balance hídrico simple (BHS) en el programa Instat son: Precipitación, evapotranspiración y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (Ruíz *et al.*, 2012b).

2.6. Análisis probabilístico de las fechas de inicio de la estación de crecimiento

Para el cálculo de las probabilidades de las fechas de inicio de la estación de crecimiento (EC), se aplicó la distribución de probabilidad Normal estándar (Infante y Zárate de Lara, 2001). Se estandarizó los datos obtenidos del BHS con la siguiente ecuación:

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}_i}{S_i} \dots \dots \dots (4)$$

X_i = inicio de la EC, $\bar{X}_i$ = media, S_i = desviación estándar y Z_i = variable estandarizada.

Se obtuvo el valor de la probabilidad F (Z_i), que se ve afectada por la probabilidad relativa de ocurrencia de fecha de inicio denotado por Co , obtenido del cociente

del número de años con inicio de la EC (Mo) y el número de años de registro (No), para considerar aquellos años en los que no se define el inicio de la EC:

$$Co = \frac{Mo}{No} \dots \dots \dots (5)$$

La probabilidad del inicio de la EC, se obtiene con la expresión (6). Finalmente se obtienen los niveles de probabilidad de excedencia al 20, 40, 60, 80%.

$$F(I) = Co * (FZi) \dots \dots \dots (6)$$

2.7. Análisis probabilístico de la fechas de fin de la estación de crecimiento

Para conocer las fechas del fin de la estación de crecimiento con un 20, 40, 60 y 80 por ciento de probabilidad, se aplicó la distribución de probabilidad Normal estándar. Se estandarizan primero los datos con la siguiente fórmula:

$$Z_f = \frac{X_f - \bar{X}_f}{S_f} \dots \dots \dots (7)$$

X_f = fin de la EC, $\bar{X}_f$ = media, S_f = desviación estándar y Z_f = variable estandarizada. De las tablas de probabilidad acumulada de la distribución normal estándar se obtiene $F(Z_f)$. Se multiplica por la probabilidad relativa de ocurrencia de fecha de fin (Cp), obtenido del cociente del número de años con fin de la EC (Mp) y el número de años de registro (Np), para considerar años en los que no se define el fin de la EC:

$$Cp = \frac{Mp}{Np} \dots \dots \dots (8)$$

La probabilidad del fin de la estación de crecimiento se obtiene con la expresión:

$$F(F) = (1 - F(Z_f)) * Cp \dots \dots \dots (9)$$

2.8. Tratamiento probabilístico para las variables: Duración, número total de días lluviosos y precipitación total durante la estación de crecimiento

Se analizaron los datos obtenidos del BHS con la distribución Normal estándar y se obtuvo la probabilidad de ocurrencia para los niveles de 20, 40, 60 y 80 por ciento de probabilidad. Se siguió el procedimiento de cálculo realizado para el fin de la estación de crecimiento del punto 2.7.

2.9. Determinación de áreas con potencial de adaptación, cultivos: maíz y frijol

Para determinar las áreas potenciales de adaptación en el estado de San Luis Potosí con los cultivos de maíz y frijol, se realizó una clasificación de cinco clases; muy alto (1), alto (2), medio (3), bajo (4) y nulo (5) (Cuadro 1). Se tomaron de base las características de precipitación, duración del ciclo e inicio de la siembra de las variedades de maíz y frijol para condiciones de temporal, propuestas por la SARH, (1977).

Variedades de maíz de temporal (SARH, 1977).

- H-309. Es de ciclo intermedio con 130 días (aproximadamente) a la madurez, siendo apto para zonas de temporal bueno (800 milímetros o más). Debe sembrarse entre el primero de mayo y el 15 de junio.
- H-230. Es un híbrido precoz que tarda aproximadamente 125 días en llegar a la madurez, debe sembrarse en zonas de temporal regular (675 a 800 mm), o para siembras tardías en zonas de temporal bueno. El período de siembra es del primero de mayo al 15 de junio.
- H-220. Híbrido precoz con 120 días a la madurez (aproximadamente), recomendable para zonas de temporal con precipitación de 525 a 675 mm, o para siembras tardías en zonas de temporal bueno o regular. El período de siembra es del 20 de mayo al 30 junio.

- VS-201 y Cafime. Son variedades precoces que maduran a los 110 o 115 días y se recomiendan para zonas de temporal deficiente (menos de 525 mm), o bien en zonas de temporal regular o bueno para siembras tardías. Su fecha límite de siembra es hasta el 31 de julio.

Variedades de frijol de temporal

- Flor de mayo. Semiguía, susceptible al mosaico; de 120 a 125 días a la madurez, y con rendimientos de 1200 a 1500 kilogramos por hectárea. La época de siembra adecuada es del 15 de mayo al 25 julio.
- Canario 107. variedad tolerante al mosaico (TM); de 100 a 110 días a la madurez, y con rendimiento de 1500 a 1800 kilogramos por hectárea.
- Canario 101. Con ciclo de 100 a 110 días a la madurez, y con rendimientos de 1500 a 1800 kilogramos por hectárea. Fecha límite de siembra 15 de julio.

En el Cuadro 1 se muestran las clases propuestas para definir las áreas potenciales de establecimiento de los cultivos de maíz y frijol. Los parámetros propuestos de acuerdo a la revisión de literatura en maíz para las variedades analizadas, son: precipitación de 500 a 800 mm, la duración del ciclo de 100 a 150 días y las fechas recomendadas de siembra son a partir del 01 de mayo (122) al 31 de julio (213). En el caso del frijol, la precipitación es de 300 a 500 mm, la duración del ciclo es de 80 a 125 días y la fecha de siembra es a partir del 15 de mayo (136) al 15 de julio (197).

Cuadro 1. Criterios para definir áreas con potencial en el establecimiento de los cultivos de maíz y frijol.

Clasificación para el cultivo de Maíz				
Nivel	Precipitación (mm)	Potencial	Duración (días)	Siembra (día juliano)
1	>800	Muy alto	>150	<122
2	500-800	Alto	133-150	122-152
3	400-500	Medio	117-133	152-182
4	260-400	Bajo	100-117	182-213
5	<260	Nulo	<100	>213

Clasificación para el cultivo de Frijol				
Nivel	Precipitación (mm)	Potencial	Duración (días)	Siembra (día juliano)
1	>500	Muy alto	>125	<136
2	300-500	Alto	110-125	136-156
3	240-300	Medio	95-110	156-176
4	180-240	Bajo	80-95	176-197
5	<180	Nulo	<80	>197

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (CAAS)

En la Figura 3, se muestra la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo ponderado, así como el área de influencia, obtenido con los polígonos de Thiessen. El CAAS más pequeño es de 22.59 mm, el más grande es de 243.35 mm. La variabilidad del CAAS se debe a la textura y a la profundidad del suelo.

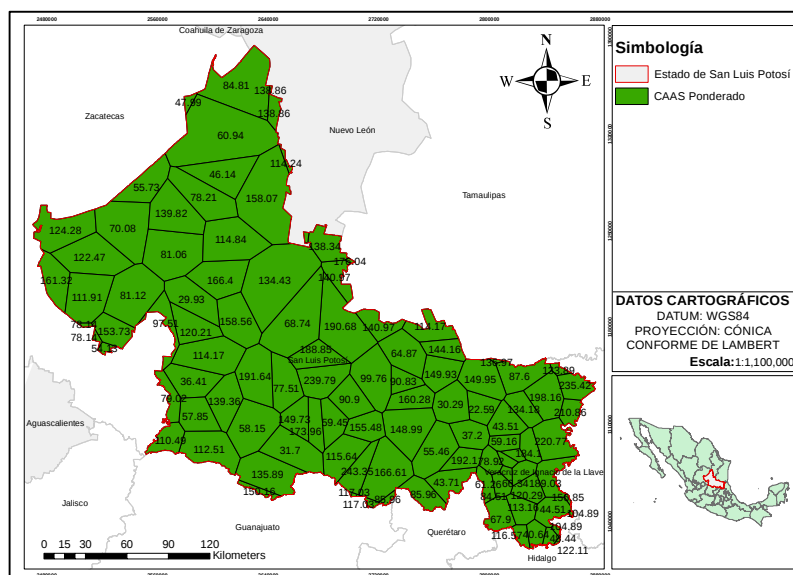


Figura 3. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (mm).

3.2. Evapotranspiración

Para las 108 estaciones climatológicas se determinó 16 años de evapotranspiración diaria con el método de Hargreaves. Posteriormente se obtuvo la evapotranspiración promedio para cada estación analizada (Cuadro 2).

Cuadro 2. Evapotranspiración promedio diaria (mm) para la estación

24165, San José de Coronado, Real de Catorce, SLP.

Clave	24165	lat=	23.58	long=	-101.57	Promedio	2010-1995					
Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	2.8	3.5	4.2	4.9	5.6	5.3	4.8	5.1	4.7	4.1	3.3	3.0
2	2.7	3.3	4.2	4.7	5.6	5.5	4.9	5.0	4.6	4.0	3.2	3.1
3	3.0	3.4	4.3	4.8	5.5	5.7	4.9	5.1	4.5	4.0	3.3	3.0
4	2.8	3.4	4.4	4.9	5.7	5.6	5.0	5.1	4.5	3.9	3.4	2.9
5	3.0	3.4	4.5	5.0	5.9	5.6	4.8	5.1	4.2	3.9	3.6	2.9
6	2.9	3.5	4.6	4.9	5.9	5.6	4.6	5.0	4.3	3.9	3.3	2.7
7	2.9	3.5	4.5	5.0	5.9	5.7	4.8	4.9	4.2	3.9	3.4	2.7
8	3.0	3.4	4.4	5.1	5.8	5.4	4.8	5.1	4.2	3.8	3.5	2.8
9	2.9	3.6	4.5	5.1	5.9	5.3	4.7	5.0	4.2	4.1	3.4	2.8
10	2.8	3.5	4.4	5.1	6.0	5.5	4.9	5.0	4.5	3.8	3.5	2.8
11	2.6	3.6	4.4	4.9	6.0	5.4	5.0	5.0	4.4	3.7	3.4	2.9
12	2.8	3.6	4.5	4.9	5.8	5.5	4.7	4.9	4.3	3.8	3.3	2.9
13	2.7	3.7	4.7	5.0	5.8	5.5	4.9	4.9	4.3	3.9	3.3	2.6
14	2.7	3.6	4.5	5.1	5.8	5.4	5.0	4.8	4.2	4.2	3.2	2.5
15	2.9	3.8	4.8	5.2	5.4	5.5	5.1	4.9	4.1	4.1	3.2	2.6
16	2.7	4.1	4.8	5.4	5.5	5.3	5.2	5.0	3.9	4.2	3.2	2.6
17	2.8	4.0	4.7	5.4	5.3	5.4	5.3	5.0	4.0	4.2	3.2	2.6
18	2.8	4.1	4.6	5.3	5.4	5.3	5.0	4.9	4.1	4.1	3.2	2.8
19	2.7	4.1	4.4	5.4	5.4	5.3	5.2	4.8	4.2	4.1	3.1	2.8
20	2.9	3.9	4.7	5.5	5.7	5.3	5.1	4.7	4.2	3.9	3.0	2.8
21	3.0	4.0	4.8	5.3	5.9	5.3	5.1	4.8	4.1	3.8	3.1	2.9
22	3.0	4.1	4.9	5.4	6.0	5.4	5.0	4.8	4.1	3.8	3.4	2.9
23	2.9	4.1	4.9	5.4	5.7	5.4	5.0	4.6	4.1	3.6	3.3	2.7
24	2.9	4.0	5.1	5.2	5.7	5.4	5.0	4.8	4.1	3.6	3.3	2.7
25	3.0	3.9	5.0	5.4	5.6	5.2	4.9	4.9	4.1	3.5	3.2	2.7
26	3.0	4.0	4.9	5.3	5.5	5.2	4.9	4.9	4.1	3.4	3.1	2.6
27	3.1	4.0	5.0	5.3	5.6	5.2	4.9	4.8	4.2	3.6	3.0	2.6
28	3.1	4.1	5.1	5.4	5.7	5.2	5.0	4.8	4.2	3.7	3.1	2.6
29	3.1	4.3	4.9	5.3	5.5	5.2	5.1	4.6	4.3	3.6	3.1	2.6
30	3.2		5.3	5.3	5.4	5.1	5.3	4.7	4.2	3.7	3.1	2.6
31	3.2		5.1		5.4		5.0	4.6		3.6		2.7

Este procedimiento permite estimar la ETo cuando no se tiene disponibilidad de datos meteorológicos de radiación solar, humedad relativa o velocidad del viento, y se cuenta con registros de información de temperatura máxima y mínima. El método de Hargreaves es accesible y aplicable en la planeación de actividades en la agricultura y la selección del método depende de la disponibilidad de variables con que se cuente (Santiago *et al.* 2012).

En la Figura 4, se muestra la evapotranspiración de referencia media anual calculada con la expresión alternativa de Hargreaves, que va desde los 1315 hasta los 2006 mm. Se expresa en mm por unidad de tiempo. La zona media presenta mayor evapotranspiración que va desde los 1700 hasta los 2006 mm.

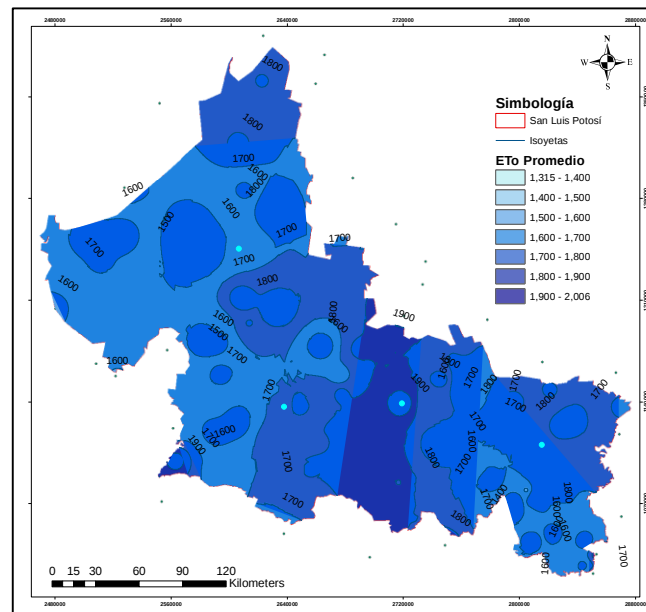


Figura 4. Evapotranspiración de referencia media anual.

3.3. Balance hídrico simple

Con el programa Instat se obtuvieron tablas de resumen del BHS. Con el que se definió el tipo y característica del período de crecimiento como lo son: todo el año, normal, intermedio y Sin período de crecimiento. Las tablas de resumen del balance hídrico son codificadas automáticamente, '--' cuando la humedad en el suelo es cero y '++' cuando está a su máxima capacidad de almacenamiento.

En el Cuadro 3, se muestra un balance hídrico para un año completamente seco, en el que no se define período de crecimiento para la estación 24094 y el año 1995.

Cuadro 3. BHS del año 1995 de la estación 24094, Venegas, SLP.

Daily	data	for:	1995									
Mon	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
-----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----
Day.	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----
1	3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2	3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3	1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
6	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
7	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
9	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
11	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
12	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
13	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
14	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
15	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
16	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
17	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
18	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
19	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
20	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
21	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
22	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
23	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
24	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
25	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
26	--	--	--	--	5	--	--	--	--	--	--	--
27	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
28	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
29	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
30	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
31	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Minimum	(Overall: 0)											
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum	(Overall: 5.3)											
	3	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0

En el Cuadro 4, se observan meses en los que la precipitación se presenta en períodos cortos y mal distribuidos a lo largo del año, lo que hace ver a la humedad del suelo con una distribución intermitente.

Cuadro 4. BHS del año 1997 de la estación 24069, San Luis Potosí.

Daily data for: 1997												
Mon Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec												
Day. ---	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---
1	--	17	--	--	--	--	--	39	--	--	--	--
2	--	14	--	--	--	--	--	34	--	--	--	--
3	--	11	--	--	--	--	--	29	--	--	--	--
4	--	8	--	--	--	--	--	24	--	2	--	--
5	--	5	--	--	--	34	--	19	--	--	--	--
6	--	1	--	--	--	29	--	15	--	--	--	--
7	--	--	--	4	--	24	--	10	--	--	--	--
8	--	--	--	4	--	31	--	6	--	--	--	--
9	--	--	--	--	--	26	--	1	--	1	--	--
10	--	--	--	--	6	21	--	--	--	4	0	--
11	--	--	--	--	0	16	--	--	--	13	--	--
12	--	--	--	--	--	10	--	--	--	26	--	--
13	--	--	--	1	--	5	--	--	--	30	--	--
14	--	--	--	5	--	0	--	6	--	28	--	--
15	--	--	--	14	--	--	--	15	--	24	--	--
16	--	--	--	15	--	--	--	10	--	20	--	--
17	--	--	--	11	--	--	--	6	--	17	--	--
18	--	--	--	6	--	--	15	1	--	13	--	--
19	9	--	22	0	--	--	53	--	--	10	--	--
20	16	--	19	--	1	--	66	--	--	6	--	--
21	12	--	15	--	6	4	90	--	--	3	--	--
22	9	--	10	--	2	10	86	--	--	--	--	--
23	6	--	6	--	--	5	81	--	--	--	--	--
24	3	--	1	--	--	--	76	--	--	--	--	--
25	0	--	--	--	--	--	72	--	--	--	--	--
26	--	--	--	--	--	--	67	--	--	--	--	--
27	--	--	--	--	--	--	63	--	--	--	--	--
28	--	--	--	--	--	--	58	--	--	--	--	--
29	--	--	--	--	--	--	53	--	--	--	--	--
30	--	--	--	--	--	--	48	--	--	--	--	--
31	--	--	--	--	--	--	44	--	--	--	--	--
Minimum	(Overall: 0)											
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum	(Overall: 90.3)											
	16	17	22	15	6	34	90	39	0	30	0	0

Debido a que la distribución de la lluvia en el año es muy variable, el inicio de período de crecimiento es el día 157 (05 junio), y su fin para el día 232 (19 de agosto) con un período seco del 24 junio al 17 julio. La duración de la estación de crecimiento es muy corta por lo que es muy arriesgado establecer un cultivo bajo condiciones de temporal.

En el Cuadro 5 se tiene un año en el que se define perfectamente una fecha de inicio y fin de la estación de crecimiento.

Cuadro 5. BHS para la estación 24006 y para el año 2008.

Daily data for: 2008	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Mon Day.	----	----	-----	-----	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---
1	--	--	--	--	--	--	8	60	92	119	85	--
2	--	--	--	--	--	--	3	56	88	115	82	--
3	--	--	--	--	--	--	1	51	84	111	79	--
4	--	--	--	--	--	--	--	46	79	107	76	--
5	--	--	--	--	--	--	5	41	78	103	73	--
6	--	--	--	--	--	24	10	37	90	100	70	--
7	--	--	--	--	--	80	81	32	102	130	67	--
8	--	--	--	--	--	99	++	27	146	127	64	--
9	--	--	--	--	--	100	++	22	147	124	61	--
10	--	--	--	--	--	98	++	17	147	122	58	--
11	--	--	--	--	--	94	++	12	143	119	55	--
12	--	--	--	--	--	88	148	7	++	117	52	--
13	--	--	--	--	--	82	143	2	++	126	49	--
14	--	--	--	--	--	76	138	--	147	123	45	--
15	--	--	--	--	8	70	132	--	++	126	42	--
16	--	--	--	--	4	65	127	--	145	129	40	--
17	--	--	--	--	--	59	122	--	140	129	37	--
18	--	0	--	--	--	54	117	0	136	125	34	--
19	--	--	--	--	--	48	112	18	132	121	31	--
20	--	--	--	--	--	43	107	26	128	118	28	--
21	--	--	--	--	--	38	102	26	123	114	26	--
22	--	--	--	--	--	33	98	21	143	110	23	--
23	--	--	--	--	--	28	93	17	146	107	19	--
24	--	--	--	--	--	23	88	38	142	103	17	--
25	--	--	--	--	--	18	93	37	142	100	14	--
26	--	--	--	--	--	12	89	36	138	96	11	--
27	--	--	--	--	--	7	84	36	134	97	8	--
28	--	--	--	--	--	1	79	40	131	94	5	--
29	--	--	--	--	--	10	74	42	127	90	2	--
30	--	--	--	--	--	8	69	100	123	88	--	--
31	--	--	--	--	--	--	65	97	--	88	--	--
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	78	(Overall: 0)	88	0
Maximum	0	0	0	0	8	100	149	100	149	(Overall:148.8)	130	85
	0	0	0	0	8	100	149	100	149	130	85	0

El balance hídrico para el año 2008 de la estación 24006, Cárdenas, SLP, muestra un inicio de período de crecimiento el día 6 de junio, y un fin de la estación de crecimiento el día 30 de noviembre. La duración del período de crecimiento es de aproximadamente seis meses.

En el Cuadro 6 se presenta un año donde la estación de crecimiento se puede definir en todo el año.

Cuadro 6. Balance hídrico simple para el año 1992 de la estación 24087.

Daily	data	for:	1992									
Mon	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Day.	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---
1	55	61	--	15	14	++	--	60	31	57	37	20
2	54	57	--	9	7	60	--	59	26	52	++	16
3	++	59	--	12	1	62	--	58	21	48	63	13
4	63	56	--	19	--	57	50	52	16	43	60	10
5	60	53	--	14	--	50	56	46	11	39	56	7
6	57	49	--	8	--	++	59	40	7	35	53	17
7	54	45	--	2	15	60	53	41	2	31	49	14
8	51	48	--	--	14	++	48	35	--	27	61	11
9	52	46	--	--	7	60	48	30	--	++	58	7
10	60	42	--	--	1	++	43	29	--	62	54	5
11	63	39	--	--	--	60	48	24	3	59	51	2
12	60	35	--	--	--	54	43	19	28	++	48	--
13	57	31	--	--	--	48	37	13	47	++	60	--
14	54	27	--	7	50	42	33	7	50	63	57	--
15	51	23	--	4	60	36	62	5	54	59	62	--
16	++	20	--	--	54	30	++	56	62	55	62	--
17	++	16	--	--	55	24	63	++	57	51	59	--
18	63	12	--	--	++	18	++	65	62	++	56	--
19	62	14	--	--	60	61	++	61	57	++	53	--
20	58	10	--	--	55	56	++	56	52	64	50	--
21	55	5	8	--	49	50	++	50	48	60	47	--
22	51	1	4	--	43	45	62	++	43	57	43	--
23	48	--	--	--	36	39	++	61	38	61	40	--
24	45	7	--	--	30	33	61	56	45	++	37	2
25	43	3	--	--	24	28	55	++	52	63	34	19
26	46	--	23	--	18	22	56	61	48	59	31	17
27	44	--	31	30	12	16	51	56	++	56	31	16
28	41	--	26	32	6	11	45	51	++	52	28	14
29	++	--	21	26	--	6	40	46	++	48	25	11
30	65		15	20	16	1	38	41	62	45	22	8
31	62		20		37		++	36		41		5
Minimum										(Overall: 0)		
	41	0	0	0	0	1	0	5	0	27	22	0
Maximum										(Overall:66.3)		
	66	61	31	32	66	66	66	66	66	66	66	20

Para evitar períodos secos, se establece un inicio de la estación de crecimiento a partir del día 118 (27 de abril) y una fecha de fin del período de crecimiento el día 347 (12 de diciembre). La duración del período de crecimiento es de aproximadamente ocho meses.

En el Cuadro 7 se presenta el porcentaje de ocurrencia mensual del inicio y fin de la EC para cada nivel de probabilidad. Se observa que el inicio de la estación de crecimiento para una probabilidad baja (20%), es en el mes de mayo, para el 40 y 60%, en mes de junio. El fin de la estación de crecimiento para el 40 y 60% se presenta en septiembre, para el 20% de octubre a diciembre. El Inicio y el Fin de la EC al 80% de probabilidad con mayor porcentaje en julio y agosto respectivamente.

Cuadro 7. Porcentaje de ocurrencia mensual del inicio y fin de la EC por nivel de probabilidad (%).

Inicio De La EC				
Nivel De Probabilidad	80%	60%	40%	20%
Enero	-	-	-	-
Febrero	-	-	-	0.9
Marzo	-	-	0.9	4.6
Abril	-	1.9	5.6	11.1
Mayo	1.9	6.5	27.8	55.6
Junio	15.7	49.1	62.0	17.6
Julio	61.1	42.6	3.7	-
Agosto	11.1	-	-	-
No Dato	10.2	0	0	10.2
Fin De La EC				
Julio	14.8	-	-	-
Agosto	28.7	26.9	-	-
Septiembre	7.4	30.6	33.3	0.9
Octubre	17.6	8.3	25.9	30.6
Noviembre	15.7	20.4	21.3	22.2
Diciembre	5.6	13.9	19.4	36.1
No Dato	10.2	0	0	10.2

3.4. Representatividad espacial de las variables; Inicio, Fin, Duración, NTDLL y PTDEC

En la Figura 5 se detalla para una un probabilidad del 80%, el inicio del período de crecimiento se presenta en un área mayor a partir del día juliano 180 al 220 que corresponden al mes de julio y parte de Agosto, mientras que para el 60%,

se presenta a partir del 14 de junio (día juliano 166) hasta el 25 de julio (día juliano 207), para el 40%, de mayo a junio y para el 20% en mayo.

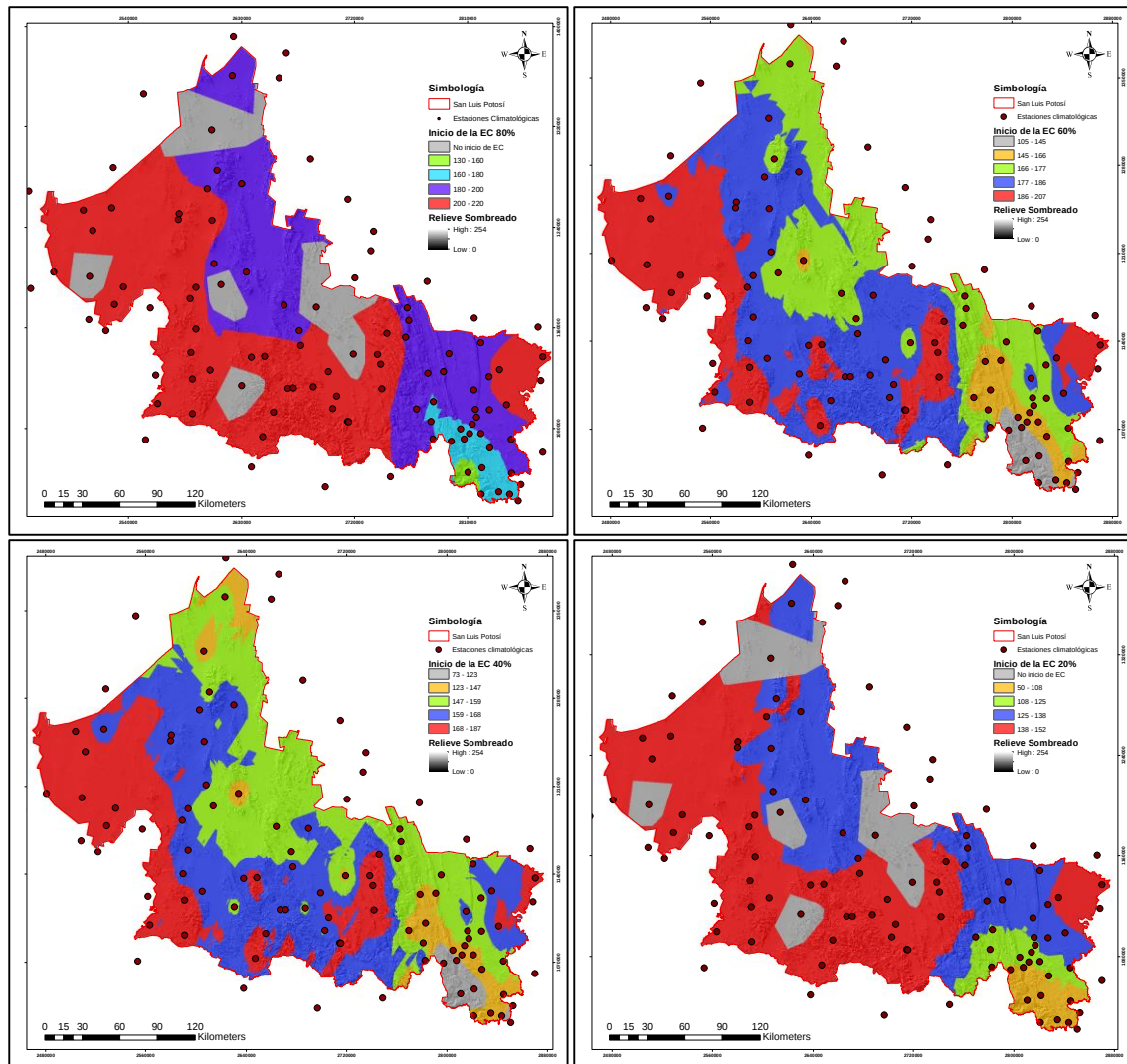


Figura 5. Distribución espacial del inicio de la EC al 80, 60, 40 y 20% de probabilidad.

En la Figura 6, el fin del período de crecimiento al 80 por ciento de probabilidad, se presenta el 8 de julio (día juliano 190) hasta el 24 de septiembre (día juliano 268) en la zona altiplano, media y centro del estado, al 60% en agosto, al 40% en septiembre y al 20% en septiembre y octubre.

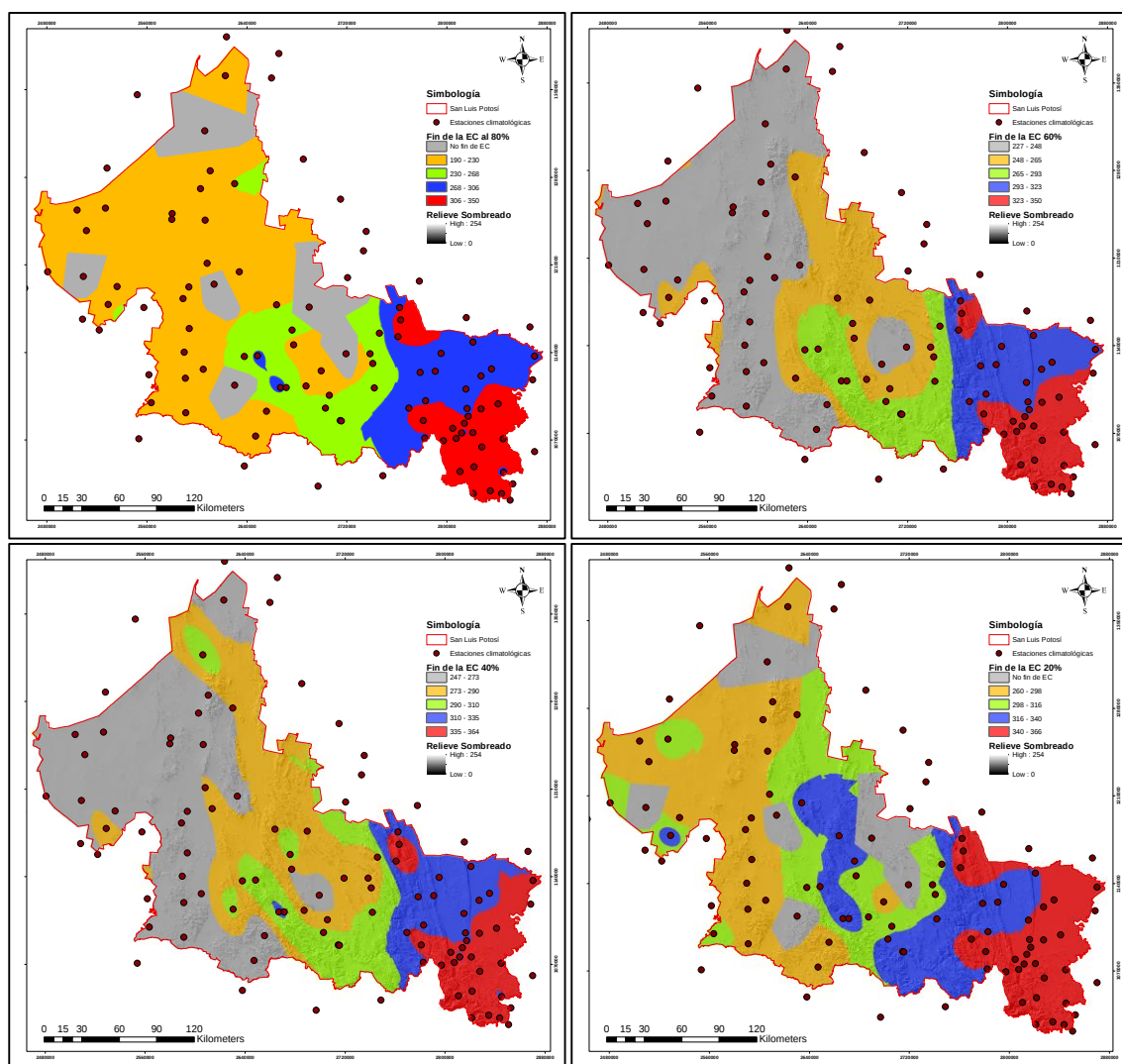


Figura 6. Distribución espacial del fin de la EC con diferentes niveles de probabilidad.

La duración del período de crecimiento al 80% de probabilidad, muestra áreas en las que no se presenta EC y áreas donde es muy arriesgado establecer cultivos bajo temporal. Con una probabilidad de 60%, la duración en la zona Media, Centro y Altiplano es de 30 a 120 días, y en la huasteca de 120 a 260 días, con forme disminuye la probabilidad (40 y 20%) la duración aumenta, aunque es poco

probable que los cultivos desarrollen adecuadamente, dado que con una probabilidad baja, es mayor el riesgo (Figura 7).

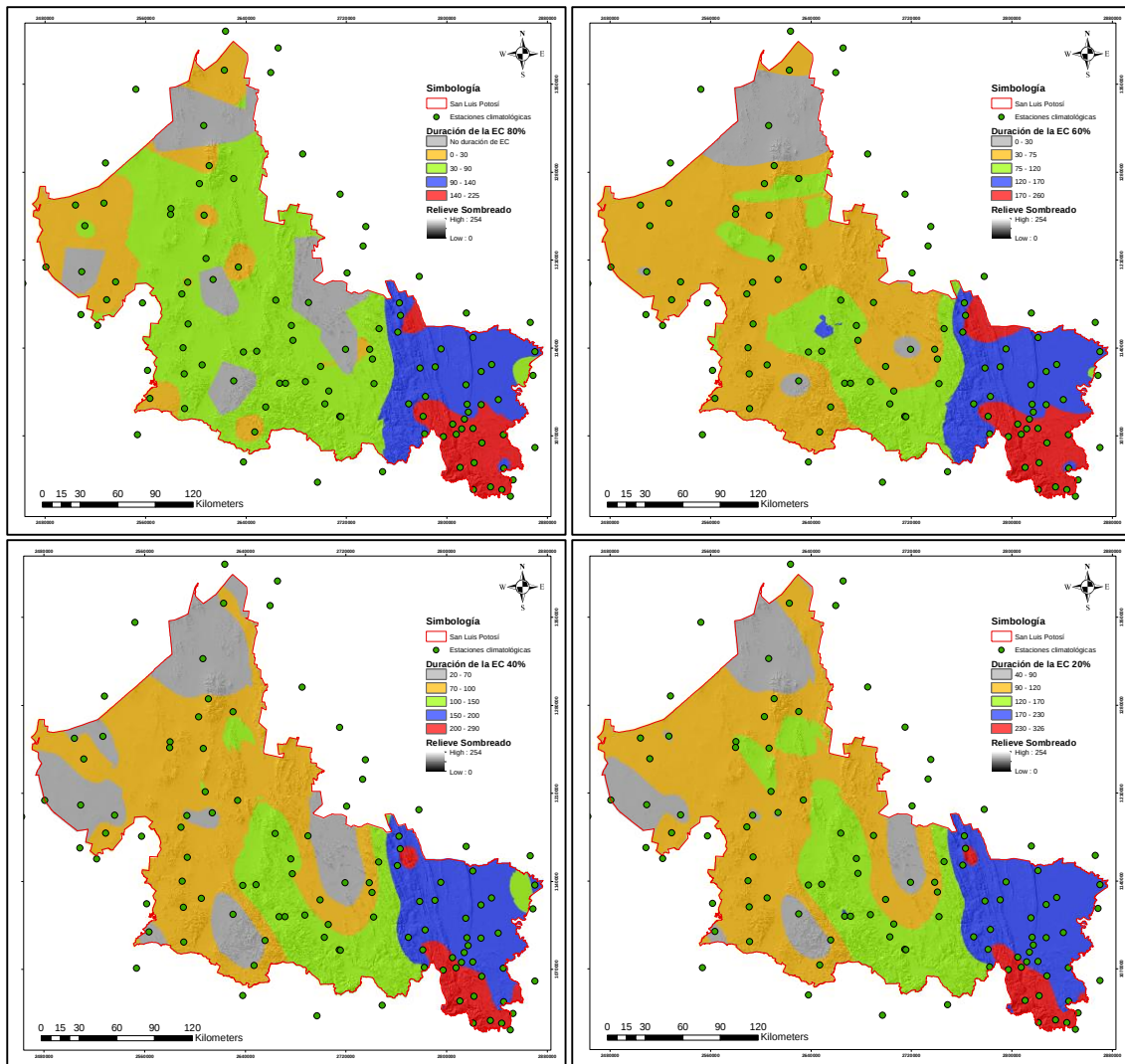


Figura 7. Distribución espacial de la duración de la EC con diferentes niveles de probabilidad.

El número total de días lluviosos durante la estación de crecimiento, permite definir e identificar áreas donde no se llevará a cabo agricultura de temporal, para los niveles 20, 40, 60, y 80% de probabilidad (Figura 8).

En la Figura 8, se observa un intervalo de hasta 90 días de lluvias para un 80% de probabilidad. Las zonas con menor disponibilidad de lluvias se encuentran hacia el norte del estado.

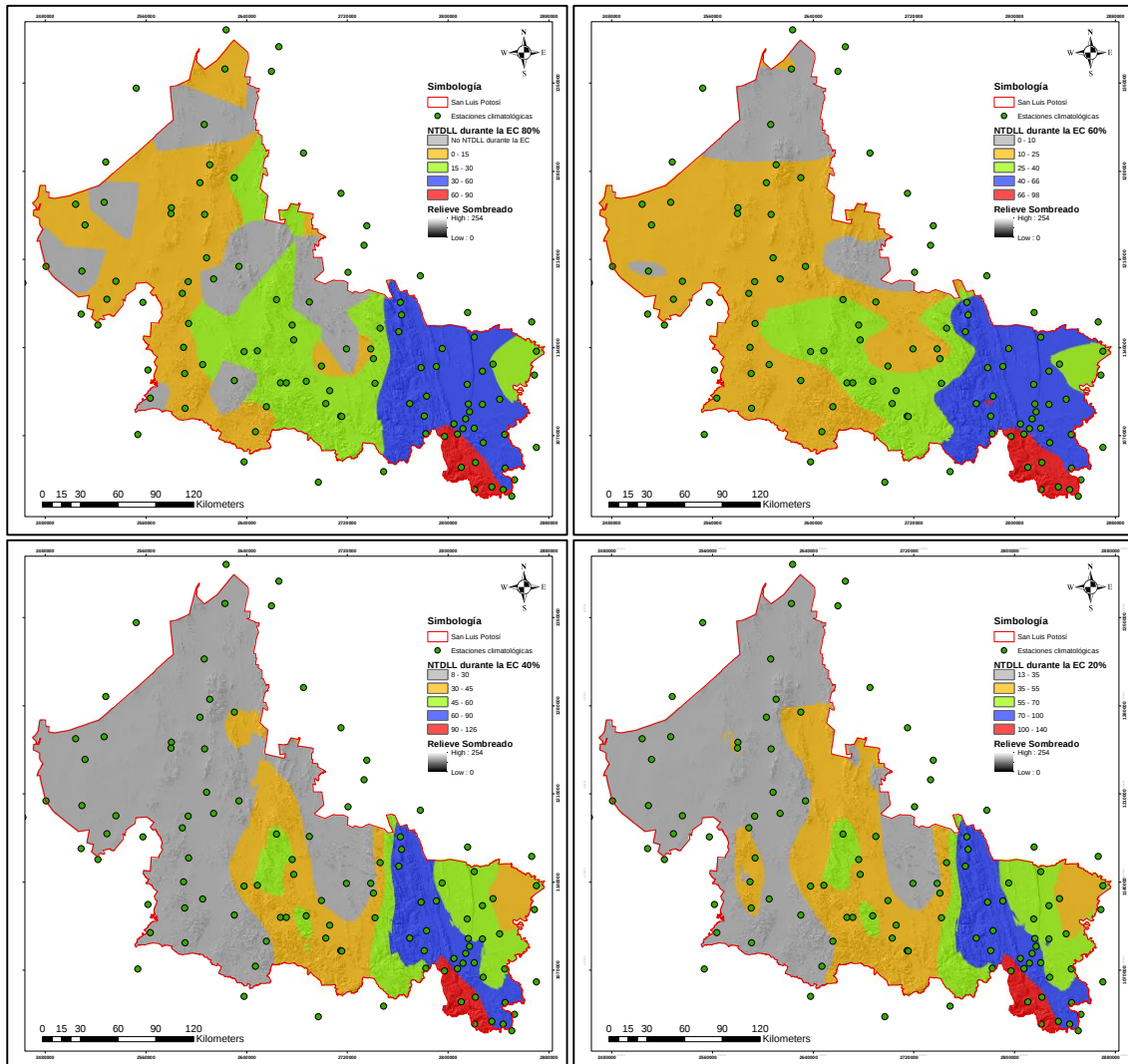


Figura 8. Distribución espacial del número total de días lluviosos durante la EC con diferentes niveles de probabilidad.

En la Figura 9, se muestra para un 80% de probabilidad, áreas donde no se presenta precipitación durante la estación de crecimiento y áreas con baja

precipitación entre los 25 y 325 mm. Lo que indica que es poco probable que se pueda llevar acabo agricultura de temporal.

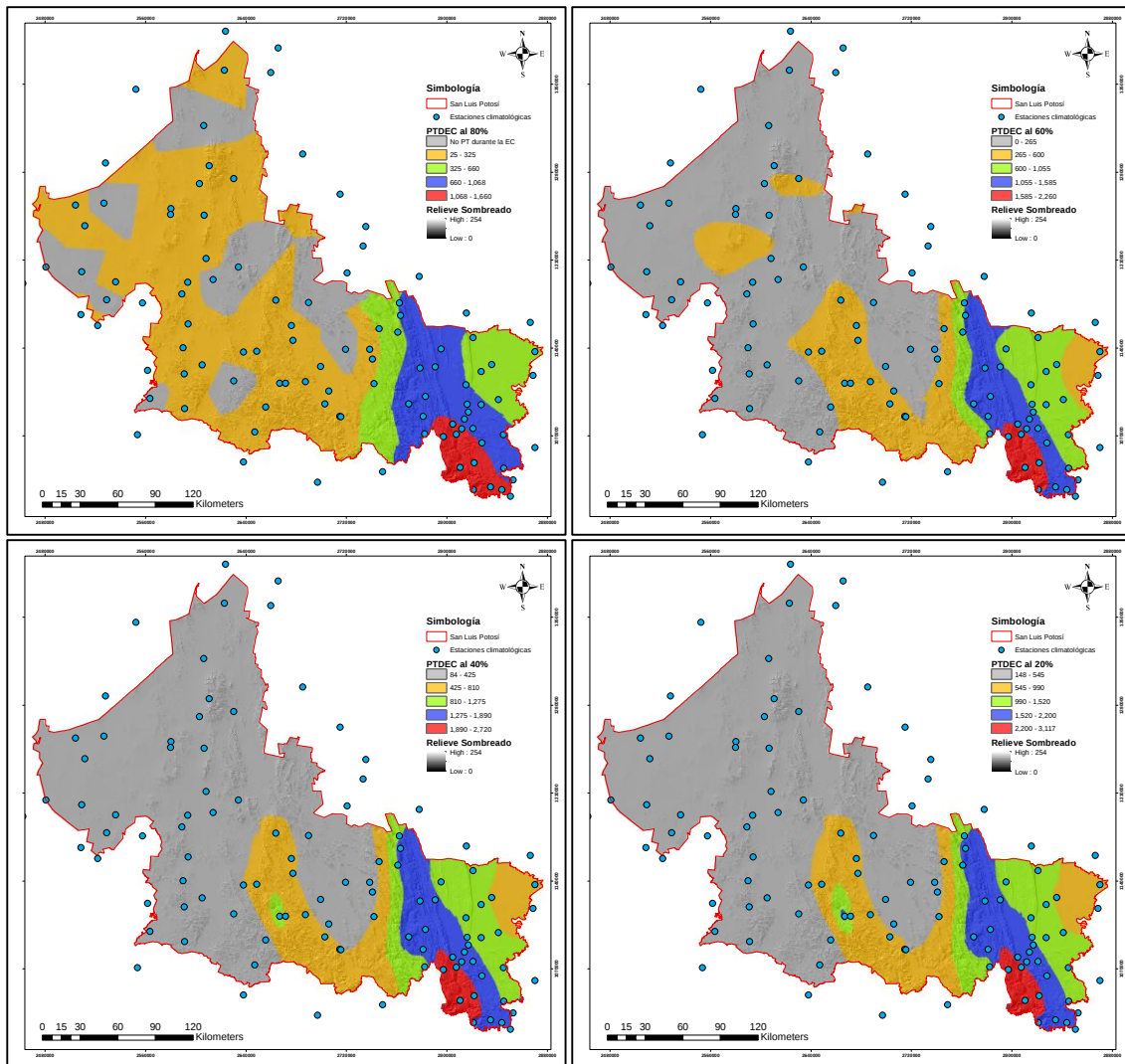


Figura 9. Distribución espacial de la Precipitación total durante la EC con diferentes niveles de probabilidad.

3.5. Áreas potenciales para el establecimiento de maíz y frijol

Del balance hídrico simple, se tomaron las variables precipitación total durante la estación de crecimiento (PTDEC), duración e inicio del período de crecimiento,

como parámetros para el establecimiento del maíz y frijol en el estado de San Luis Potosí.

De acuerdo a los criterios establecidos, en el Cuadro 8 se muestran 125 combinaciones de potencial. Las combinaciones se interpretan de la siguiente manera:

El primer valor de los tres dígitos, representa el nivel de potencial de precipitación, el segundo representa el de la variable duración y el tercero el del inicio del período de crecimiento (época de siembra). Por lo tanto:

- 111: Corresponde a la clase definida como: Muy alto, Muy alto, Muy alto.
- 222: Corresponde a la clase definida como: Alto, Alto, Alto.
- 333: Corresponde al nivel de potencial: Medio, Medio, Medio.
- 444: Corresponde al nivel de potencial: Bajo, Bajo, Bajo.
- 555: Corresponde al nivel de adaptación: Nulo, Nulo, Nulo.

Cuadro 8. Combinaciones posibles de adaptación.

Niveles de potencial								
111	135	214	243	322	351	425	454	533
112	141	215	244	323	352	431	455	534
113	142	221	245	324	353	432	511	535
114	143	222	251	325	354	433	512	541
115	144	223	252	331	355	434	513	542
121	145	224	253	332	411	435	514	543
122	151	225	254	333	412	441	515	544
123	152	231	255	334	413	442	521	545
124	153	232	311	335	414	443	522	551
125	154	233	312	341	415	444	523	552
131	155	234	313	342	421	445	524	553
132	211	235	314	343	422	451	525	554
133	212	241	315	344	423	452	531	555
134	213	242	321	345	424	453	532	

En la Figuras 10 y 11, se identifican las combinaciones obtenidas para los cultivo de maíz y frijol. Se obtuvieron 20 clasificaciones de potencial de 125 posibles para el cultivo de maíz, y 26 combinaciones de adaptación para el cultivo de frijol. El potencial más alto obtenido tanto en maíz como en frijol, es la combinación 112, que corresponde a una clasificación muy alta. La combinación 555 corresponde al nivel nulo, es decir, que la precipitación y la duración es nula, además de que no se presentó un inicio de la estación de crecimiento con un 80% de probabilidad en esa zona.

En la Figura 10 se muestra la delimitación de áreas con diferentes niveles de potencial de adaptación del cultivo de maíz en el estado de San Luis Potosí. Las necesidades hídricas del cultivo de maíz para obtener una cosecha cuyo rendimiento sea de 6–9 t/ha, varia de entre 500 y 800 milímetros (mm) de agua (Doorenbos y Kassam, 1979; FAO, 2015). Zamora *et al.* (2011), obtuvo un rendimiento de 9.27 t ha⁻¹ de maíz (variedad *Pionner* 30G40) con una lámina menor de 409 mm en una zona árida del municipio de la Paz Baja California Sur. En los resultados obtenidos, las áreas con un valor de muy alto potencial se localizan en la parte sur de la zona huasteca, la zonas con potencial nulo y bajo se localizan en el región altiplano y centro. La región media, presenta potenciales variados entre altos, medios y bajos.

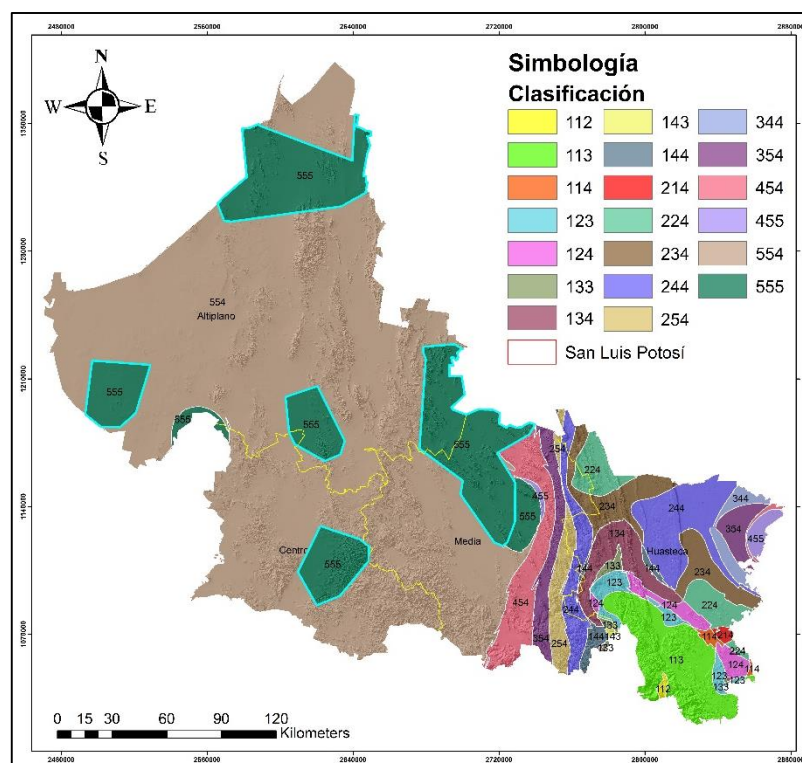


Figura 10. Áreas potenciales de adaptación del cultivo de maíz.

En la Figura 11 se identifica las regiones donde se puede producir con alto potencial el cultivo de frijol. En las regiones media y huasteca se encontraron mejores condiciones para el establecimiento del cultivo de frijol, se tiene un potencial desde la clasificación 112 hasta 235 en la zona huasteca y de la clasificación 135 hasta 555 para la región media. Martínez *et al.* (2008) reportan zonas con potenciales altos y medios, ubicadas en la región media y las de bajo potencial en el altiplano para el cultivo de frijol de temporal en el estado de San Luis Potosí. En este estudio, las regiones Altiplano y Centro, presentan una clasificación baja o nula de potencial de producción. La región Media presenta en mayor extensión de terreno, la clasificación baja y nula, aunque existen condiciones de potenciales altos y medios en áreas más pequeñas en la zona.

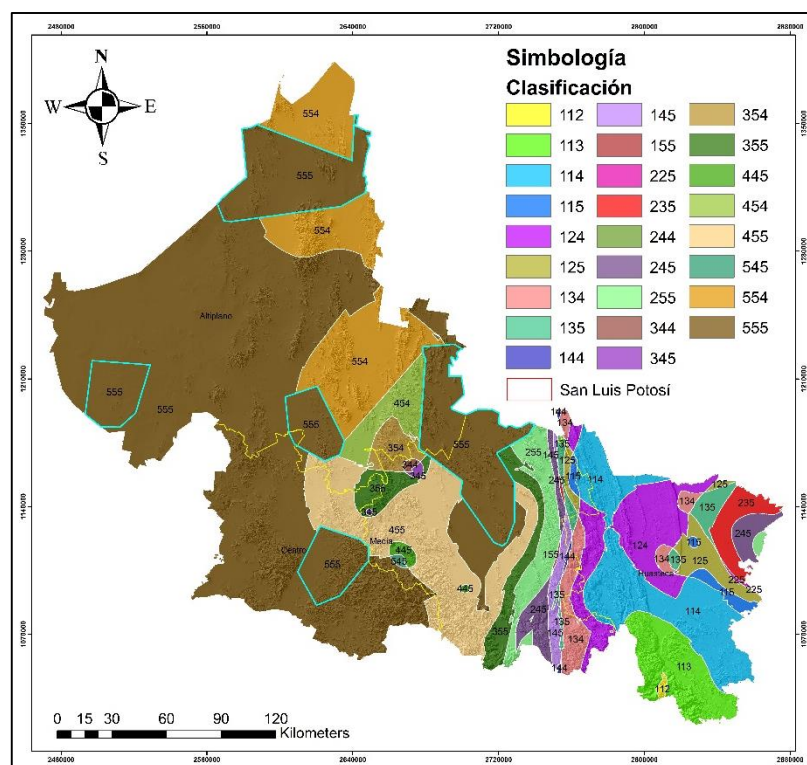


Figura 11. Áreas potenciales de adaptación del cultivo de frijol.

3.6. Modelos representativos de la relación DEC versus PTDEC, PTA, NTDLL, Inicio y Fin de la EC

Se analizó la relación entre la duración de la estación de crecimiento y las variables Precipitación total durante la estación de crecimiento (PTDEC), Precipitación total anual (PTA), Número de días lluviosos durante el período de crecimiento (NTDLL), Inicio y Fin del período de crecimiento. Se realizaron diversos diagramas de dispersión y se identificó la tendencia de los datos. Así mismo, se determinó el modelo que relaciona los datos con las técnicas de regresión lineal y polinómica de segundo orden para las probabilidades del 20, 40, 60 y 80%. En la Figura 12 se presenta en todos los casos un coeficiente de determinación (r^2) menor con la regresión lineal en comparación con la regresión

polinómica de segundo orden. Por lo tanto, la regresión cuadrática muestra un mejor ajuste.

La falta de datos e información meteorológica en México, ha llevado a buscar relaciones matemáticas para estimar a los períodos de crecimiento a partir de información de otras variables climatológicas disponibles. Pájaro y Ortiz (1992) describen dos modelos, donde se relaciona el inicio con la duración del período de crecimiento y la duración de la estación de crecimiento con la precipitación total anual. El coeficiente de determinación para los dos modelos son de 0.87 y 0.8 respectivamente. Estos modelos son buenos indicadores para la estimación de la duración y el inicio de la estación de crecimiento de la República Mexicana. En este estudio los modelos analizados presentan en promedio coeficientes de determinación mayores de 0.8, salvo en la relación de la variable duración y el inicio de la estación de crecimiento donde r^2 es menor de 0.6 (Cuadro 9 y 10).

En la Figura 12a) se identifica la relación duración versus precipitación total durante la EC al 80% de probabilidad, el coeficiente de determinación es mayor con la regresión cuadrática con un valor de 0.936 y 0.892 con la regresión lineal. En b) se muestra la relación de la duración de la estación de crecimiento y la precipitación total anual, se obtuvo un valor de 0.922 y 0.881 de r^2 con la regresión polinómica y lineal respectivamente. En c) se presenta un coeficiente de determinación de 0.941 con la regresión cuadrática y 0.915 con la regresión lineal, al comparar duración y el número total de días lluviosos durante el período de crecimiento. En d) el coeficiente de determinación fue de 0.575 con la regresión polinómica y 0.555 con la regresión lineal, en la relación de la duración

con el Inicio de la EC. La relación entre la duración y el Fin del período de crecimiento muestra un coeficiente de determinación de 0.926 con la regresión polinómica y 0.916 con la tendencia lineal con datos del 80% de probabilidad.

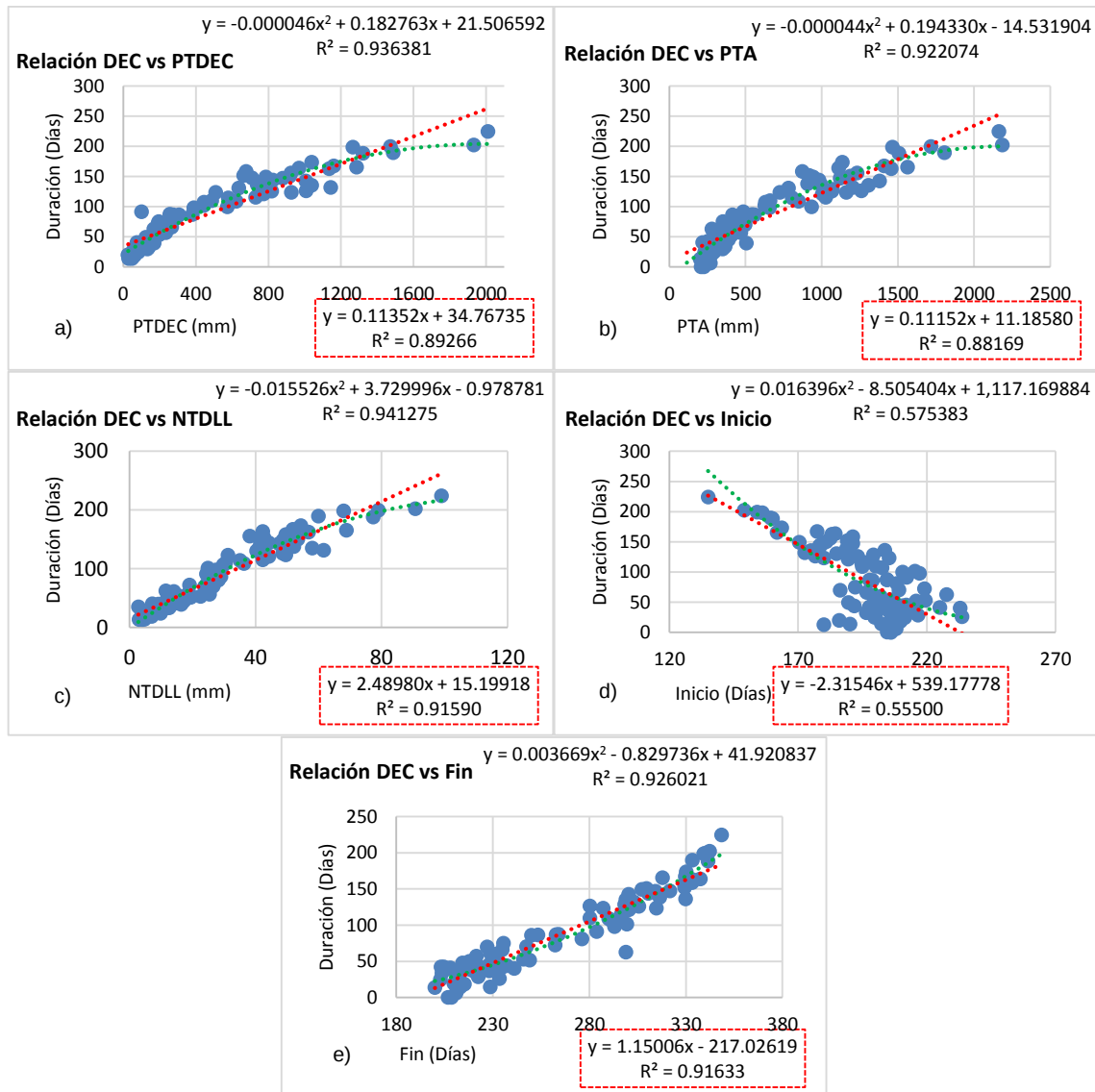


Figura 12. Diagrama de dispersión entre la DEC y la PTDEC, PTA, NTDLL, INICIO y FIN de la EC al 80% de probabilidad.

En el Cuadro 9 se muestran las ecuaciones obtenidas con la regresión cuadrática o polinómica de segundo orden y en el Cuadro 10 se presenta los modelos obtenidos con la regresión lineal, así como, el coeficiente de determinación (r^2).

Un modelo matemático es bueno para estimar cuando el coeficiente de determinación es, $r^2 > 0.80$ (Cai *et al.*, 2007). El índice estadístico r^2 permite determinar que los modelos obtenidos con la regresión polinómica de segundo orden, son más aproximados a la unidad que los modelos determinados con la regresión lineal en todos los casos.

Los modelos obtenidos de la relación de la variable duración y el número total de días lluviosos durante la estación de crecimiento (NTDLL), presenta un coeficiente mayor de 0.9 en las cuatro ecuaciones determinadas para los niveles de probabilidad del 20, 40, 60 y 80%. La relación más baja se obtuvo entre la variable duración y el inicio del período de crecimiento, dado que el r^2 fue de 0.368 hasta 0.575 (Cuadro 9).

Cuadro 9. Ecuación de regresión cuadrática y coeficiente de determinación por nivel de probabilidad analizado.

Relación entre la Precipitación total durante la EC (PTDEC) y la duración de la EC			
PROBABILIDAD	ECUACIÓN		r²
80%	DEC=	$-0.000046*PTDEC^2+0.182763*PTDEC+21.506592$	0.936381
60%	DEC=	$-0.000035*PTDEC^2+0.168252*PTDEC+27.658665$	0.940051
40%	DEC=	$-0.000023*PTDEC^2+0.141609*PTDEC+44.083032$	0.923993
20%	DEC=	$-0.000015*PTDEC^2+0.120644*PTDEC+64.235046$	0.899847
Relación entre la Precipitación total anual (PTA) y la DEC			
80%	DEC=	$-0.000044*PTA^2+0.194330*PTA+14.531904$	0.922074
60%	DEC=	$-0.000033*PTA^2+0.173340*PTA+1.643356$	0.924622
40%	DEC=	$-0.000022*PTA^2+0.145814*PTA+22.797509$	0.917701
20%	DEC=	$-0.000014*PTA^2+0.119373*PTA+47.478590$	0.897387
Relación entre el Número total de días lluviosos durante la EC (NTDLL) y la DEC			
80%	DEC=	$-0.015526*NTDLL^2+3.729996*NTDLL-0.978781$	0.941275
60%	DEC=	$-0.011273*NTDLL^2+3.478652*NTDLL+2.280068$	0.945408
40%	DEC=	$-0.008885*NTDLL^2+3.296872*NTDLL+6.805176$	0.934952
20%	DEC=	$-0.006331*NTDLL^2+3.021027*NTDLL+16.60560$	0.918136
Relación entre la Duración de la EC y el Inicio de la EC			
80%	DEC=	$0.016396*INICIO^2-8.505404*INICIO+1117.169884$	0.575383
60%	DEC=	$0.008647*INICIO^2-4.978725*INICIO+706.922272$	0.485218
40%	DEC=	$0.003744*INICIO^2-2.762589*INICIO+462.485362$	0.368568
20%	DEC=	$-0.002644*INICIO^2-1.250553*INICIO+375.220217$	0.558931
Relación de la Duración de la EC y el Fin de la EC			
80%	DEC=	$0.003669*FIN^2-0.829736*FIN+41.920837$	0.926021
60%	DEC=	$0.005179*FIN^2-1.631138*FIN+146.601494$	0.911700
40%	DEC=	$0.011258*FIN^2-5.360472*FIN+707.566395$	0.847804
20%	DEC=	$0.013148*FIN^2-6.774916*FIN+963.833695$	0.841281

En el Cuadro 10 se identifican 5 relaciones entre la duración de la EC y las variables; precipitación total durante la estación de crecimiento (PTDEC), la precipitación total anual (PTA), el número total de días lluviosos durante la estación de crecimiento (NTDLL), el inicio y el fin del período de crecimiento. Los modelos presentan un coeficiente de determinación mayor de 0.8, salvo la relación entre la duración y el inicio de la EC, que muestra un valor desde 3.6643 hasta 0.55709 de r^2 . Por lo tanto, se infiere que los modelos son altamente confiables, además, de tener una relación muy fuerte entre los datos observados y estimados.

Cuadro 10. Ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación (r^2).

Relación entre la Precipitación total durante la EC (PTDEC) y la duración de la EC			
PROBABILIDAD	ECUACIÓN		r^2
80%	DEC=	0.11352*PTDEC+34.76735	0.89266
60%	DEC=	0.10522*PTDEC+42.83985	0.90301
40%	DEC=	0.09321*PTDEC+58.87212	0.90020
20%	DEC=	0.08219*PTDEC+78.79302	0.88358
Relación entre la Precipitación total anual (PTA) y la DEC			
80%	DEC=	0.11152*PTA+11.18580	0.88169
60%	DEC=	0.10291*PTA+26.60318	0.89214
40%	DEC=	0.09228*PTA+44.82711	0.89620
20%	DEC=	0.08109*PTA+66.09703	0.88459
Relación entre el Número total de días lluviosos durante la EC (NTDLL) y la DEC			
80%	DEC=	2.48980*NTDLL+15.19918	0.91590
60%	DEC=	2.43332*NTDLL+19.01678	0.92729
40%	DEC=	2.32531*NTDLL+26.82204	0.92104
20%	DEC=	2.21131*NTDLL+37.25855	0.90899
Relación entre la Duración de la EC y el Inicio de la EC			
80%	DEC=	-2.31546*INICIO+539.17778	0.55500
60%	DEC=	-2.16256*INICIO+481.90554	0.47767
40%	DEC=	-1.71109*INICIO+391.11859	0.36643
20%	DEC=	-1.85133*INICIO+406.81584	0.55709
Relación de la Duración de la EC y el Fin de la EC			
80%	DEC=	1.15006*FIN-217.02619	0.91633
60%	DEC=	1.34527*FIN-271.96255	0.90013
40%	DEC=	1.50502*FIN-324.83697	0.81639
20%	DEC=	1.74258*FIN-404.06683	0.81602

4. CONCLUSIÓN

Las componentes de la estación de crecimiento, obtenidas con el balance hídrico simple y analizado con la distribución Normal estándar para diferentes niveles de probabilidad de excedencia, permiten identificar la distribución espacial de las fechas y duración en las que se desarrolla cualquier cultivo en condiciones ideales.

El número total de días lluviosos y precipitación total durante la estación de crecimiento, analizadas probabilísticamente, permiten tomar decisiones respecto a la disponibilidad de días y de lluvia que se presentan en el estado de San Luis Potosí. Se detallan zonas que sirven como punto de referencia para potencializar la agricultura de temporal y minimizar riesgos de producción.

Las zonas con menor período de crecimiento son las que se encuentran en la parte norte, noroccidente y centro del estado de San Luis Potosí. Por lo tanto, la zona huasteca cuenta con las mejores condiciones para la producción de cultivos bajo temporal.

Las variables precipitación total durante la estación de crecimiento, duración e inicio del período de crecimiento, presentan las mejores condiciones de adaptación para el establecimiento de los cultivos de maíz y frijol en las regiones huasteca y media. Las zonas altiplano y centro evidencian un bajo potencial de adaptación.

Los modelos obtenidos permiten conocer la duración de la estación de crecimiento con alto grado de significancia, conociendo cualquiera de las variables, Precipitación total durante la estación de crecimiento (PTDEC),

Precipitación total anual (PTA), Número total de días lluviosos durante el período de crecimiento (NTDLL), Inicio o Fin de la estación de crecimiento. Además de que son altamente correlativos con un coeficiente de determinación mayor a 0.8.

5. LITERATURA CITADA

- Allen, R. G.; Pereira L. S.; Raes D.; Smith M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. N°56. FAO. Italia, Roma. 323 p.
- Amador, G. A.; Granados L. E.; Mendoza, M. E. 2011. Tres aproximaciones para estimación y distribución espacio-temporal del balance hídrico: el caso de la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán, México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 76, 34-55.
- Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A. 2001. Componentes del balance hídrico y metodologías para su cálculo. En: Curso Internacional de Ingeniería de Drenaje Agrícola III. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.
- Benacchio, S.S. 1982. Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el Trópico Americano. FONAIAP Centro Nal. De Inv. Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Maracay, Venezuela. 202 p.
- Cai, J.; Liu, Y.; Lei, T.; Pereira S. L. 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages. Agricultural and Forest Meteorology. 145(1), 22-35.
- Chávez, R. E.; González, C. G.; González, B. J. L.; Dzul, L. E.; Sánchez, C. I.; López, S. A.; Chávez, S. J. A. 2013. Uso de estaciones climatológicas automáticas y modelos matemáticos para determinar la evapotranspiración. Tecnología y Ciencia del Agua 4(4), 115-126.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2015. Red de estaciones climatológicas: Estacionesclimatológicas.KML. Servicio Meteorológico Nacional (SMN)-Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México. DF.

- Crispín M., A.; Miranda, S. 1978. El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). In: Producción de granos y forrajes. Edit. Limusa. México, D.F. 541– 552.
- Demin, P.E. 2014. Calibración de la ecuación de Hargreaves para la determinación de la evapotranspiración de referencia en el Valle Central de Catamarca. *Revista de Climatología*. 14, 63-69.
- Doorenbos, J.; Kassam. A. H. 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO: Riego y Drenaje No. 33. FAO. Roma. 212p.
- Ferguson, B. K. 1996. Estimation of Direct Runoff in the Thornthwaite Water Balance. *The Professional Geographer*. 48(3), 263-271.
- González, C. M. 1984. Especies vegetales de importancia económica en México. Ed. Porrúa. México, 305 p.
- González, E. D. R.; Ruiz, C. J. A.; Lépez, I. R.; González, A. A.; López, A. E.; Ramírez, O. G.; Zarazúa, V. P.; Durán, P. N. 2011. Expectativas de adaptación al cambio climático de tres variedades de frijol en Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(1), 337-350.
- González, T. G.; Mendoza, H. F. M.; Covarrubias, P. J.; Morán, V. N.; Acosta, G. J. A. 2008. Rendimiento y calidad de semilla de frijol en dos épocas de siembra en la región del bajío. *Agricultura Técnica en México*, 34(4), 421-430.
- Infante, G. S.; Zárate de Lara, G. P. 2001. *Métodos Estadísticos*. 2da. Ed. México, DF. Trillas. 643 p.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2009. Eric III: Extractor rápido de información climatológica (versión 2.0. Disco). Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-IMTA. Jiutepec, Morelos, México.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2009. Evaluación de la vulnerabilidad y propuesta de medidas de adaptación a nivel regional de algunos cultivos básicos y frutales ante escenarios de cambio climático. Guadalajara, Jalisco. 65p.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2007. Regiones agropecuarias de San Luis Potosí. 69 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2012. Perspectivas estadísticas San Luis Potosí. 95 p.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). 2015. El cultivo de maíz y las condiciones climáticas. Argentina. En línea: http://www.engormix.com/el_cultivo_maiz_condiciones_s_articulos_699_AGR.htm. (Consultada: 16/09/2015).
- Larios, R. J.; Nuño, R. R. 1995. Evaluación de tierras: un estudio de caso para maíz en Jalisco. *Revista de Geografía Agrícola*, 21, 65-73.
- Lépiz, I. R. 1983. Origen y descripción botánica. In: Frijol en el Noroeste de México. Tecnologías de producción. SARH-INIA-CIPAC. CAEVACU. CPIEAS. Culiacán, Sin., México. pp. 29.
- Martínez, G. M. A.; Osuna, C. E. S.; Padilla, R. J. S.; Acosta, G. J. A.; Loredó, O. C. 2008. Tecnología para la producción de frijol en el norte centro de México. Libro técnico No. 4. SAGARPA-INIFAP-CIRNE. 216p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1997. Zonificación Agro-ecológica: Guía general. N°73. Roma. 96 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2015. Maize crop water management. En línea: http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_maize.html. (Consultada: 15/09/2015).
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Dirección de Estadística (FAOSTAT). 2015. En línea: <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/S>. (Consultada: 10/09/2015).
- Ortiz, S. C. A. 1987. Elementos de agrometeorología cuantitativa, con aplicaciones en la república mexicana. Tercera edición. Departamento de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 326 p.
- Pájaro, H. D.; Ortiz, S. C. A. 1992. Estimación del período de crecimiento por disponibilidad de agua y libre de heladas para la República Mexicana. *Revista de Geografía Agrícola*. 17(1), 119-125.

- Pereira, A. R. 2005. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. *Bragantia*. 64(2), 311-313.
- Raes, D.; Sithole, A.; Makarau, A.; Milford, J. 2004. Evaluation of first planting dates recommended by criteria currently used in Zimbabwe. *Agricultural and Forest Meteorology*. 125(3-4), 177-185.
- Rivera, H. B.; Aceves, N. L. A.; Juárez, L. J. F.; Palma, L. D. J.; González, M. R.; González, J. V. 2012. Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el estado de Tabasco, México. *Revista Avances en Investigación Agropecuaria*. 16(1), 29-47.
- Rosas, J. C. 2003. Recomendaciones para el manejo Agronómico del cultivo del frijol. Programa de Investigaciones en frijol, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Imprenta LitoCom, Tegucigalpa, Honduras, 33p.
- Ruiz, C. J. A. 1985. Informe anual de investigación. Programa de Agroclimatología. Documento inédito. INIA-CIANOC-C.E. Los Cañones. Jalpa, Zacatecas. 55 p.
- Ruíz, O. A.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A.; Ontiveros, C.R. E.; López, L. R. 2012a. Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia, trópico húmedo*, 28(1), 1-14.
- Ruíz, O. A.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A.; Ontiveros, C.R. E.; López, L. R. 2012b. Inicio de la estación de crecimiento y períodos secos en Tabasco, México. *Tecnología y Ciencia del Agua*, 3(2), 85-102.
- Said, I. G.; Zárate, G. P. 2001. Métodos Estadísticos. Segunda edición. México, DF. Trillas. 643 p.
- Sánchez, C. I.; Esquivel, A. G.; López, S. A.; Inzunza, I. M. A.; Catalán, V. E. A. 2011. Balance hídrico como fundamento para toma de decisiones en agricultura de temporal. *Relación Agua Suelo Planta - Agrofaz*, 2(1), 55-63.
- Santiago, R. S.; Arteaga, R. R.; Sangerman, J. D. M.; Cervantes, O. R.; Navarro, B. A. 2012. Evapotranspiración de referencia estimada con Fao-Penman-

- Monteith, Priestley-Taylor, Hargreaves y RNA. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 3(8), 1535-1549.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1977. Guía para la asistencia técnica agrícola. Instituto nacional de investigaciones agrícolas. Área de influencia del campo agrícola experimental "Bajío". 112p.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2009. Monitoreo Agroeconómico 2009 del estado de San Luis Potosí. Síntesis del sector agropecuario de San Luis Potosí. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 15p.
- Stern, R.; Rijks, D.; Dale, I.; Knock, J. 2006. *Instat climatic guide*. Tercera edición. Reading, UK. Universidad de Reading. 330 p.
- Tamarís, T. C.E.; López, H. J. S. 2006. Aproximación a la zonificación climática de la cuenca del Río Gaira. *Revista Intrópica*. 3, 69-76.
- Thornthwaite, C. W.; Mather R. J. 1955. The water balance. *Climatology, laboratory of climatology Drexel Institute of Technology*. 8, 1-104.
- Vázquez, S. V. 2011. Nuevas regiones del estado de San Luis Potosí: una expresión territorial de su integración funcional para la competitividad económica. *Investigaciones Geográficas*. 75, 103-117.
- Villalpando, I. J. F. 1989. Agroclimatología del maíz. En: *Memoria del Simposium Internacional sobre Tecnologías de Producción de Maíz*. Tomo I. FIRA. Guadalajara, Jalisco. 17-32.
- Zamora, S. S.; Ruis, E. H.; Beltrán, M. F. A.; Fenech, L. L.; Murillo, A. B.; Loya, R. J.; Troyo, D. E. 2011. Régimen hídrico del maíz en una zona árida, determinado en porcentajes de evaporación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(1), 181-186.

CAPÍTULO 5

PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ

Jesús Gallegos Cedillo¹, Ramón Arteaga Ramírez¹, Mario Alberto Vázquez

Peña¹, Juan Juárez Méndez²

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. ²Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco.

C.P. 56230. Chapingo, México. Email: gallegosjc_1@hotmail.com

RESUMEN

El análisis de frecuencia de los eventos extremos y la estimación de probabilidades de lluvia para la aplicación en la agricultura, permiten saber con qué frecuencia se recibirá una cantidad superior o inferior y tomar decisiones de operación y manejo. El objetivo del presente trabajo fue analizar y representar de manera temporal y espacial la precipitación máxima en 24 horas en el estado de San Luis Potosí. Se obtuvo la precipitación máxima en 24 horas (P24) y la fecha (día juliano) en que se produjo el evento extremo (DP24). Se analizó la precipitación máxima en 24 horas, con las funciones de distribución de probabilidad Normal, Log-Normal, Pearson III o Gamma de tres parámetros, Log-Pearson III y Gumbel. Se realizó la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, para elegir a la distribución de mejor ajuste. Se obtuvo la P24 y DP24

para los niveles 20, 40, 60 y 80% de probabilidad y los cuantiles para los períodos de retorno: 500, 200, 100, 50, 25 y 10 años. Se obtuvieron mapas que permiten representar de manera temporal y espacial la precipitación máxima en 24 horas en el estado de San Luis Potosí.

Palabras Clave: Eventos extremos, Precipitación máxima en 24 horas, Instat, Distribución de probabilidad.

ABSTRACT

The analysis of frequency of extreme events and the estimated chance of rain for use in agriculture, let you know how often a higher or lower amount will be received and make decisions of operation and management. The objective of this study was to analyze and represent spatial and temporal way the maximum precipitation in 24 hours in the state of San Luis Potosi. The maximum rainfall in 24 hours (Q24) and date (Julian day) occurred in the extreme event (DP24) was obtained. The maximum rainfall in 24 hours was analyzed, with probability distribution functions Normal, Log-Normal, Pearson III or three parameter Gamma, Log-Pearson III and Gumbel. Test Kolmogorov-Smirnov goodness of fit was performed to choose the best fitting distribution. The P24 and DP24 was obtained for levels 20, 40, 60 and 80% probability and quantile for return periods: 500, 200, 100, 50, 25 and 10 years. Maps can represent temporal and spatial way the maximum precipitation in 24 hours in the state of San Luis Potosi were obtained.

Keywords: Extreme events, maximum rainfall in 24 hours, Instat, probability distribution.

1. INTRODUCCIÓN

Los seres vivos se encuentran expuestos a fenómenos atmosféricos que representan un riesgo para el bienestar y el entorno (Magaña *et al.*, 2013). Un evento extremo meteorológico, es un fenómeno particular de un lugar y época del año, que se encuentra por encima o por debajo del percentil 90 o 10 de la función de probabilidad observada. A menudo hay que saber el riesgo de los eventos extremos, particularmente los que son perjudiciales, tales como, fuertes lluvias, caudales altos en los ríos, vientos fuertes o temperaturas extremas (Stern *et al.*, 2006). Estos fenómenos naturales dan origen a situaciones de inundación y sequía, provocando afectación en los múltiples sectores económicos. Con el análisis de frecuencia, se puede tomar medidas o decisiones que permitan reducir daños y riesgos ocasionados por lluvias extremas, permite a los ingenieros realizar diversos diseños y construir obras hidráulicas, para captar, controlar y conducir el incremento continuo de volumen de agua de lluvia (Ibáñez *et al.*, 2011). En general se puede decir que cuando se investiga la variabilidad de la lluvia y la estimación de probabilidades para su aplicación en la agricultura, se trata de saber con qué frecuencia se recibirá una cantidad superior o inferior a ella (Nájera y Arteaga, 1998).

En estadística existen decenas de funciones de distribuciones de probabilidad teóricas; de hecho, existen tantas que obviamente no es posible probarlas todas. Por lo tanto, es necesario escoger, las que mejor se adapten al problema de análisis (Aparicio, 2007). Los modelos o funciones de distribución más utilizadas son: Normal, Log-Normal, Pearson III, Log-Pearson III, Gumbel y General de

Valores Extremos, y han sido aplicados en diferentes estudios (Zorraquino, 2004; Miranda *et al.*, 2009; Ibáñez *et al.*, 2011). Para la selección del modelo más adecuado, existen diversas pruebas y procedimientos para elegir la distribución de ajuste, como son: Análisis gráfico, Método del error cuadrático mínimo, la prueba Kolmogorov-Smirnov, prueba de Smirnov y Prueba χ^2 , descritas por Nájera y Arteaga (1998), Aparicio (2007) y Chow *et al.* (1996).

La distribución de la precipitación en México, varía en espacio y tiempo, es heterogénea a lo largo del año y geográficamente aumenta en dirección norte-sur debido a la influencia de la latitud, la proximidad al Océano Pacífico y Golfo de México, así como, la orografía del país y los rasgos de circulación atmosférica (García, 2003). Así mismo, el estado de San Luis Potosí, presenta importantes contrastes debidos a las condiciones geográficas, orográficas y climáticas del estado, representados por la variación espacial y temporal de la precipitación y temperatura. De acuerdo a estas características, el INEGI junto con el Gobierno del Estado han dividido a San Luis Potosí en cuatro zonas o regiones naturales: huasteca, centro, media y Altiplano (Vázquez, 2011). El objetivo del presente trabajo fue representar de manera temporal y espacial la precipitación máxima en 24 horas, analizada con cinco funciones de distribución al 20, 40, 60 y 80 por ciento de probabilidad en el estado de San Luis Potosí.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción del área de estudio

San Luis Potosí se fundó, como Estado Libre y Autónimo, en 1824. La superficie total del estado es de 60,546.79 km² y representa aproximadamente el tres por

ciento de la superficie total del país (INAFED, 2010). La hidrología del estado se nutre de una precipitación pluvial que varía desde unos 410 a más de 2,000 mm anuales, con la época principal de lluvias en verano y otra de menor importancia en invierno, que genera corrientes intermitentes en la mayor parte de la entidad y corrientes perennes en la región oriental y suroriental (SGM, 2011).

2.2. Bases de datos climatológicas

Se analizaron 27 años de registros diarios de precipitación del período 1984 al año 2010, tomados de las bases de datos climatológicas, Eric III 2.0 del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2009) y la red de estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015).

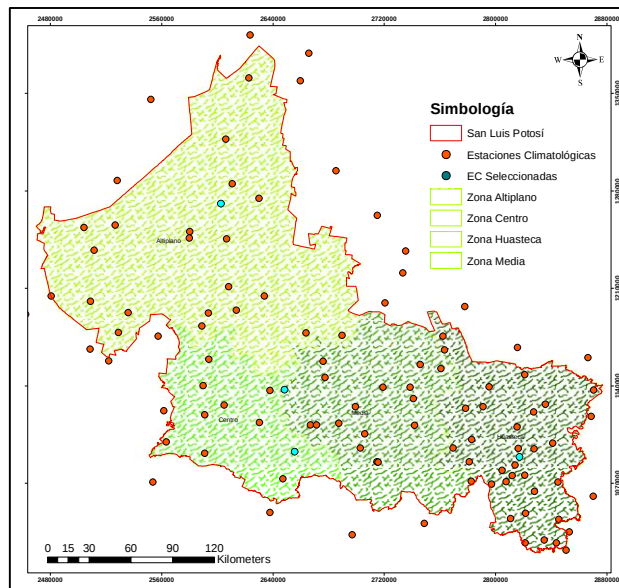


Figura 1. Zona de estudio y red de estaciones climatológicas.

Por la gran cantidad de información procesada en este trabajo, solamente se hace mención de las estaciones climatológicas San Nicolás Tolentino (24071, media), San José Alburquerque, Santa María del Río (24067, Centro), La Maroma, Real de Catorce (24033, Altiplano) y Las Moritas, Ciudad Valles (24037,

Huasteca) una por zona geográfica. Con la finalidad de ilustrar de mejor manera los resultados (Figura 1).

2.3. Determinación de la precipitación máxima en 24 horas

El programa Instat, cuenta con herramientas específicas para el análisis de información diaria, mensual y anual. También, con procedimientos que facilitan la obtención de valores extremos, principalmente los que son perjudiciales, tales como fuertes lluvias, caudales altos que propician inundaciones, temperaturas extremas (caliente o frío) y vientos fuertes (Stern *et al.*, 2006). Se obtuvo la precipitación máxima en 24 horas (P24) y la fecha (día juliano) en que se produjo el evento extremo (DP24) con el procedimiento descrito por Stern *et al.* (2006).

2.4. Procesamiento estadístico de lluvias máximas diarias

Una vez obtenida la base climática y la información de las estaciones climatológicas representativas de zona de estudio, se determinó la precipitación máxima en 24 horas para los niveles 20, 40, 60 y 80% de probabilidad y los cuantiles para los períodos de retorno: 500, 200, 100, 50, 25 y 10 años, usando las funciones de distribución de probabilidad Normal, Log-Normal, Pearson III o Gamma de tres parámetros, Log-Pearson y Gumbel, acorde a la metodología presentada en Aparicio (2007), Chow *et al.* (1996) y McCuen (1998).

2.5. Prueba de bondad de ajuste

Se utilizó la prueba Kolmogorov-Smirnov, que consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la probabilidad observada $F_o(X)$ y la estimada que se desea probar su ajuste $F(X)$. Con un valor crítico D que depende del número de datos y el nivel de significancia (Nájera y Arteaga, 1998).

$$D = \text{máx}|F_0(X) - F(X)| \dots \dots \dots (1)$$

La probabilidad observada, se determina con la Ecuación 2, donde m es el número de orden del dato en una lista ordenada de mayor a menor, y n es el número total de datos.

$$F_0 = 1 - \frac{m}{n + 1} \dots \dots \dots (2)$$

Si $|D_{\text{máx}}| < |d_{\text{tabulado}}|$, entonces existe buen ajuste. En el Cuadro 1, se reporta algunos valores de d_{tabulada} .

Cuadro 1. Valores críticos (d) para la prueba Kolmogorov-Smirnov de bondad del ajuste.

Tamaño de la muestra	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
5	0.51	0.56	0.67
10	0.37	0.41	0.49
15	0.3	0.34	0.4
20	0.26	0.29	0.35
25	0.24	0.26	0.32
30	0.22	0.24	0.29
40	0.19	0.21	0.25
n grande	$1.22/\sqrt{n}$	$1.36/\sqrt{n}$	$1.63/\sqrt{n}$

Fuente: Aparicio, 2007.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Precipitación máxima diaria

Se analizaron 27 años de 108 estaciones climatológicas (ECL). En la Figura 2, se observa la marcha de la precipitación diaria en la estación San Nicolás Tolentino, San José Alburquerque, Santa María del Río, La Maroma, Real de Catorce y Las Moritas, Ciudad Valles, San Luis Potosí.

En la Figura 2 se observa que la precipitación máxima diaria en el año 1992 fue aproximadamente 200 mm y se presentó el día 139 (18 de mayo) en la estación 24071. La precipitación máxima en la estación 24067 tuvo lugar el día 264 (20 de

septiembre) con una precipitación de 126.5 mm. De igual manera se identifica que la temporada de lluvias en la estación 24071, para el año 1992, fue a partir del día 130 (9 de mayo) hasta el 295 (21 de octubre) aproximadamente. Para el año 1993 en la estación 24067 se muestra el período de lluvias a partir del día 130 (9 de mayo) al 310 (5 de noviembre).

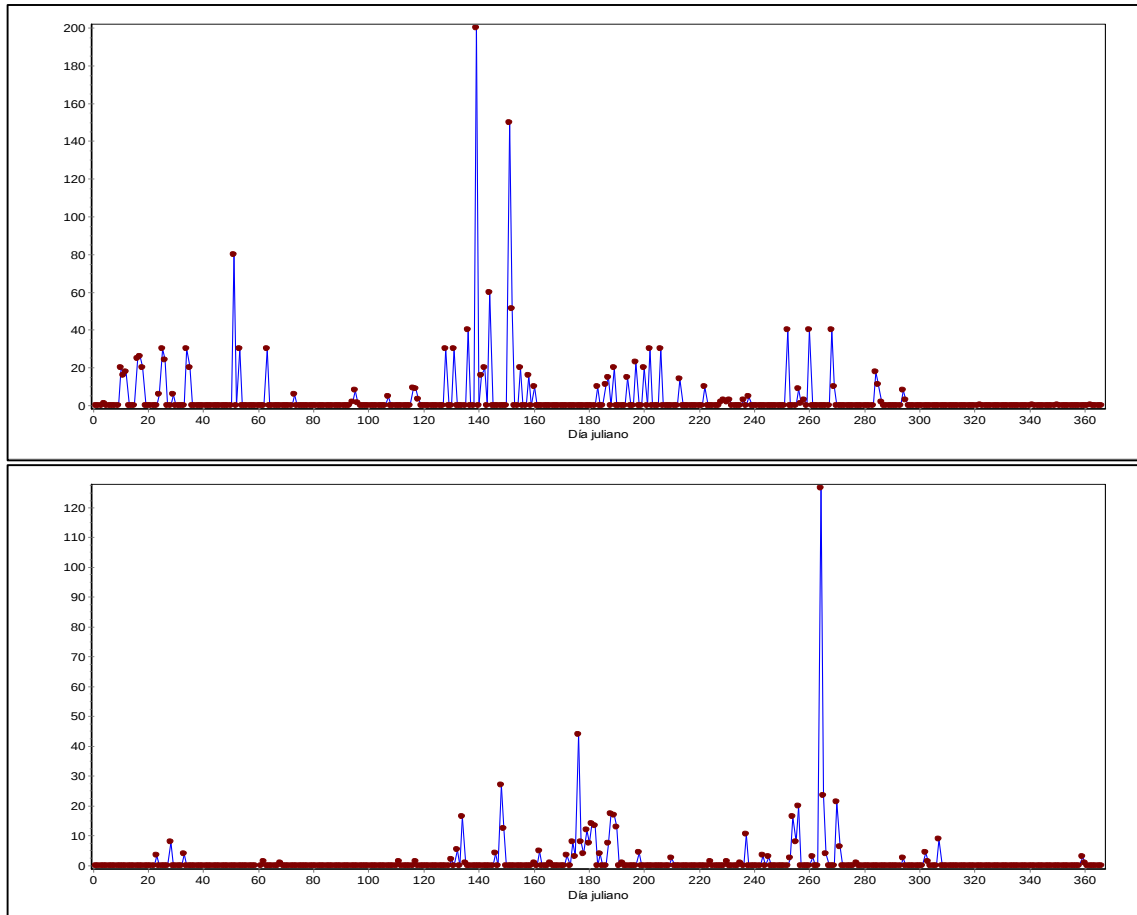


Figura 2. Precipitación diaria del año 1992 y 1993, Estación 24071 y 24067 respectivamente.

En la Figura 3 se ilustra que la precipitación máxima diaria en el año 1991 en la estación 24033 se presentó el día 128 (7 de mayo) con valor de 140 mm. Así mismo, se observa que en el año 1993 en la estación 24037 tuvo lugar una

precipitación máxima diaria de 391 mm el día 265 (21 de septiembre). En la estación 24033 para el año 1991, se presentó la época de lluvias a partir del día 128 (7 de mayo) y finalizó el día 260 (16 de septiembre). De acuerdo a la marcha de precipitación diaria en el año 1993 en la estación 24037, el inicio de la época de lluvias fue el día 140 (19 de mayo) y concluyó el día 270 (26 de septiembre).

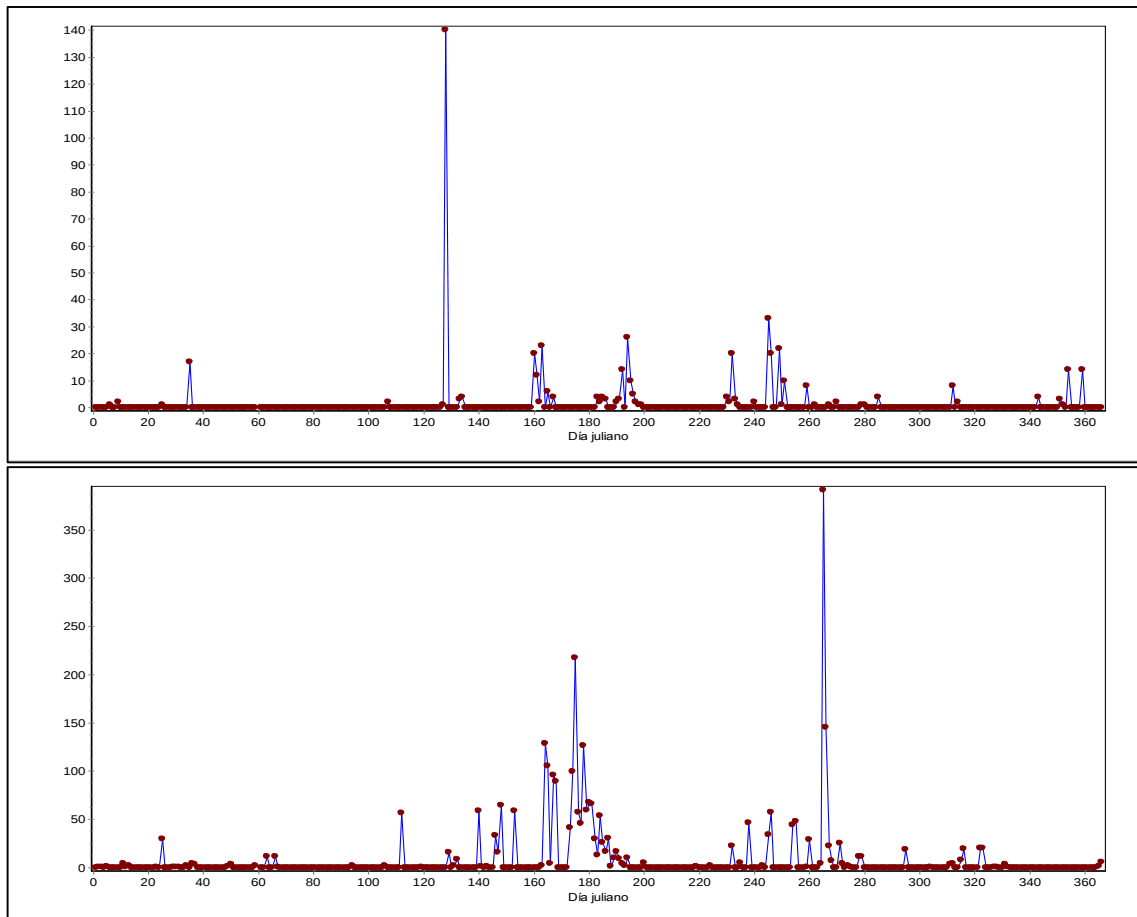


Figura 3. Precipitación diaria en las estaciones 24033 (año 1991) y 24037 (año 1993).

Los resultados numéricos del Cuadro 2, confirman el resultado de la Figura 2 y 3. También, se muestra la precipitación máxima en 24 horas para los 27 años analizados y el día juliano en que se presentó el evento.

**Cuadro 2. Lluvia máxima en 24 horas (P24) y día juliano del evento (DP24),
estación 24071, San Nicolás Tolentino, San Luis Potosí.**

Año	DP24	P24	Año	DP24	P24
1984	194	60.1	1998	257	40
1985	207	52	1999	236	74
1986	194	40	2000	217	90
1987	272	55	2001	225	65
1988	229	31	2002	227	103
1989	242	36	2003	250	73
1990	295	53	2004	129	55
1991	190	60	2005	187	45
1992	139	200	2006	288	35
1993	272	130	2007	200	65
1994	291	75	2008	237	40
1995	226	49	2009	150	45
1996	260	72	2010	185	69.5
1997	226	46			

La precipitación máxima diaria varía de 31 a 200 mm y se presenta a partir del día 129 (8 de Mayo) al 295 (20 de Octubre).

3.2. Probabilidad de precipitación máxima diaria

Una vez obtenidos los valores de la cantidad de P24 y los valores de DP24. Se analizó su variación probabilística, notando que la distribución es muy parecida en todos los casos como se muestra en el Cuadro 3.

**Cuadro 3. Probabilidades de lluvia para diferentes distribuciones, estación
24071, San Nicolás Tolentino, San Luis Potosí.**

m	P24	Log₁₀P24	Empírica	Normal	Log-Normal	Pearson III	Log-Pearson III	Gumbel
1	200.0	2.30	0.964	1.000	0.998	0.990	0.988	0.992
2	130.0	2.11	0.929	0.969	0.971	0.943	0.950	0.927
3	103.0	2.01	0.893	0.861	0.908	0.885	0.899	0.837
4	90.0	1.95	0.857	0.762	0.843	0.837	0.850	0.765
5	75.0	1.88	0.821	0.611	0.715	0.751	0.755	0.651
6	74.0	1.87	0.786	0.600	0.704	0.744	0.746	0.642
7	73.0	1.86	0.750	0.589	0.693	0.737	0.737	0.633
8	72.0	1.86	0.714	0.578	0.681	0.729	0.728	0.623
9	69.5	1.84	0.679	0.550	0.650	0.708	0.703	0.600
10	65.0	1.81	0.643	0.498	0.589	0.666	0.651	0.555
11	65.0	1.81	0.607	0.498	0.589	0.666	0.651	0.555
12	60.1	1.78	0.571	0.443	0.515	0.612	0.583	0.503
13	60.0	1.78	0.536	0.441	0.513	0.611	0.581	0.502
14	55.0	1.74	0.500	0.386	0.430	0.543	0.497	0.446

15	55.0	1.74	0.464	0.385	0.430	0.542	0.497	0.446
16	53.0	1.72	0.429	0.364	0.395	0.511	0.459	0.423
17	52.0	1.72	0.393	0.353	0.378	0.494	0.439	0.411
18	49.0	1.69	0.357	0.322	0.325	0.437	0.375	0.377
19	46.0	1.66	0.321	0.292	0.272	0.369	0.307	0.342
20	45.0	1.65	0.286	0.282	0.255	0.343	0.283	0.330
21	45.0	1.65	0.250	0.282	0.255	0.343	0.283	0.330
22	40.0	1.60	0.214	0.235	0.173	0.165	0.164	0.273
23	40.0	1.60	0.179	0.235	0.173	0.165	0.164	0.273
24	40.0	1.60	0.143	0.235	0.173	0.165	0.164	0.273
25	36.0	1.56	0.107	0.202	0.116	---	0.078	0.230
26	35.0	1.54	0.071	0.194	0.104	---	0.060	0.219
27	31.0	1.49	0.036	0.164	0.060	---	0.011	0.179

En la Figura 4, se muestra el comportamiento de la P24 ajustadas a cinco distribuciones de probabilidad. Así mismo, se identifica el valor de P24 para el 20, 40, 60 y 80% de probabilidad.

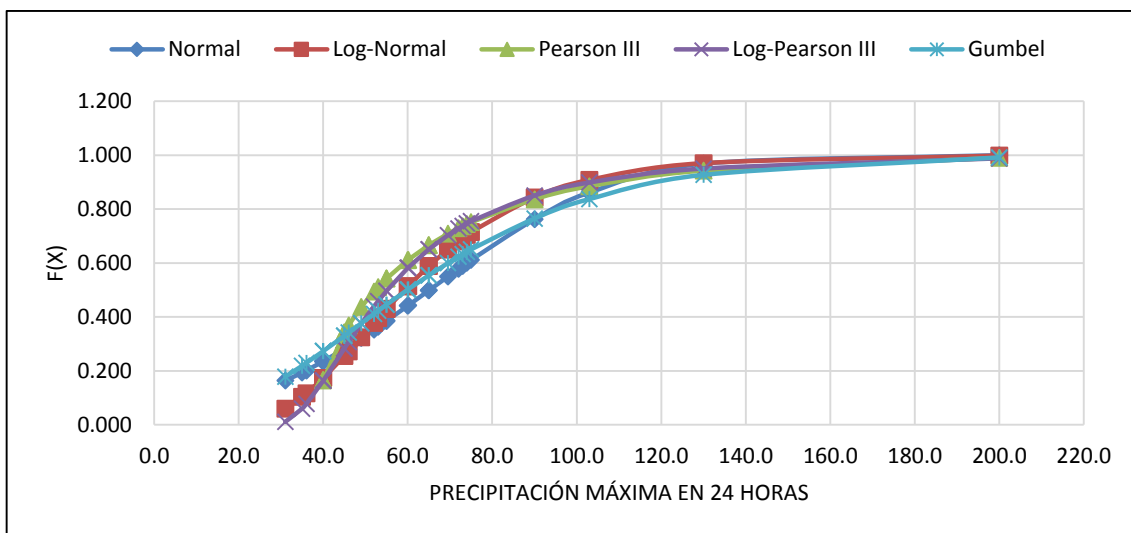


Figura 4. Curvas de probabilidad de P24 en la estación 24071, San Nicolás Tolentino, San Luis Potosí.

En el Cuadro 4, se resume los valores de P24 obtenidos para los diferentes niveles de probabilidad con la distribución Normal, Log-Normal, Gamma-3, Log-Pearson III y Gumbel. Además, se identifican valores muy similares entre la distribución normal y Gumbel, al igual que entre la distribución Log-Normal, Gamma-3 y Log-Pearson III.

Cuadro 4. Lectura probabilística de precipitación máxima, estación 24071, San Nicolás Tolentino.

Distribución de probabilidad	0.8	0.6	0.4	0.2
Normal	35.80	56.30	73.96	94.47
Log-Normal	41.69	53.26	65.77	84.03
Gamma-3	40.75	47.31	59.13	82.68
Log-Pearson III	43.25	57.20	69.87	84.34
Gumbel	33.16	51.01	69.53	95.78

Finalmente, para seleccionar la distribución que mejor se ajusta a la serie de datos, se aplica la prueba Kolmogorov-Smirnov.

3.3. Prueba Kolmogorov-Smirnov

El valor crítico *d tabulado*, se obtuvo mediante interpolación del Cuadro 1, entrando con 27 años de análisis y un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Por lo tanto *d tabulado* = 0.2520.

Cuadro 5. Valores absolutos de la diferencia entre la probabilidad observada y la estimada, estación 24071, San Nicolás Tolentino, SLP.

m	P24	Empírica	Normal	Log-Normal	Pearson III	Log-Pearson III	Gumbel
1	200.0	0.964	0.036	0.034	0.026	0.024	0.027
2	130.0	0.929	0.040	0.042	0.014	0.022	0.002
3	103.0	0.893	0.031	0.015	0.008	0.006	0.056
4	90.0	0.857	0.095	0.014	0.021	0.007	0.092
5	75.0	0.821	0.210	0.106	0.070	0.066	0.171
6	74.0	0.786	0.185	0.082	0.041	0.039	0.144
7	73.0	0.750	0.161	0.057	0.013	0.013	0.117
8	72.0	0.714	0.136	0.033	0.015	0.014	0.091
9	69.5	0.679	0.129	0.028	0.030	0.025	0.079
10	65.0	0.643	0.144	0.054	0.024	0.008	0.088
11	65.0	0.607	0.109	0.018	0.059	0.044	0.052
12	60.1	0.571	0.129	0.057	0.041	0.012	0.069
13	60.0	0.536	0.094	0.023	0.075	0.046	0.034
14	55.0	0.500	0.114	0.070	0.043	0.003	0.054
15	55.0	0.464	0.079	0.035	0.078	0.032	0.019
16	53.0	0.429	0.065	0.033	0.082	0.030	0.006
17	52.0	0.393	0.040	0.015	0.101	0.046	0.019
18	49.0	0.357	0.035	0.032	0.080	0.018	0.020
19	46.0	0.321	0.030	0.049	0.047	0.015	0.020
20	45.0	0.286	0.004	0.030	0.057	0.003	0.045
21	45.0	0.250	0.032	0.005	0.093	0.033	0.080
22	40.0	0.214	0.021	0.041	0.049	0.051	0.059
23	40.0	0.179	0.057	0.005	0.013	0.015	0.095
24	40.0	0.143	0.093	0.030	0.022	0.021	0.131
25	36.0	0.107	0.094	0.009	---	0.029	0.122
26	35.0	0.071	0.122	0.032	---	0.011	0.148
27	31.0	0.036	0.128	0.024	---	0.025	0.143
Dmáx =			0.2100	0.1062	0.1009	0.0664	0.1708

A partir de los cálculos realizados, se observa que todas las distribuciones se ajustan a los datos de precipitación analizados de la estación 24071 para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ (Cuadro 5). La distribución Log-Pearson III es la que mejor se ajusta con una diferencia máxima de 0.0664.

Posteriormente, se aplicó el procedimiento a las 108 estaciones climatológicas. En el Cuadro 6, se muestra el porcentaje de la distribución de probabilidad que mejor se ajusta al mayor número de ECL, siendo la distribución Log-Pearson III, con un porcentaje de 48.1 y un número de 52 ECL.

Cuadro 6. Número y Porcentaje de estaciones climatológicas que se ajustan a las distribuciones analizadas para los valores de P24.

Distribución de probabilidad	ECL	Porcentaje
Normal	0	0.0
Log-Normal	16	14.8
Gamma-3	24	22.2
Log-Pearson III	52	48.1
Gumbel	16	14.8
Total de Estaciones climatológicas	108	100.00

Se realizó el mismo procedimiento para los valores correspondientes a las fechas (días julianos) en que se presenta la precipitación máxima diaria. La función de probabilidades que mejor se ajusta a los datos de DP24, es la distribución Pearson III o Gamma de tres parámetros, con un porcentaje de 50.9 en 55 ECL como se observa en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Número y Porcentaje de estaciones climatológicas que se ajustan a las distribuciones analizadas para las fechas de DP24.

Distribución de probabilidad	ECL	Porcentaje
Normal	23	21.3
Log-Normal	0	0.0
Gamma-3	55	50.9
Log-Pearson III	24	22.2
Gumbel	6	5.6
Total de Estaciones climatológicas	108	100.00

3.4. Período de retorno

El conocimiento de los eventos extremos para diferentes períodos de retorno, son importantes en la proyección, construcción y dimensionamiento de obras hidráulicas. El período de retorno considerado para el diseño, depende de la importancia social y económica de la región.

En el Cuadro 8, se muestra la precipitación máxima en 24 horas, que se presenta cada período de años (período de retorno). Se identifica que la distribución Log-Pearson III, varia muy poco conforme aumenta el período de retorno.

Cuadro 8. Cuantiles de P24 en la estación 24071.

T	F	Normal	Log-Normal	Pearson III	Log-Pearson-III	Gumbel
Años	1-(1/T)			P24		
500	0.998	165.45	196.19	267.36	120.50	245.16
200	0.995	154.91	172.98	229.01	116.96	216.07
100	0.99	146.21	155.92	200.31	113.54	194.02
50	0.98	136.71	139.19	171.98	109.28	171.90
25	0.96	126.15	122.69	144.12	103.92	149.61
10	0.9	109.80	100.92	108.38	94.39	119.56

La distribución Pearson III arroja una precipitación mayor de acuerdo los períodos de retorno analizados, seguido por la distribución Gumbel. La distribución Normal y Log-Normal tienen un comportamiento y valores similares (Figura 5).

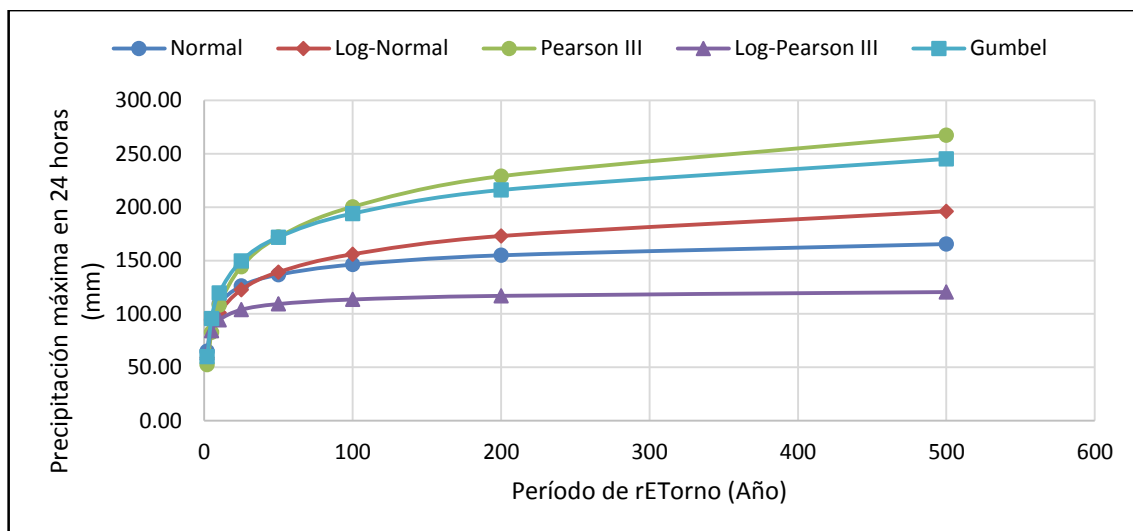


Figura 5. Período de retorno vs precipitación máxima diaria.

3.5. Representación espacial del evento extremo

Se eligió la distribución que mejor se ajustó a los datos de precipitación máxima diaria y al día en que se presenta el evento extremo, para representar la distribución espacial y temporal dentro del área de estudio.

En la Figura 6, se muestra que la mayor cantidad de P24, se presenta en los municipios del sur del estado, alcanzando un máximo de 121 mm al 80% de probabilidad. Mientras que en la mayor parte del estado se tienen precipitaciones diarias de 20 hasta 37 mm. Con forme disminuye la probabilidad de ocurrencia, aumenta el volumen de precipitación diaria que se presenta. En la zona Huasteca se puede considerar diseñar obras de captación de agua.

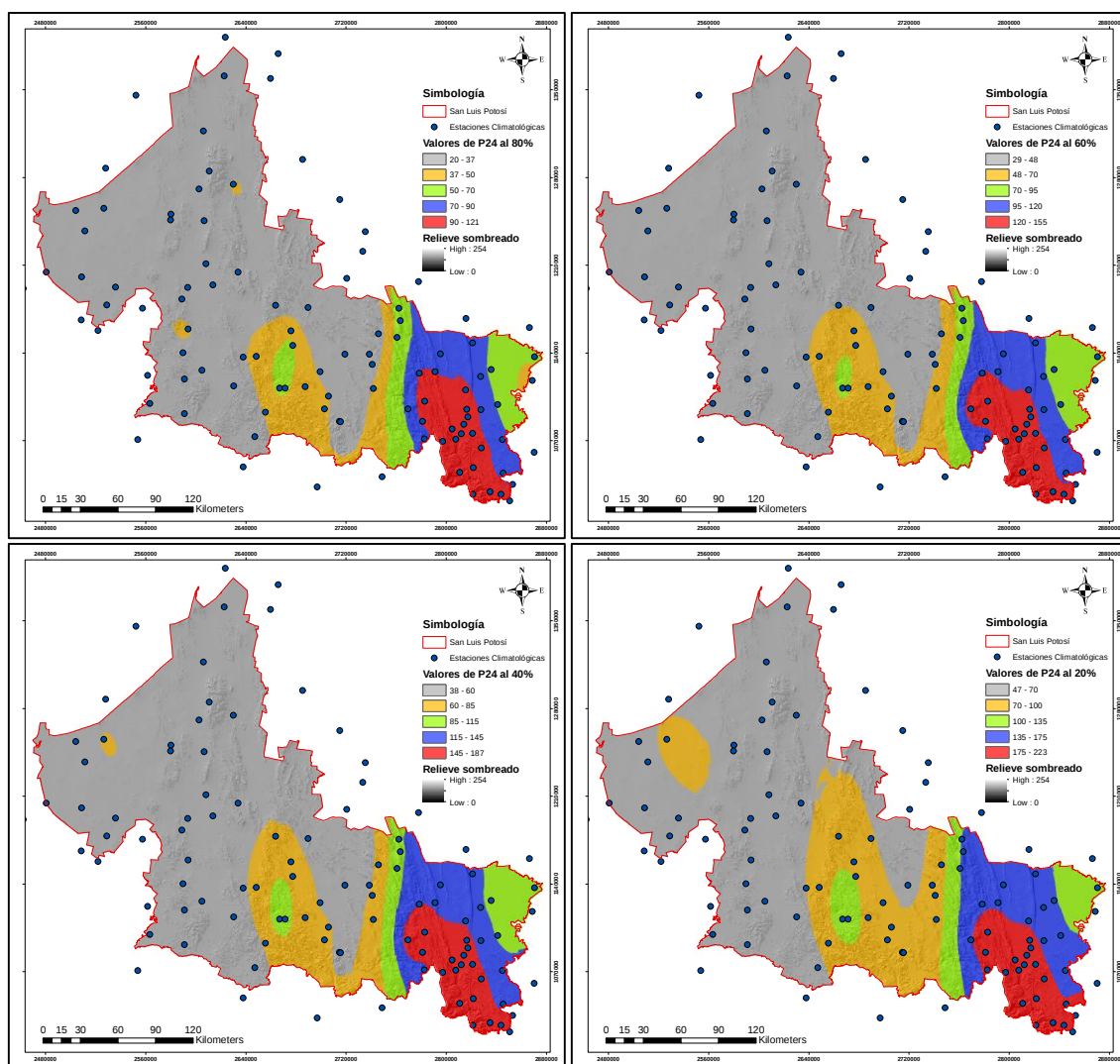


Figura 6. Distribución espacial de la precipitación máxima en 24 horas al 20, 40, 60 y 80% de probabilidad.

En la Figura 7 se ilustra que en la zona altiplano, la precipitación máxima diaria se observa en los meses de abril y mayo al 80% de probabilidad. En las zonas media y centro se presenta a finales de mayo y durante junio. Mientras que en la región sur del estado tiene presencia de junio a julio. Es importante saber cuándo se presenta los eventos extremos, para estar preparados y contar con estrategias que permitan tomar decisiones respecto a la problemática que se presente.

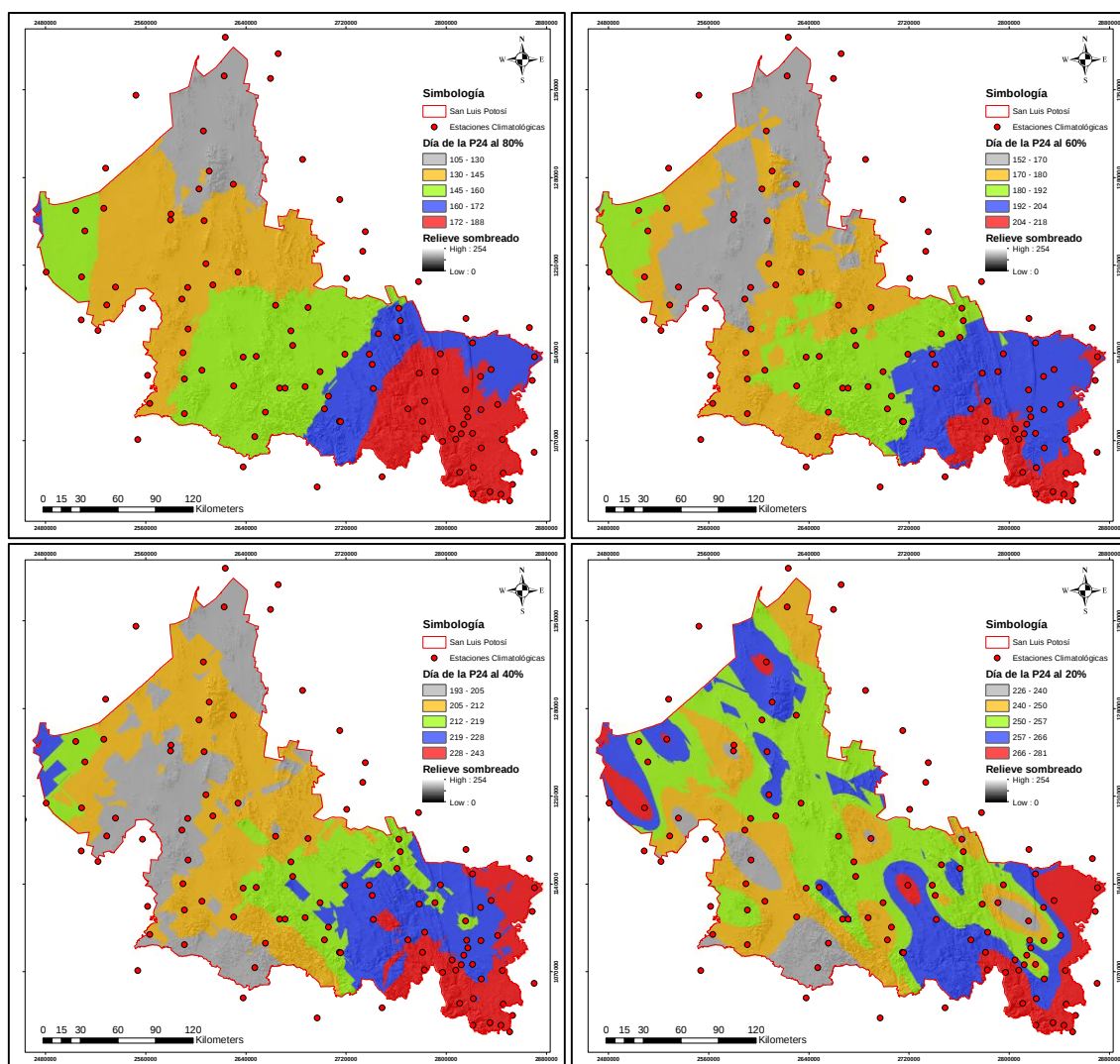


Figura 7. Distribución espacial del día juliano en que se presenta la precipitación máxima diaria al 20, 40, 60 y 80% de probabilidad.

4. CONCLUSIONES

De la comparación de las distribuciones de probabilidad, Normal, Log-Normal, Pearson III, Log-Pearson III y Gumbel, verificadas con la prueba de ajuste Kolmogorov-Smirnov, se obtuvo que la función Log-Pearson III, fue la que mejor se ajustó a los datos de Precipitación máxima en 24 horas, con un 48.1%. Así

mismo, la función que mejor se ajustó a los datos del día en que se presenta la precipitación máxima en 24 horas, fue la Pearson III con un 50.9%.

Con los valores obtenidos al 20, 40, 60 y 80% de probabilidad con la función Log-Pearson III y Pearson III, se identificó la distribución temporal y espacial de la precipitación máxima en 24 horas, así como del día en que se presentó el evento extremo, permitiendo identificar áreas donde el efecto es mayor, y sobre todo tomar medidas de protección ante éstos eventos extremos.

Las regiones con menor precipitación máxima en 24 horas son las que se encuentran en la zona norte, noroccidente y centro del estado de San Luis Potosí. La región huasteca evidencia mayor altura de precipitaciones máximas en 24 horas.

5. LITERATURA CITADA

- Aparicio, M. F. J. 2007. Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa. DF, México. 304 p.
- Chow, V. T.; Maidment, D.R; Mays, L. W. 1996. Hidrología Aplicada. Ed. McGraw-Hill Interamericana. Bogotá, Colombia. 583 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2015. Red de estaciones climatológicas: Estacionesclimatológicas.KML. Servicio Meteorológico Nacional (SMN)-Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México. DF.
- García, E. 2003. Distribución de la precipitación en la República Mexicana. Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 50, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 67-76.
- Ibáñez, C. L. A.; Lorenzo, C. A.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A. 2011. Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia de la lluvia registrada en Chapingo, México. Revista Ingeniería Agrícola y Biosistemas, 3(1), 25-32.

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2009. Eric III: Extractor rápido de información climatológica (versión 2.0. Disco). Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-IMTA. Jiutepec, Morelos, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2007. Regiones agropecuarias de San Luis Potosí. 69 p.
- Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal (INAFED). 2010. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México; San Luis Potosí.
- Magaña, V.; López, L. C.; Vázquez, G. 2013. El pronóstico de lluvias intensas para la Ciudad de México. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 16(1), 18-25.
- McCuen, R. H. 1998. Hydrologic Analysis and Design. Second Edition. Department of Civil Engineering University of Maryland. Ed. Pearson Prentice-Hall. New Jersey. USA. 833 p.
- Miranda, A. L.; Ibáñez, C. L. A.; Valdez, L. J. R.; Hernández, D. P. 2009. Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de período de retorno del Río Grande, Tlalchapa, Guerrero en dos escenarios del uso del suelo. Revista Agrociencia, 43(4), 333-344.
- Nájera, M. N. L.; Arteaga, R. R. 1998. Antología Agroclimatología. Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria (DGETA). México. 230 p.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2011. Panorama Minero del estado de San Luis Potosí. 70 p.
- Stern, R.; Rijks, D.; Dale, I.; Knock, J. 2006. Instat climatic guide. Tercera edición. Reading, UK. Universidad de Reading. 330 p.
- Vázquez, S. V. 2011. Nuevas regiones del estado de San Luis Potosí: una expresión territorial de su integración funcional para la competitividad económica. Investigaciones Geográficas. 75, 103-117.
- Zorraquino, J. C. 2004. El Modelo SQRT-ETMAX. Revista de Obras Públicas 3447: 33-47.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES GENERALES

De acuerdo a los indicadores estadísticos, el método U. S. National Weather Service (WS) presenta el índice de Willmott cercano a uno y el error estándar promedio cercano a cero, por consecuencia el método WS, es la mejor alternativa para completar registros de datos faltantes de precipitación cuando se cuenta con información del mismo período en estaciones auxiliares. Los datos de temperatura máxima y mínima, indican poca variabilidad de los métodos WS, RN y RD, dado que los datos calculados son similares a los datos observados, por lo tanto, los errores son muy semejantes con cualquiera de los métodos. En consecuencia el método U. S. National Weather Service (WS) es una alternativa eficiente para completar registros de información de datos faltantes en una serie continua. Por lo tanto se utilizó el método WS para estimar los datos faltantes en las 108 estaciones climatológicas del estado de San Luis Potosí.

El período de crecimiento y sus componentes (inicio, fin y duración), obtenidos con el balance hídrico simple (Capítulo 4) y analizado con la distribución normal estándar para diferentes niveles de probabilidad de excedencia, son muy similares al período de crecimiento definido, utilizando criterios de precipitación, períodos secos y probabilidad de ocurrencia (Capítulo 3). Por lo que, se puede utilizar cualquiera de los dos métodos para identificar la distribución espacial de

las fechas de inicio, fin o duración de la estación de crecimiento con altas probabilidades de éxito. Con ambos casos, se obtuvo que las zonas con período de crecimiento menor son las regiones altiplano, centro y media ubicadas al norte y centro del estado. La zona huasteca cuenta con las mejores condiciones de acuerdo a los dos métodos.

Los modelos matemáticos obtenidos para la variable duración y precipitación total durante la estación de crecimiento, tienen una relación muy fuerte con un coeficiente de determinación (r^2) mayor a 0.8. Se pueden determinar con alto grado de significancia si se conoce cualquiera de las siguientes variables: Precipitación total durante la estación de crecimiento (PTDEC), Precipitación total anual (PTA), Número total de días lluviosos durante el período de crecimiento (NTDLL), Inicio o Fin de la estación de crecimiento. Además, permiten conocer la duración y precipitación total durante la estación de crecimiento en cualquier parte del estado conociendo cualquiera de las variables antes mencionadas, y con ello se puede planificar la agricultura de temporal y mejorar la producción agrícola.

La zonificación de los cultivos de maíz y frijol, al utilizar como criterio de decisión las variables precipitación total durante la estación de crecimiento, duración e inicio del período de crecimiento, obtenidos del balance hídrico simple, indican que las regiones huasteca y media presentan las mejores condiciones de adaptación para el establecimiento de éstos cultivos. Las zonas altiplano y centro evidencian un bajo potencial de adaptación.

De la comparación de las distribuciones de probabilidad, Normal, Log-Normal, Pearson III, Log-Pearson III y Gumbel, verificadas con la prueba de ajuste Kolmogorov-Smirnov, se obtuvo que la función Log-Pearson III, se ajustó mejor a los datos de Precipitación máxima en 24 horas (P24). La distribución Pearson III a los datos del día juliano en que se presenta la P24. Las regiones con menor precipitación máxima en 24 horas son las que se encuentran en la zona norte, noroccidente y centro del estado. La región huasteca evidencia mayor cantidad de precipitaciones máximas en 24 horas. En la zona altiplano, la P24 se presenta en los meses de abril y mayo. En las zonas media y centro se presenta a finales de mayo y durante junio. Mientras que en la región sur del estado tiene presencia de junio a julio. Es importante saber cuándo se presenta los eventos extremos, para estar preparados y contar con estrategias que permitan tomar decisiones respecto a la problemática que se presente.

La distribución del recurso hídrico se presenta en menor grado en la parte norte, noroccidente y centro del estado de San Luis Potosí, en la parte sur del estado se tiene mejor disponibilidad del recurso hídrico, así lo demuestran las variables, inicio, fin y duración de la estación de crecimiento. También, el número total de días lluviosos y precipitación total durante la estación de crecimiento, permiten identificar la misma tendencia en cuanto a la disponibilidad y distribución de días y de lluvia que se presenta en el estado. La zona altiplano, evidencia los períodos de crecimiento más bajos, manifestando que la duración de la estación de crecimiento en la región es muy corta, como para establecer un cultivo con un alto grado de adaptabilidad, sin embargo, se puede tener un margen de

referencia para auxiliar la agricultura de temporal, mediante el riego. Las regiones centro y media muestra períodos de crecimiento variados, dado que se tienen áreas donde existen condiciones de alta adaptabilidad de cultivos, pero también zonas en las que las condiciones no son favorables. La región huasteca, presenta períodos de crecimiento altos, la duración de la estación de crecimiento es grande, el número de días totales al año beneficia la disponibilidad de agua y temperatura favorable para el desarrollo de un cultivo. Por lo tanto, las mejores condiciones de inicio, fin y duración del período de crecimiento, se presenta en la zona huasteca, así como también, se muestra en parte de la región media y centro del estado. La zona altiplano, muestra condiciones menos favorables para el crecimiento y desarrollo de cultivos bajo agricultura de temporal.

La cartografía generada, representa la información de manera temporal y espacial, esencial para planeación de agricultura de temporal. Los planos generados con la información resultante del análisis, son de gran importancia, debido a que estos permiten programar prácticas agrícolas, zonificar cultivos, minimizar los riesgos que imponen las condiciones del clima, sobre todo en los lugares donde se practica agricultura de temporal.