



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

**ESTUDIO AGROCLIMÁTICO, REQUERIMIENTO
DE RIEGO Y REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO DE PASTOS
EN TABASCO, MÉXICO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

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

PRESENTA:

OSÍAS RUIZ ÁLVAREZ



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

Diciembre de 2010

Chapingo, Texcoco, Estado de México



**ESTUDIO AGROCLIMÁTICO, REQUERIMIENTO DE RIEGO Y
REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO DE PASTOS EN TABASCO, MÉXICO**

Tesis realizada por Osías Ruiz Álvarez 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**

DIRECTOR



DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

ASESOR



DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

ASESOR



DR. RUTILO LÓPEZ LÓPEZ

No veas el estudio como un pesar, sino como una llave para entrar al fascinante mundo del conocimiento (Albert Einstein)

AGRADECIMIENTOS

A Dios por prestarme vida, por permitir mi desarrollo personal y académico; y por proveerme de habilidades que me ayudan a evitar más de una adversidad.

A mis padres por invitarme a este mundo y dotarme de medios para desenvolverme en él.

A la Universidad Autónoma Chapingo por recibirme y cobijarme en su seno de posgraduados.

Al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso integral del Agua por darme la oportunidad de sumarme a su colectividad de aprendices en ciencias hidroagrícolas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por confiar en mí y por financiar mis estudios de maestría.

A Mis hermanos por auxiliarme en cada situación difícil durante el tránsito de mi existencia.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez por su amistad, confianza y comprensión demostradas siempre, por revelarme los secretos más ocultos de la Agrometeorología, por ser pieza fundamental en la elevación y potenciación de mi carrera profesional, pero sobre todo por su sin precedente y excelsa dirección.

Al M.I. Ronald Ernesto Ontiveros Capurata por su grata amistad, compañerismo, y apoyo cognitivo durante mi estancia en Chapingo.

A Mario Figueroa Cárdenas, Jorge V. Prado Hernández, José A. Yam Tzec, Natanael Sánchez Cornelio, Arcadio Martínez Estrada, Eduardo López Blancas, Álvaro Morelos Moreno, Rocío Cervantes Osornio y Norberto Zavala Frutero quienes me acompañaron y socorrieron mientras alcanzaba mi meta.

A los profesores del departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola y del departamento de Ingeniería en Irrigación, especialmente al Dr. Mario A. Vázquez Peña por su inmensurable apoyo en los Métodos Estadísticos para Ingenieros y aportaciones hechas a esta investigación.

Al Dr. Rutilo López López por sus siempre acertadas recomendaciones en la mejora de este trabajo.

Al Dr. Leonardo N. Ávila Ayona por su aprecio, enseñanzas, guía y motivación para ser mejor en todas las parcelas de mi vida.

Al Dr. Roney Solano Vidal por su amistad, consejos y ayuda brindados en todo momento.

A la Sra. Lidia Ordaz García por su valiosa y leal amistad; y por las facilidades otorgadas al fungir como secretaria de Posgrado.

A mis compañeros (Estela, José Manuel, Cuauh, Dani, Carlos, Juan De Dios, Evaristo y Juan Carlos) de la décima generación de maestría en Ingeniería Agrícola y uso Integral del Agua.

A todos los trabajadores del programa de posgrado por con tan buen humor asistirme más de una vez.

A la familia Ruiz Rodríguez y Ruiz Sarmiento, en especial a mi primo David por confiar en mí, por sus palabras de aliento y por valorar todos y cada uno de mis esfuerzos.

DEDICATORIA

A mis padres:

Oscar Ruiz Rodríguez

y

Elia Álvarez Vázquez

A mis hermanos:

Judith

Sandra

Dámariz

y

Coquín (QEPD)

A mis sobrinos (hermanitos):

Yazmín

Damarita

y

Oscarín

***Con mucho amor, orgullo, admiración y respeto, van siempre en mi mente y mi
corazón.***

Datos biográficos del autor

Nacido el 22 de marzo de 1983 en “La Fraylesca”, Chiapas. Su educación básica la cursó en la misma zona. A la edad de 18 años, inicia en el Instituto de Estudios Superiores de Chiapas (IESCH) estudios profesionales de Contaduría Pública, que más tarde trunca tras reconsiderar su vocación y aptitud por dicha profesión. Inmediatamente después incursiona como encargado de un almacén de semillas y granos básicos. Fueron familiares, entre ellos: padres, hermanos y tíos quienes lo motivaron con justificadas razones para retomar los estudios universitarios; por lo que en agosto de 2003 y radicando en el estado de Tabasco, inicia en la Universidad Popular de la Chontalpa, ubicada en el municipio de Cárdenas, la carrera de Ingeniero Agrónomo; y obtiene el título de dicha profesión el 27 de septiembre de 2007. Faltando dos meses para concluir su plan de estudios se incorpora al Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), dependencia que lo encomienda para dar asesorías y seguimiento a productores dedicados a los cultivos de maíz, frijol y sorgo en el estado de Tabasco, simultáneamente ingresa también a Agroindustrias Consmar S.P.R. de R. L. de C. V., donde participó en la elaboración de proyectos productivos, inspector y promotor de créditos relacionados con la agricultura. Tuvo el privilegio de participar en dos estancias pre profesionales dentro del marco del Verano de la Investigación Científica, programa que encabeza la Academia Mexicana de Ciencias, financia el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y regula la Universidad Nacional Autónoma de México, una de estas estancias la realiza en el año 2006, en el Campo Experimental de Gómez Palacio del CENID-RASPA-INIFAP, bajo la asesoría del Dr. Guillermo González Cervantes quién le brindó la oportunidad de participar en su proyecto: “Uso Eficiente de los Recursos Hídricos en Zonas Áridas”, al año siguiente, realiza su segunda estancia en El Colegio De La Frontera Sur Unidades San Cristóbal y Tapachula, bajo la asesoría de los Doctores Helda Heleonora de Guadalupe Bruneliere, Juan Francisco Barrera Gaytán y Hallie Eaken a quienes apoyó en trabajos de campo en un Estudio Social, Económico y Ambiental de la Producción cafetalera del estado de Chiapas. Fueron estos cuatro investigadores, más profesores de su universidad quienes lo han motivado e inspirado para continuar fortaleciendo su formación profesional. Posee la distinción del premio al mérito académico de la generación 2003b-2007a de la carrera de ingeniero en agronomía, premio otorgado por el Colegio de Ingenieros Civiles de Tabasco A.C. en junio de 2007. En julio de 2008, inicia cursos de maestría en el Programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo. Le atrae la investigación, especialmente en la que intervienen la agroclimatología, el uso eficiente del agua en los sistemas agrícolas y las Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera.

CONTENIDO

Pág.

ÍNDICE DE CUADROS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

	CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1	Objetivos generales	5
1.2	Literatura citada	6
	CAPÍTULO 2. BALANCE HÍDRICO Y CLASIFICACIÓN	
	CLIMÁTICA DE TABASCO, MÉXICO	10
2.1	Introducción	11
2.2	Materiales y métodos	14
2.2.1	Ubicación y características del área de estudio	14
2.2.2	Información climatológica	14
2.2.3	Evapotranspiración y evapotranspiración del cultivo de referencia	14
2.2.4	Estimación de ET_0 a partir del tanque evaporímetro tipo A	15
2.2.5	Estimación de ET_0 a partir de la ecuación de Hargreaves	16
2.2.6	Modelo de regresión lineal	16

2.2.7	Índices estadísticos para evaluar el ajuste del modelo	17
2.2.8	Datos de suelo	18
2.2.9	Balance hídrico climático	18
2.2.10	Índice de humedad	19
2.3	Resultados	20
2.3.1	Comparación de ET_0 estimada con el tanque de evaporación y corregida con el modelo	21
2.3.2	Balance hídrico climático	24
2.4	Discusión	27
2.5	Literatura citada	34
	CAPÍTULO 3. INICIO DE LA ESTACIÓN DE CRECIMIENTO Y PERÍODOS SECOS EN TABASCO, MÉXICO	37
3.1	Introducción	38
3.2	Materiales y métodos	42
3.2.1	Área de estudio	42
3.2.2	Información climatológica	43
3.2.3	INSTAT PLUS V3.36	43
3.2.4	Evapotranspiración de referencia	43
3.2.5	Capacidad de almacenamiento de agua del suelo	45

3.2.6	Balance hídrico	45
3.2.7	Criterio de inicio de la estación de crecimiento	45
3.2.8	Tratamiento probabilístico del inicio de la estación de crecimiento	46
3.2.9	Criterio para definir un día seco	47
3.2.10	Cálculo de la probabilidad de ocurrencia de períodos secos con duración de siete días	48
3.3	Resultados y discusión	48
3.3.1	Balance hídrico diario	48
3.3.2	Inicio de la estación de crecimiento	50
3.3.3	Períodos secos e inicio de la estación de crecimiento	61
3.4	Conclusiones	67
3.5	Referencias	68
 CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN DEL REQUERIMIENTO DE RIEGO Y PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO EN PASTOS MEDIANTE CROPWAT EN TABASCO, MÉXICO		 72
4.1	Introducción	73
4.2	Materiales y métodos	77
4.2.1	Área de estudio	77
4.2.2	Información climática	77

4.2.3	Modelo CROPWAT	78
4.2.4	Datos de suelo	78
4.2.5	Cálculo de ET_0	79
4.2.6	Precipitación efectiva	79
4.2.7	Coefficiente del cultivo	79
4.2.8	Evapotranspiración del pasto	80
4.2.9	Reducción del rendimiento	80
4.2.10	Fecha de siembra de los pastos en Tabasco	81
4.2.11	Escenarios climáticos	81
4.3	Resultados y discusión	82
4.3.1	Evapotranspiración de referencia	82
4.3.2	Evapotranspiración del pasto	82
4.3.3	Precipitación efectiva	83
4.3.4	Requerimiento de riego	84
4.3.5	Reducción del rendimiento	86
	4.3.5.1 Secano	86
	4.3.5.2 Riego deficitario	87
4.4	Conclusiones	91
4.5	Literatura citada	91
	CAPITULO 5. CONCLUSIONES GENERALES	96

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
CAPÍTULO 2	
Cuadro 1	Clasificación climática. 19
Cuadro 2	Índices estadísticos para la comparación de ET ₀ obtenida con el tanque evaporímetro tipo A y con la ecuación del modelo. 21
CAPÍTULO 3	
Cuadro 1	Estaciones meteorológicas. 44
Cuadro 2	Balance hídrico para Cárdenas, 1958. 49
Cuadro 3	Probabilidad de inicio de la estación de crecimiento en o antes de los días indicados. 56
CAPÍTULO 4	
Cuadro 1	Características fisiológicas de los pastos. 79

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
CAPÍTULO 2	
Figura 1	15
Distribución espacial de 40 estaciones meteorológicas en Tabasco.	
Figura 2	20
Relación entre la ET_0 obtenida con el método de Hargreaves y Tanque de evaporación.	
Figura 3	24
ET_0 Tanque en oposición a ET_{0TEM} para las cinco estaciones.	
Figura 4	26
Gráficas de balance hídrico para cada estación representativa.	
Figura 5	28
Distribución espacial de los excesos en Tabasco.	
Figura 6	29
Distribución espacial de los déficits en Tabasco.	
Figura 7	30
Distribución espacial de los climas de Tabasco.	
Figura 8	34
Correlación de variables obtenidas del balance hídrico climático.	
CAPÍTULO 3	
Figura 1	53
Inicio de la estación de crecimiento para cada uno de los años de registro.	

Figura 2	Relación entre el inicio de la estación de crecimiento con la latitud (a) y la precipitación anual (b).	54
Figura 3	Análisis probabilístico del inicio de la estación de crecimiento (Paraíso).	58
Figura 4	Distribución espacial del inicio de la estación de crecimiento al 20% de probabilidad de no excedencia.	59
Figura 5	Distribución espacial del inicio de la estación de crecimiento al 80% de probabilidad de no excedencia.	60
Figura 6	Estaciones con período largo de $P < 50\%$.	64
Figura 7	Estaciones con período corto de $P < 50\%$.	65
Figura 8	Estaciones representativas de las relaciones entre períodos secos e inicio de la estación de crecimiento: Oxolotán (a), Teapa (b) y Villahermosa (c).	66

CAPÍTULO 4.

Figura 1	Distribución espacial de 18 estaciones meteorológicas en Tabasco	77
Figura 2	Comportamiento anual de la evapotranspiración de los pastos en Tabasco.	83
Figura 3	Marcha anual de la precipitación efectiva.	85

Figura 4	Variación espacial del requerimiento de riego para el escenario seco (precipitación al 80%).	86
Figura 5	Requerimiento de riego para la región de Villahermosa estimado para los tres escenarios de precipitación.	87
Figura 6	Reducción del rendimiento para el escenario seco en condición de secano (a) y riego deficitario (b).	89
Figura 7	Reducción del rendimiento por municipio para las dos condiciones y para los tres escenarios.	90

**ESTUDIO AGROCLIMÁTICO,
REQUERIMIENTO DE RIEGO Y
REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO DE
PASTOS EN TABASCO, MEXICO.**

Osías Ruiz Álvarez¹
Ramón Arteaga Ramírez²

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivos: conocer las épocas y regiones en que se presentan excesos o deficiencias de humedad; y a partir de ello clasificar el clima de la región de acuerdo con la metodología de Thornthwaite, determinar el inicio de la estación de crecimiento a diferentes niveles de probabilidad y la ocurrencia de periodos secos; así como conocer los requerimientos de riego de los pastos y la reducción del rendimiento de éstos cuando se cultivan en condiciones de secano (temporal) y riego deficitario (ET_C fijada por etapa). Para la primera parte del estudio se emplearon datos normales de precipitación, temperatura y evaporación de 40 estaciones meteorológicas; mientras que para las dos últimas se utilizó información diaria de precipitación y evaporación de 18 estaciones. Se llevó a cabo el balance hídrico climático tipo Thornthwaite-Mather y el cálculo del índice de humedad. El inicio de la estación de crecimiento al 20, 40, 60 y 80% de probabilidad de no excedencia se definió con la distribución normal a partir del balance hídrico diario realizado con el programa INSTAT, el cual también se empleó para conocer la probabilidad de ocurrencia de periodos secos con duración de siete días y definidos a partir del umbral de 1mm. Con el modelo CROPWAT se calcularon los requerimientos de riego y la reducción del rendimiento de los pastos en condiciones de secano y riego deficitario para tres escenarios de lluvia probabilística: 20 (escenario húmedo), 50 (escenario normal) y 80% (escenario seco). Los resultados demuestran que en Tabasco: existen regiones con excesos todo el año, déficit bajo, déficit moderado, déficit alto y cinco tipos de clima; el inicio de la estación de crecimiento se anticipa en el sur del estado y se retrasa al norte; los requerimientos de riego máximos mensuales para los escenarios húmedo, normal y seco, se dan en Villahermosa durante el mes de abril. De acuerdo con los promedios estatales de reducción para los escenarios normal y seco, la reducción del rendimiento es menor en condiciones de riego deficitario (normal = 2.27% y seco = 3.21%) que en secano (normal = 5.05 y seco = 14%). Con el escenario húmedo no se presentaron reducciones.

Palabras clave: Balance hídrico, estación de crecimiento, período seco, requerimiento de riego, reducción del rendimiento, modelo CROPWAT.

**AGROCLIMATOLOGICAL STUDY,
IRRIGATION REQUIREMENT AND YIELD
REDUCTION OF PASTURES IN TABASCO,
MEXICO**

Osías Ruiz Álvarez¹
Ramón Arteaga Ramírez²

ABSTRACT

The objectives of this research were: determine the times and regions that have excesses or deficiencies of moisture; and from that classify the climate of the region according to the Thornthwaite method, determine the onset of the growing season at different levels of probability and the occurrence of dry spells, and determine the irrigation requirements of pastures and yield reduction when grown under rainfed conditions (rainfed agriculture) and deficit irrigation (ET_C reduction per stage). For the first part of the study, standard precipitation, temperature and evaporation data from 40 meteorological stations were used; while for the latter two, daily precipitation and evaporation data from 18 stations were used. The Thornthwaite-Mather climatic water balance was carried out and the moisture index was calculated. The beginning of the growing season at 20, 40, 60 and 80% probability of no exceedance was defined with the normal distribution from the daily water balance performed with the INSTAT program, which was also used to determine the occurrence probability of dry spells lasting seven days and identified based on the threshold of 1 mm. With the CROPWAT model, irrigation requirements and yield reduction of pasture were carried out under dry conditions and deficit irrigation for three scenarios of rainfall probability: 20 (wet stage), 50 (normal stage) and 80% (dry stage). The results show that in Tabasco: there are regions with excess all year, low deficit, moderate deficit, high deficit and five types of climates; the beginning of the growing season is expected in the south of the state and a delay to the north; the maximum monthly irrigation requirements for wet, normal and dry scenarios are given in Villahermosa during April. According to the state reduction averages for normal and dry scenarios, yield reduction is lower in deficit irrigation conditions (normal = 2.27 and dry = 3.21) than in rainfed ones (normal = 5.05 and dry = 14%). With the wet stage there were no reductions.

Key words: Water balance, growing season, dry spell, irrigation requirement, yield reduction, CROPWAT model.

¹ Autor

² Director de tesis

¹ Thesis author

² Thesis director

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción agrícola se ven influenciados sustancialmente por las características climáticas de la región donde se ubican, máxime cuando éstos dependen totalmente de las condiciones atmosféricas (Kuglicov y Rudnev, 1989). Esto se complica cuando se presentan cambios en el régimen de la precipitación y temperatura, principalmente, los cuales últimamente atañen con mayor severidad el manejo pre cosecha de los cultivos. En este sentido, trabajos realizados por Diop (2006), Giorgis (2006) y Molua y Lambi (2006) aseguran que cambios en los patrones de precipitación y temperaturas provocarán a mediano plazo que algunas variedades e incluso especies de cultivos no produzcan rendimientos satisfactorios, al grado de provocar que estas explotaciones se vuelvan económicamente inviables, por lo que en el presente es necesario preparar nuevos genotipos o mejorar los ya existentes al considerar su adaptación a las condiciones climáticas venideras, para hacer frente a la demanda de alimentos que en ese momento la población mundial tendrá.

En Tabasco, la ganadería bovina es una de las actividades pecuarias de mayor importancia, se desarrolla por 20 mil productores y genera el 54% del ingreso del sector pecuario (De Dios, 2001). En este estado, la producción animal se realiza a libre pastoreo, sobre una superficie de 2.14 millones de hectáreas, de las cuales, el 50.14% está formado por praderas inducidas (Reyes et *al.*, 2009). Como en otros lugares tropicales donde predominan sistemas de pastoreo extensivos, en esta región la ganadería se ve afectada por la producción estacional de los pastos y la fuerte dependencia de éstos en la alimentación de los animales, por la escasez de humedad en

la época seca y el exceso de ésta en la temporada lluviosa, así como por los bajos niveles de tecnificación; todo esto se acentúa aún más durante la temporada de estiaje y en conjunto contribuyen a la obtención de forrajes de baja calidad afectándose en primera instancia el consumo de materia seca por parte del ganado, a grado de que éste no alcanza a cubrir sus requerimientos nutricionales, desencadenando una baja producción animal y la insatisfacción de la demanda de carne por parte de la población (Manríquez, 2010). En relación con la praderas del trópico tabasqueño y con el objeto de minimizar los efectos del problema previamente descrito, numerosos trabajos se han desarrollado por diferentes investigadores (Enríquez *et al.*, 1999; Reyes *et al.*, 2009; De Dios, 2001), sin embargo, casi todos tratan sobre cuestiones de calidad nutricional, carga animal, evaluaciones de rendimiento en condiciones de temporal, plagas y enfermedades, mejoramiento genético e incluso evaluaciones del comportamiento en condiciones de drenaje deficiente, pero ninguno hacia la evaluación del rendimiento de los pastos con suministro de riego durante la época crítica y bajo la ocurrencia de sequías e inundaciones extremas como las que últimamente se han dejado sentir.

Los párrafos anteriores, hacen resaltar la importancia de la realización de estudios relacionados con la agroclimatología de una región, principalmente aquellos que versen sobre la probabilidad de ocurrencia de fenómenos adversos y la estimación del grado de afectación de éstos en el rendimiento de especies de importancia económica, social y ambiental (Hachigonta *et al.*, 2008; Mugalavai *et al.*, 2008), sin soslayar el significado que estos estudios tienen para los responsables de programas y dependencias gubernamentales relacionadas con el agro mexicano (Arteaga *et al.*, 2006) y del mundo (Raes *et al.*, 2004).

Dentro de los aspectos más importantes que se consideran en el estudio agroclimático de una región, entre otros están: determinación de los períodos con deficiencias o excesos de humedad así como la cuantía de éstos, ocurrencia de eventos atmosféricos extremos, el monto anual y estacional de la precipitación y la evapotranspiración, definición de los períodos con existencia de humedad aprovechable y útil para las plantas, componentes de la estación de crecimiento, estudios sobre la ocurrencia de sequías que se presentan incluso dentro de la temporada húmeda, clasificación del clima (desde el punto de vista agrícola), estimación de los requerimientos hídricos en la época de estiaje para los cultivos de mayor importancia, así como la estimación de los índices de humedad o aridez según sea el caso.

En relación con la determinación de los períodos que presentan excedentes o déficits hídricos, el método pionero es el desarrollado por Thornthwaite y Mather (1955), quienes a partir de los datos de precipitación y temperaturas cuantifican el estado hídrico del suelo para una temporada dada, a partir del principio de conservación de la materia, con lo que pueden calcular los índices de humedad y aridez, los cuales a su vez dan la pauta para clasificar el clima de una región.

La estación de crecimiento se define como el período del año durante el cual, las características de distribución de la precipitación son adecuadas para la germinación, establecimiento y desarrollo pleno del cultivo (Odekunle, 2004). El estudio de ésta es importante en la agricultura de temporal, y se dirige en conocer su inicio, duración y fin, lo cual es información indispensable para elegir el tipo y variedad de cultivo así como el momento de establecimiento de éste que permita obtener los más altos rendimientos, ya que según Sivakumar (1988) éstos se obtienen cuando el cultivo se establece de manera

oportuna. El inicio de la estación de crecimiento se ha estudiado por diferentes autores, y cada uno de ellos emplea diferentes criterios. Algunos investigadores fijan el inicio de esta variable planteándose diferentes umbrales de precipitación (Aviad *et al.*, 2004) ya que ésta determina el inicio de la estación de crecimiento (Benoit, 1977; Aviad *et al.*, 2004; Arteaga *et al.*, 2006), otros emplean el criterio de la precipitación acumulada (Odekunle, 2004; Raes *et al.*, 2004) y modelos de balance hídrico (Mugalavai *et al.*, 2007).

Un día seco se define como el día en el que se presenta precipitación inferior a un umbral establecido (Engelbrecht *et al.*, 2006; Luengo *et al.*, 2002). La cantidad de lluvia mínima que usualmente se registrada por los instrumentos es de 0.1 mm, sin embargo, cantidades muy pequeñas son a menudo consideradas de dudoso valor para el cultivo (Faria y Puche, 1997). En este trabajo, para el estudio de períodos secos se utilizó el umbral de 1 mm; y se define a éstos como el número de días consecutivos durante los cuales la precipitación diaria no excede el umbral preestablecido (1 mm) (Stern *et al.*, 2006).

Además, la simulación de procesos donde interviene el Sistema Agua Suelo Planta Atmósfera cada vez cobra mayor importancia gracias a que permite conocer la respuesta del cultivo en condiciones climáticas y edafológicas que no han sido probadas sin que se generen las derramas financieras que caracterizan a la experimentación agrícola. También puede verificarse el comportamiento del cultivo bajo diferentes escenarios u ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos que se simulan con la manipulación de los datos originalmente registrados. Bajo la premisa anterior, en este trabajo se empleó el modelo CROPWAT desarrollado por la FAO, en virtud de que ha sido

validado y probado por diferentes investigadores en casi de todo el mundo (Doria y Madramootoo, 2009), quienes han encontrado buena concordancia entre los resultados simulados y experimentales (Cavero *et al.*, 2000).

La presente tesis se divide en cinco capítulos, el segundo tiene que ver con la determinación de épocas y regiones con déficit o excesos hídricos, así también con una clasificación climática; el tercero se refiere a la obtención de fechas de inicio de la estación de crecimiento a diferentes niveles de probabilidad y al análisis de la probabilidad de ocurrencia de períodos secos. El cuarto capítulo presenta un estudio sobre requerimientos de riego y reducción del rendimiento de pastos mediante condiciones de secano y riego deficitario; y finalmente en el último capítulo se realizan las conclusiones generales con base en los objetivos planteados, así como algunos comentarios respecto del trabajo de investigación.

1.1 Objetivos generales

Realizar un balance hídrico climático para definir épocas con excesos o deficiencias de humedad y a partir de éste realizar una clasificación climática de acuerdo con el método de Thornthwaite en Tabasco, México.

Estimar el inicio de la estación de crecimiento a diferentes niveles de probabilidad de no excedencia y analizar la probabilidad de ocurrencia de períodos secos en Tabasco, México.

Conocer mediante condiciones simuladas los requerimientos de riego y la reducción del rendimiento de pastos cultivados en condiciones de temporal y riego deficitario para tres escenarios diferentes de precipitación en Tabasco, México.

1.2 Literatura citada

- Arteaga, R. R., M. A. Vázquez P., P. M. Coras M., y V. Ángeles M. 2006. Componentes de la estación de crecimiento, variación temporal y espacial en Chapingo, México. *Ingeniería hidráulica en México*. 21:57-68.
- Aviad, Y., H. Kutiel, and H. Lavee. 2004. Analysis of beginning, end, and length of the rainy season along a Mediterranean-arid climate transect for geomorphic purposes. *Journal of Arid Enviroments*. 59:189-204.
- Benoit, P. 1977. The start of the growing season in northern Nigeria. *Agricultural Meteorology*. 18:91-99.
- Cavero, J., I. Farre, P. Debaeke, and J. Faci. 2000. Simulation of Maize Yield under Water Stress with the EPICphase and CROPWAT Models. *Agronomy Journal*. 92:679-690.
- De Dios, V. 2001. *Ecofisiología de los bovinos en sistemas de producción del trópico húmedo*. Colección José N. Rovirosa: Biodiversidad, Desarrollo Sustentable y Trópico Húmedo. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. 376 p.
- Diop, M., 2006. Analysis of crop water use in Senegal with the CROPWAT model. CEEPA discussion paper no. 34, CEEPA, University of Pretoria, 18 p.
- Doria, R. O., and C. A. Madramootoo. 2009. Estimation of irrigation requirements for some crops in southern Quebec using CROPWAT. *Irrigation and Drainage*. Published online in Wiley InterScience: www.interscience.wiley.com; DOI: 10.1002/ird.497.

- Engelbrecht, B. M. J., J. W. Dalling, T. R. H. Pearson, R. L. Wolf, D. A. Gálvez, T. Koehler, M. T. Tyree, and T. A. Kursar. 2006. Short dry spells in the wet season increase mortality of tropical pioneer seedlings. *Oecología*. 148:258-269.
- Enríquez, Q. J. F., F. Meléndez N., y E. D. Bolaños A. 1999. Tecnología para la producción y manejo de forrajes tropicales en México. INIFAP. Veracruz, México. 262 p.
- Faria, R. A. y M. Puche. 1997. Estudio de períodos secos del Municipio La Cañada de Urdaneta del Estado Zulia, Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía Universidad de Zulia*. 14:21-31.
- Giorgis, K., A. Tadege, and D. Tibebe. 2006. Estimating crop water use and simulating yield reduction for maize and sorghum in Adama Mieso districts using the CROPWAT model. CEEPA discussion paper no. 31, CEEPA, University of Pretoria. 14 p.
- Hachigonta, S., C. J. C. Reason, and M. Tadros. 2008. An analysis of onset date and rainy season duration over Zambia. *Theoretical and Applied Climatology*. 91:229-243.
- Kuglicov, V. A. y G. V. Rudnev. 1989. *Agrometeorología Tropical*. Editorial Academia. Primera edición. La Habana, Cuba. 255 p.
- Luengo, U. M. A., A. Ceballos B., J. Martínez F. y C. Yuste Y. 2002. Las rachas secas en el sector central de la cuenca del Duero. *Investigaciones geográficas*. 27:65-82.
- Manríquez, M. L. Y. 2010. Establecimiento, calidad del forraje y productividad de un sistema silvopastoril intensivo bajo pastoreo de bovinos y ovinos en el trópico

- sub-húmedo. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Tepetates, Veracruz. 89 p.
- Molua, E. and C. Lambi. 2006. Assessing the impact of climate on crop water use and crop water productivity: The CROPWAT analysis of three districts in Cameroon. CEEPA discussion paper no. 33, CEEPA, University of Pretoria. 44 p.
- Mugalavai, E. M., E. C. Kipkorir, D. Raes and M. S. Rao. 2008. Analysis of rainfall onset, cessation and length of growing season for western Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*. 148:1123-1135.
- Odekunle, T. O. 2004. Rainfall and the length of the growing season in Nigeria. *International Journal of Climatology*. 24:467-479.
- Raes, D., A. Sithole, A. Makarau, and J. Milford. 2004. Evaluation of first planting dates recommended by criteria currently used in Zimbabwe. *Agriculture and Forest Meteorology*. 125:177-185.
- Reyes, P, A., E. D. Bolaños A., D. Hernández S., E. M. Aranda I., y F. Izquierdo R. 2009. Producción de materia seca y concentración de proteína en 21 genotipos del pasto humidícola *Brachiaria humidicola* (Rendle) Scheweick. *Universidad y Ciencia*. 25:213-224.
- Sivakumar, M. V. 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*. 42:295-305.
- Stern, R., D. Rijks, I. Dale, and J. Knock. 2006. *Instat Climatic Guide*. Third edition. Universidad de Reading. Reading, Inglaterra. 322 p.

Thornthwaite, C. W. and J. R. Mather. 1955. The water balance. Publications in climatology, laboratory of climatology. Centerton, NJ. 104 p.

CAPÍTULO 2

BALANCE HÍDRICO Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE TABASCO, MÉXICO¹

RESUMEN

Se presenta un trabajo sobre balance hídrico para el estado de Tabasco, con el objeto de definir épocas y regiones con déficit o exceso de humedad y clasificar el clima de este estado empleando la metodología de Thornthwaite. La información de partida fueron datos normales de 40 estaciones meteorológicas del estado con promedios mensuales de temperatura y precipitación, en 25 de estas estaciones además de las variables mencionadas se contó con información de evaporación, por lo que para estas últimas la evapotranspiración de referencia se calculó con dos métodos: tanque evaporímetro ($ET_{0\text{ Tanque}}$) y ecuación de Hargreaves ($ET_{0\text{ Hargreaves}}$), para el resto de las estaciones (15) solo con la ecuación de Hargreaves. Con 20 de las 25 estaciones se generó un modelo de regresión para corregir la evapotranspiración de referencia obtenida con la ecuación de Hargreaves ($ET_{0\text{ TEM}}$). Datos de $ET_{0\text{ Tanque}}$ de cinco estaciones se emplearon para compararlos con $ET_{0\text{ TEM}}$, en la mayoría se obtuvieron valores aceptables de R^2 y d . A partir de la evapotranspiración de referencia y precipitación se realizó el Balance Hídrico Climático tipo Thornthwaite-Mather. De este modo se encontraron cuatro regiones en las que la humedad se comporta de modo diferente; y se constató que en el municipio de Huimanguillo se ubica la región que presenta mayor déficit anual. Asimismo se obtuvieron los índices de humedad por región con lo que se puntualizó que el estado de Tabasco tiene cinco tipos de clima.

Palabras clave: Balance hídrico climático, clasificación climática, evapotranspiración de referencia, índice de humedad

¹ Ruíz, A. O.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A.; López, L. R. y Ontiveros, C. R. 2010. Enviado a la revista *Universidad y Ciencia*.

WATER BALANCE AND CLIMATIC CLASSIFICATION OF TABASCO, MEXICO

ABSTRACT

This paper is about water balance and climate classification for Tabasco state, in order to define epoch and regions with water deficit or excess and from classify the climate of this state using the method of Thornthwaite. The basis of this study were normal data of 40 meteorological stations in the state with average monthly temperature and precipitation in 25 of these stations in addition to the variables mentioned information was available for evaporation, so that the latter reference evapotranspiration was calculated with two methods: pan evaporation ($ET_{0 \text{ Tanque}}$) and Hargreaves equation ($ET_{0 \text{ Hargreaves}}$), for the rest stations (15) only with the Hargreaves equation. With 20 stations generated a regression model for to correct the reference evapotranspiration obtained with the Hargreaves's equation ($ET_{0 \text{ TEM}}$). $ET_{0 \text{ T}}$ data from five stations were used for comparison with $ET_{0 \text{ TEM}}$, almost all were obtained acceptable values of R^2 and d . From de reference evapotranspiration and rain was generated the climatic water balance Thornthwaite type. With that found four water regions and found that Huimanguillo home the región with more excess. So were obtained moisture índices for each región. With what is stated that Tabasco has five types of climates.

Key words: Climatic water balance, climate classification, reference evapotranspiration, moisture index

2.1 Introducción

Conocer el régimen hídrico de una región tiene valiosas aplicaciones en diversas áreas. En ciencias agronómicas y en aras de minimizar riesgos en los procesos de producción ayuda a sentar las bases para la zonificación de cultivos, caracterización de sequías, determinación de épocas de siembra, programación de riego e identificación de necesidades de drenaje (Ferguson 1992; Lozada & Sentelhas 2003; McCabe &

Markstrom 2007). Una de las mejores maneras de conocer dicho régimen es por medio de un Balance Hídrico Climático (BHC). Este concepto se introdujo para referirse a las entradas y salidas de agua por lluvia (PP) y evapotranspiración (ET), lo que implica el conteo de la humedad disponible en el suelo aplicando el principio de conservación de la materia en un volumen de control de la zona radical de los cultivos y así conocer los excesos o déficits a lo largo de una temporada (Pereira 2005; Kerkides *et al.* 1996).

El método más utilizado para realizar un BHC es el establecido por Thornthwaite & Mather (1955) y aplicado por Ferguson (1992), Lozada & Sentelhas (2003), McCabe & Markstrom (2007) y Sharma *et al.* (2010). Ellos utilizan la Capacidad de Almacenamiento de Agua del Suelo (CA), promedios mensuales de precipitación (PP) y temperatura (T), con esta última estiman la evapotranspiración de referencia (ET_0) (Kerkides *et al.* 1996). Adicional a estas premisas diversos autores convergen que el período de información climática sea de por lo menos 30 años como sugiere la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Lozada & Sentelhas 2003; Kar & Verma 2004).

Por otra parte, el entendimiento del clima de una zona provee una idea de las características del ambiente, tipo de suelo, flora y fauna; así como de los factores meteorológicos que la gobiernan (Mather & Yoshioka 1967). Además, es de gran provecho en la elaboración de mapas de climas, zonificación agrícola, sistemas de información geográfica (SIG), estudios de impacto ambiental, escenarios climáticos, así como en investigación aplicada (De Souza *et al.* 2007). Sin embargo, investigar el clima de un territorio no es un proceso simple, precisa información multidisciplinaria y personal capacitado. Oliver (2005) alude que para esta labor existe gran diversidad de

métodos, entre ellos están los desarrollados por Köppen, Vahl, Troll, Peguy, Holdridge, entre otros. Sin embargo, muchos científicos se basan en la conjetura de que la vegetación y las masas de aire que alcanzan a la región son la mejor expresión del clima. Para otros la base de la clasificación es la precipitación y la temperatura. Para Thornthwaite (1948), estas clasificaciones presentan limitaciones cuando se requiere para aplicación agrícola, por el motivo de que no consideran variables de suelo y flujos del ciclo hidrológico representados principalmente por la evapotranspiración de los cultivos (De Souza *et al.* 2007). Ante esto, él formuló una metodología para que los climas se ordenen de acuerdo al grado de humedad, tomando en cuenta las necesidades hídricas de los cultivos; y partiendo de los resultados del balance hídrico climatológico (BHC): evapotranspiración (ET), Excesos (EXC) y Déficit (DEF) con los cuales se realizan iteraciones que determinan el índice de humedad (I_h), mismo que posibilita agrupar el clima en una de las clasificaciones que él propone (Thornthwaite 1948; Thornthwaite & Mather 1955).

Con base en los estudios de W. Köppen y Enriqueta García, Velázquez (2004) manifiesta que como producto de su ubicación en el trópico, cercanía al Golfo de México y carencia de elevaciones, Tabasco posee clima tipo A con subtipos Am, Af, Af(m), Am(w) y Aw. Pero esta clasificación no presenta alternativas que se requieren para proyectos agrícolas, por lo cual se plantea el presente trabajo con los objetivos de: definir regiones y épocas con excesos o déficits hídricos; y clasificar el clima de Tabasco de acuerdo al método de Thornthwaite.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Ubicación y características del área de estudio

Tabasco se localiza entre los meridianos 90°59'08'' y 94°07'00'' al oeste del meridiano de Greenwich y los paralelos 17°15'00'' y 18°38'45'' de latitud norte, cuenta con una extensión territorial de 24 738 Km²; y clima dominante de tipo cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Velázquez 1994). En este estado la precipitación promedio es del orden de los 2 500 mm anuales. Los suelos predominantes son vertisol éutrico (433 000 ha), Histosol fibrico y asociación de Gleysoles (341 078 ha) y Fluvisol éutrico (245 828 ha) (López *et al.* 2007; Palma *et al.* 2007).

2.2.2 Información climatológica

Se utilizó información normal de 40 estaciones climatológicas del estado de Tabasco, todas reportadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN); la distribución espacial de éstas, así como su clave y nombre se presenta en la Figura 1. La información climatológica que se utilizó son datos de precipitación, temperaturas máximas y mínimas medias mensuales, en 25 estaciones además de las variables mencionadas se emplearon datos de evaporación media mensual del tanque tipo "A".

2.2.3 Evapotranspiración (ET) y evapotranspiración del cultivo de referencia (ET₀)

De acuerdo con Allen *et al.* (2006) la ET es un proceso simultáneo a través del cual un área de cultivo pierde agua por evaporación del suelo y transpiración del follaje, mientras que ET₀ es la tasa de evapotranspiración (ET) de una superficie de referencia que ocurre sin restricciones de agua.

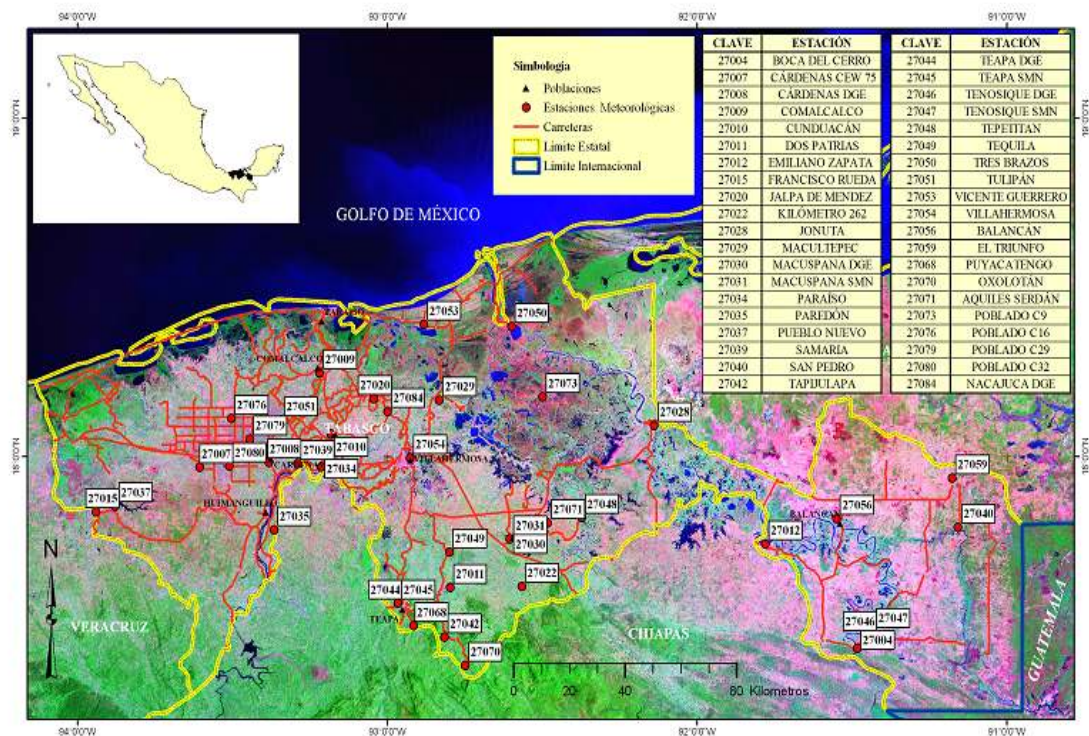


Figura 1. Distribución espacial de 40 estaciones meteorológicas en Tabasco.

2.2.4 Estimación de ET_0 a partir del Tanque evaporímetro tipo A (ET_0 Tanque)

Para 25 estaciones que cuentan con información de evaporación, la evapotranspiración de referencia se calculó con el método del tanque evaporímetro tipo A (Allen *et al.* 2006). Para este método se manejó un coeficiente de tanque (K_p) de 0.80, que se recomienda para regiones tropicales donde prevalece alta humedad relativa y baja velocidad del viento (Doorenbos & Pruitt 1977; Palacios 2002). La evapotranspiración de referencia por el método del tanque evaporímetro cumple la siguiente ecuación:

$$ET_0 = E_{pan} * K_p \quad (1)$$

donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia ($mm\ mes^{-1}$); K_p es el coeficiente de tanque (adim) y E_{pan} es la evaporación del tanque ($mm\ mes^{-1}$).

2.2.5 Estimación de ET_0 a partir de la ecuación de Hargreaves ($ET_{0 \text{ Hargreaves}}$)

Para las 40 estaciones la evapotranspiración de referencia también se estimó con la ecuación de Hargreaves. Ésta utiliza temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media mensual, así como radiación extraterrestre (R_a) en milímetros de evaporación (Allen *et al.* 2006). Esta ecuación se presenta en seguida:

$$ET_0 = 0.0023 (T_{\text{media}} + 17.8) (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.5} R_a \quad (2)$$

donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}); T_{media} es la temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$); T_{max} es la temperatura máxima mensual ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} es la temperatura mínima mensual ($^{\circ}\text{C}$) y R_a es la radiación extraterrestre en milímetros de evaporación (mm día^{-1}).

Allen *et al.* (2006) aclaran que debido a que el método de Hargreaves fue establecido para climas áridos, al utilizarlo en condiciones de trópico húmedo se presenta una sobreestimación de ET_0 debido a la alta humedad relativa y baja velocidad del viento. Por lo anterior, la expresión 3 se utilizó para transformar los datos calculados con el método de Hargreaves de las 15 estaciones que no contaron con datos de evaporación.

2.2.6 Modelo de regresión lineal

De las 25 estaciones donde se calculó la ET_0 con los dos métodos propuestos se utilizaron 20 de éstas para definir con un diagrama de dispersión la relación que existe entre los datos calculados con el método de tanque Tipo “A” y el de Hargreaves, de esta manera se obtuvo el siguiente modelo lineal:

$$ET_{0 \text{ Tanque}} = a + b ET_{0 \text{ Hargreaves}} \quad (3)$$

donde $ET_{0 \text{ Tanque}}$ es la evapotranspiración de referencia obtenida con el tanque tipo “A” (mm mes^{-1}); $ET_{0 \text{ Hargreaves}}$ es la evapotranspiración de referencia obtenida por el método de Hargreaves (mm mes^{-1}); a y b son parámetros de regresión.

Las cinco estaciones restantes (de las 25) que tienen datos de ET_0 con ambos métodos sirvieron para validar la ecuación 3 para lo cual se procedió de la siguiente manera:

Con el modelo se estimó la $ET_{0 \text{ Tanque}}$ en función de la $ET_{0 \text{ Hargreaves}}$ al considerar los datos de las cinco estaciones. Los Valores de $ET_{0 \text{ Tanque}}$ estimados con el modelo (ET_{0EM}) se compararon con los valores de la ET_0 calculados con los datos de la evaporación de Tanque Tipo “A”, para lo cual se utilizaron los siguientes índices estadísticos.

2.2.7 Índices estadísticos para evaluar el ajuste del modelo

Estudios realizados por George *et al.* (2000), Cai *et al.* (2007), Tojo *et al.* (2007) y Kang *et al.* (2009) indican que los índices utilizados para evaluar la bondad de ajuste de un modelo son:

- a) Raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RCCME):

$$RCCME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{(n - 1)}} \quad (4)$$

donde n es el número de observaciones; Y_i es la $ET_{0 \text{ Tanque}}$ (evapotranspiración de referencia estimada con el tanque evaporímetro) y X_i es la ET_{0TEM} (evapotranspiración de referencia estimada con el modelo 3).

- b) Error relativo (ER):

$$ER = \frac{RCCME}{\bar{X}} \quad (5)$$

donde $\bar{X}$ es el promedio de los valores para X_i con $i = 1, 2, \dots, n$.

c) Coeficiente de determinación (R^2):

$$R^2 = \frac{[\sum(Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})]^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2 \sum(X_i - \bar{X})^2} \quad (6)$$

donde $\bar{Y}$ es el promedio de los valores para Y_i .

d) Índice de Willmott (d):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|Y'_i| + |X'_i|)^2} \quad (7)$$

donde Y'_i es $Y_i - \bar{Y}$ y X'_i es $X_i - \bar{X}$.

e) El coeficiente de regresión b , para la regresión a través del origen relaciona los conjuntos de datos Y_i y X_i .

El modelo tiene buen comportamiento cuando $d \geq 0.95$ y $ER \leq 0.20$ (George *et al.* 2000; Tojo *et al.* 2007; Kang *et al.* 2009), también cuando b es cercano a 1.0 (1.0 ± 0.10) y $R^2 > 0.80$ (Caí *et al.* 2007).

2.2.8 Datos de suelo

La textura del suelo representativa para Tabasco es arcilla (López *et al.* 2007; Palma *et al.* 2007).

Se determinó la Capacidad Máxima de Almacenamiento de agua del Suelo (CA) con la textura representativa del Estado, aplicando el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Palacios 2002).

2.2.9 Balance Hídrico Climático (BHC)

El balance hídrico se realizó con el método descrito por Thornthwaite & Mather (1955); y aplicado en diversos estudios (Ferguson 1992; Kerkides *et al.* 1996; Lozada & Sentelhas 2003; Kar & Verma 2004; Pereira 2005; De Souza *et al.* 2007; McCabe &

Markstrom 2007; Sharma *et al.* 2010) donde se afirma que este proceso obedece a la ecuación:

$$HA_i = HA_{i-1} + P_i - ET_{0i} \quad (8)$$

donde HA_i es la humedad almacenada del mes actual (mm); HA_{i-1} es la humedad almacenada del mes anterior (mm); P_i es la precipitación del mes actual (mm) y ET_{0i} es la evapotranspiración de referencia del mes actual (mm). Bajo este enfoque existe deficiencia si $HA_{i-1} + P_i - ET_{0i} < 0$. Por otro lado, el exceso debe cumplir la condición $HA_{i-1} + P_i - ET_{0i} > CA$, el valor de la humedad almacenada (HA) surge de $0 < HA_{i-1} + P_i - ET_{0i} \leq CA$.

2.2.10 Índice de humedad (I_h)

El índice de humedad relaciona los excesos y déficits con la demanda evapotranspirativa del medio, lo que proporciona una clara descripción del clima (Thornthwaite 1948). La ecuación que describe esta relación es:

$$I_h = \frac{100(EXC - DEF)}{ET_0} \quad (9)$$

donde I_h es el índice de humedad (%); EXC es el exceso hídrico (mm); DEF es el déficit hídrico (mm) y ET_0 es la evapotranspiración de referencia (mm).

A partir de este índice se realiza la clasificación de climas con ayuda del Cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación climática (%: porcentaje).

Tipo de clima	Índice de humedad (%)
A Perhúmedo	> 100
B4 Húmedo	80 a 100
B3 Húmedo	60 a 80
B2 Húmedo	40 a 60
B1 Húmedo	20 a 40
C2 Húmedo subhúmedo	0 a 20
C1 Seco subhúmedo	-20 a 0
D Semiárido	-40 a -20
E Árido	-60 a -40

2.3 Resultados

El análisis de regresión al que se sometieron los datos de las 20 estaciones donde se relacionó la ET_0 obtenida con el método de Hargreaves (ET_0 Hargreaves) y Tanque evaporímetro (ET_0 Tanque) se presentan en la Figura 2. En ella puede apreciarse la estrecha relación y el alto grado de ajuste que existe entre los valores estimados por ambos métodos, así como el alto valor del coeficiente de determinación (R^2).

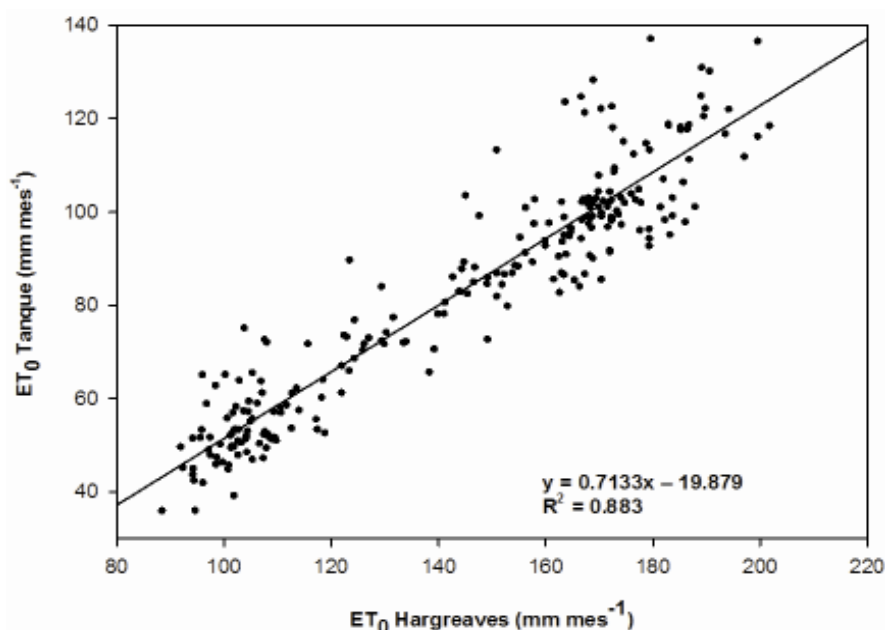


Figura 2. Relación entre la ET_0 obtenida con el método de Hargreaves y Tanque de evaporación.

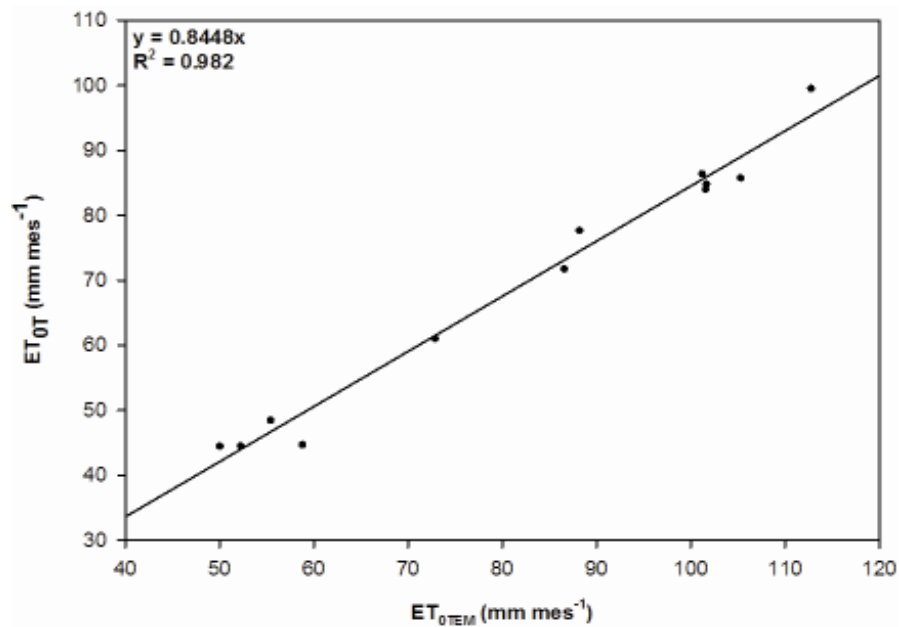
2.3.1 Comparación de ET_0 estimada con el tanque de evaporación ($ET_{0\text{ Tanque}}$) y corregida con el modelo ($ET_{0\text{TEM}}$)

En el Cuadro 2 se muestran los índices estadísticos obtenidos al validar los valores de ET_0 calculados con el Tanque evaporímetro para las cinco estaciones con los calculados con la ecuación del modelo: $y = 0.7133x - 19.879$. Puede apreciarse que para el caso de d , todas las estaciones presentan valores aceptables que van de 0.90 a 0.99. Respecto a R^2 y R_0^2 corresponden respectivamente valores mínimos de 0.85 y 0.84; no presentándose diferencia significativa entre ambos índices para cada estación. En cuanto RCCME y ER, los mejores resultados corresponden a Macultepec y El Triunfo, mientras que los desfavorables son para Dos Patrias y Paraíso. El coeficiente b , se encuentra en el rango de 0.84 a 1.13, pero los valores ideales cercanos a 1, son para: El Triunfo, Francisco Rueda, Macultepec y para Global de ET_0 considerando a ésta como el conjunto de las cinco estaciones.

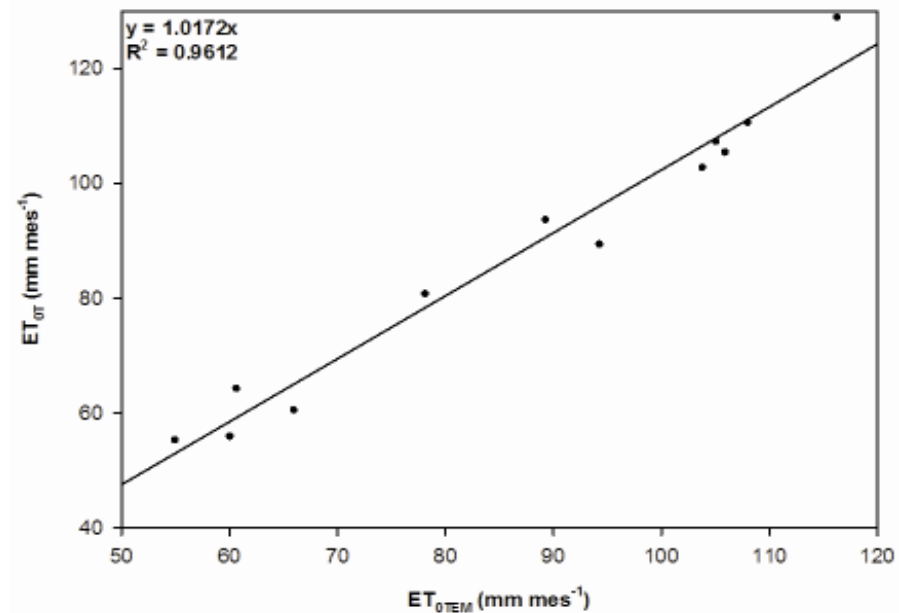
Cuadro 2. Índices estadísticos para la comparación de ET_0 obtenida con el tanque evaporímetro (ecuación 1) y con la ecuación del modelo (RCCME: raíz cuadrada del cuadrado medio del error, ER: error relativo, R^2 : coeficiente de determinación completo, R_0^2 : coeficiente de determinación al origen, d : índice de Willmott, b : coeficiente de regresión).

ESTACIÓN	RCCME	ER	R^2	R_0^2	d	b
Global	9.173	0.111	0.850	0.849	0.960	0.974
Dos Patrias	14.058	0.171	0.982	0.982	0.904	0.845
El Triunfo	5.079	0.058	0.966	0.961	0.988	1.017
Francisco Rueda	9.375	0.112	0.974	0.972	0.964	0.907
Macultepec	3.525	0.042	0.980	0.976	0.994	0.991
Paraíso	11.293	0.149	0.986	0.979	0.936	1.132

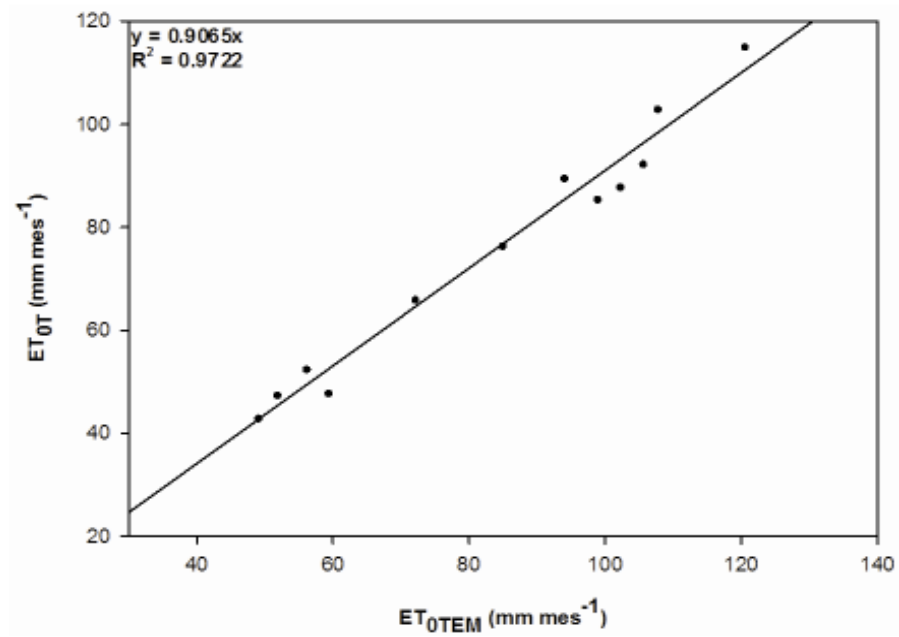
En la Figura 3, se muestran las regresiones a través del origen entre $ET_{0\text{ Tanque}}$ y $ET_{0\text{ TEM}}$ para las cinco estaciones. Puede verse que $ET_{0\text{ TEM}}$ es muy próxima a $ET_{0\text{ Tanque}}$ en El Triunfo, Francisco Rueda y Macultepec. Este hecho es confirmado por sus valores de b cercanos a 1.



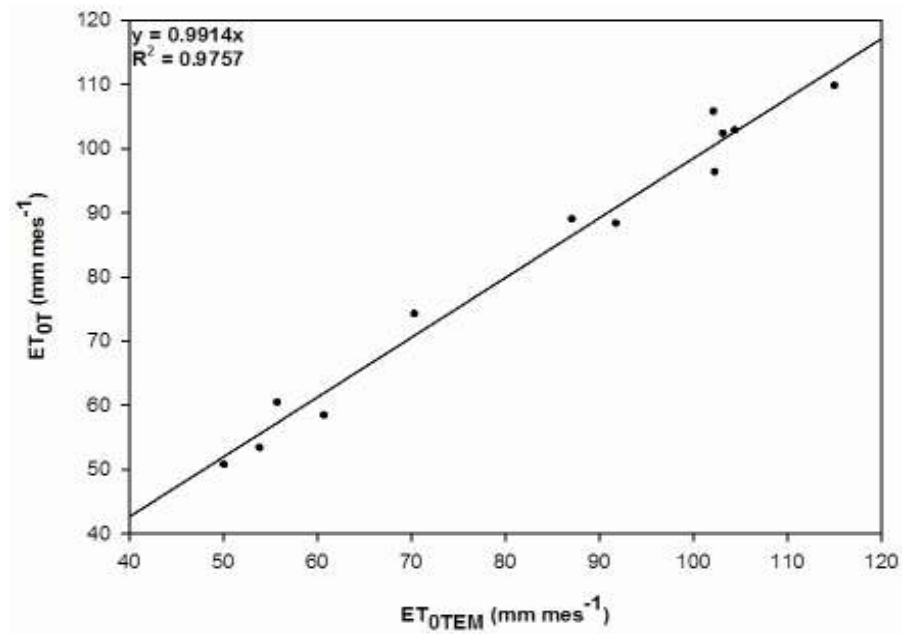
a). Dos Patrias.



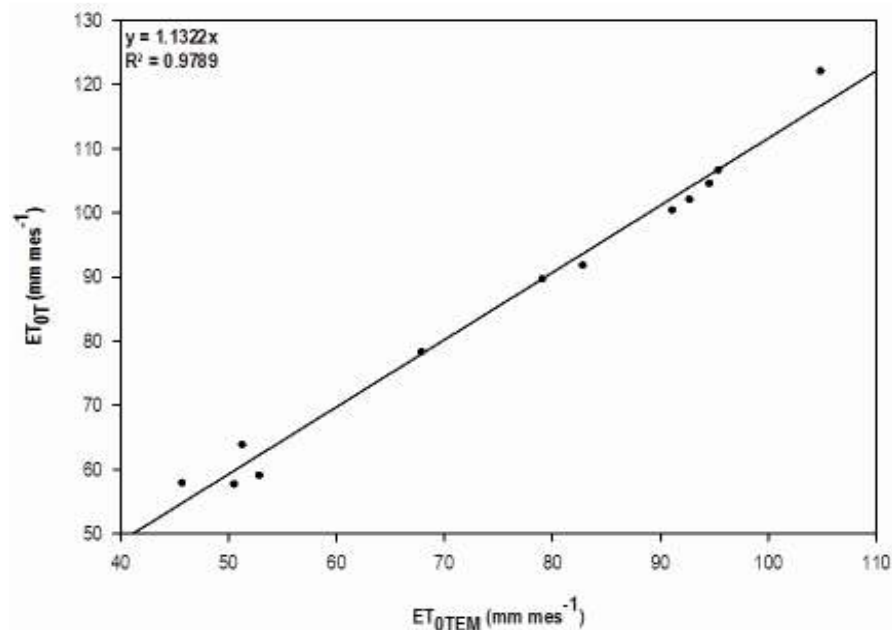
b). El Triunfo.



c). Francisco Rueda.



d). Macultepec.

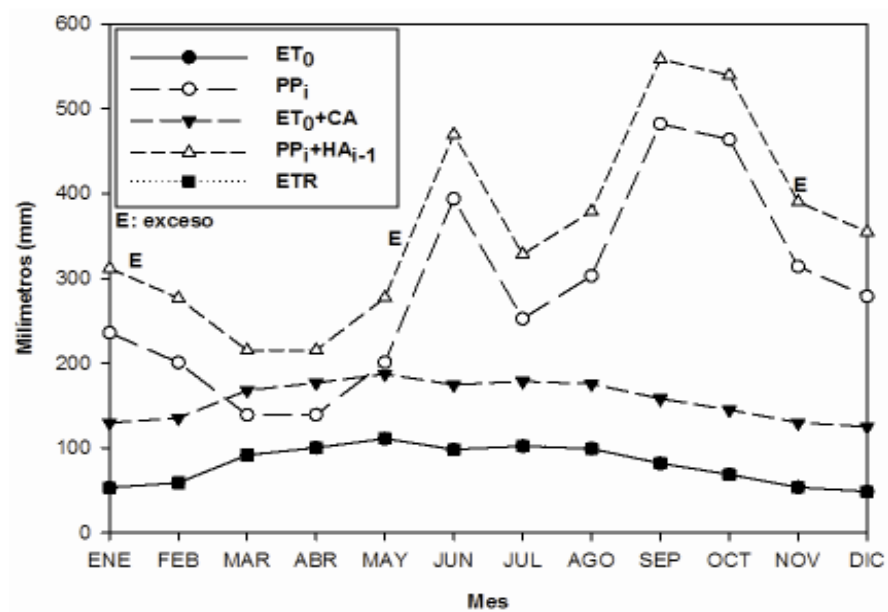


e). Paraíso.

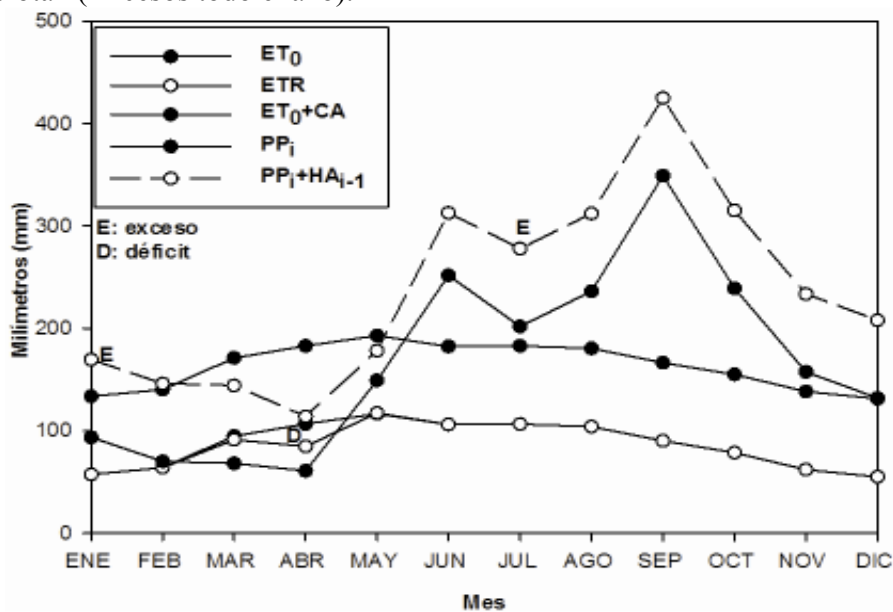
Figura 3. ET_{0 Tanque} en oposición a ET_{0TEM} para las cinco estaciones.

2.3.2 Balance hídrico climático

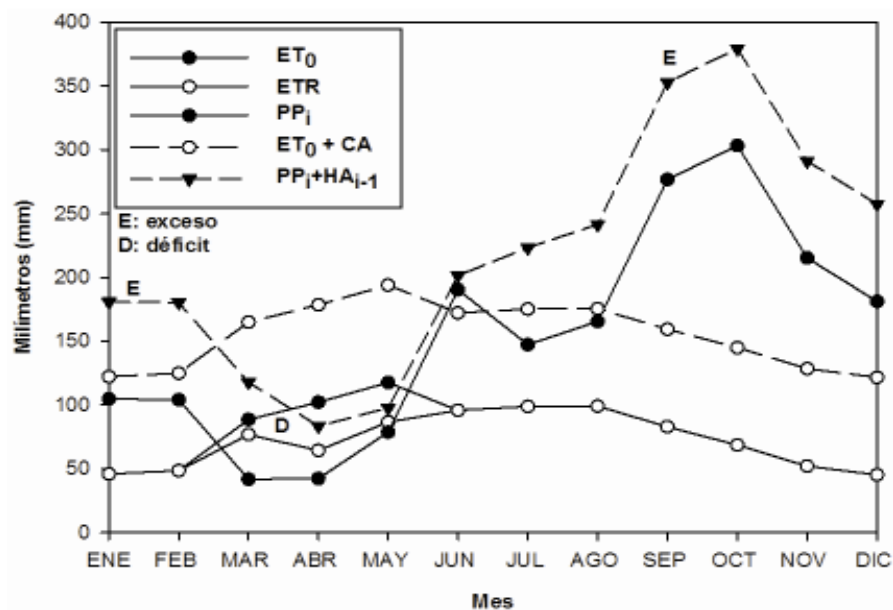
Los resultados del balance hídrico climático indican que Tabasco tiene regiones con: excesos todo el año, déficit bajo, déficit moderado y déficit alto. En la Figura 4, se presentan gráficas de BHC de las estaciones Oxolotán; Tenosique SMN; Vicente Guerrero y Poblado C29, las cuales son representativas de las regiones previamente mencionadas. En las gráficas se observa que para el caso de la región representada por la estación Oxolotán, solo se da un período húmedo ($PP_i + HA_{i-1}$) durante todo el año, siendo en éste cuando se presentan los excesos. Para las otras regiones se identificaron un período seco y otro húmedo; cuyas duraciones difieren para cada región.



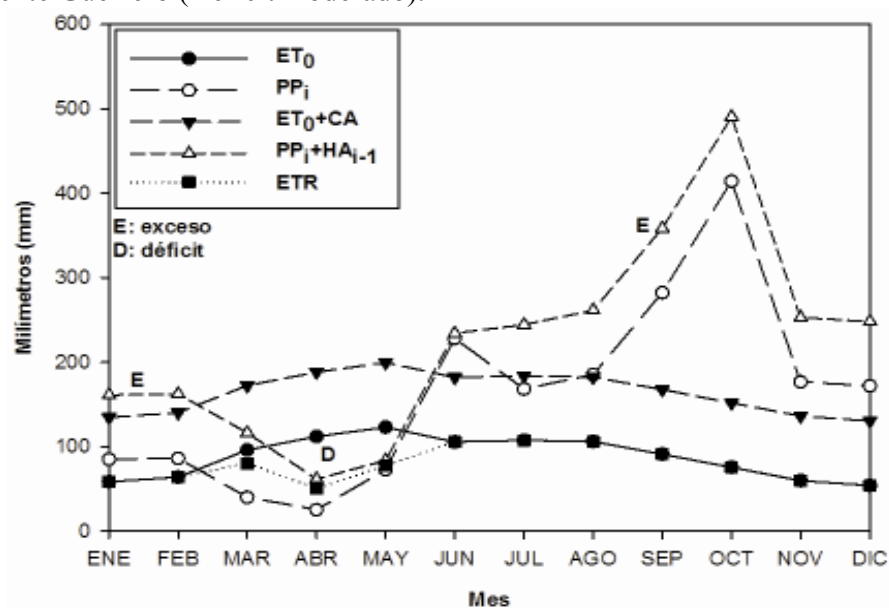
a). Oxolotán (Excesos todo el año).



b). Tenosique SMN (Déficit bajo).



c). Vicente Guerrero (Déficit moderado).



d). Poblado C29 (Déficit alto).

Figura 4. Gráficas de balance hídrico para cada estación representativa (ET_0 : evapotranspiración de referencia, PP_i : precipitación, $ET_0 + CA$: evapotranspiración de referencia más capacidad de almacenamiento de agua del suelo, $PP_i + HA_{i-1}$: precipitación del mes actual más la humedad almacenada del mes anterior, ETR : evapotranspiración real).

Con los resultados obtenidos del balance hídrico, se generaron mapas estatales de distribución de las principales variables climáticas. En la Figura 5 puede apreciarse que los mayores excesos se registran al sur del estado, principalmente hacia las montañas del norte de Chiapas donde se ubican Dos Patrias, Puyacatengo, Kilómetro 262, Oxolotán, Tapijulapa y Teapa. En relación con los déficits, los valores más altos se presentan al centro, norte y noreste del estado (Figura 6). Con los montos de excesos, déficits y evapotranspiración de referencia se obtuvieron los índices de humedad, cuyos valores más altos se obtuvieron en lugares con mayor precipitación, los más bajos en áreas con menor monto de lluvia anual y elevada evapotranspiración, con dichos índices se realizó la clasificación climática; encontrándose que en Tabasco existen cinco diferentes tipos de clima (Figura 7).

2.4 Discusión

A pesar de la subestimación (Dos Patrias) y sobreestimación (Paraíso) de b , observadas en la comparación (Tabla 3), se concluye que las correcciones realizadas a ET_0 Hargreaves con la ecuación obtenida del modelo proporciona resultados aceptables; por tanto, puede sugerirse el uso de ésta para ajustar los valores de ET_0 Hargreaves de la región.

En cuanto a la humedad del Estado, ésta varía en función del área geográfica y variables climatológicas (PP y ET_0). Sin embargo, se encontró que la variación de la humedad también se da a nivel regional, tal es el caso del municipio de Macuspana; ya que la estación kilómetro 262 presenta excesos todo el año, mientras que en Aquiles Serdán, Macuspana SMN, Macuspana DGE y Tepetitán se registran déficits bajos. Del mismo modo para el municipio de Centro; Macultepec y Pueblo Nuevo presentan déficit bajo y al mismo tiempo Villahermosa presenta déficit alto.

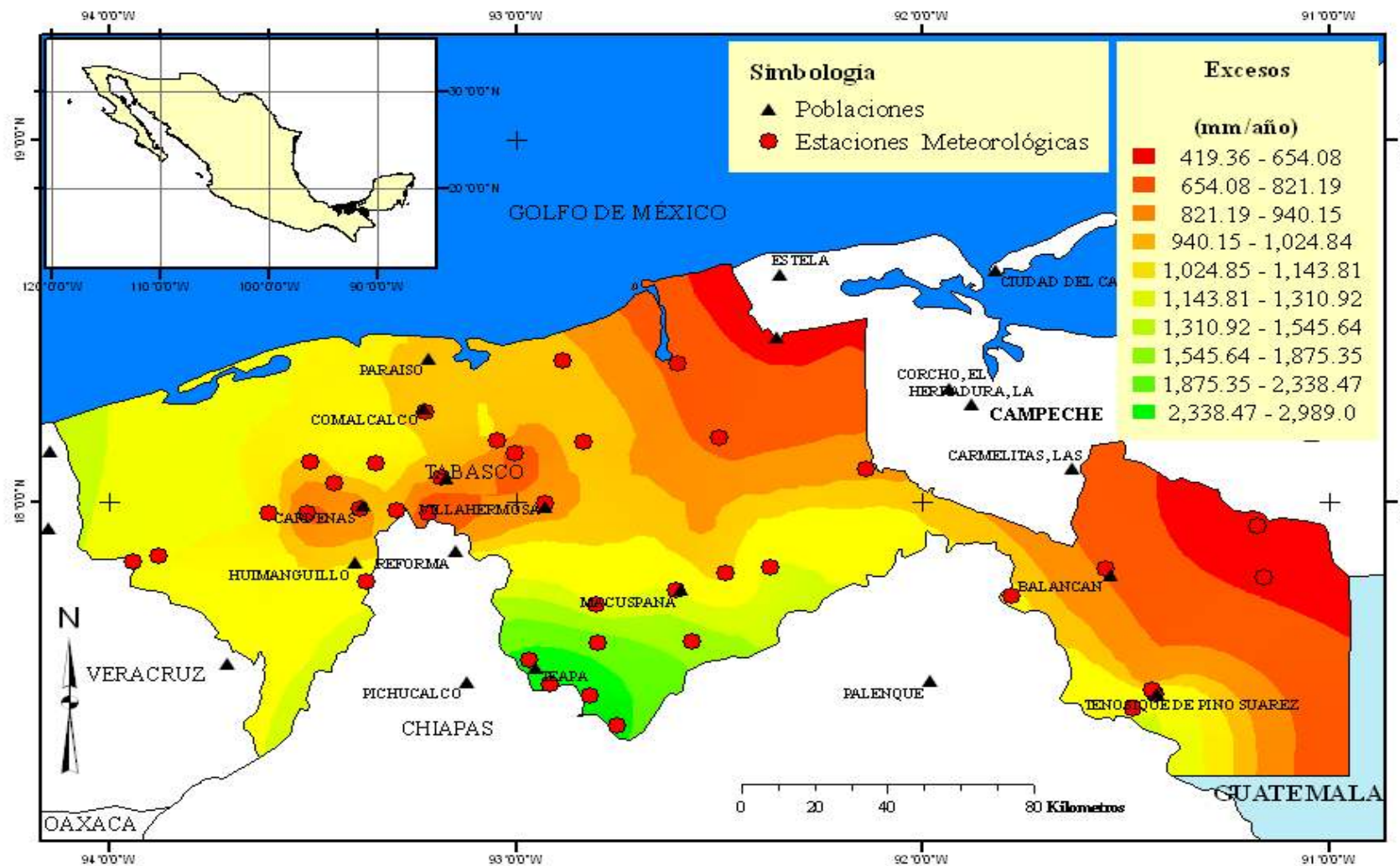


Figura 5. Distribución espacial de los excesos en Tabasco.

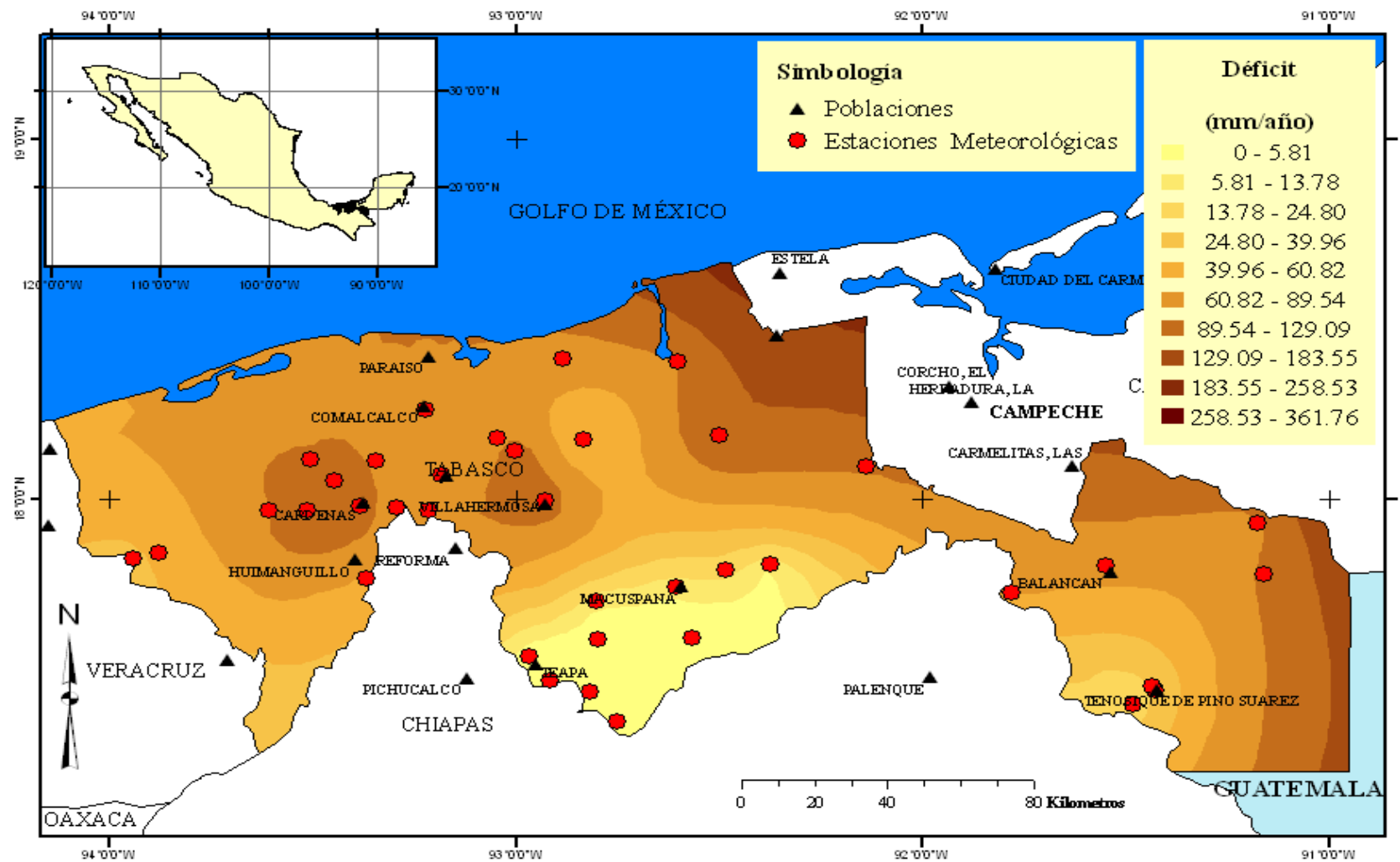


Figura 6. Distribución espacial de los déficits en Tabasco.

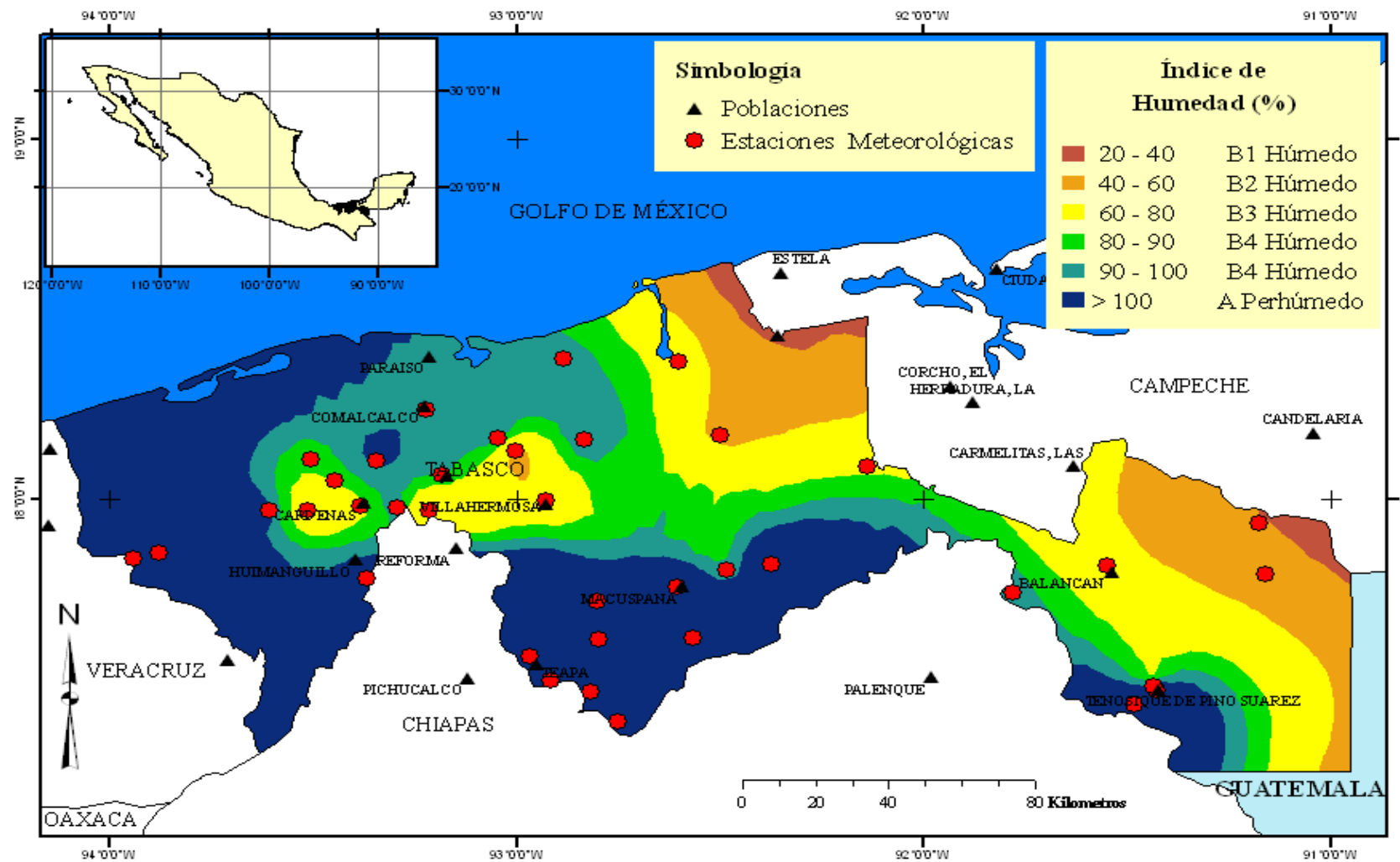


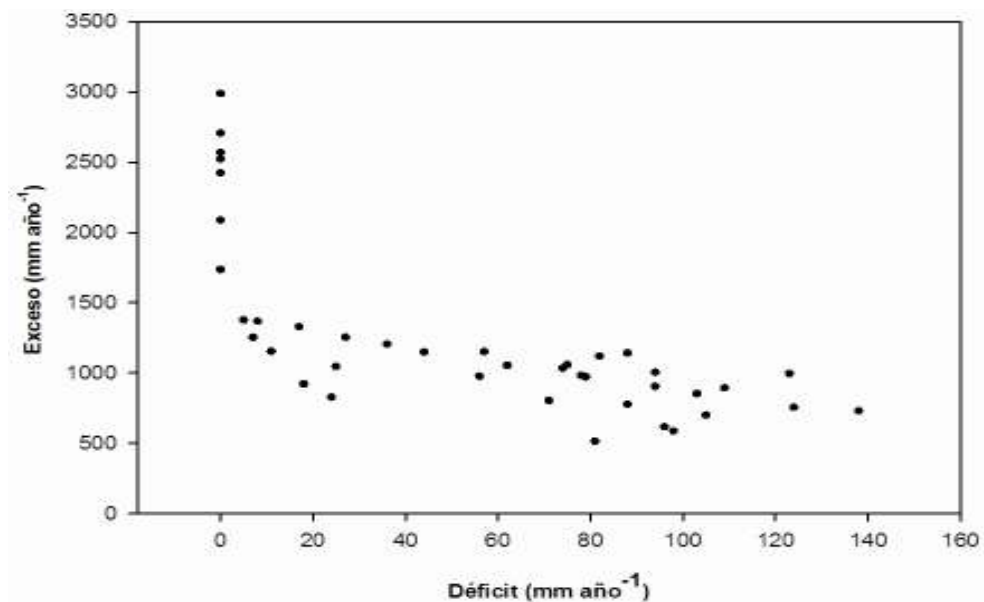
Figura 7. Distribución espacial de los climas de Tabasco.

Lo mismo para Huimanguillo, pues Francisco Rueda presenta déficit bajo, mientras que Paredón déficit moderado y el Poblado C32 déficit alto, esta comunidad expresa el déficit más alto de la entidad tabasqueña. Por su parte Cárdenas, en la estación Cárdenas CEW75 y Poblado C16 revelan déficit moderado, en tanto que Cárdenas DGE, Poblado C9 y Poblado C29 déficit alto.

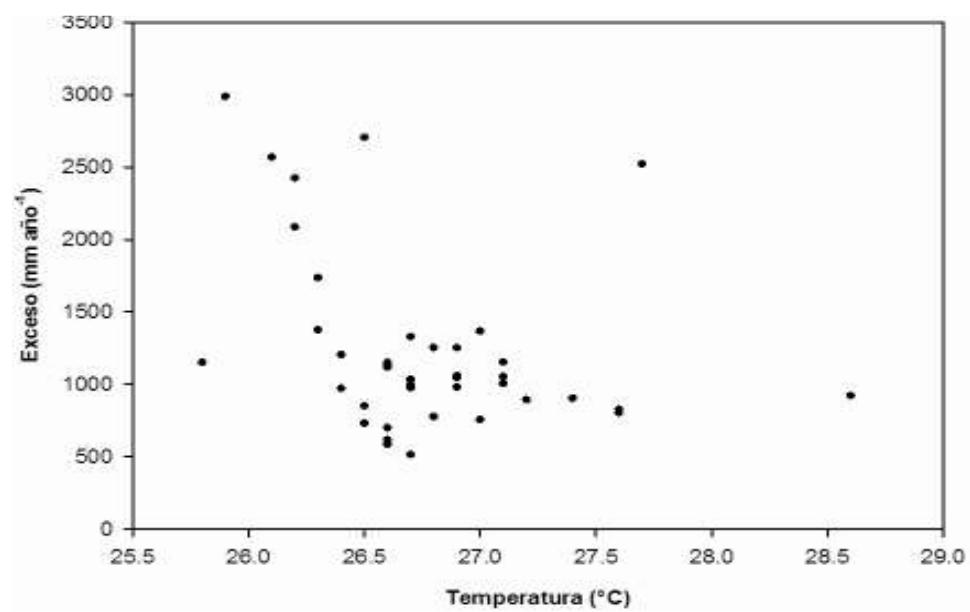
En relación con la marcha de humedad en el tiempo; las estaciones Puyacatengo, Dos Patrias, Kilómetro 262, Oxolotán, Tapijulapa, Teapa DGE y Teapa SMN únicamente tienen un período húmedo a lo largo del año, en el cual se presentan los excesos. Los municipios restantes presentan un período húmedo y otro seco, el primero se presenta de junio a febrero a excepción de las estaciones: El Triunfo y San Pedro las cuales lo presentan de junio a enero, Tepetitán lo tiene de junio a marzo; mientras que Nacajuca DGE, Paraíso lo tienen de agosto a febrero y Poblado C32 de julio a febrero. Para todas las estaciones que presentan período seco, este se da de marzo a mayo a excepción de las estaciones Aquiles Serdán, Boca del Cerro, Macuspana DGE, Tenosique DGE y Tenosique SMN que lo presentan de marzo a abril; por otro lado Macuspana SMN y Tequila lo presentan de abril a mayo; y Tepetitán en abril. En la Figura 4 puede observarse la variación de humedad a lo largo del año. Estos resultados se apegan a lo reportado por Velázquez (1994).

Los diagramas de dispersión entre déficit y exceso (a), exceso y temperatura (b), precipitación y exceso (c); y precipitación y déficit (d) se muestran en la Figura 8. Para el primer caso (a), nótese que las estaciones que presentan exceso superior a 1500 mm no presentan déficit y que las estaciones que presentan ambas situaciones tienen el común de que la mayoría de excesos se encuentran en el rango de 600 a 1200 mm. En

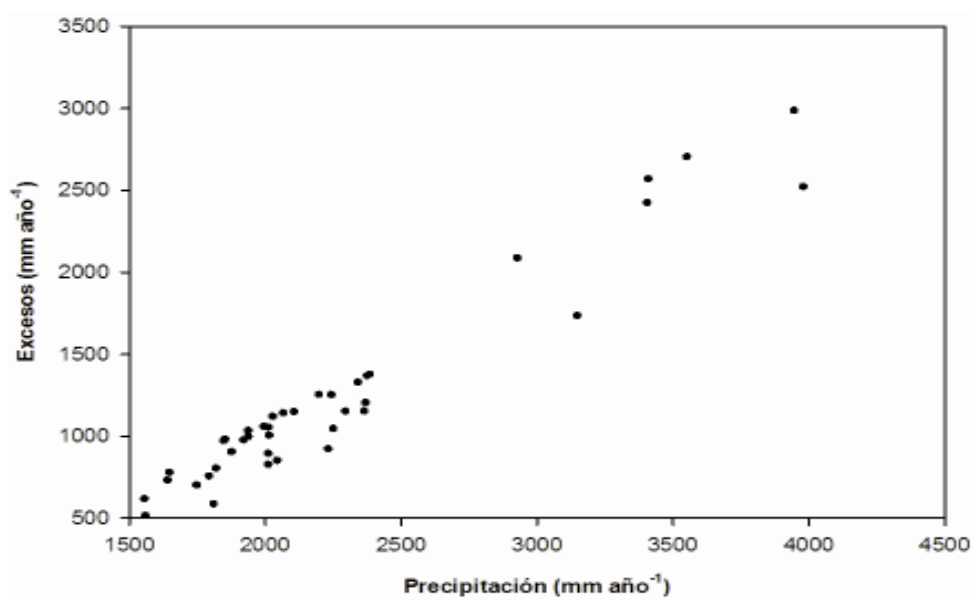
(b) se observa que la mayor parte de excesos, los cuales se encuentran entre 600 y 1500 mm se dan de 26 a 27.5 °C. Una relación estrecha se aprecia en (c) y como era de esperarse puede verse que la magnitud de los excesos aumenta conforme aumenta la precipitación, además la mayoría de los excesos ocurren en el rango de 1500 a 2500 mm de precipitación, en esta situación encontramos el 82.5% del total de estaciones consideradas en el estudio. En (d), puede verificarse que las variables presentan buena correlación, el orden descendente de la distribución muestra que cuando la precipitación aumenta el déficit disminuye y viceversa.



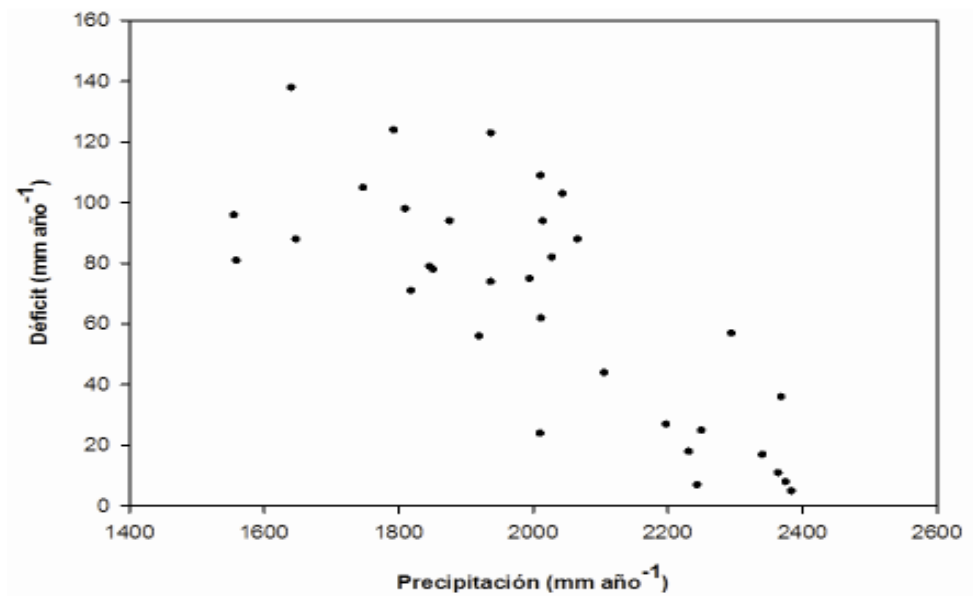
a)



b)



c)



d)

Figura 8. Correlación de variables obtenidas del balance hídrico climático.

2.5 Literatura citada

Allen GR, Pereira LS, Raes D, Smith M (2006) Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Roma. 298 pp.

Cai J, Liu Y, Lei T, Santos-Pereira L (2007) Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology* 145(2007): 22-35.

De Souza-Rolim G, Paes-De Camargo MB, Grosseli-Lania D, Leite-De Moraes JF (2007) Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. *Bragantia: revista de ciencias agronómicas* 66(4): 712-718.

Doorenbos J, Pruitt W (1977) Las necesidades de agua de los cultivos. FAO. Roma. 194 pp.

- Ferguson B (1996) Estimation of Direct Runoff in the Thornthwaite Water Balance. *Professional Geographers* 48(3): 263-271.
- George B, Shende S, Raghuwanshi N (2000) Development and testing of an irrigation scheduling model. *Agricultural Water Management* 46(2000): 121-136.
- Kang S, Evett SR, Robinson CA, Payne WA (2008) Simulation of winter wheat evapotranspiration in Texas and Henan using three models of differing complexity. *Agricultural Water Management* 96(2009): 167-178.
- Kar G, Verma H (2005) Climatic water balance, probable rainfall, rice crop water requirements and cold periods in AER 12.0 in India. *Agricultural Water Management* 72(2005): 15-32.
- Kerkides P, Michalopoulou H, Papaioannou G, Pollatou R (1996) Water balance estimates over Greece. *Agricultural Water Management* 32(1996): 85-104.
- López-Guemez ADR, Palma-González B, Hernández-Rivera MA, Ojeda-Morales ME, Ángeles-Padilla A, Ruiz-Nájera JA, García Marín MJ (2007) Caracterización físicoquímica de los suelos predominantes en el estado de Tabasco. *Conciencia Tecnológica* 7(34): 45-46.
- Lozada-García BI, César-Sentelhas P (2003) Diferencias entre las deficiencias y excedentes hídricos estimados a partir del balance hídrico climático normal y secuencial de las localidades de Bramon, Venezuela, y Piracicaba, Brazil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 11(1): 195-198.
- McCabe G, Markstrom S (2007) A monthly water-balance model driven by a graphical user interface. Reston, Virginia 6 pp.
- Oliver J (2005) *Encyclopedia of world climatology*. Springer. New York. 854 pp.

- Palacios-Vélez E (2002) ¿Por qué, cuándo, cuánto y cómo regar? Para lograr mejores cosechas. Trillas. México. 214 pp.
- Palma-López DJ, Cisneros-Domínguez J, Moreno-Caliz E, Rincón-Ramírez JA (2007) Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable. Colegio de Postgraduados-IPROTAB-FUPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México. 195 pp.
- Roberto-Pereira A (2005) Simplificado o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. Bragantia: revista de ciencias agronómicas 64(2): 311-313.
- Rousell-Mather J, Yoshioka G (1967) The role of climate in the distribution of vegetation. Association of American Geographers 3: 29-41.
- Sharma B, Rao K, Vittal K, Ramakrishna Y, Umarasinghe U (2010) Estimating the potential of rainfed agriculture in India: Prospects for water productivity improvements. Agricultural Water Management 97(2010): 23-30.
- Tojo-Soler CM, César-Sentelhas P, Hoogenboom G (2007) Application of the CSM-CERES Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. European Journal of Agronomy 27(2007): 165-177.
- Velázquez-Villegas G (1994) Los recursos hidráulicos del estado de Tabasco. Universidad Juárez Autónoma del Estado de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. 242 pp.
- Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. American Geographical Society 38(1): 55-94.
- Thornthwaite CW, Mather J (1955) The water balance. Publications in climatology, laboratory of climatology. Centerton, NJ. 104 pp.

CAPÍTULO 3

INICIO DE LA ESTACIÓN DE CRECIMIENTO Y PERÍODOS SECOS EN TABASCO, MÉXICO¹

RESUMEN

En la agricultura de temporal, la información sobre fechas de inicio de las lluvias sirve de base para planear las actividades inherentes a la explotación al grado de determinar el éxito o fracaso de la misma, parte de estos resultados se reflejan después de la siembra (germinación) y al momento de la cosecha. Otro aspecto de gran importancia son los períodos secos que se presentan en el ciclo agrícola, los cuales provocan mala germinación, crecimiento raquítico, desarrollo deficiente y reducciones considerables en el rendimiento. Por esto, se llevó a cabo un análisis del inicio de la estación de crecimiento en Tabasco, con el fin de conocer las fechas de inicio de ésta a diferentes niveles de probabilidad, también se estudió la ocurrencia de períodos secos (definidos con el umbral de 1 mm) con duración de siete días. Para esto se utilizaron datos diarios de precipitación y evaporación de 18 estaciones meteorológicas del Estado. Se encontró que: existe relación entre el inicio medio de la estación de crecimiento y la latitud, así como con la precipitación promedio anual, esto se corroboró con un análisis de regresión lineal en los que para cada caso se encontraron valores de r^2 de 0.6884 y 0.8112, las fechas más tempranas del inicio de la estación de crecimiento se relacionan con bajas probabilidades del inicio éstas, en Tabasco existen tres regiones en las que el inicio de la estación de crecimiento (80%) se ve afectada distintamente por la ocurrencia de períodos secos de siete días.

Palabras clave: estación de crecimiento, balance hídrico, agricultura de temporal, distribución normal, período seco, rendimiento

¹ Ruíz, A. O.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A.; López, L. R. y Ontiveros, C. R. 2010. Enviado a la revista *Universidad y Ciencia*.

ONSET GROWING SEASON AND DRY SPELLS IN TABASCO, MÉXICO

ABSTRACT

In rainfed agriculture, the information about from dates of the rains uses as base to plan the activities inherent to the exploitation to the degree to determine the success or failure of the same one, part of these results they are reflected after the sowing (germination) and to the moment of the crop. Another aspect of great importance they are the dry periods that there appear in the agricultural cycle, which provoke bad germination, rachitic growth, deficient development and considerable reductions in the yield. For this, there was carried out an analysis of the beginning of the rainy station in Tabasco, in order to know the from dates of the rains to different levels of probability, also there was studied the probability of occurrence of dry periods (defined with the threshold of 1 mm) with duration of seven days. For this there were in use daily information of rainfall and evaporation of 18 weather stations of the State. It found that: relation exists between the average beginning of the rains with the latitude and the average annual rainfall. This was corroborated by analysis of linear regression in those who for every case were values of r^2 of 0.6884 and 0.8112; The earliest dates of the beginning of the rains relate to low probabilities of the beginning these; In Tabasco there exist three regions in which the beginning of the station of growth (80%) meets affected distinctly for the occurrence of dry periods of seven days.

Key words: growing season, water balance, rainfed agriculture, normal distribution, dry spell, yield.

3.1 Introducción

La precipitación es el fenómeno meteorológico más importante que está directamente enlazado con el desarrollo económico mundial. Por eso, la investigación en esta temática cada vez cobra mayor importancia en los ámbitos: agrícola, hidrológico, hidráulico y de recursos naturales (Aviad *et al.*, 2004; Faustine *et al.*, 2007; Deni *et al.*, 2008). Desde finales del siglo pasado, diversos trabajos se han venido desarrollando por numerosos

científicos, con el fin de conocer la duración, fecha de inicio y fin de la estación de crecimiento en una región determinada, prestando especial atención a los periodos de sequía que ocurren en este intervalo, su probabilidad de ocurrencia así como su distribución en el tiempo y en el espacio; y son: la expansión de la agricultura (tanto de riego como de seco), el desarrollo industrial, el aumento apresurado de la población, el cambio climático y la pérdida de recursos naturales los acontecimientos que han provocado aumento en la demanda de estos estudios (Deni *et al.*, 2008).

Para el sector agrícola, contar con información del patrón que siguen las lluvias es de vital importancia a la hora de planear las actividades, principalmente aquellas que se relacionan con la preparación del suelo, selección del cultivo y variedad de éste, así como la determinación de fechas y métodos de siembra (Hachigonta *et al.*, 2007), ya que los rendimientos más altos se obtienen cuando los cultivos se establecen de manera oportuna (Sivakumar, 1988). En relación con esto, diversos autores mencionan que el inicio de la temporada de lluvias determina la época de siembra y el inicio de la estación de crecimiento (Benoit, 1977; Aviad *et al.*, 2004; Arteaga *et al.*, 2006), definiéndose la estación de crecimiento como el período del año durante el cual 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, duración y fin de ésta. En este sentido, Aviad *et al.* (2004), comentan que el criterio que se emplee dependerá de la orientación y propósito de la investigación, por su parte, en un estudio para Israel utilizaron dos rangos de umbrales de precipitación, uno de 0.1 a 80 mm con

intervalos de 2.5 mm y otro de 80 a 200 mm con intervalos de 5 mm encontrando que conforme el umbral aumenta, el inicio de la estación de crecimiento se retrasa, su fin se anticipa y como consecuencia la longitud se reduce. En un trabajo similar, Odekunle (2004) aplicó el método de porcentaje de precipitación acumulada, para esto precisó que la estación de crecimiento inicia en la pentada cuyo valor acumulado de la lluvia varía entre 7 y 8% del total anual; y termina en la pentada que se alcanza el 90% de ésta, además declaró que la ventaja de este método es que emplea únicamente datos diarios de precipitación. Con el propósito de obtener fechas de siembra con altas probabilidades de éxito en Zimbabwe, Raes *et al.* (2004) establecieron que el inicio de la estación de crecimiento se da en la fecha en que el total de la precipitación acumulada en cuatro días llega a ser de 40 mm, auxiliándose también de un modelo de balance hídrico. En una investigación sobre la misma línea y utilizando un modelo de balance hídrico del suelo aplicado al cultivo de maíz en el Oeste de Kenya Mugalavai *et al.* (2007) encontraron relación estrecha entre la duración, fecha de inicio y fin de la estación de crecimiento.

Por otra parte, un período seco se define como el período de tiempo en el que la precipitación que se registra es menor a un umbral determinado, a partir del cual el ecosistema empieza a sufrir estrés hídrico importante y visible, lo cual determina que la vegetación active al máximo los mecanismos que le son propios para adaptarse a esta circunstancia ocasionando una reducción considerable del rendimiento (Hershfield, 1971; Luengo *et al.*, 2002). Engelbrecht *et al.* (2006) comentan que cuando se presentan períodos secos con duración de diez días, ocurre un descenso significativo en el número de plántulas de especies forestales tropicales recién emergidas. Por su parte Raes *et al.* (2004) y Stern *et al.* (2006) aseguran que un período seco prolongado después de las

primeras lluvias, puede provocar una salida “en falso” del cultivo, generando la pérdida de las semillas y obligando a los agricultores a una segunda siembra.

En este tópico como en el anterior, también diversos autores han realizado importantes aportaciones, entre ellas resulta valioso mencionar la investigación que Hershfield (1971) llevó a cabo para Maryland en la que aplicó una distribución geométrica para determinar el número total de días secos y su longitud media, con lo que llegó a isolíneas y ecuaciones para calcular la probabilidad de que ocurra un período seco con duración igual o mayor a un determinado número de días en un punto geográfico comprendido entre 31 estaciones, en ese trabajo un día seco se definió a partir de los umbrales: 0.01, 0.10 y 0.25 pulgadas. En trabajos distintos, Faustine *et al.* (2007) y Deni *et al.* (2008) analizaron, respectivamente, la distribución de frecuencia de períodos secos en Tanzania y la distribución espacial de éstos en la Península de Malasia así como su ajuste a siete distribuciones de probabilidad, en ambos estudios consideraron como día seco aquél en que la precipitación es menor a 1.0 mm, sin embargo, en el primero encontraron que el período seco más largo se presentó en el año de 1999 con duración de 249 días, mientras que en el segundo se localizaron períodos secos hasta de 77 días. Luengo *et al.* (2002) estudiaron períodos secos en la Cuenca del Duero, España, empleando cadenas de Markov y distribución de frecuencias de Gumbel, fijando como día seco aquél donde se presenta precipitación menor o igual a 0.1 mm. Para Engelbrecht *et al.* (2006) en un período seco la precipitación es menor que la evapotranspiración media diaria; y bajo este enfoque descubrieron que incluso en la estación húmeda de una región tropical se presentan períodos secos de al menos seis días de duración. Por otro lado, Cindrić *et al.* (2010) en un trabajo sobre períodos secos efectuado para Croacia definieron días secos a

partir de 0.1, 1, 5 y 10 mm, de este modo respecto a las sequías pudieron dividir al país en tres regiones climáticas diferentes. Por último, Alyamani y Sen (1997) en un trabajo sobre duración y variación espacio temporal de períodos secos para el Suroeste de Arabia Saudita hallaron relación inversa entre el número de períodos y sus duraciones, para esto determinaron que en un día seco la precipitación que se presenta es igual a cero.

De las citas presentadas puede verse que existen diferentes criterios para definir el inicio de la estación de crecimiento y la ocurrencia de días secos, sin embargo, la elección de uno de ellos depende de la precisión que quiera obtenerse en los resultados y de la aplicación futura que se le dará a los mismos.

El presente estudio tiene como objetivos: determinar las fechas de inicio de la estación de crecimiento en Tabasco a los niveles del 20, 40, 60 y 80% de probabilidad de no excedencia a partir del balance hídrico diario y la distribución normal, así como conocer la probabilidad de ocurrencia de períodos secos de siete días definidos con el umbral de 1 mm.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Área de estudio

Según Velázquez (1994), Tabasco se localiza en la zona cálida húmeda del hemisferio boreal y comprende la parte occidental de la región sureste del país; ubicándose entre los meridianos 90°59'08'' y 94°07'00'' al oeste del meridiano de Greenwich y los paralelos 17°15'00'' y 18°38'45'' de latitud norte. Limita al norte con el Golfo de México y el estado de Campeche, al sur con el estado de Chiapas y la República de Guatemala y al oeste con el estado de Veracruz. Tiene una extensión territorial de 24 661 Km².

3.2.2 Información climatológica

Se utilizó la que se reporta en el Extractor Rápido de Información Climática (ERIC, V3) creado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2008). Las variables empleadas son datos diarios de precipitación (mm) y evaporación del tanque tipo A (mm), en 18 estaciones ubicadas a lo largo de los 17 municipios del Estado. En el Cuadro 1 se presentan sus características así como los años con la información empleada en el estudio.

3.2.3 Instat Plus V3.36

Es un software que incorpora un paquete de métodos de probabilidad y estadística, así como una gama de herramientas que facilitan el manejo y procesamiento de los datos climáticos aplicables a la agricultura, ha sido generado por la universidad de Reading Inglaterra y empleado en numerosos trabajos de climatología agrícola (Raes et al., 2004; Stern et al., 2006).

Para cada estación se obtuvieron los promedios mensuales de evaporación.

3.2.4 Evapotranspiración de referencia (ET_0)

Ésta se obtuvo a partir de los promedios mensuales de evaporación, empleando la expresión: $ET_0 = K_p * E_{pan}$. E_{pan} es la evaporación del tanque tipo A (mm), K_p es el coeficiente de tanque, mismo que depende del clima de la región. Para este estudio se empleó un K_p de 0.80 (Doorenbos y Pruitt, 1977; Palacios, 2002; Allen et al., 2006). Posteriormente se seleccionó un valor típico anual de esta variable en cada una de las estaciones consideradas.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas.

Estación	Longitud (W)	Latitud (N)	Altitud (m)	Precipitación (mm)	Datos	Años
Boca del Cerro	91° 29'	17° 26'	100	2340	PP Ev	51 47
Dos Patrias	92° 47'	17° 36'	60	2927	PP Ev	48 37
Macuspana DGE	92° 34'	17° 46'	68	2364	PP Ev	51 26
Pueblo Nuevo	92° 52'	17° 51'	60	2105	PP Ev	50 38
Samaria	93° 16'	17° 59'	19	1994	PP Ev	51 47
San Pedro	91° 9'	17° 47'	36	1555	PP Ev	47 27
Tapijulapa	92° 49'	17° 28'	60	3550	PP Ev	38 33
Teapa	92° 58'	17° 34'	72	3409	PP Ev	38 38
Tres Brazos	92° 38'	18° 24'	30	1647	PP Ev	51 20
El Triunfo	91° 10'	17° 56'	60	1559	PP Ev	26 14
Oxolotán	92° 45'	17° 22'	36	3404	PP Ev	25 7
Cárdenas	93° 23'	17° 58'	21	2043	PP Ev	41 29
Francisco Rueda	93° 56'	17° 50'	7	2368	PP Ev	32 20
Macuspana SMN	92° 35'	17° 45'	60	2375	PP Ev	45 18
Paraíso	93° 12'	17° 58'	-	1810	PP Ev	46 27
Villahermosa	92° 55'	17° 59'	10	2010	PP Ev	49 48
Puyacatengo	92° 55'	17° 30'	25	3945	PP Ev	22 22
Nacajuca	92° 55'	18° 12'	-	1747	PP Ev	19 14

PP, precipitación

Ev, evaporación

-, falta información

3.2.5 Capacidad de almacenamiento de agua del suelo (CA)

El cálculo se llevó a cabo con el método que propone el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de Los Estados Unidos (Palacios, 2002). Para esto, se asumió como representativa la profundidad de 70cm y textura arcillosa de los suelos del Estado (Palma et al., 1999).

3.2.6 Balance hídrico

Se efectuó para todas las estaciones y cada uno de los años de los que se dispone información, se utilizó INSTAT PLUS V3.36 (Raes et al., 2004; Stern et al., 2006) ingresando los valores diarios de precipitación, capacidad de almacenamiento de agua del suelo y el valor anual característico de ET_0 para la estación considerada.

3.2.7 Criterio de inicio de la estación de crecimiento

Después de las primeras lluvias del año, es común que se presenten días sin precipitación apreciable (Stern et al., 2006), por tal motivo, para evitar falsos inicios de la estación de crecimiento se considera conveniente que los resultados del balance hídrico sean los que determinen el inicio de ésta; donde el único factor que restringe es la humedad almacenada del suelo (Ortiz, 1987). El modelo de balance hídrico obedece a la expresión $HA_i = HA_{i-1} + P_i - ET_{0i}$. HA_i es la humedad almacenada para un día determinado (mm), HA_{i-1} es la humedad almacenada del día anterior (mm), P_i es la precipitación en el día (mm) y ET_{0i} es la evapotranspiración de referencia del día en cuestión (mm), cuyo valor se mantuvo constante en todo el año. Si $HA_i < 0$ quiere decir que se trata de un día con déficit hídrico en el que es posible que un cultivo dado sufra de estrés, pero si $HA_i > CA$ hay exceso de humedad, sin embargo, desde el punto de vista de disponibilidad de ésta no representa problemas, otro caso que puede presentarse es

que HA_i sea menor que CA pero mayor a cero, este valor representa la humedad que está disponible para el cultivo, lo ideal para que se considere período húmedo es que prevalezca cualquiera de las dos últimas condiciones. Entonces el inicio de la estación ocurre en la fecha que $HA_i > 0$, para los días en que esta condición se mantiene es la estación de crecimiento.

3.2.8 Tratamiento probabilístico del inicio de la estación de crecimiento

Para esto se utilizó la distribución normal considerando que los fenómenos físicos se ajustan a esta distribución (Said y Zárate, 2001). Según estos autores, una variable aleatoria X se distribuye normalmente si su función de densidad es:

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2}; & -\infty < x < \infty \\ 0, & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (1)$$

donde $\mu = E(X)$, $-\infty < \mu < \infty$; $\text{Var}(X) = \sigma^2$, $\sigma^2 > 0$; $e = 2.71828\dots$ y $\pi = 3.14159\dots$. A esta distribución le corresponde una variable aleatoria Z estandarizada que se obtiene con:

$$Z = \frac{X_i - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

donde X_i es el día juliano, μ es la media de los días (día juliano) en los que ha iniciado la estación de crecimiento para los años de los que se disponen datos; y σ es la desviación estándar. Esta expresión, permite conocer la probabilidad que le corresponde a cada uno de los días del año, dicha probabilidad, se obtuvo de tablas de probabilidades acumuladas de la distribución normal (Said y Zárate, 2001). Para conocer el día del año en que inicia la estación de crecimiento a los niveles de 20, 40, 60 y 80% de probabilidad, se le aplicó a estos niveles, la distribución normal estándar inversa para

obtener Z . De este modo, el día (X_i) en que inicia la estación de crecimiento está dado por:

$$X_i = \mu + (Z * \sigma) \quad (3)$$

Sin embargo, no se debe omitir que en algunas regiones de Tabasco también se presentan lluvias desde el primer día de enero (Velázquez, 1994). Esto provoca que la media de la serie del inicio de la estación de crecimiento se vea afectada por los días en que esta variable ha iniciado en esos días lo que conduce a un error en el valor de la probabilidad (probabilidad empírica), el cual puede corregirse con la siguiente función mixta (Thom, 1959):

$$P_c = F_0 + (1 - F_0) * f(x) \quad (4)$$

donde P_c es la probabilidad corregida, $f(x)$ es la probabilidad empírica que le corresponde a cada día (X_i) del año, F_0 es la frecuencia donde el inicio de la estación de crecimiento se presenta el primero de enero; y se obtiene con:

$$F_0 = \frac{n}{m} \quad (5)$$

donde m representa el número de años de la serie y n el número de años en que la estación de crecimiento ha iniciado el primero de enero.

3.2.9 Criterio para definir un día seco

Diversos autores han empleado diferentes criterios para definir un día seco (Alyamani y Sen, 1997; Luengo et al., 2002; Aviad et al., 2004; Odekunle, 2004; Engelbrecht et al., 2006; Faustine et al., 2007; Mugalavai et al., 2008; Cindrié et al., 2009;). En este trabajo, un día seco es el que presenta precipitación menor que 1 mm.

3.2.10 Cálculo de la probabilidad de ocurrencia de períodos secos con duración de siete días

Esta fase se realizó con INSTAT PLUS V3.36 (Raes et al., 2004; Stern et al., 2006). Primero se resumieron los datos de precipitación considerando el umbral de 1 mm, de esta manera se obtuvo el número de días secos y húmedos para cada uno de los años. En seguida los datos de precipitación se ajustaron al Modelo de Markov (Luengo et al., 2002); y con éste se calculó la probabilidad de ocurrencia de períodos de sequía con duración de siete días.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Balance hídrico diario

En el cuadro 2, se presentan los resultados del balance hídrico de la estación Cárdenas para el año de 1958. Cuadros similares a éste se obtuvieron para todos los años y para todas las estaciones. En éstos se presenta el estado de humedad del suelo para cada uno de los días del mes. Los símbolos: -- y ++ indican, respectivamente, que la humedad del suelo es igual a cero (déficit), y por arriba de su capacidad de almacenamiento (excesos), los números expresan el valor de la humedad almacenada (HA_i).

Cuadro 2. Balance hídrico para Cárdenas, 1958.

Día/Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	++	24	43	--	--	66	66	54	++	68	++	++
2	++	21	40	--	--	++	++	51	73	++	73	++
3	73	18	37	--	--	++	++	64	72	++	72	++
4	70	15	34	--	--	++	74	68	++	++	++	73
5	68	12	31	--	--	++	++	65	++	++	73	70
6	72	9	28	--	--	75	++	63	73	75	++	67
7	++	6	25	--	--	73	++	65	++	72	73	++
8	73	3	22	--	--	70	++	62	++	69	72	++
9	70	--	19	--	--	67	++	60	73	++	70	73
10	67	--	16	--	--	64	++	57	70	++	++	70
11	64	--	13	--	--	61	73	++	++	++	++	73
12	61	--	10	--	--	++	++	73	74	75	73	70
13	58	--	12	--	--	73	++	70	++	++	70	67
14	55	--	14	--	--	71	++	67	73	73	67	74
15	52	--	19	--	--	68	73	64	70	73	64	++
16	54	--	24	--	--	65	70	61	67	++	61	++
17	51	--	21	--	--	62	++	58	++	++	58	++
18	48	--	18	--	17	++	++	55	++	++	55	++
19	45	--	15	--	28	73	73	52	73	++	++	73
20	42	--	12	--	48	++	71	49	70	73	++	70
21	45	--	9	--	53	73	68	46	67	70	++	67
22	42	--	6	--	58	70	65	43	64	67	73	64
23	39	--	3	--	55	67	62	40	65	65	70	61
24	37	53	5	--	52	73	63	37	62	62	67	58
25	34	55	17	--	49	70	64	41	++	59	64	56
26	31	52	14	--	46	71	61	38	++	57	61	58
27	31	49	11	--	43	++	58	36	++	54	58	62
28	31	46	8	--	41	73	55	33	++	53	72	++
29	33		5	--	38	70	52	31	73	50	++	73
30	30		2	--	35	67	59	40	70	++	++	75
31	27		--		32		56	++		++		++

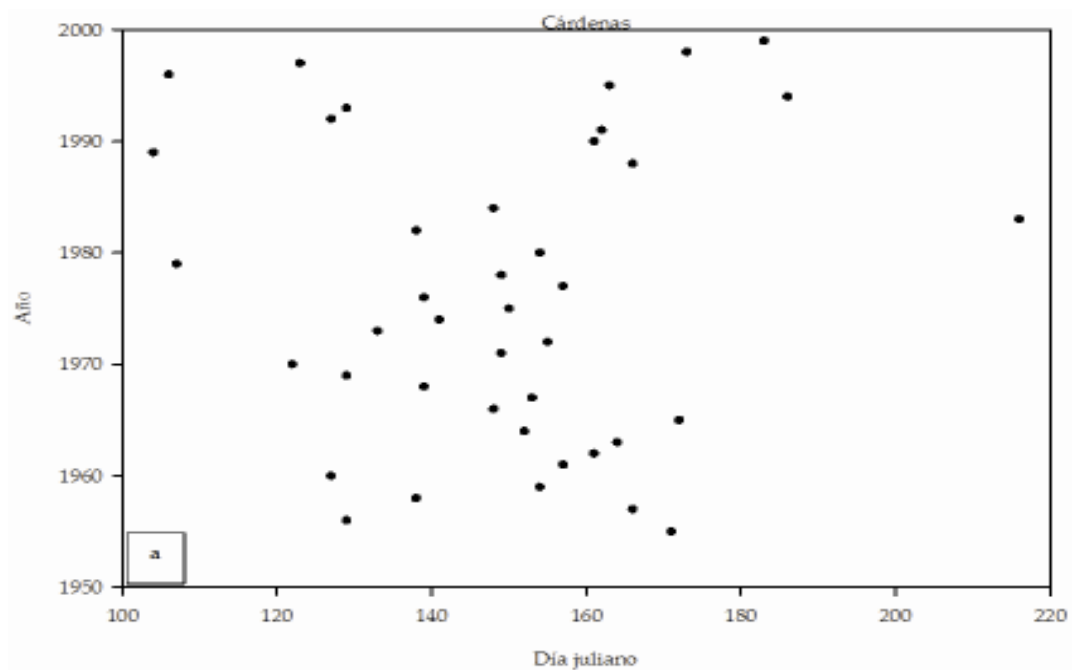
Como puede verse, los déficits se presentaron del nueve al 23 de febrero, a finales de este mes y hasta el 30 de marzo, se interrumpieron, para reanudarse el día 31, y prolongarse hasta el 17 de mayo. Por la situación intermitente de la humedad (déficits en los primeros cuatro meses), de acuerdo al criterio de inicio de la estación de crecimiento,

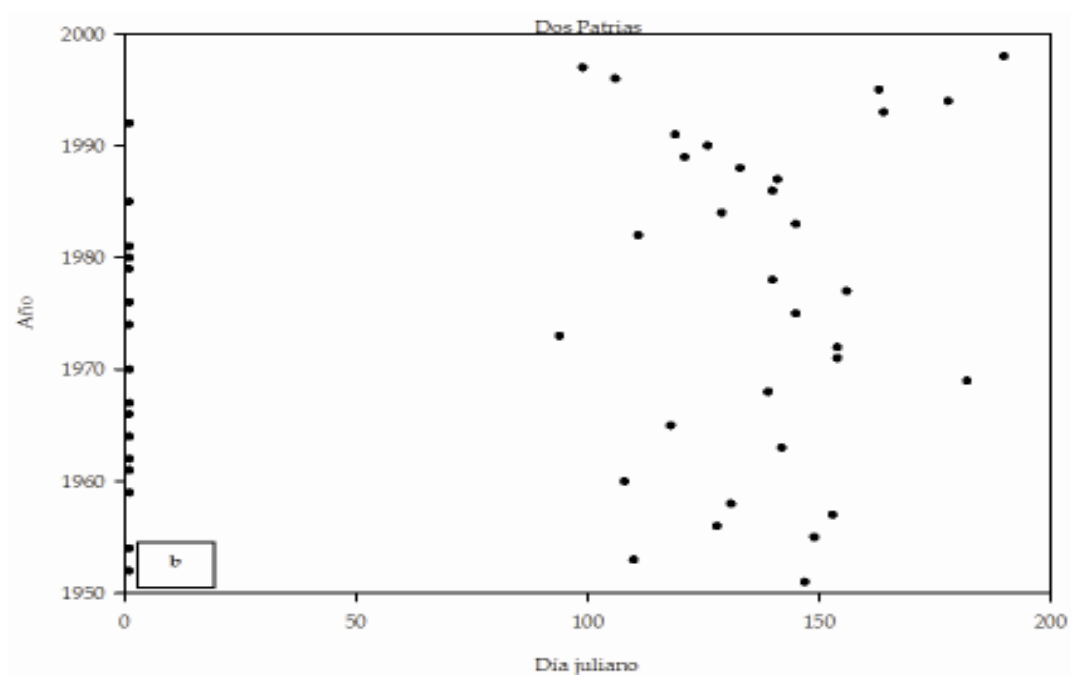
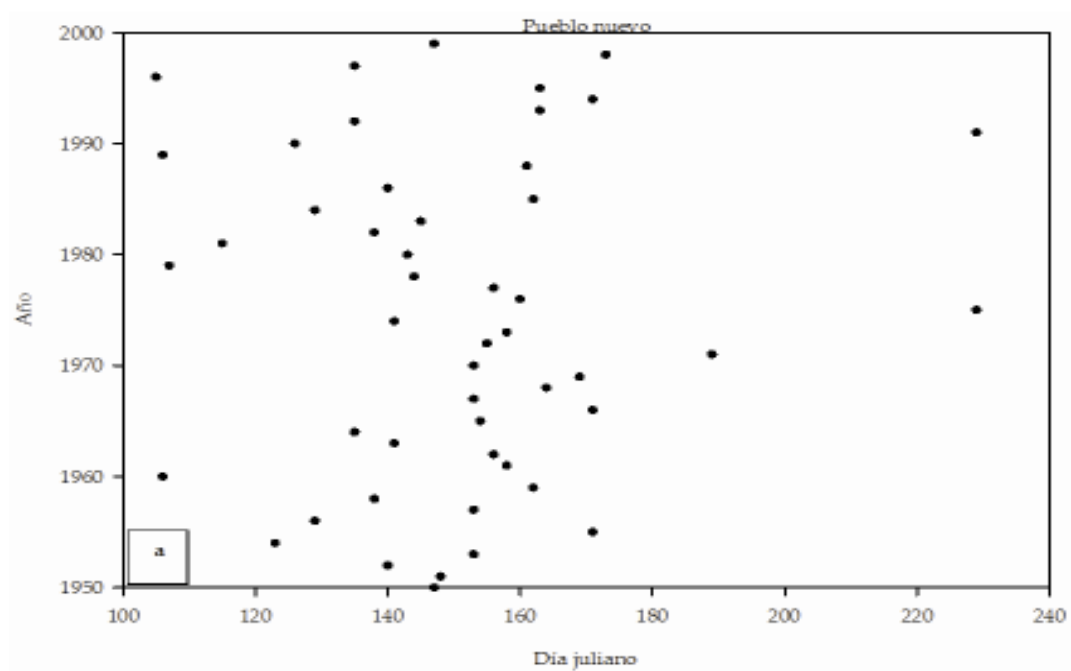
ésta comenzó una vez que la humedad disponible perduró sin interrupción para el resto del año o para un período de tiempo considerable que diera lugar a la obtención de al menos una cosecha de un cultivo determinado (Eldin, 1983). Para el área de influencia de Cárdenas, puede verse que la estación de crecimiento en ese año inició el 18 de mayo. Toda siembra efectuada en enero, febrero y marzo, hubiera conducido al fracaso. No obstante, con siembras en el primer y tercer mes las semillas habrían alcanzado a germinar, incluso, las plántulas hubieran crecido, pero al experimentar 15 días de sequía (siembra de enero), hubieran sufrido estrés hídrico que de superarlo las reducciones en el rendimiento hubieran sido pronunciadas (Doorenbos y Kassam, 1977; Brower *et al.*, 1990; Allen *et al.*, 2006). Por otro lado, siembras a principios de febrero hubieran conducido a una inevitable pérdida de la semilla (Stern *et al.*, 2006). Con estos cuadros se obtuvieron las fechas de inicio de la estación de crecimiento para cada una de las estaciones y años de los que se dispone de datos.

3.3.2 Inicio de la estación de crecimiento

Las estadísticas básicas calculadas para el inicio de la estación de crecimiento fueron la media y la desviación estándar. La desviación estándar presentó una variación entre 19 (El Triunfo) y 71 (Oxolotán). La media se encontró entre 38 (Tapijulapa) y 185 (Nacajuca). Para trece de las estaciones consideradas, la estación de crecimiento inició entre los días 130 y 180 en la mayor parte de los años (Figura 1a), para éstas, la desviación estándar varió entre 19 y 54, el valor más bajo corresponde a El triunfo, que de su serie de datos (26 años), solo en tres años la estación inició fuera del rango señalado: dos años, ha iniciado antes (un año 12 días antes y otro un día después) y solo uno después (36 días después), el valor más alto de la desviación estándar correspondió

a Francisco Rueda; y se debe a 11 años de los cuales en cinco esta variable inició en enero, cinco años entre los días 95 (cinco de abril) y 128 (ocho de mayo) y un año el día 205 (24 de julio). Para las cinco estaciones restantes (Puyacatengo, Dos Patrias, Tapijulapa, Teapa y Oxolotán), los valores de la desviación estándar variaron entre 61 y 71 debido a que entre el 33 y 71% de los años de las serie, la estación de crecimiento inició el primero de enero, sin embargo, todas comparten el común de que el resto de los años inició entre los días 100 (10 de abril) y 160 (9 de junio) (Figura 1b).





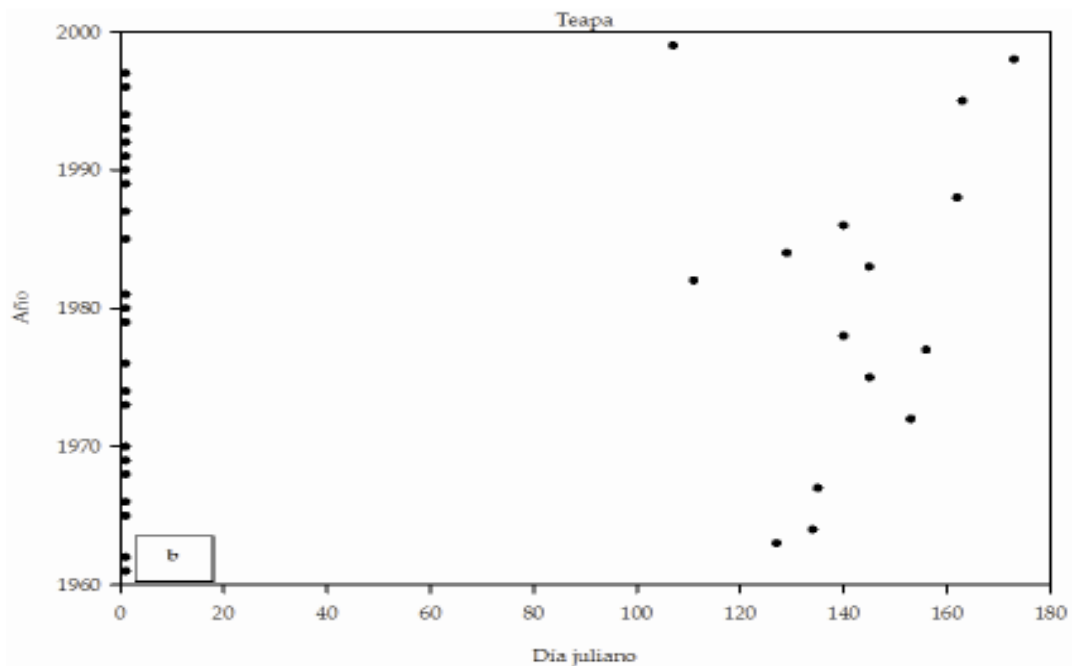


Figura 1. Inicio de la estación de crecimiento para cada uno de los años de registro.

Se encontró que la estación de crecimiento empieza tempranamente en regiones que se encuentran orientadas al sur del Estado y con rumbo a las montañas del norte de Chiapas. Para las estaciones que se ubican cerca de las costas del Golfo de México el inicio de la estación de crecimiento se retrasa, lo cual se verificó con un diagrama de dispersión (Figura 2a) al relacionar la fecha media de inicio de la estación de crecimiento con la latitud, encontrándose para r^2 el valor de 0.6884.

También se encontró que las estaciones que presentan inicio anticipado de la estación de crecimiento tienen correspondencia con los valores más altos de precipitación total anual, esto se corroboró con el valor de r^2 de 0.8112 que se obtuvo de la regresión lineal entre la fecha media de inicio y la precipitación anual (Figura 2b), por lo que es lógico pensar que: a mayor precipitación anual o a valores altos de precipitación, ésta se

distribuya en una estación de crecimiento más o menos prolongada; y para que esto se cumpla debe existir inicio anticipado de la misma.

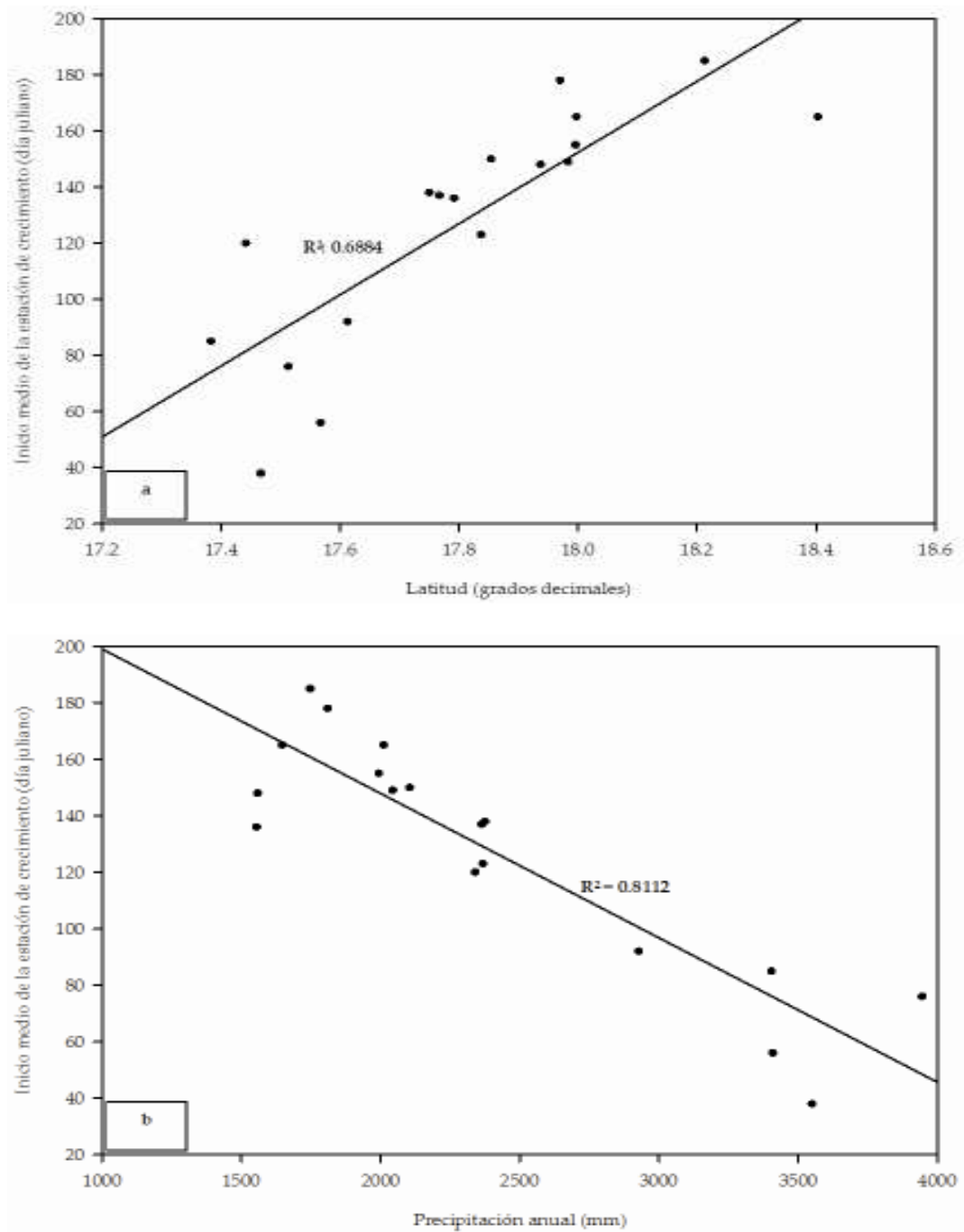


Figura 2. Relación entre el inicio medio de la estación de crecimiento con la latitud (a) y la precipitación anual (b).

En el Cuadro 3, se muestran las fechas de inicio de la estación de crecimiento al 20, 40, 60 y 80% de probabilidad de no excedencia calculada para todas las estaciones que se utilizaron en el estudio. Para el 20%, el inicio osciló entre los días 77 (18 de marzo) y 152 (1 de junio), para el 40, entre 1 (1 de enero) y 175 (24 de junio); para 60, entre 125 (5 de mayo) y 195 (14 de julio); y para el 80, entre 116 (26 de abril) y 218 (6 de agosto). Estos valores se interpretan de la siguiente manera: para la columna del 20%, los valores indican que en un año de cada cinco el inicio de la estación de crecimiento ocurre en ese día o antes para el área de influencia de esa estación, mientras que para el 40, 60 y 80 son dos, tres y cuatro de cada cinco, respectivamente.

En la Figura 3, se presenta el análisis probabilístico para la estación Paraíso, con ella se puede conocer de forma gráfica la probabilidad que le corresponde a una fecha dada de que la estación de crecimiento inicie y viceversa, así mismo puede apreciarse que a medida que los días transcurren, mayor es la probabilidad de que esta variable inicie. Las cuatro fechas de inicio de la estación de crecimiento obtenidas para cada estación, brindan una idea confiable de las fechas de siembra con cierta probabilidad (misma probabilidad del inicio de la estación de crecimiento) de que al momento de realizar esta actividad exista suficiente humedad en el perfil del suelo para dar lugar al proceso de germinación. Así, en este estudio las fechas de siembra se han clasificado como sigue: el inicio de la estación de crecimiento que le corresponde el 20% de probabilidad es la fecha de siembra temprana, el 40 y 60 son las fechas medias y el 80 es la fecha de siembra tardía.

Cuadro 3. Probabilidad de inicio de la estación de crecimiento en o antes de los días indicados.

Estación	Probabilidad (%)			
	20	40	60	80
Cárdenas	130	143	155	168
Francisco Rueda	77	109	136	168
Macuspana SMN	104	128	148	172
Paraíso	145	168	188	211
Villahermosa	139	157	173	192
Campo E. Puyacatengo*			125	145
Nacajuca	152	175	195	218
Boca del Cerro	82	109	132	159
Dos Patrias*		107	132	151
Macuspana DGE	103	127	148	172
Pueblo Nuevo	129	144	156	171
Samaria	131	148	162	179
San Pedro	108	128	145	164
Tapijulapa*				116
Teapa*				141
Tres Brazos	139	157	172	190
El Triunfo	132	143	153	164
Oxolotán*		1	134	148

El * que aparece para las estaciones Puyacatengo, Dos Patrias, Tapijulapa, Teapa y Oxolotán indica, respectivamente, que el primero de enero hay una probabilidad de 45, 33, 71, 61 y 40% de inicio de la estación de crecimiento.

Con ayuda del Cuadro 3, se generaron mapas estatales de distribución espacial del inicio de la estación de crecimiento al 20 (Figura 4) y 80% (Figura 5) de probabilidad de no excedencia, en los que se puede apreciar que para ambos niveles el inicio de la estación

se anticipa en el sur del estado. Por otra parte, la fecha que promete mayores esperanzas de éxito en el establecimiento del cultivo es la que deriva del 80% de probabilidad de no excedencia, sin embargo, las desventajas a las que se expondría el productor es que en las siembras tardías de este tipo, debido a la intensidad de las precipitaciones y a que a principios del ciclo agrícola el suelo aún no está ocupado por las raíces de las plantas existen muchas posibilidades de lixiviación y arrastre de sustancias nutritivas, mayormente en suelos del trópico donde existe una baja capacidad de retención de humedad (Wambeke, 2003), además de que se incrementarían los gastos por conceptos de control de malas hierbas que proliferan con mayor agresividad una vez establecida la estación de crecimiento. Por otra parte, existe el riesgo de cosechar cuando los precios del producto se mantienen bajos a causa de la saturación del mercado, por eso, está visto que para vender a buen precio los agricultores prefieren sembrar anticipadamente, aunque para esto la fecha sea determinada con base en su experiencia.

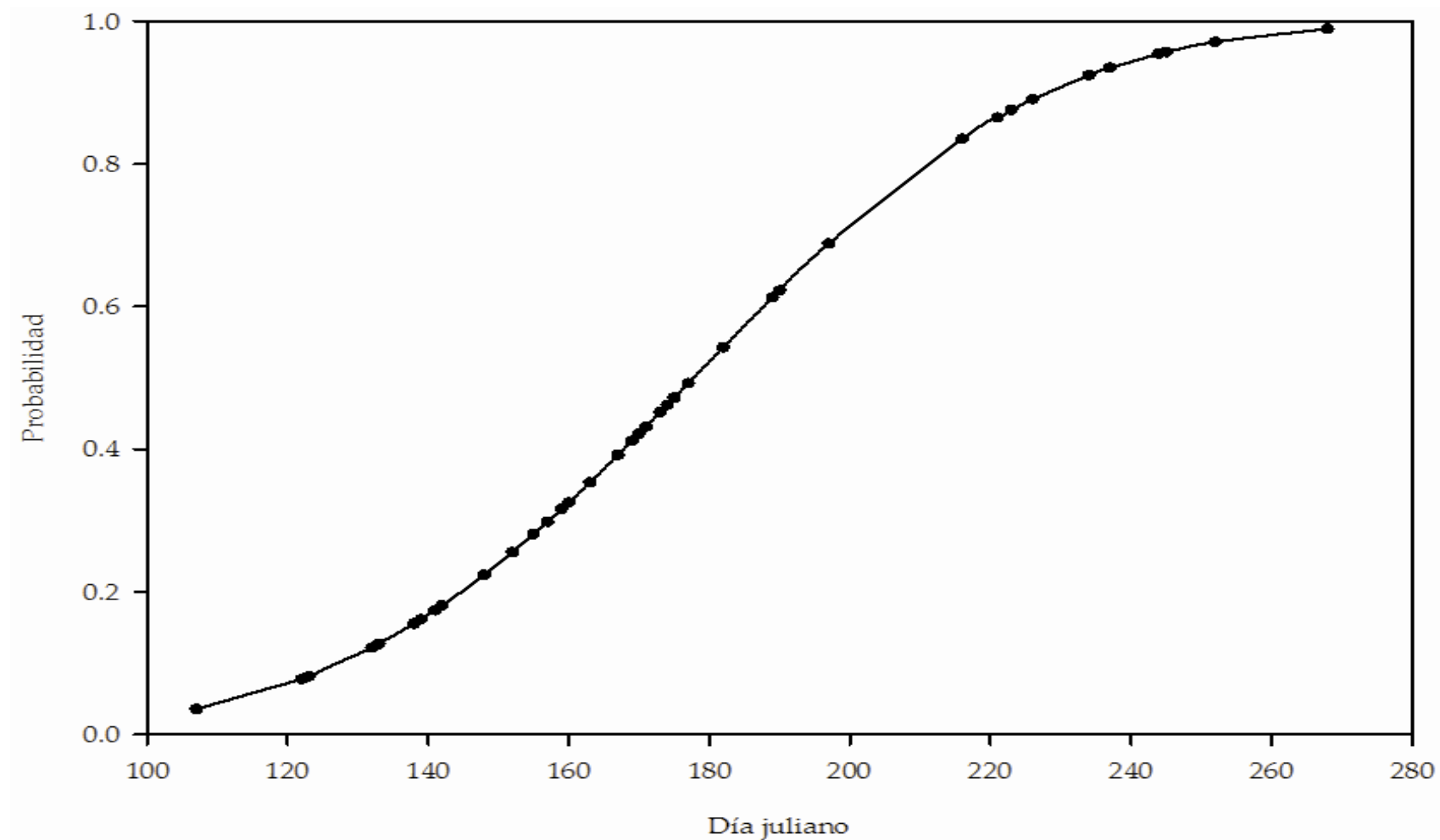


Figura 3. Análisis probabilístico del inicio de la estación de crecimiento (Paraíso).

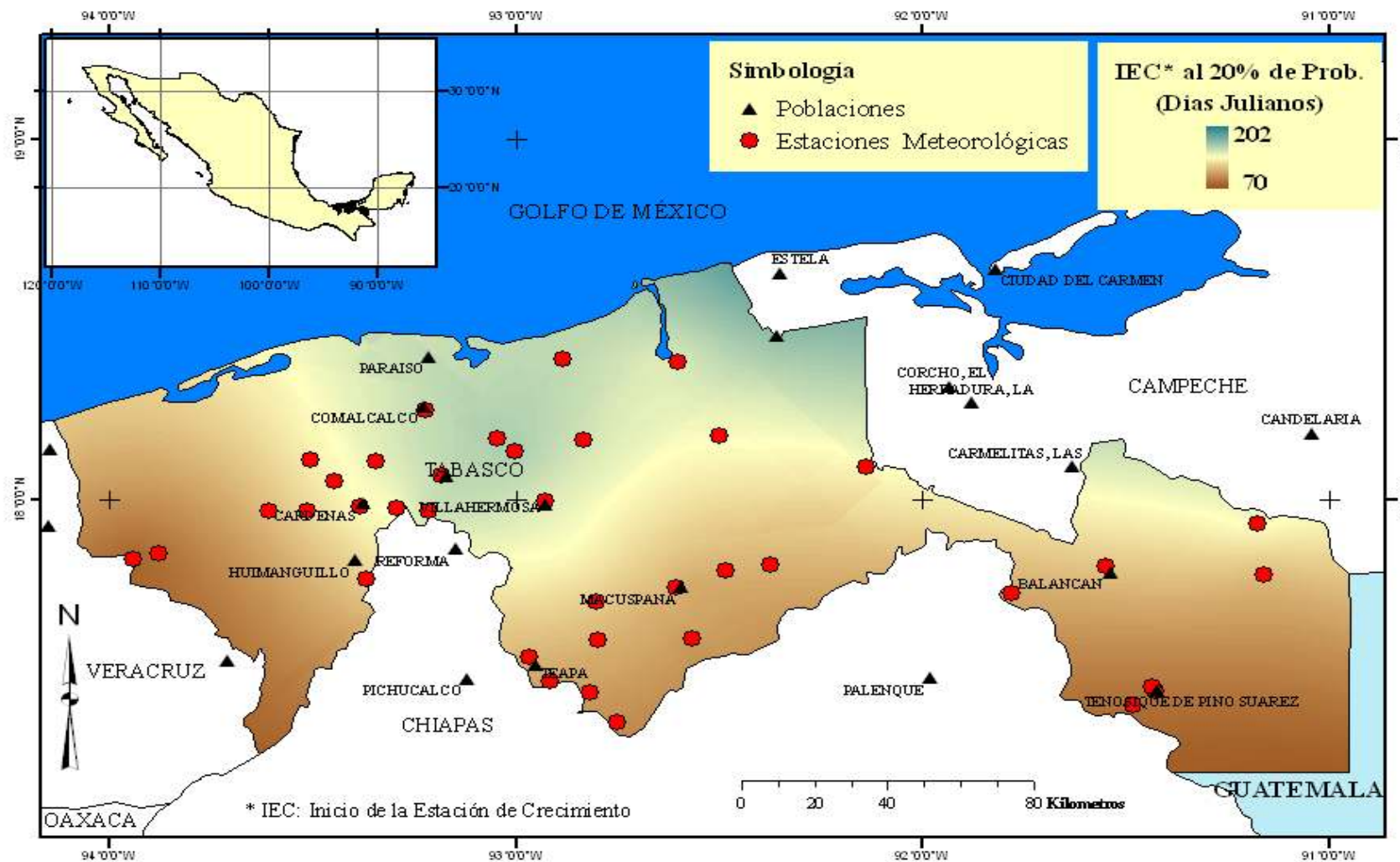


Figura 4. Distribución espacial del inicio de la estación de crecimiento al 20% de probabilidad de no excedencia.

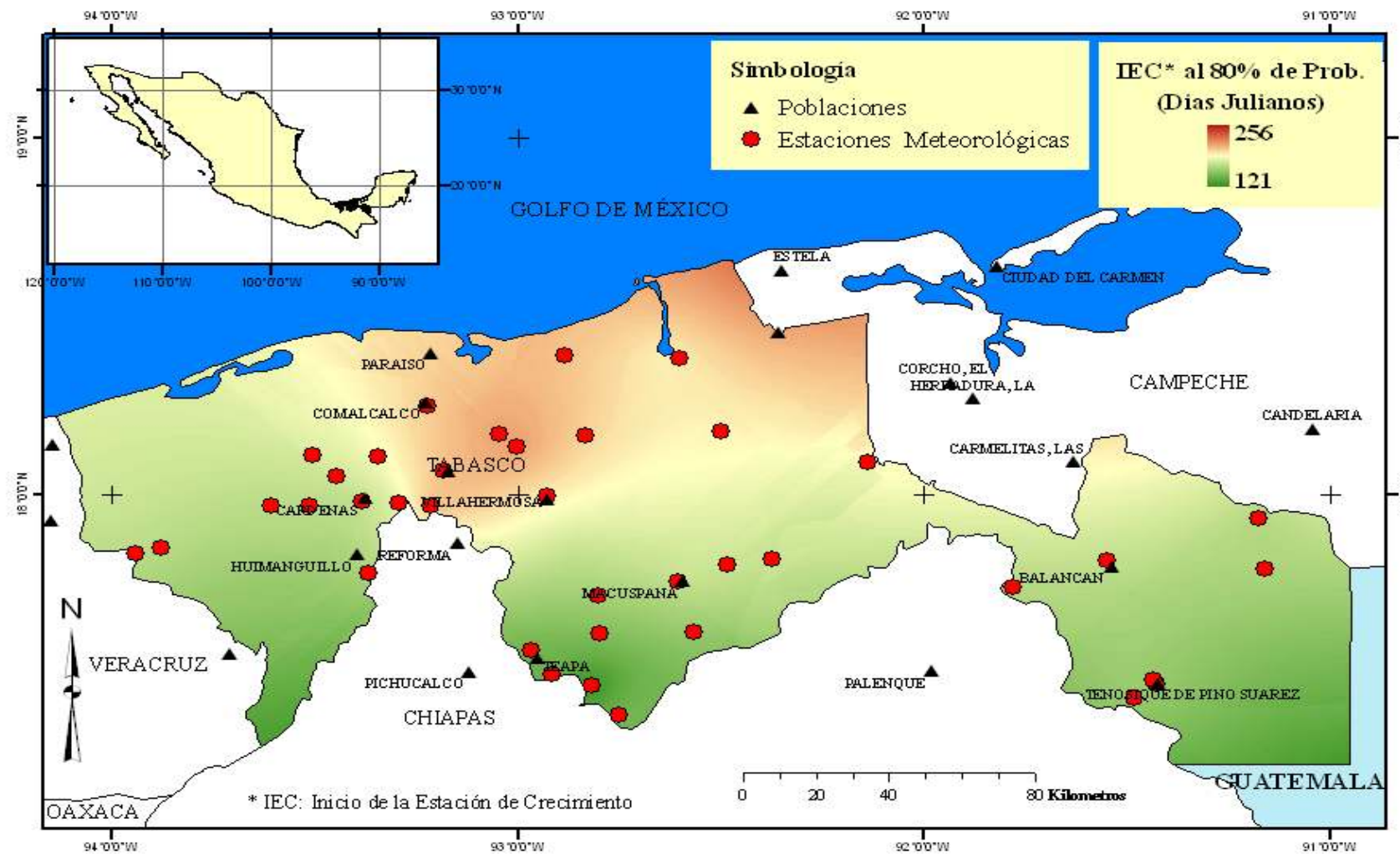


Figura 5. Distribución espacial del inicio de la estación de crecimiento al 80% de probabilidad de no excedencia.

3.3.3 Períodos secos e inicio de la estación de crecimiento

A partir de las curvas de probabilidad de ocurrencia de períodos secos, se encontraron dos grupos de regiones donde la ocurrencia de períodos secos se presentó de manera diferente, uno con probabilidades $<50\%$ en un período “largo” (Figura 6) y otro con este tipo de probabilidades en un período “corto” (Figura 7). Sin embargo, todas las estaciones presentaron altas probabilidades a partir del 27 de octubre, elevándose aún más hasta alcanzar valores muy cercanos a 1 (0.999) entre el 10 de marzo y 22 de abril (Figura 7), cuando según Velázquez (1994) se presentan lapsos secos que duran entre seis y siete semanas con períodos de retorno de 20 años. Posteriormente, para el primer grupo se inició una drástica caída de la curva cuando la probabilidad fue mayor o igual a 95% (30 de abril) (Figura 6), para el segundo grupo esto inició cuando la probabilidad fue igual o mayor a 93% (17 de mayo) (Figura 7). Es importante señalar que las probabilidades de mayor interés en agricultura de temporal son las menores a 50% que es cuando existe menos riesgo de períodos secos para los cultivos; para el grupo 1 (Figura 6) éstas se presentaron entre el 21 de mayo y el 12 de octubre y su interpretación se ejemplifica con las estaciones: Oxolotán y Teapa, cuyas curvas de probabilidad de ocurrencia de períodos secos alcanzaron valores menores o iguales a 30% (del 29 de mayo al 2 de octubre para Oxolotán y del 7 de junio al 27 de septiembre para Teapa), lo cual indica que en esa temporada se dan períodos secos con duración de siete días en tres de cada 10 años; y en Dos Patrias debido a que la curva descendió a valores menores o iguales a 40% (del once de junio al dos de octubre) ocurren períodos secos en cuatro de cada diez años. Para el segundo grupo (Figura 7), las probabilidades menores a 50% se dieron del 4 de agosto al 4 de octubre, un tiempo considerablemente menor comparado

con el primer grupo, por mencionar algunos ejemplos dentro de este rango se encontraron Macuspana DGE (del 4 de agosto al 4 de octubre); Pueblo Nuevo (del 8 de agosto al 1 de octubre) y Nacajuca (del 24 de agosto al 25 de septiembre). A partir de la diferencia en la duración de períodos con probabilidades de mayor importancia agrícola entre los dos grupos, puede decirse que el primero ofrece mejores condiciones a lo largo de la estación de crecimiento, y como en el segundo grupo el período de menor riesgo es muy corto (máximo dos meses) puede ser necesario implementar riego complementario para suministrar el agua que los cultivos requieren y que las precipitaciones no alcanzan a satisfacer. Un aspecto importante es que entre el 9 y 22 de julio todas las estaciones presentaron un aumento de la probabilidad, lo cual se debe a que en este lapso ocurre la sequía intraestival que no es otra cosa más que días con altas temperaturas y escasa precipitación dentro de una temporada húmeda (Velázquez, 1994), originando para el grupo 1 (Figura 6) los mayores aumentos (55%) el día 20 de julio en Francisco Rueda donde ocurren períodos secos de siete días en cinco de cada diez años, para el grupo 2 (Figura 7) la mayor elevación de la probabilidad se da esa misma fecha en Paraíso donde se presentan períodos secos en nueve de cada diez años.

La ocurrencia de períodos secos se relacionó de tres maneras diferentes con el inicio de la estación de crecimiento. Para la primera, se encontraron regiones que al momento de iniciar la estación de crecimiento al 80% de probabilidad se presentaron probabilidades menores o iguales a 50% de ocurrencia de períodos secos (Figura 8a) en este grupo está: Puyacatengo (50%), Boca del Cerro (30%), San Pedro (36%), Oxolotán (32%), Francisco Rueda (36%) y El Triunfo (50%), por lo que estas regiones pueden destacarse como las de menos riesgo de presentar lapsos secos al inicio de la estación de

crecimiento. La segunda, incluye zonas que al inicio de la estación a la probabilidad indicada, su probabilidad de ocurrencia de períodos secos osciló entre 94 y 60% (Figura 8b), sin embargo, es importante señalar que para este grupo el riesgo de períodos secos se mantuvo a la baja, en este grupo figura: Tapijulapa (94%), Teapa (72%) y Dos Patrias (60%); y a pesar de que presentaron probabilidades altas de períodos secos al inicio de la estación de crecimiento, éstas llegaron a niveles inferiores de 38% (Dos Patrias) en la temporada de mayores precipitaciones. La tercer forma comprende localidades que al inicio de la estación de crecimiento al 80%, la probabilidad de ocurrencia de períodos secos fue mayor o igual a 50% (ilustración 8c), en la mayoría de los casos estas curvas se encontraban ascendiendo y sus probabilidades de ocurrencia de períodos secos menores a 50% se presentaron en un período corto, en este grupo se encuentran las nueve estaciones restantes y son las que aparecen en la Figura 7; sus probabilidades de ocurrencia de períodos secos (al inicio de la estación) variaron entre 50 (Macuspana DGE y Pueblo Nuevo) y 88% (Paraíso); y junto con Teapa, Tapijulapa y Dos Patrias (Figura 6) son las que presentan mayor riesgo de sequía al inicio de la estación de crecimiento con el nivel de probabilidad mencionado.

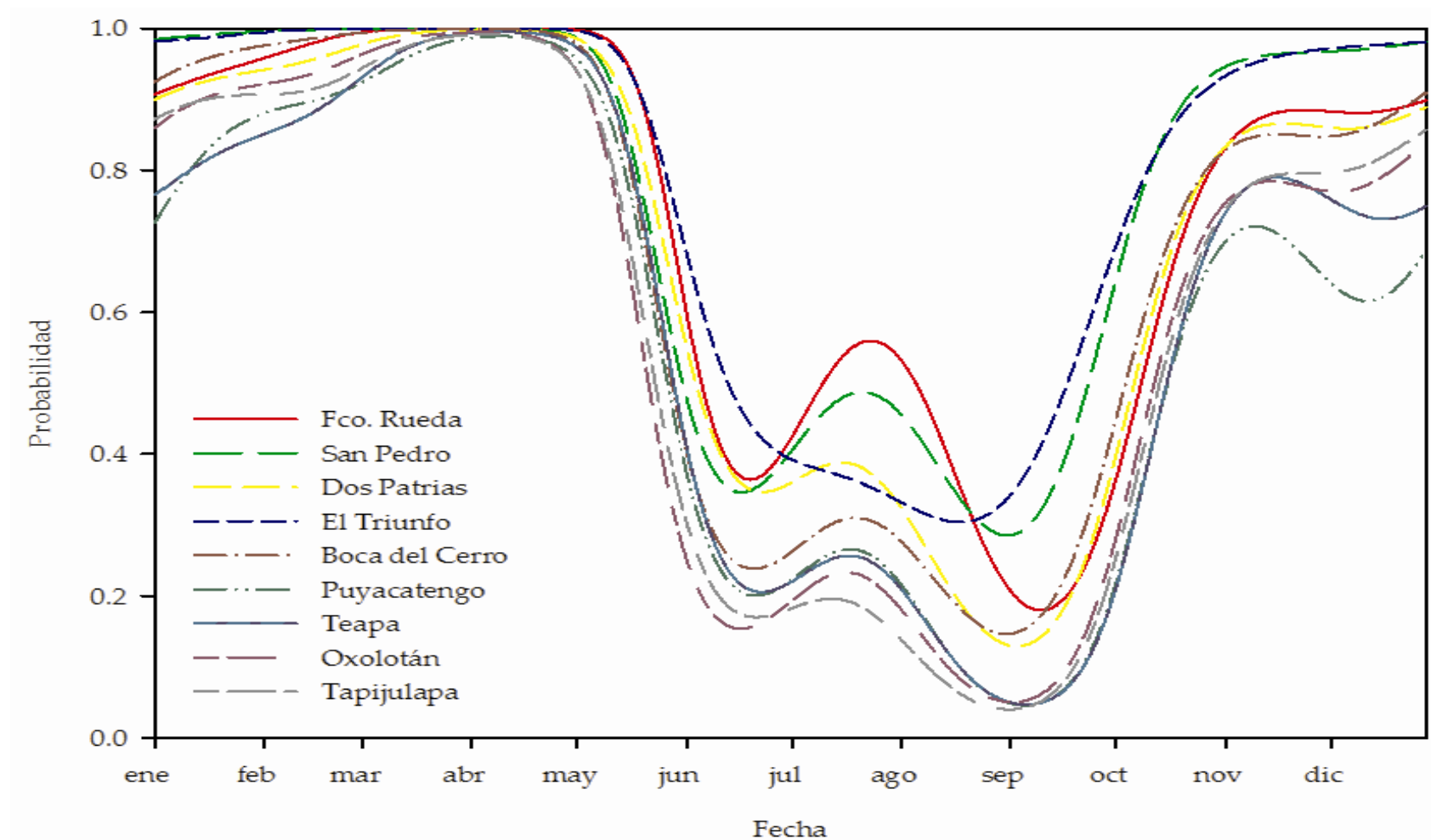


Figura 6. Estaciones con período largo de $P < 50\%$.

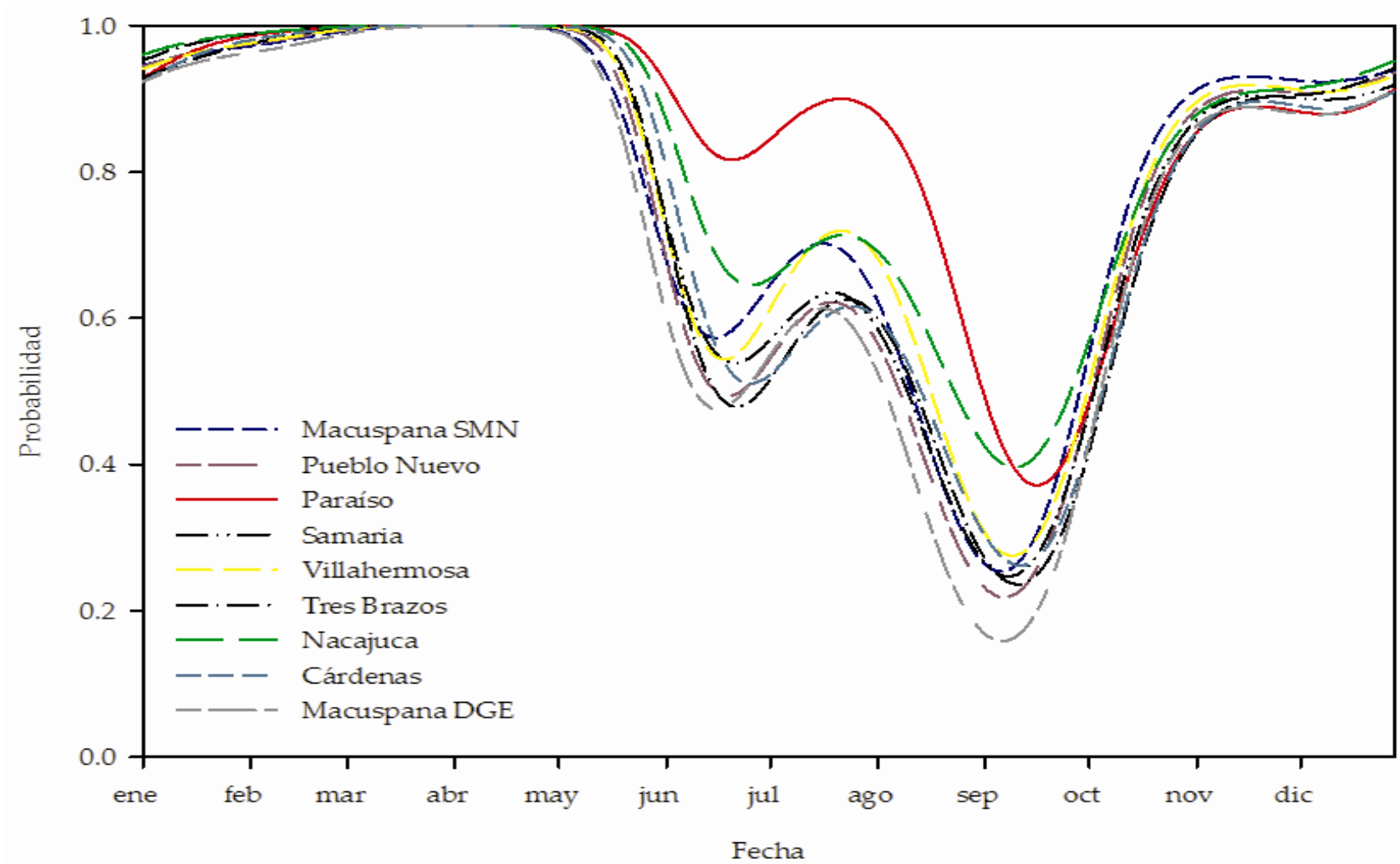


Figura 7. Estaciones con período corto de $P < 50\%$.

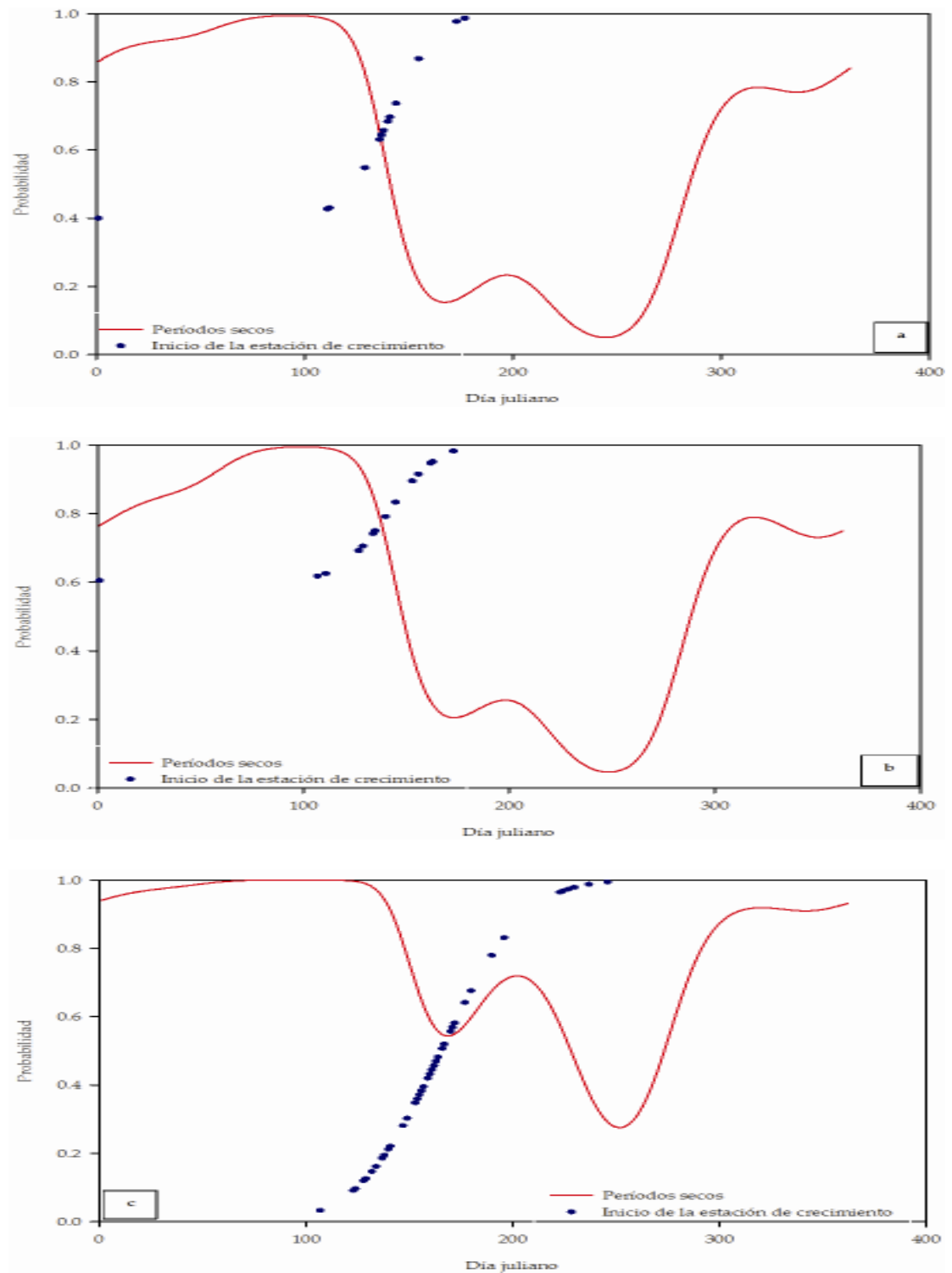


Figura 8. Estaciones representativas de las relaciones entre periodos secos e inicio de la estación de crecimiento: Oxolotán (a), Teapa (b) y Villahermosa (c).

3.4 Conclusiones

Se estudió el inicio de la estación de crecimiento en Tabasco, a partir de los resultados del balance hídrico para el 20, 40, 60 y 80% de probabilidad de no excedencia, así también se analizó la probabilidad de ocurrencia de períodos secos de siete días con el umbral de 1 mm.

Las fechas del balance hídrico y procesadas con la distribución normal son un buen indicador del inicio probabilístico de la estación de crecimiento porque involucra variables de suelo y clima.

La estación de crecimiento inicia anticipadamente en regiones que se ubican al sur del Estado y con dirección a las montañas del norte de Chiapas; estas regiones presentan los valores más altos de precipitación total anual. En regiones ubicadas al norte del estado el inicio de la estación se retrasa.

En Tabasco, el inicio de la estación de crecimiento al 80% de probabilidad se da entre los días 116 (26 de abril) y 218 (6 de agosto).

En fechas de siembra tardías (80% de inicio de la estación de crecimiento), Boca del cerro, San Pedro, Oxolotán y Francisco Rueda presentan períodos secos de siete días en tres de cada diez años; mientras que en Puyacatengo, El Triunfo, Macuspana DGE y Pueblo Nuevo ocurren en cinco de cada diez; para Dos Patrias, Cárdenas, Macuspana SMN, Samaria y Tres Brazos se presentan en seis de cada diez; en Teapa, Villahermosa y Nacajuca en siete de cada diez; y en Tapijulapa y Paraíso en nueve de cada diez.

En Macuspana, Cárdenas, Pueblo Nuevo, Paraíso, Samaria, Villahermosa, Tres Brazos y Nacajuca donde las probabilidades de períodos secos menores a 50% se dan en un período corto puede requerirse de riego complementario.

3.5 Referencias

- ALLEN, R., PEREIRA, D. y SMITH, M. *Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, núm. 56. Roma. FAO, 2006, 298 pp.
- ALYAMANI, M. y SEN, Z. Spatiotemporal dry and wet spell duration distributions in Southwestern Saudi Arabia. *Theoretical and applied climatology*. Vol. 57, núm. 3-4, 1997, pp. 165-179.
- ARTEAGA, R., VÁZQUEZ, M., CORAS, P. y ÁNGELES, V. Componentes de la estación de crecimiento, variación temporal y espacial en Chapingo, México. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXI, núm. 2, 2006, pp. 57-68.
- AVIAD, Y., KUTIEL, H. y LAVEE, H. Analysis of beginning, end, and length of the rainy season along a Mediterranean-arid climate transect for geomorphic purposes. *Journal of arid environments*. Vol. 59, núm. 1, 2004, pp. 189-204.
- BENOIT, P. The start of the growing season in northern Nigeria. *Agricultural meteorology*. Vol. 18, núm. 2, 1977, pp. 91-99.
- BROWER, C., PRINS, K. y HEIBLOEM, M. *Programación del riego. Manejo del agua de riego, manual de campo*, núm. 4. Roma. FAO, 1990, 45 pp.
- CINDRIĆ, K., PASARIĆ, Z. y ČAPKA, M. Spatial and temporal analysis of dry spells in Croatia [en línea]. Primera edición. Croatia. Springer, febrero de 2010 [citado el 26 de abril de 2010]. Disponible para internet en: <http://springerlink.metapress.com/content/u1555q2175w2456l/fulltext.pdf>.
- DENI, S., JEMAIN, A. y IBRAHIM, K. The spatial distribution of wet and dry spells over Peninsular Malaysia. *Theoretical and applied climatology*. Vol. 94, núm. 3-4, 2008, pp. 163-173.

- DOORENBOS, J. y KASSAM, A. *Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos*, núm. 33. Primera edición. Roma. FAO, 1980, 212 pp.
- DOORENBOS, J. y PRUITT, W. *Las necesidades de agua de los cultivos*, núm. 24. Segunda edición. Roma. FAO, 1977, 193 pp.
- ELDIN, M. A system of agroclimatic zoning to evaluate climatic potential for crop production. Agroclimate information for development. Reviving the green revolution. David F. Cusack (ed.): Boulder, Estados Unidos: Westview Press, 1983, pp. 83-91.
- ENGELBRECHT, B., DALLING, J., PEARSON, T., WOLF, R., GÁLVEZ, D., KOEHLER, T., TYREE, M. y KURSAR, T. Short dry spells in the wet season increase mortality of tropical pioneer seedlings. *Oecología*. Vol. 148, núm. 2, 2006, pp. 258-269.
- FAUSTINE, F., TILYA, S. y MOHAMED, S. Frequency of wet and dry spells in Tanzania. *Climate and land degradation*. SIVAKUMAR, K. y NDIANG'UI, N. (Editors). New York, USA. Springer, 2007, 623 pp.
- HACHIGONTA, S., REASON, C. y TADROS, M. An analysis of onset date and rainy season duration over Zambia. *Theoretical and applied climatology*. Vol. 91, núm. 4, 2008, pp. 229-243.
- HERSHFIELD, D. The frequency of dry periods in Maryland. *Chesapeake science*. Vol. 12, núm. 2, 1971, pp. 72-84.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA. *Extractor rápido de información climatológica*, v3. *Manual del usuario*. Colección de proyectos

- IMTA. Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008, 80 pp.
- LUENGO, M., CEBALLOS, A., MARTÍNEZ, J. y YUSTE, C. Las rachas secas en sector central de la Cuenca del Duero. *Investigaciones geográficas*. Núm. 27, 2002, pp. 65-82.
- MELLENDEZ, F., GONZÁLEZ, J. y PÉREZ, J. *Manejo tecnológico del pasto estrella africana en el trópico*. Segunda edición. Villahermosa, Tabasco, México. Instituto Para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco, 2006, 79 pp.
- MUGALAVAI, E., KIPKORIR, E., RAES, D. y RAO, M. Analysis of rainfall onset, cessation and length of growing season for western Kenya. *Agricultural and forest meteorology*. Vol. 148, núm. 6-7, 2008, pp 1123-1135.
- ODEKUNLE, T. Rainfall and the length of the growing season in Nigeria. *International journal of climatology*. Vol. 24, núm. 4, 2004, pp. 467-479.
- ORTIZ, C. *Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la república mexicana*. Tercera edición. Chapingo, México. Departamento de suelos, Universidad Autónoma Chapingo, 1987, 327 pp.
- PALACIOS, E. *¿Porqué, cuándo, cuánto y cómo regar?* Primera edición. México, D.F. Trillas, 2002, 214 pp.
- PALMA, D., CISNEROS, J., MORENO, E. y RINCÓN, J. *Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable*. Primera edición. Villahermosa, Tabasco, México. Colegio de Postgraduados-Instituto Para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco-Fundación Produce Tabasco, 2007, 195 pp.

- RAES, D., SITHOLE, A., MAKARAU, A. Y MILFORD, J. Evaluation of first planting dates recommended by criteria currently used in Zimbabwe. *Agricultural and forest meteorology*. Vol. 125, núm. 3-4, 2004, pp. 177-185.
- SAÍD, G. y ZÁRATE, G. *Métodos estadísticos*. Segunda edición. México, D.F. Trillas, 2001, 643 pp.
- STERN, R., RIJKS, D., DALE, I. y KNOCK J. *Instat climatic guide*. Tercera edición. Reading, Inglaterra. Universidad de Reading. 2006, 322 pp.
- SIVAKUMAR, K. Predicting rainy season potential from onset of rains in southern Sahelian and Sudanian climatic zones of west África. *Agricultural and forest meteorology*. Vol. 42, núm. 4, 1988, pp. 295-305.
- THOM, S. The distribution of freeze data and freeze-free period for climatological series with freeze-less years. *Monthly weather Review*. Vol. 87, núm. 4, 1959, pp. 136-144.
- VELÁZQUEZ, G. *Los recursos hidráulicos del estado de Tabasco: ensayo monográfico*. Primera edición. Villahermosa, Tabasco, México. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, 1994, 242 pp.
- WAMBEKE, A. *Soils of the Tropics: Properties and Appraisal*. Primera edición. New York, USA. McGraw Hill, 2003, 343 pp.

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN DEL REQUERIMIENTO DE RIEGO Y PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO EN PASTOS MEDIANTE CROPWAT EN TABASCO, MÉXICO¹

RESUMEN

En Tabasco, la ganadería bovina es una de las actividades agropecuarias más importantes del renglón económico. Se desarrolla en 1 millón y medio de hectáreas; y se sostiene principalmente, de pastizales que se cultivan en casi más del 50% del territorio del estado. Actualmente esta actividad presenta poca rentabilidad debido a múltiples factores, particularmente a causa de la sequía que se presenta entre los meses de marzo y mayo y genera escasez de materia seca. Por lo anterior, el presente trabajo tiene por objeto conocer mediante simulaciones realizadas con el modelo CROPWAT, los requerimientos de riego y la reducción del rendimiento que sufren los pastos, cuando se cultivan en condiciones de secano y riego deficitario; y bajo tres escenarios de precipitación (20, 50 y 80% de probabilidad de excedencia). Se utilizaron datos diarios de precipitación y evaporación de 18 estaciones meteorológicas del Estado, información fenológica del cultivo y referencias edafológicas del sitio de estudio. Los resultados indican que la evapotranspiración del cultivo es mayor en el municipio de Villahermosa y para todas las localidades de abril a agosto. Todas las regiones presentan los valores más bajos de precipitación efectiva entre marzo y abril, los mayores requerimientos hídricos se dan de marzo a mayo y para el escenario de lluvia al 80%. Para condiciones de secano los promedios estatales de reducción fueron: 5.05 (normal) y 14% (seco), mientras que bajo riego deficitario de 2.27 (normal) y 3.21% (seco). Para el escenario húmedo no se presentaron reducciones en ninguna de las dos condiciones.

Palabras clave: Evapotranspiración, simulación, modelo CROPWAT, precipitación efectiva, requerimiento de riego, escenario

¹ Ruíz, A. O.; Arteaga, R. R.; Vázquez, P. M. A.; López, L. R. y Ontiveros, C. R. 2010. Enviado a la revista *Universidad y Ciencia*.

SIMULATION OF IRRIGATION REQUIREMENT AND PREDICTION OF YIELD IN PASTURE BY MEANS OF CROPWAT IN TABASCO, MEXICO

ABSTRACT

In Tabasco, livestock is one of the most important farming economic line. It develops in 1 million and a half hectares, and is held mainly grassland grown in almost over 50% of the territory of the state. Currently this activity has low profitability due to multiple factors, particularly drought that occurs between March and May and creates shortage of dry matter. Therefore, this study aims to examine through simulations with the model CROPWAT, irrigation requirements and yield reduction experienced by grasses when grown under rainfed conditions and limited irrigation, and under three scenarios of precipitation (20, 50 and 80% exceedance probability). We used daily data of precipitation and evaporation of 18 meteorological stations of the state, crop phenological information and referrals in the study site soil. The results indicate that evapotranspiration is greater in the city of Villahermosa and for all locations from April to August. All regions have the lowest values of effective rainfall between March and April, the highest water requirements are given from March to May and for the stage of rain 80%. For dry conditions the state averages reduced were. 5.05 (normal) and 14% (dry), while reduced irrigation of 2.27 (normal) and 3.21% (dry). For the wet stage there were no reductions in either condition.

Key words: evapotranspiration, simulation, CROPWAT model, effective rain, irrigation requirement, stage

4.1 Introducción

En Tabasco, la ganadería ocupa un lugar importante desde el punto de vista económico y social, se desarrolla por más de 20 000 productores (De Dios, 2001) y cuenta con un hato que oscila alrededor de 1, 657, 167 cabezas, su valor económico alcanza los 8 796

795.75 miles de pesos, participando con el 54% del ingreso del sector pecuario; y junto con la infraestructura complementaria ocupa 1 millón y medio de ha (De Dios, 2001; Palma *et al.*, 2007). En el estado, los animales se sostienen principalmente de pastizales naturales y cultivados; y solamente estos últimos ocupan el 52.1% del territorio estatal. Actualmente, esta actividad presenta poca rentabilidad por el bajo índice de agostadero que deriva del empleo de pastos de baja calidad nutricional y del manejo deficiente de los potreros que no permite que las especies forrajeras expresen todo su potencial; y como toda la superficie que se cultiva es bajo condiciones de temporal, el problema se agudiza con la ocurrencia de sequías agrícolas que en esta región del trópico húmedo se presenta de marzo a mayo (Meléndez *et al.*, 2006); e incluso dentro de la época lluviosa (Engelbrecht *et al.*, 2006), las cuales agravan los efectos de la de por sí errática distribución de la precipitación (Palma *et al.*, 2007). Estos lapsos secos se caracterizan por altas temperaturas, radiación solar intensa y los valores más bajos de precipitación (Velázquez, 1994) que generan escasez de pasturas y reducciones hasta del 34% de la producción comparada con los rendimientos que se obtienen en la época de altas precipitaciones, lo que al fin de cuentas provoca los índices más bajos de la producción ganadera (Gómez *et al.*, 1994; Meléndez *et al.*, 2006).

Ante problemas como el anterior, Caverio *et al.* (2000) y George *et al.* (2001) comparten que deben adoptarse técnicas que permitan un uso eficiente de los recursos, entre ellas la adopción del riego, que según Engelbrecht *et al.* (2006) también debe implementarse en zonas húmedas que en una época del año presentan períodos prolongados de sequía. Sin embargo, Liu *et al.* (2007) y Wriedt *et al.* (2009) añaden que cuando esta práctica adolece de una adecuada planeación entre otros problemas que surgen están: la

lixiviación de nutrientes y pesticidas, la salinización y sobreexplotación de acuíferos que modifican el régimen natural del flujo de agua. Por eso, es necesario realizar estudios agrícolas que permitan derivar mejoras que se traduzcan en un aumento de la productividad, optimización de los recursos y reducción del riesgo de pérdidas de cosechas (Giorgis *et al.*, 2006). Desafortunadamente, este proceso requiere experimentación, recursos económicos y mano de obra; y los resultados que se obtienen no se pueden exportar a otras regiones geográficas (Liu *et al.*, 2007). Sin embargo, con el desarrollo de la computación han surgido modelos que permiten evaluar a la explotación agrícola en diferentes escenarios, especialmente cuando interviene la irrigación. Estos modelos, además de calcular: las necesidades de riego pueden evaluar la productividad del agua y pronosticar el rendimiento para regiones con condiciones meteorológicas distintas y situaciones de suelo específicas que no han sido probadas (Cavero *et al.*, 2000; Dechmi *et al.*, 2003; Molua y Lambi, 2006; Liu *et al.*, 2007).

En el diagnóstico de un distrito de riego para el noreste de España Dechmi *et al.* (2003) emplearon el modelo CROPWAT para simular prácticas comunes en la planeación del riego y conocer el efecto que éstas producen en el rendimiento. Con el mismo modelo, Diop (2006) analizó las afectaciones que el maíz, maní y mijo sufrirían ante diversos escenarios de cambio climático y encontró que el cultivo más sensible de presentar reducciones en el rendimiento es el mijo. Molua y Lambi (2006) utilizan CROPWAT, para definir estrategias en la selección de cultivos en tres distritos de riego de Camerún, estudiaron la eficiencia y productividad del agua para los cultivos que ahí se explotan poniendo énfasis a los efectos que el cambio climático ejercen sobre el rendimiento; y concluyeron que un aumento de las temperaturas modificará la estación de crecimiento

por lo que deben prepararse nuevas variedades tolerantes al calor, que no maduren muy rápido y que su temperatura óptima de fotosíntesis sea más alta. Giorgis *et al.* (2006) estimaron las necesidades de agua de maíz y sorgo (CROPWAT), simularon su crecimiento y desarrollo empleando datos climáticos promedio de 10 años, para los distritos de riego de Adama y Mieso en Etiopía, así, encontraron que el agua que se suministra a los cultivos es menor de la que realmente requieren. Sheng-Feng *et al.* (2006) emplearon CROPWAT para estimar las necesidades hídricas de arroz, maíz, sorgo y soja que se cultivan en condiciones de secano en Chianan, Taiwan; y concluyen que la demanda hídrica regional es de 537 mm año⁻¹, 126 mm es el requerimiento máximo mensual y que el 28.4% de la precipitación se pierde por percolación profunda. Doria y Madramootoo (2009) se apoyaron de CROPWAT para estimar las necesidades de riego en el sur de Quebec, bajo tres escenarios diferentes de precipitación (20, 50, y 80% de probabilidad de excedencia); y comentan que para un año seco (80%) la lámina de riego aumenta entre el 40 y 100% para papa, soja y maíz respecto de un año normal (50%); y para un año húmedo (20%) disminuye entre 0.5 y 16%. De igual forma, Cavero *et al.* (2000) a partir de simulaciones realizadas con CROPWAT obtuvieron la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET₀) y la evapotranspiración real del cultivo (ET_C) para evaluar el comportamiento de maíz de grano sometido a estrés hídrico.

La presente investigación tiene por objetivo estimar mediante simulaciones con el modelo CROPWAT, los requerimientos de riego y la reducción del rendimiento que sufren los pastos cuando se cultivan en condiciones de secano y riego deficitario, bajo

tres escenarios de precipitación: normal (50%), condición seca (80%) y condición húmeda (20%).

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Área de estudio

Tabasco está situado entre las coordenadas 17°19'00'' y los 18°39'00'' de latitud norte y los 90°57'00'' y 94°08'00'' de longitud oeste. Limita al norte con el Golfo de México, hacia el sur con el estado de Chiapas, al oeste con el estado de Veracruz, al noreste con el estado de Campeche y al sureste con la República de Guatemala (Velázquez, 1994; Palma *et al.*, 2007).

4.2.2 Información climática

Se utilizó la reportada en el Extractor Rápido de información Climatológica (ERIC, V3) generado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2008). Las variables son datos diarios de precipitación (mm) y evaporación total del tanque tipo A (mm), en 18 estaciones ubicadas en los 17 municipios del Estado (Figura 1).

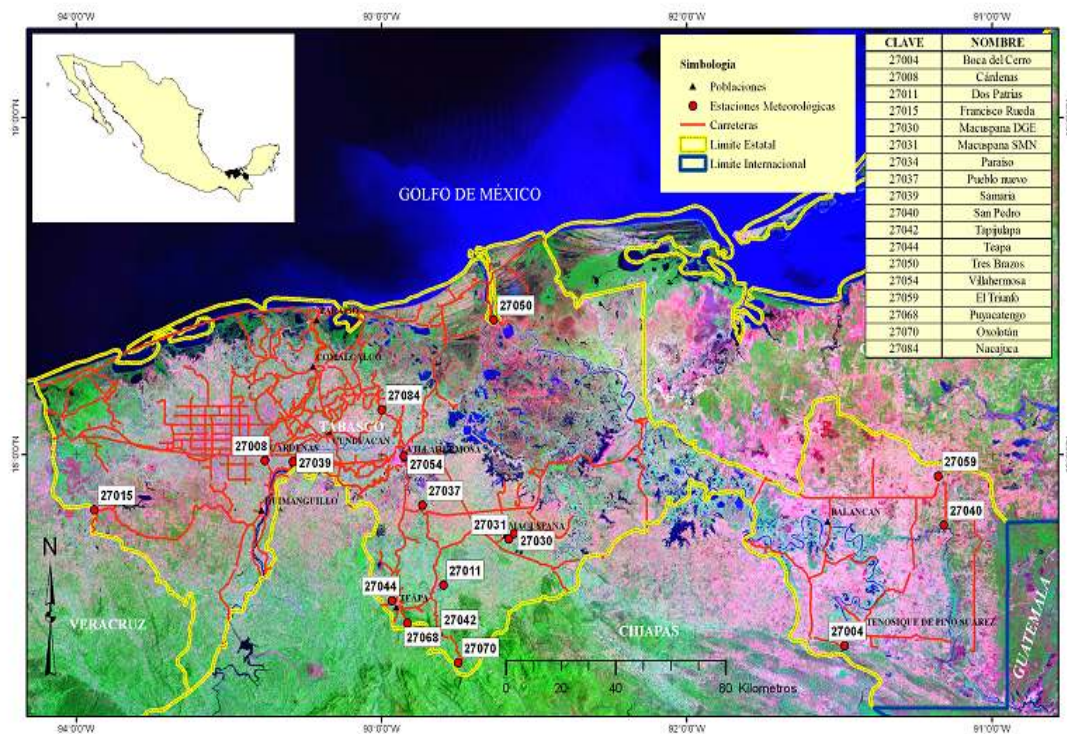


Figura 1. Distribución espacial de 18 estaciones meteorológicas en Tabasco.

4.2.3 Modelo CROPWAT

Es un programa de cómputo desarrollado por la FAO, que calcula las necesidades de agua de los cultivos a partir de información climática, edáfica y fenológica; basado en las metodologías descritas en los boletines 24, 33 y 56 de la serie FAO Riego y Drenaje (Smith, 1992; George *et al.*, 2001; Doria y Madramootoo, 2009; Molua y Lambi, 2006; Giorgis *et al.*, 2006). Estima las reducciones que se presentan en el rendimiento del cultivo, cuando éste se explota bajo condiciones diferentes a las óptimas. Todas las versiones operan bajo el concepto de evapotranspiración de referencia calculado mediante el método de Penman-Monteith modificado por la FAO, la versión ocho, ofrece la posibilidad de ingresar el valor de esta variable obtenido con cualquier otro método aprobado por la misma dependencia, cuando se carece de información climática

para operar con el método del boletín 56 (Giorgis *et al.*, 2006; Cavero *et al.*, 2000; Doria y Madramootoo, 2009).

4.2.4 Datos de suelo

La información edafológica del área de estudio requerida por el modelo CROPWAT para planificar el riego fue tomada de la base de datos de suelos con la que cuenta este programa, por lo que considerando los estudios realizados para Tabasco por López *et al.* (2007) y Palma *et al.* (2007) se eligió textura arcillosa como representativa. Por otra parte, la humedad inicialmente disponible considerada al momento de la siembra fue de 100 mm m^{-1} . De acuerdo a los estudios de Doorenbos y Pruitt (1977) se tomó en cuenta una profundidad máxima de enraizamiento del pasto de 100 cm.

4.2.5 Cálculo de ET_0

Se realizó con el método del tanque tipo A, al multiplicar el promedio mensual de evaporación (E_{pan}) por el coeficiente de tanque K_p (0.80), recomendado para regiones tropicales donde prevalece alta humedad relativa y baja velocidad del viento (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen *et al.*, 2006). Su expresión es:

$$ET_0 = K_p * E_{pan} \quad (1)$$

4.2.6 Precipitación efectiva (P_{ef})

Considerada como la parte de la lluvia anual o estacional total que es útil directa o indirectamente para la producción del cultivo en el lugar donde se registra (Dastane, 1977; Molua y Lambi, 2006; George, *et al.*, 2001), se calculó con el modelo CROPWAT

empleando el criterio del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USDA), este método se rige por las siguientes condiciones de la precipitación:

$$\text{Si } P \leq 250 \text{ mm, } P_{\text{ef}} = \left(\frac{125 - (0.2 * P)P}{125} \right) \quad (2)$$

$$\text{O si } P > 250 \text{ mm, } P_{\text{ef}} = (0.1 * P) + 125 \quad (3)$$

4.2.7 Coeficientes del cultivo

En el Cuadro 1 se presentan los valores de K_C y datos fenológicos del pasto. Éstos fueron tomados de la base de datos del software y se mantuvieron constantes en las simulaciones realizadas para todas las comunidades.

Cuadro 1. Características fisiológicas del pasto.

Fase	Inicial	Desarrollo	Mediados de temporada	Final de temporada	Total
Coeficiente del cultivo (K_C)	0.85		0.95	0.85	
Duración de la fase (días)	140	60	120	45	365
Factor de respuesta del rendimiento (K_y)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

4.2.8 Evapotranspiración del pasto

El cómputo se realizó con CROPWAT a través del método del coeficiente único del cultivo, en el que se integran los efectos combinados de la transpiración y evaporación del suelo en un coeficiente único a partir de la relación:

$$ET_C = K_C * ET_0 \quad (4)$$

En la que ET_C representa la evapotranspiración real del cultivo (mm).

4.2.9 Reducción del rendimiento

Diversos factores ejercen influencia en el rendimiento de los cultivos, especialmente el agua; cuando ésta no se suministra en cantidades requeridas se afecta el crecimiento y rendimiento. Ismail y Depeweg (2005) aseveran que la magnitud de la afectación varía

según la especie y la etapa de crecimiento; pero Zaikin y Butcher (2008) comentan que todos los cultivos presentan mayor sensibilidad al déficit hídrico durante la emergencia, floración y formación de granos. No obstante, el efecto de la falta de agua sobre la producción puede predecirse a partir de una función lineal de producción, si se considera la relación entre el rendimiento y el consumo de agua relativos establecidos por Doorenbos y Kassam (1979) y adoptados por Molua y Lambi (2006) y Giorgis *et al.* (2006). Las iteraciones del cálculo se rigen por la ecuación:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - K_y * \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (5)$$

Siendo Y_a el rendimiento real (Kg/ha), Y_m el rendimiento potencial máximo (Kg/ha), ET_a la evapotranspiración del cultivo (mm), ET_m la evapotranspiración potencial máxima (mm) y K_y el factor de respuesta del rendimiento (adim).

4.2.10 Fecha de siembra de los pastos en Tabasco

De acuerdo con Meléndez *et al.* (2006) la primer época de siembra va de enero a febrero, ésta se ve favorecida por la alta luminosidad y las elevadas temperaturas que se presentan entre marzo y mayo; aunque la precipitación es escasa, el suelo cuenta con humedad retenida de la época de “nortes”. Otra época es al inicio de la temporada de lluvias (junio a julio), es muy recomendable no sembrar después del 20 de julio ni a principios de agosto, porque en este período se presenta la sequía intraestival. En este estudio, y por las ventajas mencionadas, las simulaciones se han hecho utilizando la primera época de siembra.

4.2.11 Escenarios climáticos

Las simulaciones se realizaron mediante dos condiciones: secano y riego deficitario (ET_c fijada por etapa), para cada condición se manejó lluvia a los niveles de 20, 50 y 80% de probabilidad de excedencia; y así conocer el comportamiento del cultivo ante los impactos del cambio climático cuyos efectos cada vez cobran mayor importancia (Dastane, 1977; Molua y Lambi, 2006; Doria y Madramootoo, 2009); así, el primer nivel de probabilidad denota un escenario húmedo, el segundo, un año normal y el tercero, un año seco que podría presentarse en cuatro de cada cinco años (Doorenbos y Pruitt, 1977; Smith, 1992). La precipitación probabilística se determinó con la distribución normal (Said y Zárate, 2001). Lo anterior, debido a que se trabajó con totales mensuales y la región de estudio es una zona húmeda.

4.3 Resultados y discusión

4.3.1 Evapotranspiración de referencia (ET_0)

En Tabasco, esta variable está ligada a factores locales, su marcha anual presentó un rápido incremento de enero a mayo donde alcanzó su máximo y un descenso gradual desde este mes. El mínimo para todos los municipios se presentó en el mes de diciembre, a excepción de Macuspana que lo tuvo en enero. El valor anual estatal de esta variable varió entre 833 (Dos Patrias) y 1219 mm (Villahermosa). Para la mayoría de los municipios, cuando la magnitud de esta variable inició su descenso en el mes de junio nuevamente se presentó un ligero y repentino aumento en el mes de julio, esto se debe a las elevaciones térmicas que se dan a causa de la sequía intraestival que en esos días

azota al estado (Velázquez, 1994). Los valores más altos de la evapotranspiración de referencia se dieron de marzo a septiembre cuando se superó el promedio mensual estatal.

4.3.2 Evapotranspiración del pasto

En la Figura 2 puede apreciarse que a lo largo del año los valores más altos se dieron en Villahermosa, seguidos de los de Nacajuca y San Pedro, los más pequeños se presentaron en Teapa, Tapijulapa y Dos Patrias. Todos los municipios mostraron la misma tendencia, sin embargo, los meses en los que se detectaron los contrastes más importantes fueron julio y agosto, entre Dos Patrias y Villahermosa; y este último municipio con Tapijulapa con diferencias de más de 39 mm. La variación en los valores de esta variable entre los municipios se debe a la configuración climática, ya que es el principal impulsor del movimiento del agua a través de la planta (Doria y Madramootoo, 2009). En todo el estado la evapotranspiración de los pastos varió entre 765 (Dos Patrias) y 1121 mm (Villahermosa), con un promedio estatal de 908 mm año⁻¹.

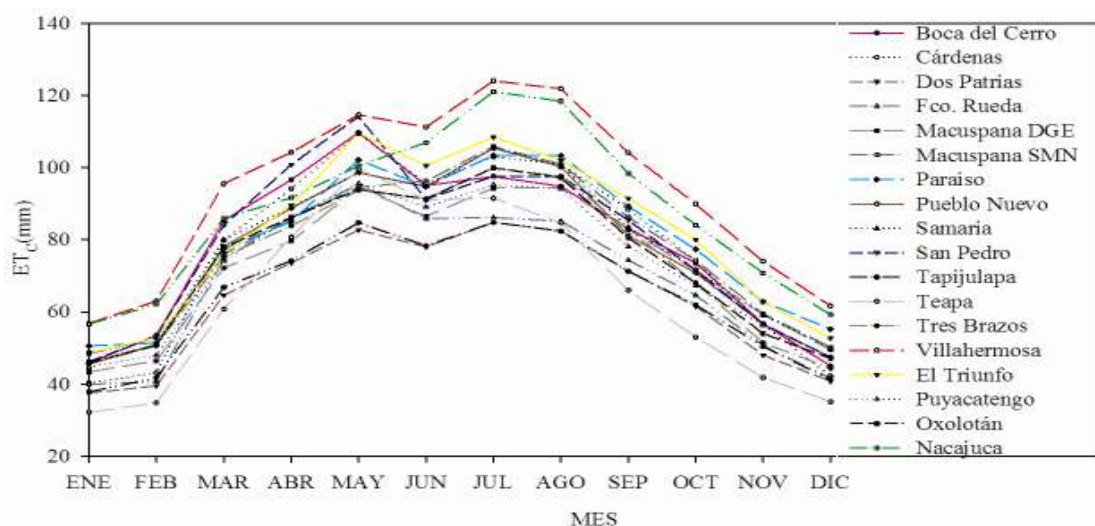


Figura 2. Comportamiento anual de la evapotranspiración de los pastos en Tabasco.

4.3.3 Precipitación efectiva (P_{ef})

Ésta varió en función de la cantidad de precipitación total registrada (Dastane, 1977). Para los tres escenarios, las regiones que presentaron mayor cantidad a lo largo del año son: Puyacatengo, Oxolotán, Tapijulapa, y Teapa; mientras que los valores más bajos se dieron en: El Triunfo, Tres Brazos, San Pedro y Paraíso. En general, bajo cualquier escenario, todas las localidades siguieron la misma tendencia respecto al tiempo, sin embargo, para los escenarios normal y seco, la menor dispersión entre los valores de P_{ef} se presentó en el mes de septiembre, mientras que para el húmedo en agosto. Para los tres escenarios, todas las localidades presentaron las menores cantidades de P_{ef} entre marzo y abril, después de estos meses el valor aumentó hasta el máximo que para todas las regiones se dio en septiembre, a excepción de Nacajuca que lo presentó en octubre. Para las tres situaciones, los mayores contrastes se dieron entre: Puyacatengo y El Triunfo durante los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo; Tapijulapa y Tres Brazos en abril; Paraíso y Oxolotán en mayo y junio; Puyacatengo y San Pedro en octubre; y Puyacatengo con Paraíso en julio, agosto y septiembre. En la Figura 3 se ilustra la marcha anual de la precipitación efectiva, para el escenario normal, en cada una de las localidades.

4.3.4 Requerimiento de riego

Para el escenario normal, las regiones que requieren riego, lo necesitan de marzo a mayo, sin embargo, San Pedro lo requiere desde febrero; Villahermosa y Paraíso, además del período mencionado lo requieren en julio; El Triunfo desde enero y Nacajuca de marzo hasta julio, por otra parte Dos Patrias, Tapijulapa, Teapa, Puyacatengo y Oxolotán no presentaron requerimientos de riego. A excepción de paraíso, que presentó su mayor necesidad en mayo, todas las demás regiones la

presentaron en abril. Para los escenarios húmedo y seco las necesidades y períodos de riego cambiaron en relación con el escenario anterior. La principal diferencia fue la reducción del número de regiones con necesidades de irrigación, ya que para el escenario normal ésta se requiere en 13 localidades, mientras que para el húmedo en 10, sin embargo, se encontró que bajo esta situación en todas las localidades los requerimientos se presentaron de marzo a mayo, a excepción de El Triunfo, Samaria, Pueblo Nuevo y Francisco Rueda que lo presentaron en marzo y abril. Bajo el escenario seco, las necesidades de riego cambiaron sustancialmente y variaron en cuatro regiones diferentes, la primera región requiere riego de noviembre a agosto en ésta se encuentran Nacajuca, El Triunfo y San Pedro; la segunda lo requiere de enero a agosto, en ella están Cárdenas, Paraíso, Samaria, Tres Brazos y Villahermosa; la tercera región comprende estaciones que requieren riego de marzo a mayo en ella figuran Dos Patrias, Macuspana DGE, Macuspana SMN, Tapijulapa, Teapa, Puyacatengo y Oxolotán; y la última región requiere riego de enero a mayo aquí se ubican Boca del Cerro, Francisco Rueda y Pueblo Nuevo. Además, Pueblo Nuevo, Macuspana SMN y Macuspana DGE, aparte de requerir riego en la época previamente mencionada, adicionalmente lo requieren en julio. En la Figura 4 se muestra la variación espacial de los requerimientos de riego para el escenario seco (80%).

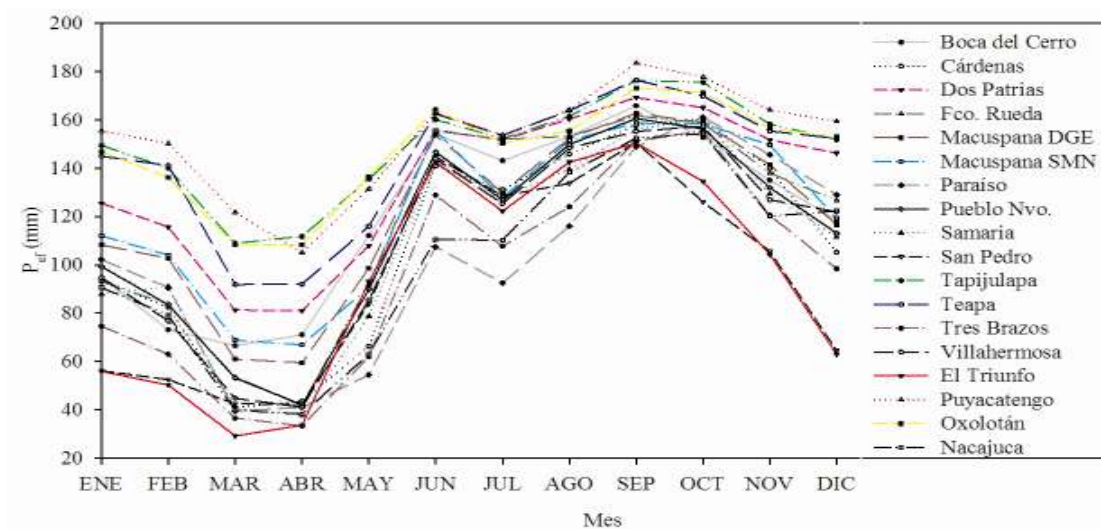


Figura 3. Marcha anual de la precipitación efectiva (mm).

Como era de esperarse, en todas las localidades, el escenario seco presentó mayor requerimiento de riego que el escenario normal, también se encontró que aún bajo situación húmeda es necesario aplicar riego complementario para mantener a los pastos bajo una funcionalidad ideal, sin embargo, los requerimientos para esta última situación son menores comparados con las otras situaciones, en este sentido, cabe señalar que para el escenario húmedo el promedio estatal de necesidad de irrigación es de $25.91 \text{ mm año}^{-1}$, mientras que para el escenario normal y seco los promedios son: 101.78 y $209.84 \text{ mm año}^{-1}$, respectivamente. Con lluvia al 80%, los requerimientos varían de: 11 (Tapijulapa) a 391 (Nacajuca) mm año^{-1} . En la Figura 5 puede verse para la región de Villahermosa, la variación que se da en la demanda de riego al considerar los tres escenarios de precipitación.

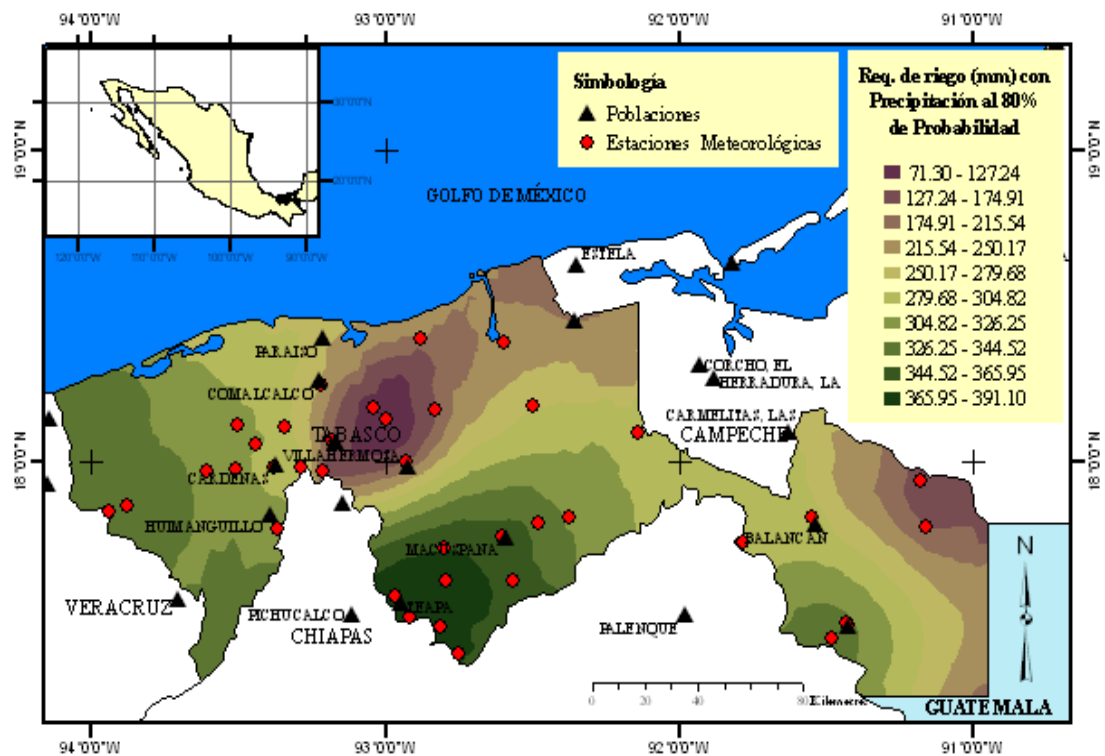


Figura 4. Variación espacial del requerimiento de riego para el escenario seco (precipitación al 80%).

4.3.5 Reducción del rendimiento

4.3.5.1 Secano

Para el escenario normal (50%), las reducciones se dieron en diez municipios, de éstos, siete superaron el promedio estatal de reducción estimado para esta condición (5.05%), con un rango de reducción del rendimiento de 2.4 a 6.2%. Para el escenario seco (80%), el promedio de reducción del rendimiento del pasto para todo el Estado aumentó a 14%, viéndose superado por siete municipios que presentaron los porcentajes más altos de reducción, para esta situación el rango de variación fue de 1.7 a 24.1%; y Tapijulapa, Puyucatengo y Oxolotán no presentaron reducción del rendimiento. Con el escenario húmedo (20%), ninguna localidad del estado tuvo reducciones en el rendimiento. Lo comentado puede verificarse en la Figura 7.

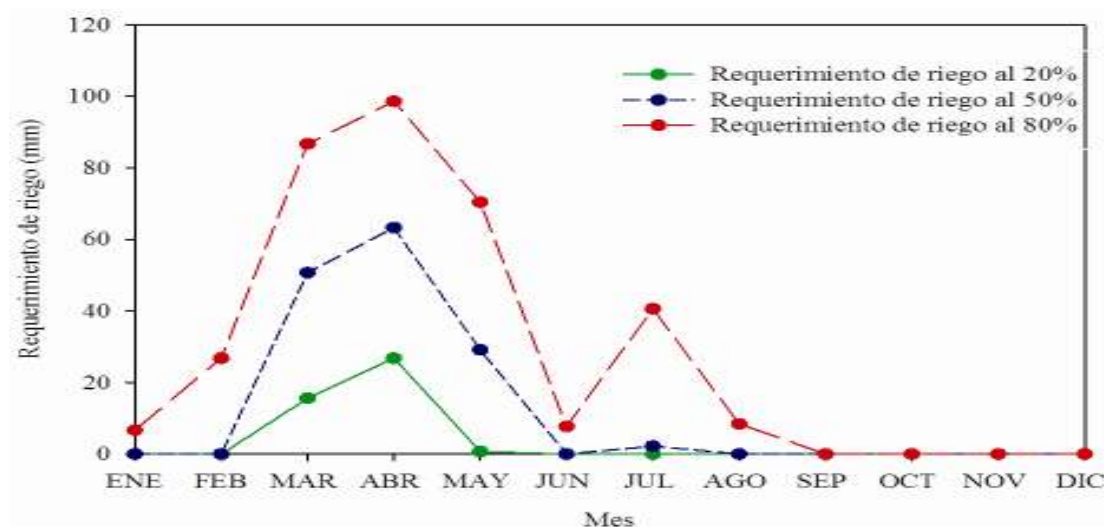


Figura 5. Requerimiento de riego para la región de Villahermosa estimado para los tres escenarios de precipitación.

4.3.5.2 Riego deficitario (ET_C fijada por etapa)

Bajo el escenario normal, las reducciones se presentaron en 10 municipios con un rango de variación de 1.9 (El Triunfo) a 2.5% (Pueblo Nuevo), el promedio estatal de reducción fue de 2.27%, aún cuando en ocho de las diez localidades se aplicaron láminas netas de riego que variaron de 55.3 (Samaria) a 65.6 mm (San Pedro) al año. Para el escenario seco, las reducciones se presentaron en 15 localidades, el promedio estatal de disminución del rendimiento bajo esta circunstancia fue de 3.21%, con un rango que osciló entre 1.7 y 5.2%; en 13 de las 15 estaciones que presentaron reducción en el rendimiento se suministraron láminas netas de riego anuales que variaron de 64 (Macuspana DGE) a 301 mm (Nacajuca) para mantener la reducción del rendimiento en niveles aceptables. Entre los escenarios normal y seco se presentaron variaciones importantes en las láminas netas aplicadas, por mencionar algunos ejemplos está el caso de Macuspana DGE donde para el escenario normal no fue necesario suministrar riego y con el seco se aplicó una lámina neta de 64 mm; por otra parte, en la estación Nacajuca

bajo el escenario seco se aplicó una lámina neta de 301 mm, mientras que bajo el normal la lámina neta aplicada fue de 62 mm. Para la situación seca, en Teapa, Puyacatengo, Oxolotán, Tapijulapa, y Dos Patrias no se aplicó riego complementario ante una circunstancia extrema que de acuerdo con Dastane (1977), Doorenbos y Pruitt (1977), Smith (1992) y Doria y Madramootoo (2009) se presenta en cuatro de cada cinco años. Con riego deficitario, el escenario húmedo tampoco presentó problemas de reducción del rendimiento (Figura 7).

Las diferencias más contrastantes en las reducciones del rendimiento, fueron para el escenario seco mediante condiciones de secano y riego deficitario, para los que se obtuvieron promedios estatales de reducción de 14 y 3.21%, respectivamente; la variación espacial en el estado de éstas reducciones se presenta en la Figura 6a (secano) y 6b (riego deficitario), mientras que las diferencias en la reducción del rendimiento para cada una de las localidades de acuerdo a las dos condiciones y tres escenarios pueden verificarse en la Figura 7.

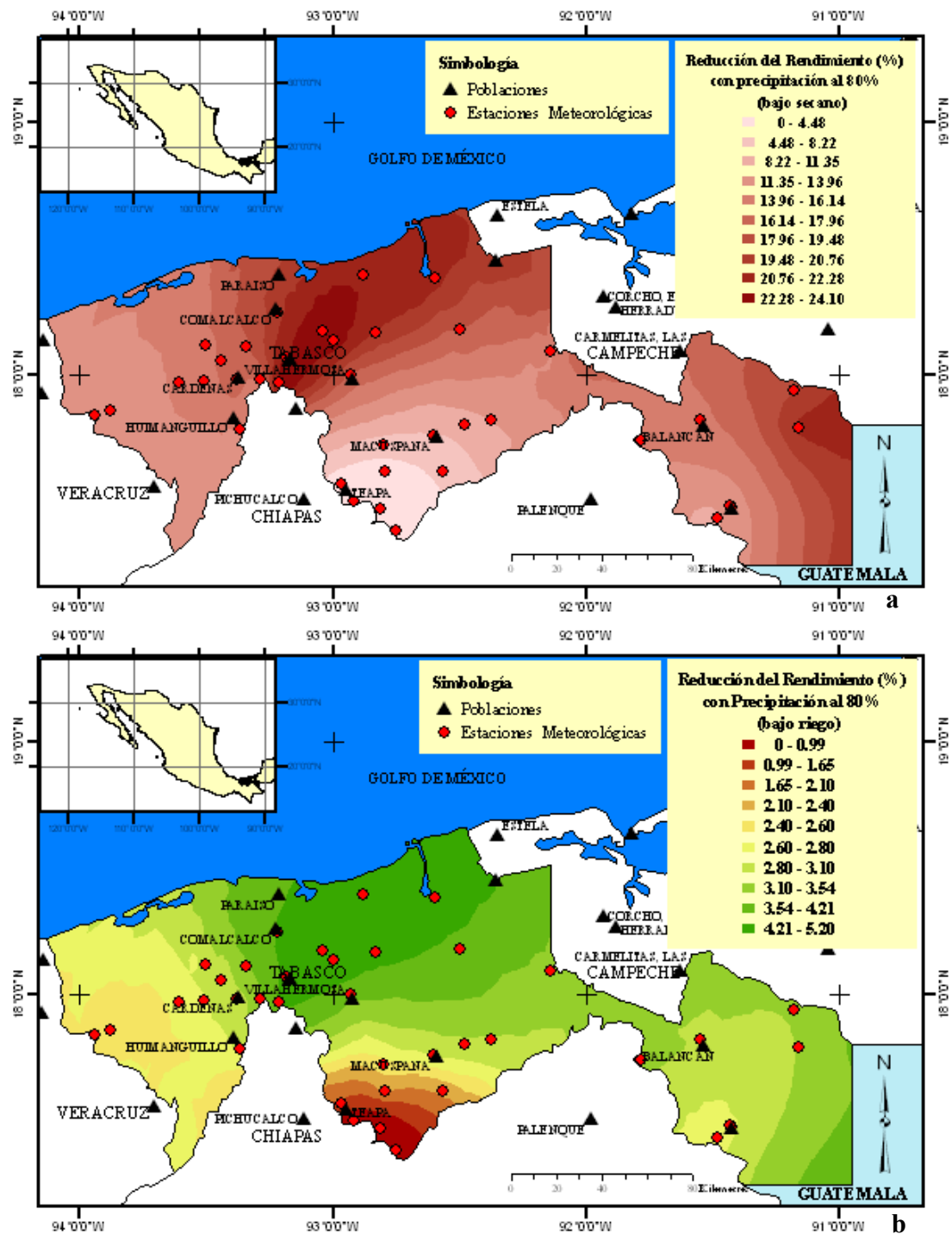


Figura 6. Reducción del rendimiento para el escenario seco en condición de secano (a) y riego deficitario (b).

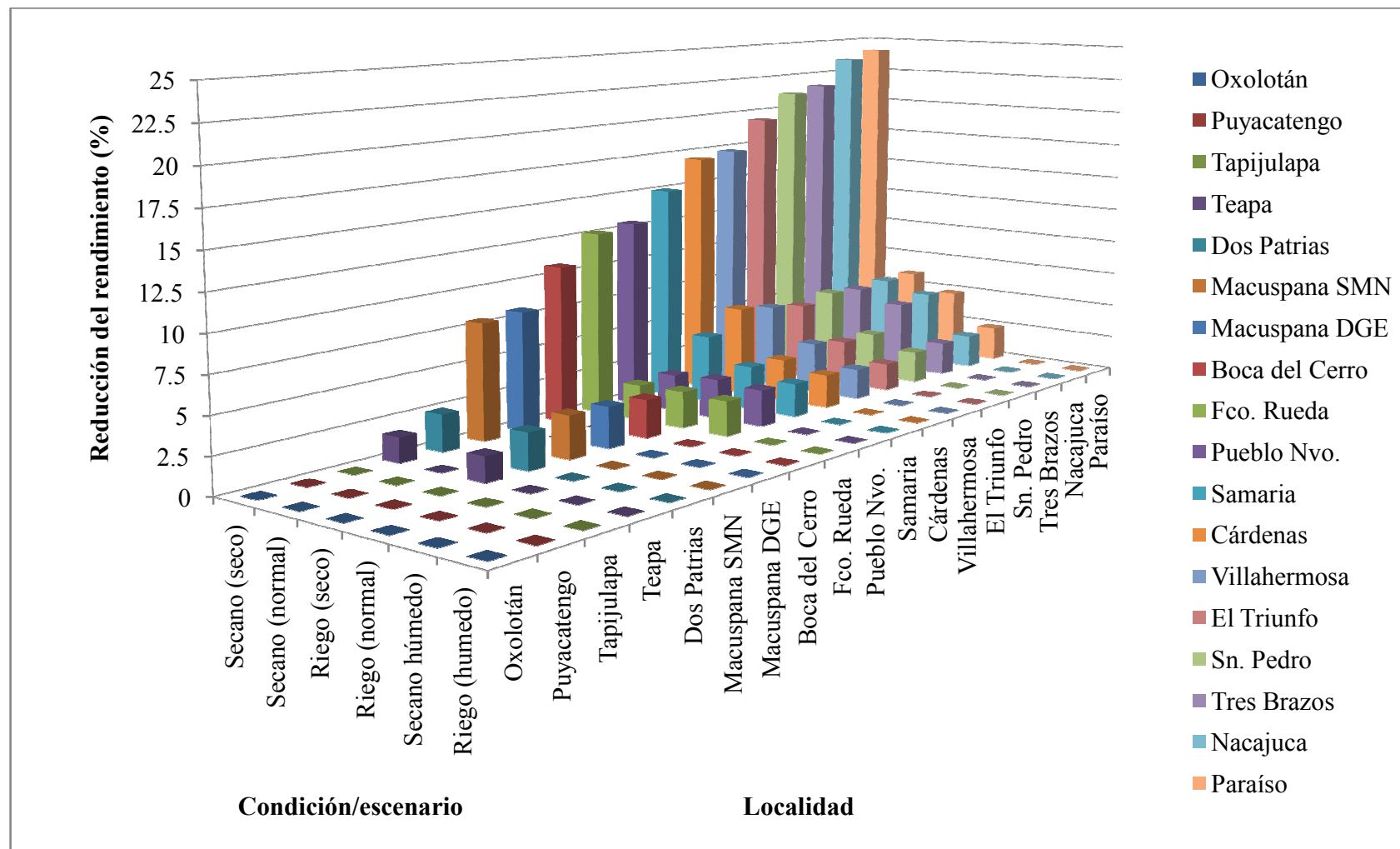


Figura 7. Reducción del rendimiento por municipio para las dos condiciones y para los tres escenarios.

4.4 Conclusiones

Los requerimientos de riego máximo mensual para cada escenario son: 63.3 mm (normal), 26.8 mm (húmedo) y 98.6 mm (seco) y se dan en Villahermosa durante el mes de abril.

Para el escenario normal, Dos Patrias, Tapijulapa, Teapa, Puyacatengo y Oxolotán no requieren riego complementario.

Para el escenario normal, los requerimientos de riego en la mayor parte de las regiones se presentan de marzo a mayo y para otras, estas necesidades son de enero a julio.

Para la producción de pastos en Tabasco, bajo un escenario seco, debe implementarse el riego en 15 localidades para que en éstas no ocurran reducciones considerables del rendimiento.

Los requerimientos de riego promedios estatales son: 209.84 (escenario seco), 101.78 (escenario normal) y 25.91 mm año⁻¹ (escenario húmedo).

De acuerdo con el promedio del estado y el rango, para el escenario normal y el seco, la reducción del rendimiento es menor en condiciones de riego deficitario (normal = 2.27% y seco = 3.21%) que en secano (normal = 5.05 y seco = 14%).

4.5 Literatura citada

- ALLEN G, R. L. SANTOS P. D. RAES Y M. SMITH. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje 56. Roma, Italia. 298 p.
- CAVERO, J., I. FARRE, P. DEBAEKE, AND J. FACI. 2000. Simulation of Maize Yield under Water Stress with the EPICphase and CROPWAT Models. Agronomy Journal. 92:679-690.

- DASTANE N. G. 1977. Precipitación efectiva en la agricultura de regadío. FAO. Riego y Drenaje 25. Roma, Italia. 68 p.
- DE DIOS, V. 2001. Ecofisiología de los bovinos en sistemas de producción del trópico húmedo. Colección José N. Rovirosa: Biodiversidad, Desarrollo Sustentable y Trópico Húmedo. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. 376 p.
- DECHMI, F., E. PLAYÁN, M. TEJERO, AND A. BERCERO. 2003. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain II. Irrigation evaluation, simulation and scheduling. *Agricultural Water Management*. 61:93-109.
- DIOP, M., 2006. Analysis of crop water use in Senegal with the CROPWAT model. CEEPA discussion paper no. 34, CEEPA, University of Pretoria, 18 p.
- DOORENBOS, J. Y A. KASSAM. 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje 33. Roma, Italia. 212 p.
- DOORENBOS, J. Y W. PRUITT. 1977. Las Necesidades de Agua de los Cultivos. FAO. Riego y Drenaje 24. Roma, Italia. 194 p.
- DORIA, R. O., AND C. A. MADRAMOOTOO. 2009. Estimation of irrigation requirements for some crops in southern Quebec using CROPWAT. *Irrigation and Drainage*. Published online in Wiley InterScience: www.interscience.wiley.com; DOI: 10.1002/ird.497.
- DURGA R, K. H. V., C. S. KRISHNA K., AND V. HARI P. 2001. Irrigation Water requirements and Supply Analysis in Dehradun Region – An Integrated Remote Sensing and GIS Approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 29:59-67.

- ENGELBRECHT, B. M. J., J. DALLING, T. PEARSON, R. WOLF, D. GÁLVEZ, T. KOEHLER, M. TYREE, AND T. KURSAR. 2006. Short dry spells in the wet season increase mortality of tropical pioneer seedlings. *Oecologia*. 148:258-269.
- GEORGE B., S. SHENDE, AND N. RAGHUWANSHI. 2000. Development and testing of an irrigation scheduling model. *Agricultural Water Management*. 46:121-136.
- GIORGIS K., A. TADEGE, AND D. TIBEBE. 2006. Estimating crop water use and simulating yield reduction for maize and sorghum in Adama Miesso districts using the CROPWAT model. CEEPA discussion paper no. 31, CEEPA, University of Pretoria. 14 p.
- GÓMEZ G. E., B. VALLES, E. CASTILLO Y J. JARILLO. 1994. Evaluación de métodos para el establecimiento de *Arachis pinto* en una pastura nativa de Veracruz, México. *Pasturas Tropicales*. 16: 15-21.
- ISMAIL S. AND H. DEPEWEG. 2005. Water productivity and crop production simulation under surge flow irrigation in short furrows in Egypt. *Irrigation and Drainage*. 54:103-113.
- LIU J., J. WILLIAMS, A. ZEHNDER, AND H. YANG. 2007. GEPIC – modeling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale. *Agricultural Systems*. 94:478-493.
- LÓPEZ G, A. DEL R., B. PALMA G., M. A. HERNÁNDEZ R., M. E. OJEDA M., A. ÁNGELES P., J. A. RUIZ N., Y M. J. GARCÍA M. 2007. Caracterización físicoquímica de los suelos predominantes en el estado de Tabasco. *Conciencia Tecnológica*. 34:45-46.

- MELÉNDEZ N, F., J. A. GONZÁLEZ M., Y J. PÉREZ P. 2006. Manejo Tecnológico del Pasto Estrella Africana en el Trópico. Instituto Para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco (ISPROTAB). Segunda edición. Villahermosa, Tabasco, México. 79 p.
- MOLUA, E. AND C. LAMBI. 2006. Assessing the impact of climate on crop water use and crop water productivity: The CROPWAT analysis of three districts in Cameroon. CEEPA discussion paper no. 33, CEEPA, University of Pretoria. 44 p.
- PALMA L, D. J., J. CISNEROS D., E. MORENO C., Y J. A. RINCÓN R. 2007. Suelos de Tabasco: Su Uso y Manejo Sustentable. Colegio de Postgraduados- ISPROTAB-FUPROTAB. Primera edición. Villahermosa, Tabasco, México. 195 p.
- SAID I, G. Y G. P. ZÁRATE DE L. 2001. Métodos estadísticos. Trillas. Segunda edición. México, D.F. 643 p.
- SHENG-FENG K; SHIN-SHEN H, AND CHEN-WUING L. 2006. Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan. Agricultural Water Management. 82:433-451.
- SMITH, M. 1992. CROPWAT. A Computer Program for Irrigation Planning and Management. FAO. Irrigation and Drainage Paper 46. Roma, Italia. 122 p.
- VELÁZQUEZ V, G. 1994. Los recursos hidráulicos del estado de Tabasco. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Primera edición. Villahermosa, Tabasco, México. 242 p.

- WRIEDT, G., M. VAN D. V., A ALOE, AND F. BOURAOUI. 2009. Estimating irrigation water requirements in Europe. *Journal of Hidrology*. 373:527-544.
- ZAIKIN, A., AND W. BUTCHER. 2008. Economic Evaluation of Farmers' Alternatives During Irrigation Water Deficit, ***In:*** Enviromental Problems of Central Asia and their Economic, Social and Security Impacts, Qi J. and Evered K. T. (eds.); Tashkent, Uzbekistan, 1-5 October 2007, Springer Science, p: 251-266.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES GENERALES Y COMENTARIOS

5.1 Conclusiones

En relación con la disponibilidad de humedad definida con datos normales de: precipitación, evaporación y temperaturas máximas y mínimas, Tabasco tiene regiones con: excesos todo el año (1737 a 2989 mm), déficit bajo (5 a 44 mm), déficit moderado (56 a 88 mm) y déficit alto (103 a 138 mm). Las regiones que presentan un tipo de déficit también presentan excesos en el período lluvioso.

En la mayor parte del territorio tabasqueño, los déficits se dan de marzo a mayo, no obstante en Aquiles Serdán, San Fernando, Boca del Cerro, Macuspana DGE, Tenosique de Pino Suárez DGE y Tenosique de Pino Suárez SMN se presentan de marzo a abril; mientras que Macuspana SMN y Tequila Jalapa lo tienen de abril a mayo; y Tepetitán Macuspana en abril.

De acuerdo al método de Thornthwaite, en Tabasco existen cinco tipos de clima: Perhúmedo (A), Húmedo (B4), Húmedo (B3), Húmedo (B2) y Húmedo (B1).

La estación de crecimiento inicia anticipadamente en regiones ubicadas al sur del estado y con dirección a las montañas de Chiapas, mientras que en regiones ubicadas al norte el inicio se retrasa.

En Tabasco, el inicio de la estación de crecimiento al 80% se da entre los días 116 y 218.

En fechas de siembra tardías (80% de inicio de la estación de crecimiento), Boca del cerro, San Pedro, Oxolotán y Francisco Rueda presentan periodos secos de siete días en tres de cada diez años; mientras que en Puyacatengo, El Triunfo, Macuspana DGE y

Pueblo Nuevo ocurren en cinco de cada diez; para Dos Patrias, Cárdenas, Macuspana SMN, Samaria y Tres Brazos se presentan en seis de cada diez; en Teapa, Villahermosa y Nacajuca en siete de cada diez; y en Tapijulapa y Paraíso en nueve de cada diez.

Los requerimientos de riego máximo mensual para cada escenario son: 63.3 mm (normal), 26.8 mm (húmedo) y 98.6 mm (seco) y se dan en Villahermosa durante el mes de abril.

Para el escenario normal, los requerimientos de riego en la mayor parte de las regiones se presentan de marzo a mayo y para otras, estas necesidades son de enero a julio. Mientras tanto, en Dos Patrias, Tapijulapa, Teapa, Puyacatengo y Oxolotán no se requiere riego complementario. Bajo el escenario húmedo, en todas las localidades los requerimientos se dan de marzo a mayo, a excepción de El Triunfo, Samaria, Pueblo Nuevo y Francisco Rueda que lo tienen en marzo y abril. Con el escenario seco, las necesidades de riego varían en cuatro regiones, la primera requiere riego de noviembre a agosto en ésta se encuentran Nacajuca, El Triunfo y San Pedro; la segunda de enero a agosto, en ella están Cárdenas, Paraíso, Samaria, Tres Brazos y Villahermosa; la tercera comprende estaciones que requieren riego de marzo a mayo en ella figuran Dos Patrias, Macuspana DGE, Macuspana SMN, Tapijulapa, Teapa, Puyacatengo y Oxolotán; y la última requiere riego de enero a mayo aquí se ubican Boca del Cerro, Francisco Rueda y Pueblo Nuevo.

De acuerdo con la media aritmética del estado y el rango, para el escenario normal y el seco, la reducción del rendimiento es menor en condiciones de riego deficitario (normal = 2.27% y seco = 3.21%) que en secano (normal = 5.05 y seco = 14%).