



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

Estudio agroclimático del cacao en el estado de Tabasco.

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

EDUARDO PÉREZ SOSA

Asesor: DR. JUAN CARLOS GÓMEZ ROJAS



Ciudad Universitaria, México

2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria

*A mis
padres por brindarme su apoyo, cariño, respeto y comprensión; a mis hermanas por su afecto, tolerancia y
su cálida compañía. Sin ustedes no podría ser la persona que soy... Los amo infinitamente.*

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser la institución que me ha formado académicamente.

Al M. en C. Antonio González Hernández del CENID-COMEF por asesorarme en mi investigación, su apoyo me permitió realizar satisfactoriamente este trabajo.

Al Dr. Juan Carlos Gómez Rojas por ser mi asesor y contribuir con sus sugerencias y observaciones, y por avivar en mí el gusto por la Agroclimatología.

A mi sinodales la Dra. Rebeca Granados, Lic. Rafael Salceda, Lic. José Luis Luna y la Dra. Rosa María Bonilla por sus acertadas observaciones y contribuciones que permitieron mejorar el presente estudio.

Al CENID-COMEF del INIFAP y a los miembros del Laboratorio de Geomática el M. en C. Antonio González Hernández, Dr. Ramiro Pérez Miranda, Dr. Enrique Sánchez y Dr. Tomás Hernández por permitirme usar sus instalaciones para el desarrollo de la investigación y por su agradable compañía.

A los productores de cacao en Tabasco que me brindaron parte de su tiempo para atenderme y contribuir con su conocimiento.

A mi familia Teo, Guadalupe, Angélica, Cynthia y Ernesto Huesca por su apoyo y amor, me siento enormemente orgulloso por pertenecer a ésta familia.

A las personas que se han convertido en mis hermanos y con las que he compartido buena parte de mi vida: Saddam, Jonathan y José Luis, gracias por su amistad y por los buenos momentos que hemos pasado.

De igual manera, a José Luis, Fernando, Saddam y Mauricio porque durante aquellos años nos convertimos en una pequeña familia, unida por un gusto en común.

A mis amigos con los que estuve durante todo el trayecto de la carrera: Jojosé, Kevin, Ernesto, Efraim, Balam, Álvaro, Rafa, Alejandra, Karla y Jessica, en verdad los aprecio mucho.

Finalmente a todas aquellas personas que formaron parte de mi etapa durante la carrera y que he olvidado mencionar. Gracias.

Índice	Página.
Introducción.....	1
Antecedentes.....	4
Marco teórico-conceptual	7
Marco metodológico.....	20
Capítulo 1. Marco geográfico del estado de Tabasco.....	31
1.1. Aspectos generales	31
1.2. Geología y Suelos	33
1.3. Fisiografía.....	35
1.4. Hidrología.....	36
1.5. Climas.....	40
1.6. Agricultura	41
1.7. Situación de la cadena agroproductiva del cacao en Tabasco	44
1.7.1. Producción a nivel mundial y nacional	44
1.7.2. Características generales de la cadena agroproductiva del cacao.....	50
1.7.3. Puntos críticos de la cadena agroproductiva	53
Capítulo 2. Agroclimatología y fenología del cacao.....	56
2.1. El cacao: origen, domesticación y distribución.....	56
2.1.1. Origen	56
2.1.2. Domesticación.....	57
2.1.3. Distribución	58
2.2. Requerimientos agroclimáticos del cacao	59
2.2.1. Elementos climáticos que inciden en las plantas.....	59
2.2.2. Hábitat del cacao	60
2.2.3. Requerimientos agroclimáticos	60
2.2.4. Suelos	61
2.3. Fenología del cacao.....	62
2.3.1. Descripción fisiológica del cacao	62
2.3.2. Fenología del cacao	63
2.4. Relación entre agua y la planta del cacao	68
2.5. Relación entre radiación solar, temperatura y la planta de cacao	69
2.6. Análisis de las precipitaciones.....	72
2.6.1 Estaciones meteorológicas en Tabasco.....	72
2.6.2. Prueba de homogeneidad	73

2.6.3. Balance hídrico con base en la temperatura	73
2.6.4. Balance hídrico con base en la ETP	79
2.7. Análisis de la radiación y temperatura	86
2.7.1. Análisis de la radiación	86
2.7.2. Intensidad de la luz	86
2.7.3. Duración astronómica del día o fotoperiodo	88
2.7.4. Unidades fototérmicas	88
2.8. Análisis de las temperaturas	91
2.8.1. Unidades calor	95
2.8.2. Termoperiodismo	98
2.9. Zonificación agroclimática del cacao en Tabasco	99
Capítulo 3. Cambio climático y agricultura. El caso del cacao	106
3.1. El cacao y cambio climático	106
3.2. Análisis de las temperaturas bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3 y su efecto en la fenología del cacao en los municipios productores de cacao	108
3.3. Cálculo de la ETP según Thornthwaite bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3	113
3.4. Balance hídrico para los municipios productores de cacao en Tabasco bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3	114
3.5. Análisis de las temperaturas bajo escenario RCP4.5 HADGEM2-ES y su efecto en la fenología del cacao	118
3.6. Cálculo de la ETP según Thornthwaite bajo escenario RCP4.5. HADGEM2-ES	121
3.7. Balance hídrico para los municipios productores de cacao en Tabasco bajo escenario RCP4.5. HADGEM2-ES	121
Discusión	127
Conclusiones	133
Literatura citada	134
ANEXO 1	143
ANEXO 2	145
ANEXO 3	148

Introducción

México dio a conocer el cacao al mundo y es considerado como el centro de domesticación. Fue herencia de la cultura Olmeca que los Mixezoqueanos (2500-1000 a.C.) cultivaron cacao, sobre todo en Izapa, en la zona que ahora es el Soconusco y éstos a su vez heredaron este conocimiento a la cultura maya (Andrade, 2007). Para los Mayas y Mexicas, el cacao y los productos derivados de él eran de importancia económica, gastronómica y simbólica y ya en aquellos tiempos el territorio que actualmente comprende el estado de Tabasco figuraba como una de las regiones importantes para la producción del cacao.

Actualmente México se encuentra dentro de los 11 países que producen cacao a nivel mundial, sin embargo, las cifras que se reportan de producción y rendimiento están lejanas respecto a los principales productores de cacao que se localizan la mayoría de ellos en el continente africano. Lo anterior no significa que no se tengan las condiciones adecuadas (ambientales, edáficas, ecológicas) en el territorio mexicano para este cultivo. La baja en la producción y rendimiento del cacao en el país se debió a factores de carácter social, político y económico tales como la apertura del mercado y la liberalización del producto, la desincorporación de la Comisión Nacional de Cacao, el aumento en los costos de producción, al mismo tiempo, la expansión de cacao en África y la saturación del mercado que provocaron bajos precios, situación que genera lo que llaman González y Amaya (2005) “una demora en la respuesta que causaría un desfase en México de entre cinco y diez años entre el estímulo y la respuesta de la cadena de valor a él, en particular, al sector primario, tiempo que corresponde con el inicio y maduración de las nuevas plantaciones, además, la industria, intermediarios, instituciones y organizaciones también presentan este desfase y tiempo de demora para el aprendizaje y adecuación ante las situaciones (nuevas) que se iban presentando”, este desfase repercutirá gravemente en la producción del país lo que se prolongaría hasta décadas posteriores.

Para la planta de cacao son importantes las condiciones ambientales como la temperatura, la precipitación, el viento y las horas Sol (SIAP, 2016). En México, sólo Tabasco, Chiapas, Guerrero y Oaxaca producen cacao, es precisamente Tabasco la entidad con mayor participación en la producción de esta plantación. En Tabasco son 60,161.3 ha destinadas para el cacao y ocupa el segundo lugar en cuanto a extensión de cultivos después del pasto cultivado. Los municipios que tienen mayor superficie sembrada y de producción son

Comalcalco, Cunduacán, Cárdenas, Huimanguillo y recientemente el municipio de Tacotalpa.

La producción de cacao se concentra en cuatro entidades del país y es el factor ambiental el que limita el establecimiento de plantaciones del cacao. Lo anterior es comprensible si se aborda la relación entre la planta del cacao y las condiciones ambientales de esos lugares, es decir, desde un enfoque agroclimático. La Agroclimatología es la ciencia dentro de la Geografía que se encarga de estudiar las leyes y principios que relacionan los elementos y factores del clima con el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas cultivadas (Arteaga y Romo, 1983). Algunas de las aplicaciones de los estudios agroclimáticos son: la apertura de nuevas zonas a la agricultura, zonificación de cultivos, introducción de nuevas especies y variedades, determinación de las adversidades climáticas para cada cultivo con base en su fenología con el objeto de tomar medidas que tiendan a eliminarlas o atenuarlas, planeación de calendarios de siembra y cosecha, y predicción de rendimientos, entre las principales (Arteaga y Romo, 1983).

En la Agroclimatología se señala que la temperatura, la disponibilidad de agua y radiación solar son los principales factores climático-meteorológicos que influyen en las plantas. La planta de cacao es propia de los lugares tropicales donde no existe una diferenciación en la fenología de las plantas y resulta complejo establecer las fases o etapas fenológicas con fechas precisas ya que en un mismo momento pueden presentarse varias etapas, por lo que se observan los “picos” donde la mayoría de las plantas se encuentran en su ciclo de crecimiento. Como resultado del presente estudio se identificó que en Tabasco, el rango de temperatura promedio para las etapas de floración y madurez es de 25 – 27°C y 26 - 28°C respectivamente. Las unidades fototérmicas para el ciclo reproductivo de la planta (desde la floración hasta la madurez del fruto) corresponden a más de 3,000 unidades fototérmicas. La duración astronómica del día oscila entre 11 y 12.40 horas, por otra parte, el periodo húmedo tiene una duración de 9 meses, con 3 meses de periodo seco (de marzo a mayo).

El efecto del cambio climático en la agricultura está relacionado con variaciones en los climas locales más que en patrones mundiales, situación que afecta de diferente forma a cada región del planeta. En la agricultura, el cambio climático podría afectar este sector de varias maneras como en la productividad, en prácticas agrícolas, cambio en el uso del suelo, adaptación de cultivos, entre otros. En este tenor, se ha encontrado que las plantas han respondido al cambio climático en dos formas principales, migración y adaptación (Etterson & Shaw, 2001). Field *et al.* (1992) mencionan que las plantas responden a los

desequilibrios causados por variaciones ambientales y tienden a compensarlo, al menos parcialmente. Los aumentos en las temperaturas promedio mensuales bajo escenarios de cambio climático repercutirían en la duración de la fenología del cacao en dos casos: 1) la planta del cacao buscaría temperaturas similares (durante el año) al comienzo de cada etapa respecto a los valores históricos que son tomados como el escenario base, es decir, una modificación en el calendario fenológico, o bien 2) una adaptación de la planta a estos aumentos de temperatura con posibles cambios en la duración de ciertas etapas (como en la fructificación y madurez del fruto), manteniendo el calendario fenológico similar al actual.

De los estudios que se han realizado sobre la planta de cacao, los que se han desarrollado en el país son pocos y prácticamente no existen publicaciones que traten la relación entre la fenología del cacao con las condiciones ambientales.

El presente estudio tiene como objetivo principal determinar algunos de los indicadores agroclimáticos más importantes para la planta del cacao a lo largo de su ciclo de crecimiento y por etapa fenológica, se propone un calendario fenológico anual (con dos picos de cosechas) realizado con base en la búsqueda bibliográfica y el trabajo en campo. El primer capítulo aborda las características geográficas generales del estado de Tabasco, así como el panorama agrícola enfocado al cacao y a los municipios productores. En el capítulo 2 se presentan las características de la planta de cacao y los elementos ambientales que influyen en él. Es en este mismo apartado donde se muestran los indicadores agroclimáticos para el cacao y la zonificación agroclimática, donde se identifican las áreas con potencial óptimo actual, tratándose de lugares en los que se satisfacen las demandas agroclimáticas, aunado a factores edáficos y de uso del suelo favorables para el cacao. Por último, en el capítulo 3 se compararon los cambios en los valores de temperatura y precipitación bajo los escenarios de cambio climático RCP4.5 GFDL-CM3 y RCP4.5 HADGEM2-ES para el horizonte 2015-2039. Se calculó la evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite y se realizó un balance hídrico por el método directo basado en el mismo autor para identificar los cambios en la disponibilidad de agua para los municipios donde se produce cacao en el estado de Tabasco y su relación con la fenología de la planta.

Antecedentes

Los diversos trabajos dedicados al cacao se concentran principalmente en manuales para el cultivo del cacao, destacan los países centroamericanos y suramericanos como los principales proveedores de estas investigaciones.

A partir de la segunda mitad del siglo anterior comienzan a hacerse populares las publicaciones sobre el cultivo. Wood (1959) realiza un trabajo arduo donde describe el cultivo del cacao en Venezuela, Colombia y Ecuador, identificando las principales enfermedades. Hardy (1960) publica un manual para el cultivo del cacao donde presenta, entre otros temas, los elementos ambientales que influyen en el cultivo. Una investigación más arraigada a la relación entre un elemento ambiental y una etapa fenológica del cacao es el realizado por Rubio (1961) en Ecuador donde trata de relacionar la influencia del fotoperiodo en el crecimiento y desarrollo del cacao encontrando que este indicador no influye en la floración, aunque es una conclusión que no se puede generalizar ya que es conocido que existe variabilidad en cuanto a la época del año donde se da esta etapa. Burgos y Reyes (1965) utilizaron el método geográfico deductivo para tratar de determinar cuáles son los elementos climáticos, sus magnitudes y combinaciones que servirán para definir los tipos agroclimáticos para el cacao; de ese estudio se obtuvieron datos importantes que relacionan la fenología del cacao y algunos indicadores agroclimáticos. Los trabajos realizados en Costa Rica por Braudeau (1969) proporcionan un panorama general de la cadena productiva del cacao. García y Maquín (1972) realizan una relación entre la magnitud de excesos hídricos y la producción de cacao en Costa Rica concluyendo que las altas precipitaciones tienen efectos favorables en los rendimientos de cacao. Años más tarde Enríquez (1985) publica un curso sobre el cacao donde abarca desde la historia del cacao, su hoja botánica, la ecología (refiriéndose más bien a los factores y elementos ambientales que influyen en el crecimiento y desarrollo de la planta), los suelos favorables, el mejoramiento en la producción, la reproducción del cacao, el manejo del mismo y la comercialización del producto.

Son pocos los trabajos orientados hacia una zonificación de la planta del cacao. Leal *et al.* (1999) realizaron una zonificación del cacao donde identifican las áreas potenciales para el desarrollo del cacao en Venezuela, los autores utilizaron variables ambientales y sobre todo variables edáficas y topográficas basados en sus necesidades agroecológicas de la planta; como parte de sus resultados reportan 650,000 ha aptas para el cultivo del cacao en

Venezuela. El grupo de Zonas Productoras de Cacao en Venezuela (2002) realizan una zonificación en el estado de Mérida de Venezuela, basándose en los criterios que utilizaron Leal *et al.*, en 1999. Una nueva zonificación para el cacao fue la realizada por Suárez (2006) para el Macizo montañoso Nipe-Sagua-Baracoa en Cuba basados en los criterios y peso de evidencia que fueron emitidos por expertos y por lo encontrado en la bibliografía, seleccionaron los elementos climáticos, factores edáficos y fisiográficos que influyen en el crecimiento y desarrollo del cacao, dándole mayor peso a las precipitaciones y su distribución. Las categorías que utilizaron se dividen en zona óptima, medianamente óptima y aceptable.

Las instituciones dedicadas a la investigación agrícola de distintos países han contribuido enormemente al conocimiento de esta planta perenne. En los resúmenes ejecutivos sobre el cacao emitidos por el Ministerio de Agricultura y Riego de Perú a través de la Dirección General de Competitividad Agraria describen con amplitud la cadena productiva del cacao y su importancia y fue posible encontrar un aporte valioso; un acercamiento al calendario fenológico del cacao durante un año. Para el caso de México, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ha aportado entre otras publicaciones relacionadas con el cacao: el Paquete Tecnológico Cacao (*Theobroma cacao* L.). Establecimiento y Mantenimiento y la publicación del Potencial Productivo de Especies Agrícolas de Importancia Económica en México donde presentan una zonificación del cacao a nivel nacional, además, la Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) de igual manera ha dedicado trabajos publicados en su revista científica sobre el cacao.

Si bien, los estudios especializados en agroclimatología y cacao son limitados en el país, lo es aún más si se trata de relacionarlo con el cambio climático. A pesar de que la literatura ha aumentado enormemente en el rubro del cambio climático, son pocas las publicaciones que se encuentran sobre el cacao y su relación ante éste. En Ländlerach *et al.* (2013) se enunciaron los efectos del cambio climático en los dos países con mayor contribución de producción de cacao en el mundo, encontraron que algunas zonas productoras de cacao actuales se harán inadecuadas y requerirán un cambio por otro cultivo, mientras que otras requerirán adaptaciones en la gestión agronómica y en otras la idoneidad climática para el cacao se aumentará. Señalan que la región con las mejores condiciones ambientales para el cacao se sitúa en el cinturón de selva tropical de África Occidental. Por su parte, Torquebiau *et al.* (2015) mencionan que la disminución de la producción en áreas de Costa

de Marfil y Ghana se debe principalmente a las condiciones secas más que al posible aumento (de 2°C) de temperatura para el 2050.

Concretamente, investigaciones orientadas al cacao en el estado de Tabasco son las realizadas por la Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios (1994) donde describen el panorama general del cultivo y los problemas a los que se ha enfrentado el sector en ese estado. Un trabajo con contenido similar es la de *El mundo del cacao* publicado por la revista *Agroproductividad* del Colegio de Posgraduados. Un estudio orientado hacia el ámbito social es el realizado por Ramírez (2007) donde expone la situación del pequeño productor de cacao en Tabasco ante un mundo globalizado.

Marco teórico-conceptual

Agroclimatología

El fundamento teórico con el que se sustenta la presente investigación se vincula con la Agroclimatología. Como señalan Arteaga y Romo (1983) “la Agroclimatología es la ciencia dentro de la Geografía que se encarga de estudiar las leyes y principios que relacionan los elementos y factores del clima con el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas cultivadas”. En la agroclimatología se señala que la radiación solar, la temperatura y la disponibilidad de agua son los principales factores climático-meteorológicos que influyen en las plantas.

Un estudio agroclimático de cultivo tiene como objetivo fundamental evaluar la aptitud agrícola de una zona o región, con base en los efectos que tienen los factores y elementos del clima en los cultivos (Campos, 2005).

Fenología

Un elemento fundamental para la investigación agroclimática es la fenología que es una rama de la Ecología que se encarga del estudio de los fenómenos periódicos de los seres vivos y sus relaciones con las condiciones ambientales, tales como luz, temperatura y humedad.

La emergencia de los cultivos, la brotación de los frutales, la floración, fructificación, madurez, entre otros, corresponden a estudios de fenología vegetal (Torres, 1995). O bien en una acepción más general, la fenología vegetal es la ciencia que estudia los fenómenos periódicos de los vegetales y su relación con el clima y con el tiempo atmosférico (Arteaga y Romo, 1983).

El lapso de la vida total de una planta constituye su periodo vegetativo. Dicho periodo que comprende una etapa de crecimiento, en sentido cuantitativo y uno de desarrollo, en sentido cualitativo, es decir, sufre cambios que suelen ser relativamente violentos y se aprecian en el exterior de la planta, estos cambios reciben el nombre de fases fenológicas.

Es menester diferenciar entre los conceptos de crecimiento y desarrollo. Por un lado, el crecimiento de un cultivo es el proceso de acumulación y traslocación de la materia fotosintetizada y está controlado principalmente por la escasez de agua, la nutrición y la

intensidad de la irradiación. En cambio, el desarrollo es el progreso del cultivo a través de sus diversas etapas fenológicas y consiste esencialmente en el cambio en su estructura morfológica. Estos cambios incluyen latencia y germinación de la semilla, desarrollo de la vegetación inicial, diferenciación de la floración temprana, elongación rápida del tallo, floración, polinización y el fijado, llenado y maduración de semillas (Campos, 2005).

Fases y etapas fenológicas

Existe una división del periodo de crecimiento y desarrollo que corresponde a fases y subperiodos o etapas fenológicas. Una fase es un periodo de tiempo relativamente corto (días, semanas) en que la planta pasa de una etapa a otra y las condiciones meteorológicas-climáticas son bruscas. Por otra parte, se entiende por subperiodo o etapa fenológica al periodo de tiempo más o menos largo (semanas, incluso meses) en que se desarrolla un órgano de la planta (tallo, flor, fruto, etcétera) y en el cual las condiciones meteorológico-climáticas son diferentes al resto de las etapas. Gómez (1988) señala que dos fases fenológicas delimitan una etapa.

Periodo crítico

Un periodo crítico es el breve intervalo durante el cual, la planta presenta la máxima sensibilidad a determinado elemento (temperatura, lluvia, radiación solar, etcétera) de tal manera que las oscilaciones en los valores de ese fenómeno meteorológico se reflejan sobre el rendimiento del cultivo (Torres, 1995). Conocer los periodos críticos permite tomar las medidas adecuadas (riegos, fertilización, aplicación de plaguicidas, labores culturales, etc.) para evitar decrementos en los rendimientos, además de bases para pronóstico de cosechas y la lucha contra las adversidades climáticas (Arteaga y Romo, 1983).

Radiación solar

El elemento más importante para los cultivos y las plantas en general, es la radiación solar, porque simplemente es el que les suministra la energía necesaria para desarrollar sus actividades vitales, además, es el motor que pone en marcha y hace operar a todos los fenómenos meteorológicos (Arteaga y Romo, 1983).

Intensidad de la radiación

Otro aspecto a destacar se refiere a la intensidad de la radiación, que es la cantidad de energía que se recibe sobre una unidad de superficie durante una unidad de tiempo, generalmente se expresa en calorías gramo por centímetro cuadrado por minuto (Torres, 1995).

Se pueden clasificar a las plantas en heliófilas (de Sol), plantas umbrófilas (de sombra) y plantas indiferentes. Algunos efectos de la luz que se desarrolla en las plantas son: la etiolación que se presenta cuando la intensidad de la luz no es suficiente para el desarrollo normal de las plantas y el fototropismo, la dirección de la cual proviene la luz determina en alto grado la dirección del crecimiento de los tallos y hojas (Torres, 1995).

Fotoperiodo o duración astronómica del día

Un indicador derivado es el fotoperiodo o duración astronómica del día, o sea la duración de la luminosidad del día sin tomar en cuenta la radiación que se relaciona con la floración.

La duración lumínica diaria o duración astronómica del día también se le conoce con el nombre de fotoperiodo y la reacción de las plantas a éste el de fotoperiodismo (Gómez, 1988). El fotoperiodo N , es la duración de la luminosidad del día sin tomar en cuenta la intensidad de la radiación (Torres, 1995). El fotoperiodismo se manifiesta entre otras de las siguientes formas (Gómez, 1988):

- Inducción floral (cambio del estado vegetativo al reproductivo).
- Época de floración de cada especie.
- Distribución geográfica de las especies.
- Entrada y salida de la dormancia (para plantas criófilas por ejemplo).
- Condicionamiento del crecimiento y desarrollo.

Como es señalado por Gómez (1988) se ha observado que la duración astronómica del día induce la floración y con ciertos rangos de duración aparecía la floración plena, esto para algunas especies de frutales pomáceos y drupáceos se haya también asociado al rompimiento de la dormancia, después del cual comienza la floración. De esta manera se

puede deducir que el fotoperiodo actúa como un tipo de “relojería”, o bien, que la planta cuenta con un reloj biológico que le indica cuándo debe realizar determinadas funciones.

Considerando al fotoperiodismo vegetal, o sea la respuesta de las plantas a diferentes duraciones diarias de luz solar, se puede clasificar a los vegetales en tres grandes grupos: las plantas de fotoperiodo largo (requieren una duración del día de más de 12 hrs.), plantas de fotoperiodo corto (una duración del día igual o menor a 12 hrs.), y las plantas indiferentes, es decir, florecen y fructifican normalmente tanto en épocas de días cortos como días largos. Dado que el cacao se produce en regiones tropicales en el que el día tiene una duración cercana a las 12 hrs se puede considerar una planta de fotoperiodo corto (Torres, 1995).

Unidades fototérmicas

Un índice que se relaciona con el elemento de radiación solar son las llamadas unidades fototérmicas. Se tratan de un índice resultado de multiplicar las unidades calor por la duración media del fotoperiodo (duración astronómica del día) y dividir el resultado entre diez o cien para obtener un número manejable con facilidad. Las unidades fototérmicas se pueden obtener por ciclo completo o por etapa o fase fenológica.

Temperatura

La temperatura es uno de los elementos meteorológicos más importantes para el ambiente vegetal. Reviste enorme significancia para el crecimiento, desarrollo y rendimiento de todas las plantas; requieren del régimen de temperatura uno óptimo y que no se presenten valores extremos (máximos y mínimos) que impidan su crecimiento o su supervivencia (temperaturas cardinales) y que las temperaturas medias diarias sean tales que la acumulación de temperatura se satisfeca en un lapso razonable (Campos, 2005). Estos valores pueden variar con la edad, el estado de desarrollo, la especie y la interacción con otros factores (Heuveltop, 1986). El estudio de este elemento debe abarcar los siguientes apartados: la temperatura de la planta, la del suelo y la del aire atmosférico cercano a la superficie, siendo esta última la que tiene una marcada influencia en el crecimiento y desarrollo que ocurren en la parte aérea de las plantas, mientras que la temperatura del suelo, por su parte, afecta directamente a la germinación y emergencia, así como a procesos metabólicos en las raíces.

Temperaturas cardinales y letales

La velocidad del crecimiento de cualquier planta cultivada está limitada por dos valores de temperatura, uno mínimo y otro máximo, fuera de los cuales cesa el crecimiento, además de un valor óptimo. Estos tres valores de temperatura se les conoce como temperaturas cardinales, mientras que las temperaturas letales son las que provocan la muerte de los tejidos vegetales e incluso de toda la planta (Campos, 2005).

Unidades calor

Se entiende como unidades calor o grados día a la cantidad de calor que las plantas deben acumular o consumir desde la germinación hasta la madurez (Arteaga y Romo 1983).

Constante térmica

La constante térmica para un determinado cultivo es la cantidad acumulada de unidades calor desde la emergencia hasta la madurez fisiológica (Torres, 1995). Posteriormente se fue apreciando que la constante térmica no era la misma todos los años y que variaba de un lugar a otro. Conservando la idea de que las plantas requieren cierta cantidad de calor para madurar, se idearon métodos como el método residual, exponencial, fisiológico o termofisiológico, entre otros que se ajustan mejor para ciertos lugares y cultivos (Gómez, 1988).

Termoperiodismo

La variación de la temperatura ya sea anual, diaria o aperiódica se denomina termoperiodo y la reacción que las plantas presentan a éste recibe el nombre de termoperiodismo. La característica del termoperiodismo es que presenta dos "fases" una positiva que corresponde a las altas temperaturas y otra negativa que corresponde a las bajas temperaturas, de hecho, el termoperiodo corresponde al régimen térmico y a la oscilación que ésta presenta (Gómez, 1988).

Burgos y Reyes (1965) reconocen que, en lo que se refiere al termoperiodo diario, valores que van desde los 28 a 34°C o más de temperatura media máxima del mes más caliente, donde 34°C o más corresponde a una termofase positiva diaria cálida y 28°C una termofase positiva diaria fría. Además de estos valores toma en cuenta la amplitud media diaria del mes más caliente, de los cuales, obtiene valores que van de los 5°C hasta los 14°C, donde

el primer valor corresponde a un termoperiodo diario con una amplitud pequeña y el segundo valor como un termoperiodo diario con una amplitud grande.

Agua

Con el agua se cierra la trilogía de los factores más importantes en la agroclimatología; por lo que es necesario conocer cómo se distribuye en el tiempo y en el espacio de estudio, y el papel intrínseco que juega dentro de los cultivos.

La precipitación ejerce sobre el terreno influencias mecánica, fertilizante, física y química, algunas de las cuales son favorables y otras desfavorables para la agricultura (Torres, 1995). Sin embargo, el agua es un elemento primordial para el desarrollo vegetal, aunque un exceso o un déficit repercuten en las etapas fenológicas, y en consecuencia, en la producción y rendimiento de los cultivos, siendo la temperatura y agua dos factores climáticos críticos.

La transpiración y la evaporación constituyen la evapotranspiración potencial o real. La evapotranspiración potencial (ETP) es la cantidad total de agua que el cultivo (planta y suelo) transpira y evapora (Torres, 1995).

Diagramas ombrotérmicos

García *et al.* (1983), señala que el diagrama ombrotérmico es una forma de representación gráfica del clima con la intención de evidenciar rápidamente similitudes climáticas de una región o localidad, a partir de dos elementos del clima: la precipitación mensual expresada en milímetros (mm) y la temperatura media mensual en grados centígrados (°C). Esta forma de representación permite evidenciar la eficiencia o déficit de precipitación con relación al tipo de régimen de lluvia y la temperatura sobre el crecimiento de las plantas.

La ventaja de los diagramas ombrotérmicos es que se puede observar la posible secuencia de la eficiencia o deficiencia de la precipitación en relación al régimen de lluvias y a la marcha de la temperatura a lo largo del año, adicionalmente se puede construir la curva de evapotranspiración potencial para un análisis más completo.

Balance hídrico

El balance hídrico es un método que se utiliza para cuantificar la relación entre las entradas y salidas de agua de un lugar en un periodo determinado. Las aportaciones de agua se

efectúan gracias a las precipitaciones y las pérdidas a la combinación de la evaporación y transpiración de las plantas. Partiendo del conocimiento de las precipitaciones medias mensuales y de la evapotranspiración potencial mensual estimada, se puede calcular el balance del agua en el suelo a lo largo del año. El conocimiento del balance de humedad es necesario para definir la falta y excesos de agua y es de aplicación para las clasificaciones climáticas definir la hidrología de una zona y para la planificación hidráulica (Almorox, 2003).

Existen varios métodos para calcular el balance hídrico, sin embargo, se utilizó el método para cada estación meteorológica considerada para este trabajo tomada de Almorox (2003), el cual se basa en el balance hídrico propuesto por Thornthwaite & Mather (1955). De acuerdo a Campos (2005) “la estimación de la ETP por el método de Thornthwaite es adecuada para las regiones húmedas”, es por eso que se toma en consideración este método.

Zonificación

El hecho de que el segundo objetivo particular de esta investigación sea identificar las zonas en las que actualmente son destinadas para el cultivo del cacao y las zonas con aptitud, incita a esclarecer algunos conceptos relacionados con la zonificación.

Cuando se habla de zonificación se puede entender como el proceso de división o parcelamiento, ya sea regular o irregular en un área determinada, conducente a la definición de zonas individuales que poseen características propias y un grado relativamente alto de uniformidad interna en todos o en ciertos atributos esenciales para propósitos específicos. La caracterización de la zona permite la evaluación de su aptitud para posibles tipos de utilización de recursos (García *et al.*, 1998). Es importante diferenciar conceptualmente si se realiza una zonificación ecológica, agroecológica o agroclimática.

Zonificación ecológica

Por un lado la zonificación ecológica es un proceso de zonificación basado en criterios ecológicos. Consiste en la identificación, definición y caracterización de áreas o zonas que corresponden a las distintas condiciones ecológicas en un marco geográfico determinado. Las variables determinantes en la zonificación son aquellas que se constituyen en factores propios del paisaje local de cada zona. Las zonas ecológicas retienen un grado

relativamente alto de uniformidad interna en todas sus características o al menos en aquellos factores determinantes del carácter de la zona (García *et al.*, 1998).

Los enfoques para definir las zonas ecológicas a partir de la información contenida en inventarios sobre recursos naturales son esencialmente de dos tipos: temático e integral. El enfoque temático consiste en determinar zonas con relativa uniformidad interna en todos los factores ambientales considerados. Esto se logra mediante la definición de áreas como resultado de la intersección de los factores temáticos individuales. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) sirven como herramientas integradoras de todos los factores expresados como coberturas temáticas. En contraste, el enfoque integral define zonas ecológicas mediante la incorporación a priori del conocimiento del especialista en las diferentes disciplinas. Es decir, la integración de los diferentes factores ambientales se logra a partir de la interacción de los especialistas antes de la definición final de los linderos de las zonas; las imágenes de satélite son de utilidad en este enfoque para proporcionar una visión total de las expresiones de los elementos del paisaje que es zonificado. Cabe señalar que no existen argumentos suficientemente fuertes para preferir un enfoque u otro (García *et al.*, 1998). En este trabajo se utilizará el enfoque temático ya que es el que más se apega a la disponibilidad de la información y al método que se pretende utilizar.

Zonificación agroecológica

La zonificación agroecológica de acuerdo a los criterios de la FAO (1997), define zonas con base a combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas. Los parámetros particulares usados en la definición se centran en los requerimientos climáticos y edáficos de los cultivos y en los sistemas de manejo bajo los que estos se desarrollan. Cada zona tiene una combinación similar de limitaciones y potencialidades para el uso de tierras y sirve como punto de referencia de las recomendaciones diseñadas para mejorar la situación existente de uso de tierras, ya sea incrementando la producción o limitando la degradación de los recursos (FAO, 1997).

Zonificación agroclimática

Por otra parte, como señalan White *et al.* (2011) “una región agroclimática es una zona con características interrelacionadas entre el clima y los sistemas de cultivos, el entendimiento de estas interrelaciones ayuda a tomar mejores decisiones de los manejos de los cultivos”. En una acepción práctica, la zonificación agroclimática se trata de una sobreposición de

mapas tomando en cuenta las siguientes variables: los lugares en donde se encuentran los cultivos, los mapas correspondientes a las condiciones climáticas del lugar, en especial, los que serán la base agroclimática del sitio y la fenología del cultivo, es decir, se trata de un cruzamiento entre la fenología, los indicadores agroclimáticos y la producción.

Método de interpolación IDW

Existen métodos determinísticos como el IDW o Spline y métodos geoestadísticos como el Kriging y sus variantes. La interpolación de datos ofrece la ventaja de proyectar mapas o superficies continuas a partir de datos discretos, sin embargo, la utilización de una buena cantidad de puntos del área en estudio limita su utilización (Johnston *et al.*, 2001; Villatoro y *et al.*, 2007)

El método de la distancia inversa ponderada se apoya en el concepto de continuidad espacial, con valores más parecidos para posiciones cercanas que se van diferenciando conforme se incrementa la distancia. Desde el punto de vista metodológico cada valor que tiene una correspondencia con un punto determinado, influye sobre los demás de forma local y disminuye proporcionalmente su efecto con la distancia (García y Cebrián, 2006). El exponente de distancia va a controlar la significancia de los puntos circundantes sobre el valor interpolado. Kravchenko y Bullock (1999) citado por Villatoro, Henríquez y Sancho (2007) mencionan que a pesar de que el uso correcto del valor p (power, peso o potencia) y del número de valores vecinos más cercanos puede mejorar la interpolación, estos valores no pueden ser obtenidos con base en las propiedades estadísticas de los datos.

El método IDW es más rápido en los cálculos, sin embargo, tiende a producir patrones conocidos como tipo “ojo de buey” alrededor de los puntos muestreados. Lo anterior expresa el peso que se le puede dar a la variación particular del valor de un punto de muestreo sobre los que están alrededor (Gotway *et al.*, 1996; Villatoro *et al.*, 2007).

Kravchenko (2003) recomienda el IDW para bases de datos pequeñas en donde los parámetros del variograma no son conocidos, también cuando la distancia de muestreo es grande e incluso para cuando la distancia de muestreo es mayor al rango de correlación espacial.

Cambio climático

El último objetivo particular busca comparar las condiciones ambientales bajo dos escenarios de cambio climático y su relación con la planta de cacao.

El cambio climático se refiere a las variaciones estadísticamente significativas en el estado promedio del clima o su variabilidad, que persisten durante periodos largos, típicamente décadas o más. Actualmente se reconoce con un nivel de confianza alto que el calentamiento observado es debido al aumento de concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) asociados a actividades humanas (IPCC-WGI, 2007).

Las emisiones continuas de gases de efecto invernadero causarán un mayor calentamiento y nuevos cambios en todos los componentes del sistema climático. Para contener el cambio climático, será necesario reducir de forma sustancial y sostenida las emisiones de gases de efecto invernadero. De acuerdo a múltiples evidencias científicas, se considera que el factor antropogénico ha sido determinante en el cambio climático; entre las principales causas de origen antropogénico se encuentran el incremento en los gases de efecto invernadero de la atmósfera, la deforestación y agricultura (Alvarado *et al.*, 2002).

En los últimos años, se han desarrollado Modelos de Clima Global (MCG) y escenarios posibles bajo ciertos periodos de tiempo futuro para evaluar los efectos en el clima de aumentar las emisiones de GEI. Juntos proporcionan un escenario posible bajo ciertos factores; los escenarios de cambio climático representarían entonces una imagen de lo que podría acontecer debido por los cambios en las emisiones de GEI y son considerados como instrumentos de utilidad tanto en el análisis, como en la evaluación de los efectos que el cambio climático puede tener a diferentes niveles.

El gradiente total del aumento de la temperatura previsto, basado en seis expectativas de emisiones, es de 1.1 a 6.4°C para finales de siglo. El mejor rango estimado de incremento de temperaturas previsto, se extiende del punto medio de la perspectiva menor de emisión hasta el punto medio de la perspectiva mayor de emisión, es de 1.8 a 4.0°C a finales del siglo (Moore y Allard, 2008). Mientras que la proyección para América Central para la precipitación fluctúa entre -22% y el +7% en 2100 (IPCC, 2014).

Riesgos en la agricultura ante el cambio climático

Los riesgos relacionados con el cambio climático surgen de amenazas relacionadas con el clima y la vulnerabilidad de las sociedades (IPCC, 2014). El inminente calentamiento global afectará a las sociedades en aspectos como la disminución en la producción y abastecimiento de alimentos, reaparición de viejas enfermedades, incremento en alergias y plagas, fenómenos naturales magnificados (sequías, inundaciones, huracanes, etc.), aspectos que pueden impactar en mayor medida a los países con pobreza o menos desarrollados (Alvarado *et al.*, 2002).

El efecto del cambio climático en la agricultura está relacionado con variaciones en los climas locales más que en patrones mundiales y que afectará de diferente forma a cada región del planeta. En la agricultura, el cambio climático podría afectar de varias maneras como en la productividad, prácticas agrícolas, cambio en el uso del suelo, adaptación de cultivos, entre otros.

Se sabe que las plantas han respondido al cambio climático en dos formas principales, migración y adaptación (Etterson & Shaw, 2001). Field *et al.* (1992) mencionan que las plantas responden a los desequilibrios causados por variaciones ambientales y tienden a compensarlo, al menos parcialmente. Uno de los efectos sobre la vegetación tiene lugar en la fenología de las plantas. Los cambios en el ambiente ejercen diferentes presiones en las plantas e influyen en forma única en el desarrollo de cada una de las especies. La respuesta de las plantas a estos cambios ambientales, repercutirán en especies cuya floración u otra fase o etapa está controlada por la temperatura, así como en plantas donde el fotoperiodo es determinante, e incluso algunas especies donde la disponibilidad de agua sea el factor que desencadene un determinado evento fenológico (Alvarado *et al.*, 2002). No obstante, se sabe que el principal elemento climático que afecta la fenología de las plantas es la temperatura. Los efectos que tendría un probable aumento de temperatura sobre la fenología pueden verse reflejados en un desfase temporal de los mismos, es decir, podrían adelantarse, atrasarse, acortarse o alargarse los eventos fenológicos, como por ejemplo la floración. Alvarado *et al.* (2002) hacen notar que los patrones fenológicos anticipados pueden alterar la distribución de recursos en las plantas, pueden tener implicaciones en los sistemas de polinización y también incrementar el tamaño, la riqueza de especies y la diversidad genética intraespecífica del banco de semillas del suelo (Thorhallsdottir, 1997), bien si se tratan de cultivos los cambios en los eventos fenológicos traerán consigo una probable afectación en la productividad o rendimiento.

Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP)

Para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, la comunidad científica ha definido un conjunto de cuatro escenarios nuevos, denominados trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés), que se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo total en el año 2100 en relación con 1750, esto es, 2.6 Wm^2 , en el caso del escenario RCP2.6; 4.5 Wm^2 , en el caso del escenario en el caso del escenario RCP4.5; 6.0 Wm^2 , en el caso del escenario RCP6.0, y 8.5 Wm^2 , en el caso del escenario RCP8.5 (IPCC, 2013).

Los cuatro escenarios ofrecen conjuntos de datos de resolución espacial del cambio de uso del suelo y de emisiones sectoriales de contaminantes atmosféricos, y especifican cuáles serán las concentraciones de gases de efecto invernadero y las emisiones antropógenas anuales hasta 2100. Los escenarios de RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos sencillos, modelos de la química atmosférica y modelos del ciclo global del carbono. Si bien los escenarios de RCP abarcan una amplia gama de valores de forzamiento total, en ellos no se considera todo el abanico de emisiones definidos en la bibliografía, especialmente los aerosoles (IPCC, 2013).

De acuerdo a los resultados de la mayoría de las simulaciones, el grupo de trabajo del IPCC determinó las concentraciones de CO_2 y las concentraciones de CH_4 y N_2O que combinadas alcanzarán 475 ppm para el RCP2.6; 630 ppm para el RCP4.5; 800 ppm para el RCP6.0; y 1,313 ppm para el RCP8.5 para el año 2100 (IPCC, 2013).

En general, se prevé un cambio en la temperatura media global en superficie para el periodo 2016-2035, en relación con el periodo 1986-2005, esté en el rango de 0.3°C a 0.7°C (nivel de confianza medio). También se toma en cuenta que los aumentos a corto plazo en las temperaturas medias estacionales y anuales serán mayores en los trópicos y subtrópicos que en latitudes medias (nivel de confianza alto). Así mismo, es prácticamente seguro que se produzcan temperaturas extremas calientes más frecuentes y frías menos frecuentes en la mayoría de las zonas continentales, en escalas temporales diarias y estacionales, conforme vaya aumentando la temperatura media global (IPCC, 2013).

Es importante tener en cuenta que los RCP pueden representar una variedad de políticas climáticas, es decir cada RCP puede ser resultado de diferentes combinaciones de futuros económicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionales. Esto difiere de los

escenarios utilizados en los informes anteriores (escenarios A1, A2, B1, B2 utilizados en el Tercer y Cuarto Informe de Evaluación), cada uno de los cuales asumía una línea evolutiva determinada (IPCC, 2013).

Escenarios GFDL-CM3 y HADGEM2-ES

Para el caso de México se desarrollan escenarios climáticos a nivel regional con la colaboración de diferentes institutos y administrados por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional se ha realizado la actualización de escenarios de cambio climático para México, disponibles en el portal de Internet del INECC y se refieren a proyecciones climáticas bajo los diferentes escenarios de radiación, para un futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099) (Cavazos *et al.*, 2013).

Los escenarios GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) y HADGEM2-ES (Met Office Hadley) corresponden a dos de las tres nuevas salidas de aquellos modelos seleccionados por la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático para ejemplificar los nuevos escenarios de cambio climático para México.

Los nuevos escenarios tienen una resolución espacial original de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (55 x 55 km aproximadamente); a partir de ellos obtuvieron su respectiva anomalía y mediante un proceso de reducción de escala se estructuraron a $30'' \times 30''$ (926 x 926 m aproximadamente). Posteriormente sumaron las anomalías a la climatología base correspondiente y de esa manera se generaron los escenarios a muy alta resolución espacial y que incorporan el efecto topográfico considerado en la climatología base (1950-2000).

Los nuevos escenarios fueron estructurados para 3 forzamientos radiativos: RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5, mientras que para el modelo HADGEM2-ES se incorporó adicionalmente el forzamiento RCP6.0. Los horizontes que presentan son: 2015-2039 (25 años) y 2075-2099 (25 años) para cada uno de los cuales se desarrollaron bases de datos de promedios mensuales de temperatura media y precipitación (UNIATMOS, 2016).

Marco metodológico

La metodología empleada para esta investigación se enfoca en los principios del método agroclimático que básicamente son tres: 1) contar con observaciones climático-meteorológicas, 2) contar con información fenológica, y 3) establecer la relación entre ambas, con el fin de establecer los requerimientos de los cultivos.

Antes de emprender el método agroclimático, se comenzó por desarrollar el marco geográfico del estado de Tabasco, el cual corresponde al capítulo uno del presente trabajo. Se realizó una búsqueda bibliográfica para describir las características de geología y suelos, fisiografía, hidrología, los climas en la entidad y el panorama agrícola en Tabasco. Se identificó la situación de la cadena agroproductiva del cacao en la entidad y los factores que intervienen en él con base en la búsqueda bibliográfica y entrevistas semi-estructuradas con algunos productores de cacao en los municipios de Cunduacán, Cárdenas, Huimanguillo y Comalcalco.

El primer criterio del método agroclimático establece que se debe contar con observaciones climático-meteorológicas para la zona de estudio. Las bases de datos se obtuvieron del portal <http://clicom-mex.cicese.mx/> del Sistema CLICOM del CICESE, estas bases de datos contaban con valores de temperatura media, máxima y mínima y precipitación a nivel diario.

En seguida se realizó una estimación de los datos faltantes de cada estación meteorológica, donde se ocupó la ecuación de la pendiente de la recta dados dos puntos, la cual ya despejada quedó de la siguiente manera:

$$Y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) + y_1$$

Dónde:

y = El dato a estimar

y_2 = El valor del año siguiente del dato a estimar

y_1 = El valor del año anterior del dato a estimar

x = El año que se va a estimar

x_2 = El año siguiente del dato a estimar

x1= El año anterior del dato a estimar

Posteriormente, se utilizó el criterio o test de Helmer para verificar la homogeneidad de las series, utilizando la variable de precipitación. De acuerdo a Campos (2005) la prueba de Helmer es sencilla, se trata de analizar el signo de las desviaciones de cada dato de la serie con respecto a su media: si una desviación de cierto signo es seguida por otra del mismo signo, se ha formado una secuencia (S), por el contrario, si una desviación es seguida por otra de signo contrario, representa un cambio (C). La serie es homogénea si la diferencia entre el número de secuencias y el de cambios es cero dentro de unos límites debidos a un error probable, los cuales dependen de la longitud del registro. Si las secuencias son mayores que los cambios, algún tipo de variación en la media o una tendencia están originando la pérdida de homogeneidad.

Los factores que intervinieron para la selección de las estaciones de referencia fueron: la cantidad de años operando, el comportamiento cronológico de la serie, número de datos faltantes y su distribución o concentración, es decir, si son meses o años de datos faltantes y si están dispersos o son seguidos, y por último el resultado de la prueba de homogeneidad.

El conjunto de estaciones fue exportado para su manipulación al programa Visual FoxPro 7.0® para darle formato a los datos y calcular los promedios mensuales y anuales para cada estación.

Para calcular la evapotranspiración potencial (ETP) se utilizó la fórmula de Thornthwaite. Los cálculos correspondientes se realizaron en una hoja de cálculo Excel 2013. En el criterio de Thornthwaite, la estimación de la ETP se realiza mediante una fórmula empírica que utiliza como datos básicos la temperatura media mensual en grados centígrados (Tt) y la duración promedio del día (N) en cada mes. Las fórmulas para este criterio son:

a) $ICM = (Tt / 5)^{1.514}$

b) $ET = 16 * (10Tt / ICA)^\alpha$

Donde, ICM es el índice de calor mensual, ET es la evapotranspiración potencial mensual sin corregir en milímetros, ICA es el índice de calor anual que es igual a la suma de los 12 índices mensuales, y el exponente α tiene la expresión empírica siguiente:

$$\alpha = 6.75 * 10^{-7}(ICA)^3 - 7.71 * 10^{-5}(ICA)^2$$

$$+1.792 * 10^{-2}(ICA) +0.49239$$

Para temperaturas mayores de 26.5°C no hay influencia del índice de calor anual, por lo cual, la ET es sólo función de Tt, por lo que se tomaron los valores de ETP sin corregir del criterio de Thornthwaite de la tabla de Jiménez (1978).

Finalmente, para la corrección de la evapotranspiración potencial (ETP) corregida se usa la fórmula:

$$ETP = FC_N * ET$$

Donde FC_N es el factor correctivo mensual que toma en cuenta el número de días del mes (D) y la insolación del lugar (N), su expresión es:

$$FC_N = (D/30) * (N/12)$$

Se realizó un primer balance hídrico con base en la temperatura utilizando diagramas ombrotérmicos para cada estación de referencia. De acuerdo a García *et al.* (1983) se construye un gráfico donde en el eje de las abscisas se anotan los doce meses del año, mientras que en el eje Y_1 se anota la temperatura anual por mes y en el Y_2 la precipitación total acumulada. La gráfica tiene que cumplir con la siguiente condición: la escala de precipitación sea el doble que la de temperatura. García *et al.* (1983) señalan que la utilización de este tipo de fórmulas se les debe agregar una constante de ajuste de tal forma que para el régimen de verano es $p = 2t + 28$; con lluvias uniformemente repartidas en el año será $p = 2t + 14$; por último, para lluvias de verano pero con elevado porcentaje de lluvia invernal se utiliza $p = 2t + 21$.

El segundo punto del método agroclimático hace mención a las observaciones fenológicas. Se obtuvo la fenología del cacao a partir de la búsqueda bibliográfica y con datos obtenidos de la aplicación de entrevistas semi-estructuradas a los productores de cacao en los municipios de Cunduacán, Cárdenas, Huimanguillo y Comalcalco donde identificaban las etapas en las que se encuentran los árboles del cacao a lo largo del año. Con esa información se construyó un calendario fenológico anual del cacao para Tabasco, con lo que se cumple el primer objetivo particular.

Los valores de las variables de las estaciones que se utilizaron para el análisis se pueden consultar en el Anexo 1 y 2.

El tercer criterio del método agroclimático establece la relación entre ambas variables; las climático-meteorológicas y las fenológicas, es decir, propiamente el análisis agroclimático que es el objetivo general de esta investigación.

Se comenzó con el elemento de la radiación solar bajo los aspectos de intensidad de la luz, fotoperiodo o duración astronómica del día y las unidades fototérmicas.

Debido a que prácticamente no hay mediciones instrumentales en el estado de Tabasco, se analizó la intensidad de la radiación solar a lo largo del año (se toma en cuenta que el cacao es una planta perenne) consultando los mapas de Irradiación Solar Global de la República Mexicana elaborados por el Instituto de Geofísica de la UNAM (Instituto de Geofísica, s.f.). Los valores se relacionaron con las diferentes etapas fenológicas del cacao.

El fotoperiodo se calcula con la siguiente ecuación:

$$N = 2/15 \cos^{-1} - (\tan \phi \tan \delta)$$

Donde:

N = fotoperiodo en horas

ϕ = latitud geográfica en grados

δ = declinación solar en grados

La duración astronómica del día o fotoperiodo de acuerdo con la latitud, con base en las tablas astronómicas de Torres (1995) para después calcular las unidades fototérmicas y su distribución respecto al comportamiento fenológico del cacao.

La fórmula para calcular las unidades fototérmicas es:

$$UF = \Sigma UC * N / 10$$

Donde:

UF = Unidades fototérmicas

ΣUC = Sumatoria de las unidades calor (por mes o etapa)

N = Fotoperiodo medio

Se calcularon las unidades fototérmicas para cada estación y por etapa fenológica y para el periodo de floración-madurez del fruto del cacao en Tabasco. Para realizar el cálculo es necesario conocer las unidades calor, las cuales se describen a continuación.

Algunos indicadores que se estimaron para el elemento de temperatura y la planta de cacao son: unidades calor y el termoperiodo.

El método llamado residual considera que el crecimiento y desarrollo de cualquier planta no se inicia a los 0°C, sino que cada especie, y aún a cada variedad, lleva a cabo sus funciones a partir de una determinada temperatura, la cual recibe el nombre de cero vital o fisiológico (o punto crítico) y todo grado de temperatura encima de dicho valor se considera unidad calor. Este método es el que más se ha utilizado para estimar unidades calor ya que es el que arroja mejores resultados por lo que se decidió utilizarlo para estimar las unidades calor del cacao. La fórmula es la siguiente:

$$U_c = (TM - PC) D$$

Donde:

U_c = Unidades calor para un día

TM = Temperatura media

PC = Punto crítico, cero fisiológico o cero vital

D = Número de días del mes

Para realizar el cálculo es necesario conocer el cero fisiológico de la planta de cacao. Se tomó como referencia a los árboles frutales cuyo cero vital es de 12°C (Campos, 2005) para determinar el cero vital del cacao.

El termoperiodo se determinó de acuerdo a lo señalado por Burgos y Reyes (1965) en lo que se refiere al termoperiodo diario, valores que van desde los 28 a 34°C o más de temperatura media máxima del mes más caliente, donde 34°C o más corresponde a una termofase positiva diaria cálida y 28°C una termofase positiva diaria fría. Además de estos valores toma en cuenta la amplitud media diaria del mes más caliente, de los cuales, obtiene valores que van de los 5°C hasta los 14°C, donde el primer valor corresponde a un termoperiodo diario con una amplitud pequeña y el segundo valor como un termoperiodo diario con una amplitud grande. Estos criterios se utilizaron para identificar qué tipo de

termoperiodo y termofase positiva correspondía a la planta de cacao en el estado de Tabasco.

Para determinar la disponibilidad de agua en el estado de Tabasco se realizó el balance hídrico por el método directo basado en Thornthwaite & Mather (1955). Para el cálculo del balance hídrico ya se contaban con los datos de precipitación media mensual y ETP por lo que se calcularon los parámetros siguientes:

La diferencia entre la precipitación y la ETP: es el balance mensual de entradas y salidas potenciales de agua en el suelo. La diferencia clasifica a los meses en secos ($P-ETP < 0$) y en húmedos ($P-ETP > 0$).

En el cálculo de la reserva de agua en el suelo (R) se tiene que tener presente lo propuesto por Almorox (2003) "el suelo tiene una capacidad de retención de humedad en función de sus características físicas y cuando se alcance la capacidad de retención máxima del suelo, el agua añadida en exceso escurrirá superficialmente o en profundidad" por lo que se debe de incluir el valor de la reserva máxima o cantidad de agua por unidad de superficie (mm) que el suelo es capaz de almacenar en su perfil. Como referencia climática se toma una reserva máxima de 100 mm (Thornthwaite, 1948).

En el balance hídrico, la reserva del mes se calcula agregando los incrementos ($P-ETP$) cuando estos son positivos. Así la reserva en el mes "i", en función del mes anterior (i-1) será:

$$a) R_i = R_{i-1} + (P_i - ETP_i) \quad \text{SI} \quad 0 < R_{i-1} + (P_i - ETP_i) < R_{\text{máx}}$$

$$b) R_i = R_{\text{máx}} \quad \text{SI} \quad R_{i-1} + (P_i - ETP_i) > R_{\text{máx}}$$

$$c) R_i = 0 \quad \text{SI} \quad 0 > R_{i-1} + (P_i - ETP_i)$$

Los valores de la reserva se irán acumulando mes a mes en el periodo húmedo, según los incrementos $P-ETP > 0$, y disminuirán al llegar al periodo seco, decreciendo mes a mes según los valores mensuales $P-ETP < 0$. La reserva nunca tendrá un valor mayor que la reserva máxima (100) ni un número negativo (Almorox, 2003).

Se necesita conocer la reserva del mes anterior para comenzar el cálculo, es por ello que se asigna un valor hipotético a un mes y se realizan los ciclos anuales del cálculo (aunque en el acomodo de los datos se tenga un mes inicial y uno final) hasta que la hipótesis de la

que partimos se confirme al final del ciclo. A efectos de cálculo, se suele suponer que después del periodo seco la reserva del suelo es nula, en consecuencia se empieza el cálculo de la reserva de agua con el primer mes húmedo y se asigna al mes anterior una reserva nula. Si después de realizar los cálculos, al final del periodo seco quedase agua en el suelo, se deberán recalcular las reservas agregando la reserva existente al final del periodo seco a las reservas del periodo húmedo. Por otra parte, si todos los meses son húmedos podemos utilizar los supuestos anteriores pero se llegará a que la reserva es igual a la reserva máxima para todos los meses, por el contrario, si todos los meses son secos la reserva será nula en todos los meses (Almorox, 2003).

La variación de la reserva o del agua almacenada es la diferencia entre la reserva del mes en el que se está realizando del cálculo y la reserva del mes anterior; si tiene un signo positivo significa reposición de humedad en el suelo y si tiene un signo negativo significa utilización de la humedad del suelo. La fórmula es:

$$VR_i = R_i - R_{i-1}$$

Por otra parte, cuando existen dos periodos, uno en la que las precipitaciones superan a la ETP (húmedo) y otro en el que las precipitaciones son menores a la ETP (seco), la evapotranspiración real se comporta de la siguiente manera: si las precipitaciones son mayores que la evapotranspiración potencial, la evapotranspiración real coincide con la potencial. Si las precipitaciones son menores a la evapotranspiración potencial, la evapotranspiración real tiene dos fases: en un primer momento la evapotranspiración real es mayor que las precipitaciones pero menor que la ETP, ya que se evapora la reserva de agua; en la segunda fase, cuando se agota la reserva de agua, la evapotranspiración real coincide con las precipitaciones.

La evapotranspiración real en el periodo húmedo va a ser igual a la evapotranspiración potencial, entonces:

$$ETR_i = ETP_i$$

Mientras que para el periodo seco, el agua que se evapora será el agua de la precipitación más la que se extrae del suelo, es decir, la variación de la reserva (la reserva que queda menos la que había en el mes anterior, como tendrá signo negativo se toma el valor absoluto), entonces:

$$ETR_i = P_i + VR_i$$

La fórmula para calcular la falta de agua o déficit, que es el volumen de agua que faltaría para cubrir las necesidades potenciales de agua es la siguiente:

$$F_i = ETP_i - ETR_i$$

Para el excedente de agua de la reserva máxima que se habrá perdido por escorrentía; sólo puede haber exceso si la precipitación ha compensado previamente la evapotranspiración real, es decir, en los meses húmedos. El exceso de agua corresponde a las siguientes formulas:

$$a) \quad Ex_i = [P_i - ETP_i - VR_i] \quad \text{SI} \quad (P_i - ETP_i) > 0$$

$$b) \quad Ex_i = 0 \quad \text{SI} \quad (P_i - ETP_i) \leq 0$$

El exceso de agua tiende a escurrir o infiltrarse, para la estimación del desagüe se utiliza la siguiente formula:

$$Ds_i = 0.5 * [D_{i-1} + Ex_i]$$

Al igual que en el cálculo de la reserva de agua, se necesita el valor del desagüe del mes anterior, por lo que se le asigna un valor hipotético y se corrige al finalizar el cálculo, así se obtiene el valor del desagüe.

Una vez realizado el balance hídrico para cada estación de referencia se analizaron los resultados vinculándolos con la fenología del cacao.

El segundo objetivo particular de esta investigación se relaciona con la zonificación del cacao en Tabasco. Se utilizó como base la metodología propuesta por la FAO (1997) con un enfoque temático de acuerdo a lo propuesto por García *et al.* (1998), donde se utilizó el SIG ArcMap 10.2.2 para realizar la zonificación.

En primer momento se generaron las coberturas ambientales con los datos de las estaciones de referencia para las variables de temperatura, precipitación y ETP a partir de sus coordenadas geográficas. Se realizaron varias pruebas de interpolación de los datos con métodos determinísticos y geoestadísticos.

En este trabajo se utilizó el método IDW con un tamaño de celda de 0.00092593 grados que es el equivalente a 100 metros. Se determinó que este valor es adecuado debido a las

pocas barreras fisiográficas y relieve plano que presenta la entidad tabasqueña. Para determinar el exponente de distancia se hicieron pruebas con valores de 0.5 a 3, la potencia de 1 fue la que mostró buenos resultados. Por último, se realizaron pruebas con el número de puntos considerados para la interpolación, y 5 son el número de vecinos circundantes más adecuados, esto para las variables ambientales.

En cuanto a las variables edáficas (profundidad, arcilla, arena, limo) los parámetros se cambiaron ya que el número de puntos era ligeramente mayor por lo que la potencia se dejó en 2 y el número de vecinos circundantes en 10, con lo cual, los resultados fueron adecuados que si se utilizan los parámetros que se aplicaron a las variables ambientales.

Para la validación del método de interpolación se extrajo al azar el 25 % de las estaciones para comparar los valores estimados por el método y los valores reales.

Así mismo, se realizaron pruebas con otro tipo de método para interpolar los datos, en este caso se optó por el método geoestadístico Kriging ordinario, no obstante, los resultados no fueron favorables ya que el número de estaciones con datos confiables es mínimo, aun si se realizan las transformaciones que recomienda la literatura y si se escoge un modelo que se adapte a esas transformaciones con base en las propiedades estadísticas de los datos. Los valores de correlación espacial no eran los óptimos en especial en las variables de evapotranspiración potencial y de precipitación por lo que se mantuvo el método IDW para las interpolaciones.

Se realizó la zonificación actual potencial del cacao en el estado de Tabasco tomando en cuenta variables ambientales, edáficas y de uso del suelo. Se pueden consultar los mapas correspondientes a estas variables en el Anexo 3.

A cada variable ocupada se le asignó un peso de acuerdo a la influencia que tiene sobre el cacao. Los rangos de las variables que se utilizaron para definir la aptitud para el cacao se tomaron de las fuentes bibliográficas, adaptándolos a las condiciones climáticas propias del estado.

Una vez que se tuvieron estos rangos, las coberturas se reclasificaron en tres clases que demostraran la aptitud para la planta de cacao, incluyendo la variable de uso del suelo. Al tratarse de una variable categórica se reclasifico en 3 valores; el tipo de vegetación de selva es la que tendría el valor de mayor aptitud, ya que se trata del hábitat del cacao. Para realizar la zonificación se utilizó la herramienta *Weighted Overlay* del SIG ArcMap® 10.2.2

que permite realizar una superposición ponderada de coberturas de tipo raster, donde los valores de preferencia no sólo deben asignarse en relación a los valores dentro de la capa, sino que también deben tener el mismo significado entre las capas. Lo que realiza la herramienta es utilizar los criterios de entrada que se multiplican por los pesos asignados y después los suma, como resultado, identifica los lugares donde las celdas tengan criterios similares.

Posteriormente, se realizó una comparación con el mapa de potencial productivo del cacao realizado con insumos de (SAGARPA, 2012) y el mapa de zonificación potencial actual que se generó como una forma de validar los resultados mediante una sobreposición de los mapas por medio del SIG ArcMap® 10.2.2. Este mapa de potencial productivo realizado por la SAGARPA utilizó como variables para la zonificación la altitud (6 a 400 m la condición de altitud apta); la precipitación (entre 1,500 y 2,500 mm anuales como valor de mayor aptitud); la temperatura media anual (de 22 a 28°C como rango de aptitud alta); para el uso de suelo consideraron zonas agrícolas de temporal, de riego, riego eventual y riego suspendido y para el tipo de suelo se excluyeron los litosoles, solonchaks y otros dos tipos de suelo. Con estas variables realizaron la zonificación de potencial productivo del cacao para todo el país.

El mapa que muestra las zonas con las mejores condiciones óptimas para el cacao en la entidad fue resultado de la intersección de ambos mapas.

El tercer objetivo particular de esta investigación se relaciona con las condiciones ambientales a futuro para el estado de Tabasco y su relación con la planta de cacao.

Se descargaron los datos mensuales en formatos Geotiff y txt correspondientes a los escenarios de cambio climático de la página <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/> donde se seleccionó la Trayectoria de Concentración Representativa (RCP por sus siglas en inglés) RCP4.5 que representa un forzamiento radiativo de 4.5Wm^2 que se estabiliza después de 2100 con una concentración de 650 p.p.m. de CO_2 para los modelos GFDL-CM3 y HADGEM2-ES para el horizonte 2015-2039. Posteriormente se trabajaron los datos en ArcMap® 10.2.2 para realizar la extracción que representa al estado de Tabasco; se utilizó una máscara del límite estatal de la entidad, así mismo, se ocuparon los puntos correspondientes a las estaciones meteorológicas para extraer los valores de las variables y así poder utilizar esos datos para el análisis de las variables y el cálculo de la ETP y el Balance Hídrico bajo estos escenarios. Se decidió utilizar esta trayectoria porque no es un

cambio tan drástico como lo sería el RCP8.5 y se pretendía conocer el efecto a mediano plazo, es por eso que se eligió el horizonte de 2015-2039. Los dos escenarios que se utilizaron forman parte de cuatro escenarios que se han adaptado para el país y fueron elegidos para contrastar los valores de cambio en las variables de precipitación y temperatura.

Capítulo 1. Marco geográfico del estado de Tabasco

1.1. Aspectos generales

Tabasco tiene una superficie de 24,661 Km² que representa el 1.3% de la superficie del país. Las coordenadas geográficas extremas son: 18°39´ de latitud norte; al sur 17°15´; al este 91°00´, al oeste 94°07´de longitud. Colinda al noreste con el Golfo de México y Campeche; al sureste con la Republica de Guatemala; al sur con Chiapas; al oeste con Veracruz (INEGI, 2012). Tabasco se conforma por 17 municipios (Tabla y Figura 1):

Tabla 1. Municipios y cabeceras municipales de Tabasco.

Municipio	Latitud Norte		Longitud Oeste		Altitud (m.s.n.m.)
	Grados	Minutos	Grados	Minutos	
BALANCÁN	17	48	91	32	30
CÁRDENAS	17	59	93	22	20
FRONTERA	18	32	92	38	10
VILLAHERMOSA	17	59	92	56	10
COMALCALCO	18	15	93	13	10
CUNDUACÁN	18	3	93	10	10
EMILIANO ZAPATA	17	44	91	45	20
HUIMANGUILLO	17	50	93	23	20
JALAPA	17	43	92	48	20
JALPA DE MÉNDEZ	18	10	93	3	10
JONUTA	18	5	92	8	10
MACUSPANA	17	45	92	35	10
NACAJUCA	18	9	93	1	10
PARAÍSO	18	23	93	12	10
TACOTALPA	17	35	92	49	20
TEAPA	17	32	92	57	40
TENOSIQUE	17	28	91	25	20

Fuente: Anuario estadístico de Tabasco 2012.



Figura 1. Municipios de Tabasco. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, 2006.

En la entidad existen 36 centros con características urbanas y aproximadamente 3,000 pequeñas comunidades rurales que se encuentran organizadas en 185 centros de desarrollo regional (INAFED, 2015). El estado de Tabasco se divide en dos regiones:

La región Grijalva abarca 12,069.34 Km² que representa el 48.9% del territorio tabasqueño, es la región donde converge la mayor concentración urbana y la que resiente más el fenómeno de inmigración y los efectos de la desaceleración de la industria petrolera, el desempleo y la contaminación ambiental. Esta región se conforma por las siguientes tres subregiones: Chontalpa, los municipios que la integran son Huimanguillo, Cárdenas, Comalcalco, Cunduacán y Paraíso; la subregión Centro; Jalpa de Méndez, Nacajuca, Centro y la subregión Sierra con los municipios de Jalapa, Teapa y Tacotalpa. De estas subregiones es la de la Chontalpa donde se encuentran los municipios productores de cacao.

La región Usumacinta ocupa el primer lugar en extensión territorial con 12,591.66 Km² que representa el 51.06% del total del estado; entre las principales actividades económicas que se llevan a cabo están la agricultura y ganadería para autoconsumo y la explotación forestal a cargo de ejidos colectivos; existen yacimientos petrolíferos y yacimientos minerales aluminicos y bancos de dolomita, grava y arena. La región Usumacinta se conforma por

dos subregiones: Pantanos y Ríos, los municipios que los conforman son Centla, Jonuta y Macuspana por un lado, y Emiliano Zapata, Balancán, Tenosique.

1.2. Geología y Suelos

El proceso de evolución de la región en términos generales es reciente y con pocas variaciones. La planicie se encuentra sobre un grupo de calizas plegadas y falladas que descansan sobre un basamento cristalino que aflora en la parte sur del Soconusco. A excepción de la porción sur, en el estado de Tabasco no existen estructuras geológicas superficiales de mayor envergadura.

En Tabasco no existe una gran diversidad litológica, en la llanura costera predominan suelos cuaternarios de tipo aluvial, lacustre, palustre y litoral, así como lomeríos de areniscas y calizas de edad terciaria. Las rocas más antiguas son también de origen sedimentario y fueron depositadas en ambientes marinos, lagunares y deltaicos, donde se formaron calizas, evaporíticas y conglomerados respectivamente.

De acuerdo a García *et al.* (2007) se distinguen tres tipos de suelos: los originados por aluviones (formados por arrastre y depositación de material por parte de los ríos), los suelos originados “*in situ*” (suelos derivados del intemperismo de las rocas sedimentarias) y los suelos marinos (suelos formados por la acción de las corrientes marinas). Los tipos de suelos que se encuentran en Tabasco, de acuerdo a la Serie II de INEGI son (Figura 2):

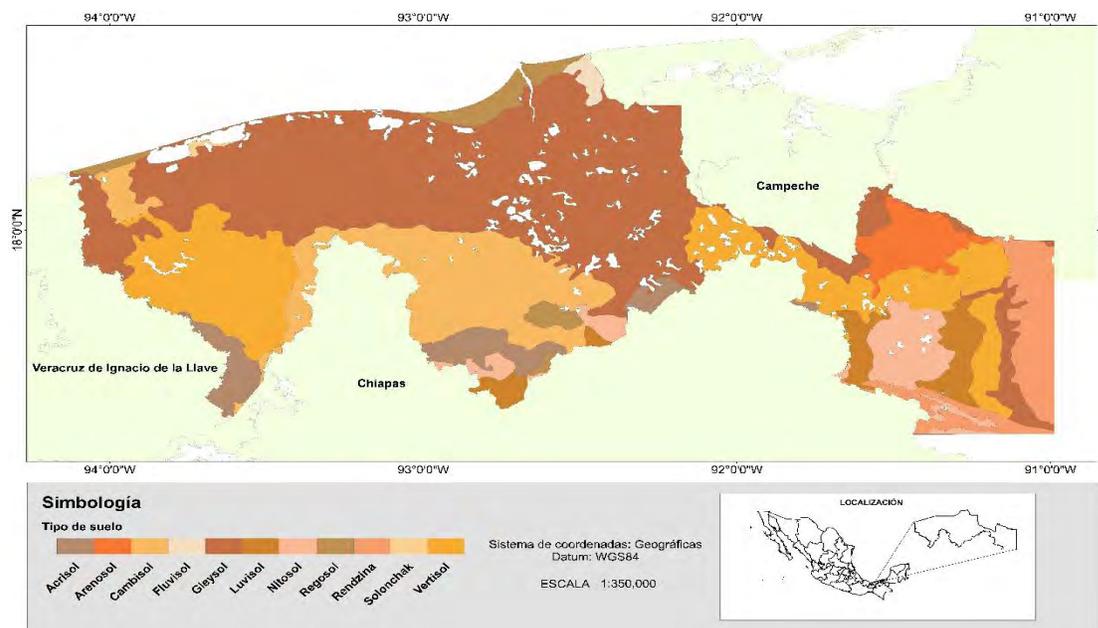


Figura 2. Tipo de suelos en Tabasco. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, 2013.

A continuación se presenta una breve descripción de los suelos presentes en Tabasco de acuerdo a la Guía para la interpretación de Cartografía Edafológica elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2015), principalmente los que se encuentran en los municipios que producen cacao en la entidad:

Acrisol: del latín *acris* (agrio, ácido) y *solum* (suelo). Es un suelo ácido, literalmente. Son suelos que se encuentran en zonas tropicales o templadas muy lluviosas. En condiciones naturales tienen vegetación de selva o bosque. Se caracterizan por tener acumulación de arcilla en el subsuelo, por sus colores rojos, amarillos o amarillos claros con manchas rojas, muy ácidos y pobres en nutrientes. En México se usan en la agricultura con rendimientos bajos, salvo los frutales tropicales como cacao, café o piña, en cuyo caso se obtienen rendimientos de medios a altos. Son moderadamente susceptibles a la erosión. Los municipios de Huimanguillo, Teapa y Tacotalpa presentan en parte de su superficie este tipo de suelo (INEGI, 2015).

Cambisol: del latín *cambiare* (cambiar), literalmente suelo que cambia. Son suelos jóvenes, poco desarrollados. Son abundantes, se destinan a muchos usos y sus rendimientos son variables pues dependen del clima donde se encuentre el suelo, son de moderada a alta susceptibilidad a la erosión. En algunas partes de los municipios productores de cacao como Cárdenas y Huimanguillo se presentan este tipo de suelo (INEGI, 2015).

Gleysol: del ruso *gley* (pantano), literalmente suelo pantanoso. Suelos que se encuentran en zonas donde se acumula y estanca el agua la mayor parte del año dentro de los 50 cm de profundidad, como es el caso de las llanuras y pantanos tabasqueños donde son los suelos más importantes por su extensión. Se caracterizan por presentar, en la parte donde se saturan con agua, colores grises, azulosos o verdosos, que muchas veces al secarse y exponerse al aire se manchan de rojo. Son variables en su textura pero en México predominan más los arcillosos, esto trae como consecuencia que presenten serios problemas de inundación durante épocas de intensa precipitación. Regularmente estos suelos presentan acumulaciones de salitre. Se usan en el sureste del país para la ganadería con resultados moderados a altos. En algunos casos se pueden destinar para la agricultura con buenos resultados en cultivos como el arroz y caña que toleran la inundación. La mayor superficie de los municipios productores de cacao tienen este tipo de suelo (INEGI, 2015).

Luvisol: del latín *luvi, luo* (lavar). Literalmente suelo con acumulación de arcilla. Son suelos que se encuentran en zonas templadas o tropicales lluviosas, aunque en algunas ocasiones

pueden encontrarse en climas más secos. La vegetación es generalmente de bosque o selva y se caracterizan por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo. Son frecuentemente rojos o amarillentos, aunque también presentan tonos pardos, que no llegan a ser oscuros. Se destinan a la agricultura principalmente, en cultivos como café y frutales en zonas tropicales. Son suelos con alta susceptibilidad a la erosión. El municipio de Tacotalpa presenta en su superficie este tipo de suelo (INEGI, 2015).

Nitosol: del latín *nitidus* (brillante), literalmente suelo brillante. En México se localiza principalmente en los Cansos de Yucatán y Campeche que son regiones cálidas y con vegetación natural de selva. Son suelos de color rojizo brillante y enriquecidos de arcilla en todo su espesor, por lo menos hasta 150 cm de profundidad. Son suelos profundos pero con una capa superficial delgada de color oscuro, donde la parte orgánica está bien mezclada con la parte mineral, su fertilidad natural es alta. Su uso óptimo es el forestal pues conserva mejor la potencialidad natural de estos suelos, aunque tienen una susceptibilidad de media a baja a la erosión. Dentro de los municipios productores de cacao, solamente Tacotalpa presenta este tipo de suelo (INEGI, 2015).

Vertisol: del latín *vertere* (voltear), literalmente suelo que se revuelve o voltea. Suelos de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa. La vegetación natural va de selvas bajas a pastizales y matorrales. Se caracterizan por su estructura masiva y su alto contenido de arcilla, la cual es expandible en húmedo, formando superficies de deslizamiento llamadas facetas, y por ser colapsables en seco pueden formar grietas en la superficie o a determinada profundidad. Su color más común es el negro o gris oscuro en la zona centro a oriente del país; y café rojizo al norte. De los municipios que producen cacao, únicamente Huimanguillo presenta una superficie considerable con este tipo de suelo (INEGI, 2015).

Además de los suelos antes mencionados, en el territorio tabasqueño también se encuentran suelos como arenosol, fluvisol, regosol, rendzina y solonchac.

1.3. Fisiografía

El estado de Tabasco se encuentra formado por llanuras bajas y húmedas de origen aluvial, efecto de la acción de los ríos. La mayor parte del territorio es una planicie con algunas elevaciones no superiores a los 50 msnm; aunque existen al sur algunas elevaciones que forman parte de la Meseta Central de Chiapas.

Las principales formas en Tabasco son las sierras y llanuras, dando origen a zonas de valles, cañones y laderas para el área montañosa, seguida de una interfase configurada por lomeríos suaves para terminar en la llanura, esta a su vez asume características propias de su ubicación, lo que ocasiona que gran parte de ella sea inundable.

Tabasco está conformado por 3 principales provincias fisiográficas (Figura 3): la Llanura Costera del Golfo Sur que cubre la mayor parte del área norte del estado y la Sierra de Chiapas y Guatemala que se distribuye en la porción sur tocando los municipios de Huimanguillo, Teapa, Tacotalpa, Macuspana y Tenosique, además de las Sierras Bajas del Petén (Gobierno del Estado de Tabasco, 2006).

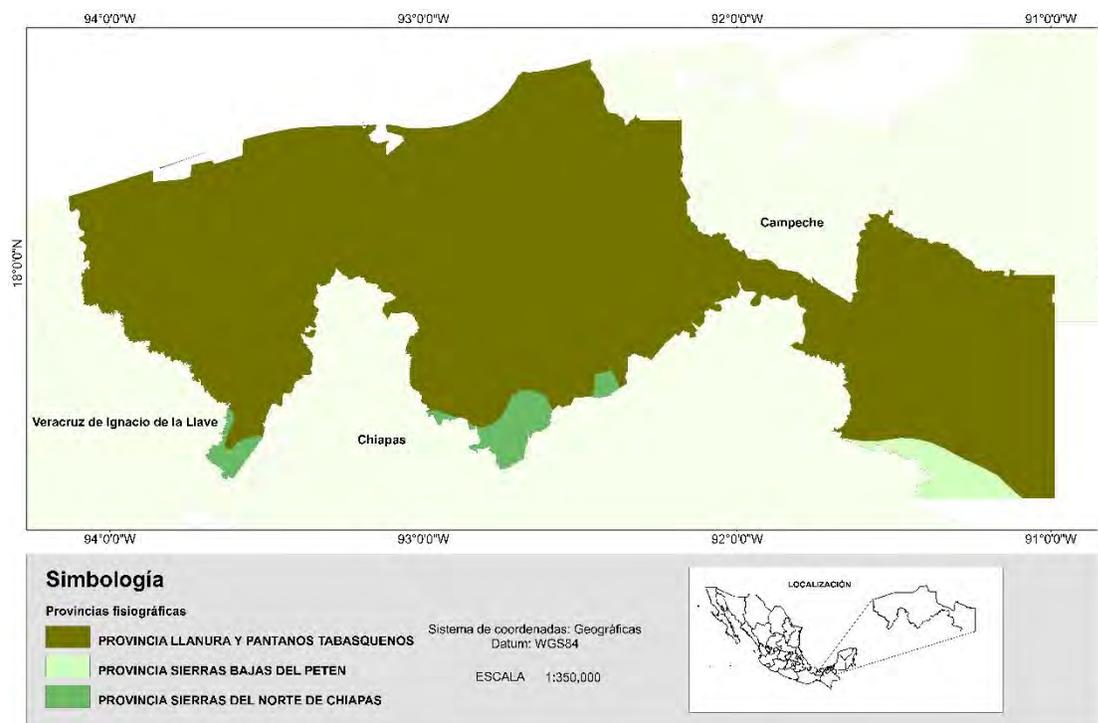


Figura 3. Provincias fisiográficas de Tabasco. Fuente: Elaboración propia con base en Cervantes *et al.*, 1990.

1.4. Hidrología

Es en esta entidad donde se localiza la red hidrológica más compleja del país y donde se registran las mayores precipitaciones pluviales (Figura 4). A diferencia de otras entidades es el excedente y no la falta de agua lo que ocasiona problemas, pues en algunas áreas se carece de la infraestructura adecuada para drenarla. La abundancia de escurrimientos superficiales, así como el escaso relieve, da lugar a la formación de drenaje: anastomosado, dendrítico y lagunar, por tal motivo se ha desarrollado un gran número de cuerpos de agua

de variadas dimensiones, al igual que pantanos y llanuras de inundación. En la Tabla 2 se presenta la superficie en porcentaje de acuerdo a la región hidrológica en el estado.

Tabla 2. Superficie (en porcentaje) estatal por región y cuenca hidrológica.

Región		Cuenca		Total
Clave	Nombre	Clave	Nombre	
				100
RH29	Coatzacoalcos	A	R. Tonalá y L. del Carmen y Machona	24
RH30	Grijalva-Usumacinta	A	R. Usumacinta	12.53
		C	L. de Términos	4.73
		D	R. Grijalva-Villahermosa	58.74

Fuente: INEGI: Anuario estadístico de Tabasco 2012.

En la entidad se encuentran dos de los ríos más importantes, el Mezcalapa-Grijalva y el Usumacinta, el más grande del país (INAFED, 2015), así como parte de las regiones hidrológicas Coatzacoalcos y Grijalva-Usumacinta. Se considera que aproximadamente el 30% de las aguas superficiales que escurren en el país lo hacen por este estado.

Región Hidrológica Coatzacoalcos (RH-29)

Es una de las más importantes a nivel nacional en cuanto al volumen de agua drenada, se localiza en el sureste del país y está constituida por dos cuencas hidrológicas. Aquí se encuentran algunos de los municipios más importantes en cuanto a producción de cacao; Huimanguillo, Cárdenas, Comalcalco y una porción del territorio de Cunduacán y Jalpa de Méndez.

Región Hidrológica Grijalva-Usumacinta (RH-30)

Dentro del estado de Tabasco, la RH-30 se ubica en el centro y este de su territorio, está conformada por tres cuencas: (A) Río Usumacinta, (C) Laguna de Términos y (D) Río Grijalva-Villahermosa, comprende más del 75% de la superficie total del estado. Los municipios de Tacotalpa, Teapa y gran parte de la superficie de Cunduacán y Jalpa pertenecen a esta región hidrológica y son de interés porque corresponden a municipios productores de cacao.

A continuación se describen brevemente las características de dos de las cuencas más importantes para el estado, la del Río Usumacinta y la cuenca del Río Grijalva.

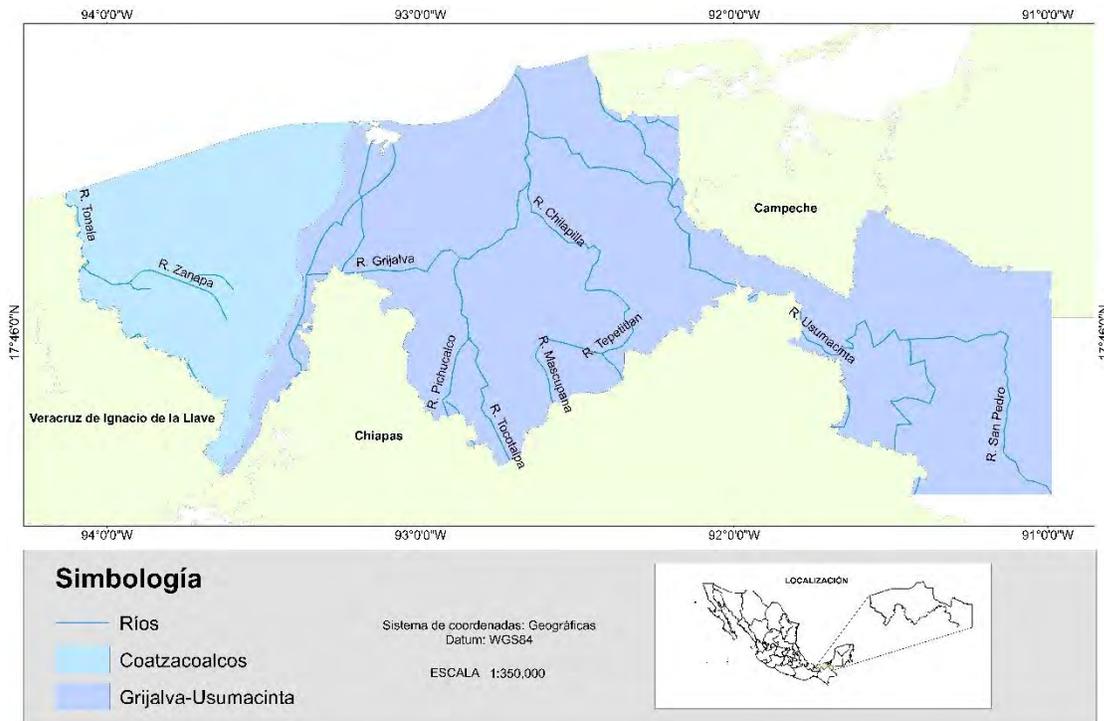


Figura 4. Regiones hidrológicas y ríos principales en Tabasco. Fuente: Elaboración propia con base en CONAGUA-Subdirección General Técnica, 2007.

Cuenca (A). Río Usumacinta

Se localiza en una amplia franja que va del sureste al centro-norte del estado; las subcuencas que se lo conforman son:

Clave	Nombre
A	Río Usumacinta
B	Río San Pedro
C	Río Palizada
D	Río San Pedro y San Pablo
E	Río Chacamax

La corriente principal es el río Usumacinta que recorre gran parte del estado, desde el sureste, en los límites con Chiapas y la República de Guatemala, para posteriormente seguir un rumbo noroeste hasta unirse con el río Grijalva antes de desembocar en el Golfo de México; en su trayecto por el territorio tabasqueño recibe la aportación de afluentes,

entre los que destacan los ríos San Pedro y Palizada. Comprende los municipios de Tenosique, Emiliano Zapata, Centla, Jonuta y Balancán.

En esta cuenca los usos de agua superficial son para vías de comunicación, abastecimientos a centros poblacionales y en menor escala a la industria.

Cuenca (D) Río Grijalva

Esta cuenca es la que ocupa mayor extensión del estado, abarca una amplia zona del centro de la entidad. Las subcuencas que la integran son:

Clave	Nombre
A	Río Grijalva
B	Río Viejo Mezcalapa
C	Río Mezcalapa
G	Río Paredón
H	Río Pichucalco
I	Río de la Sierra
J	Río Tacotalpa
K	Río Almendro
N	Río Puxcatán
O	Río Macuspana
R	Río Tulijá
T	Río Chilapa
U	Río Chilapilla
V	Río Tabasquillo
W	Río Carrizal
X	Río Samaria
Y	Río Cunduacán
Z	Río Caxcuchapa

Destaca el río Grijalva cuyo origen está en Chiapas hasta llegar a la presa Nezahualcóyotl, en el norte de Chiapas y Tabasco, tramo en el que cambia su nombre por el de Mezcalapa, hasta la ciudad de Villahermosa para después retomar de nuevo el de Río Grijalva.

La construcción de la presa Nezahualcóyotl sobre el cauce de este río permitió disminuir las inundaciones que afectan a centros poblacionales como Humanguillo, Cárdenas y Villahermosa.

1.5. Climas

El clima dominante es de tipo cálido húmedo con abundantes lluvias en verano; la precipitación es del orden de los 2,500 mm anuales (Ruíz *et al.*, 2012) con temperaturas que oscilan los 26°C.

En el estado de Tabasco existen tres tipos de climas: cálido húmedo con lluvias todo el año (*Af*) que es el 19.64% del territorio y se registra en las partes montañosas al sur del estado; cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (*Am*) que es el 75.97 % del territorio y se registra en la Llanura Costera del Golfo Sur; y cálido subhúmedo con lluvias en verano *A(w)* que es el 4.39% y se registra en pequeñas partes de los municipios limítrofes con Campeche (INEGI, 2012-2013).

Las características más importantes del tipo de clima *Af* de Köppen son las siguientes: lluvia abundante durante todo el año, falta de una estación seca bien definida y temperatura de todos los meses mayor de 18°C. En México las zonas con clima *Af* se encuentran situadas al sur del paralelo 20°N a lo largo de la base del declive este de la Sierra Madre Oriental y a lo largo del pie septentrional de los plegamientos del norte de Chiapas. El tipo *Am* es característico de los lugares húmedos situados al sur del Trópico de Cáncer, se localiza en la llanura tabasqueña, en la base y en el declive de la Sierra Madre Oriental y en el declive del pacífico de la porción sureste de la Sierra Madre de Chiapas. La temporada de mayor precipitación en este clima se encuentra en el verano y otoño. Existe una diferencia entre los climas *Am* del lado del Pacífico y las del Golfo y radica en la cantidad de lluvia recibida durante la época invernal; del lado del Golfo es más húmedo en el invierno que en el Pacífico. El clima *A(w)* se puede localizar en algunas de las partes más bajas de la llanura costera, hacia el oriente del estado en los municipios que colindan con Campeche, la mayor cantidad de lluvia se presenta durante el verano (García, 2004).

Con base en los estudios de Köppen (1918), García (2004) comenta que debido a su ubicación en el trópico, la cercanía al Golfo de México y por tener un terreno plano el estado de Tabasco posee clima tipo A con subtipos *Am*, *Af*, *Af(m)*, *Am(w)* y *Aw*.

Thornthwaite (1948) propuso una metodología para que los climas se ordenen de acuerdo al grado de humedad, al tomar en cuenta las necesidades hídricas de los cultivos (evapotranspiración) y con los resultados del balance hídrico climático, excesos y déficits se determina el índice de humedad, mismo que permite agrupar el clima en una de las clasificaciones que él propone (Thornthwaite 1948; Thornthwaite & Mather, 1955; Ruíz *et al.*, 2012)

En Ruíz *et al.* (2012) se realizó la clasificación climática del estado de Tabasco con la metodología de Thornthwaite con el objetivo de definir regiones y épocas con excesos o déficits hídricos, encontrándose que en Tabasco existen cinco diferentes tipos de clima (Tabla 3), cuatro con la categoría de húmedo, que se diferencian por el valor del índice (B1, B2, B3, B4) y un perhúmedo (A).

Tabla 3. Clasificación climática de Tabasco.

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

Fuente: Ruíz *et al.* (2012).

De acuerdo a la clasificación agroclimática de Papadakis, la cual se refiere primordialmente al aspecto geográfico del clima, a su distribución e influencia en la producción agrícola (Campos, 2005) el estado de Tabasco pertenece al grupo de clima tropical y a la subdivisión tropical húmedo donde se reconoce que algunos cultivos son favorecidos por este tipo de clima incluyendo al cacao.

1.6. Agricultura

El VIII Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2007), en Tabasco se estima que la superficie con actividad agropecuaria y forestal es de 2,153,013.2 hectáreas, de ella 51.4% corresponde a ejidos y comunidades agrarias, 46.7% a predios de propiedad privada y el restante 1.9% es superficie de propiedad pública o colonia.

En la entidad se captaron 115,039 unidades de producción y ocupan una superficie de 1,734,545.1 hectáreas (Tabla 4) así como 779 ejidos y comunidades agrarias. Los

municipios de Balancán y Huimanguillo poseen en conjunto 30.2% de la superficie total de las unidades de producción (INEGI, 2007).

Tabla 4. Número y superficie de las unidades de producción por municipio, según condición de actividad agropecuaria o forestal.

Municipio	Unidades de producción	Superficie Total (Hectáreas)	Con actividad agropecuaria o forestal		Sin actividad agropecuaria o forestal	
			Total	Superficie (ha)	Total	Superficie (ha)
Tabasco	115 039	1 734 545.1	90 124	1 110 210.8	24 915	624 334.3
Balancán	6 366	276 853.1	4 432	178 222.1	1 934	98 631
Huimanguillo	13 544	258 924.6	10 845	156 014.0	2 699	102 910.6
Macuspana	6 866	173 883.6	4 819	87 603.2	2 047	86 227.4
Centla	8 478	124 627.6	5 260	64 487.6	3 218	60 140.0
Centro	8 151	119 536.7	5 456	68 153.9	2 695	51 382.8
Cárdenas	12 849	119 217.4	11 519	96 080.5	1 330	23 136.9
Tenosique	3 768	114 262.0	3 038	87 302.7	730.0	26 959.3
Jonuta	5 091	98 378.2	4 123	62 256.9	968.0	36 121.3
Jalapa	3 509	74 857.8	2 369	47 869.5	1 140	26 988.2
Tacotalpa	4 459	66 022.7	3 951	42 921.9	508.0	23 100.8
Comalcalco	13 354	60 899.2	11 169	45 478.4	2 185	15 420.8
Cunduacán	11 948	59 204.4	10 340	42 780.7	1 608	16 423.7
Teapa	1 581	43 732.0	1 209	28 265.8	372.0	15 466.2
Emiliano Zapata	1 159	42 397.1	988.0	31 981.0	171.0	10 416.1
Jalpa de Méndez	5 031	41 032.4	4 063	31 867.9	968.0	9 134.5
Nacajuca	4 421	39 642.9	3 541	26 313.4	880.0	13 329.6
Paraíso	4 464	21 126.4	3 002	12 581.4	1 462	8 545.0

Fuente: INEGI. Dirección General de Estadísticas Económicas. Estados Unidos Mexicanos. VII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007.

Existen 115,039 unidades de producción, de las cuales en 78.3% se desarrolla alguna actividad agropecuaria o forestal; de las 1,734,545.1 ha de superficie total en 64% (1,110,210.8 ha) se desarrolla alguna actividad agropecuaria o forestal, mientras que en el 36% (624,334.3 ha) no se realizan actividades de este tipo.

Los municipios con mayor superficie con actividad forestal o agropecuaria son: Balancán, Huimanguillo, Cárdenas, Macuspana y Tenosique, también Centro, Centla y Jonuta tienen una considerable superficie con alguna de estas actividades.

La distribución de 1,734,545.1 ha de las unidades de producción de acuerdo con el uso de suelo es de la siguiente forma (Tabla 5): 35.9% es de labor, es decir, aquella que se utiliza para la producción de cultivos anuales y perennes; 60.6% se encuentra con pastos no cultivados, de agostadero o está enmontada, de ésta, 20.1% está cubierta principalmente con pastos nativos El 1.4% es de superficie de bosque o selva y 2.1% se encuentra sin vegetación, que corresponde a superficie cubierta con arenales o pedregales, ensalitrada o erosionada, cubierta con agua la mayor parte del año o contaminada.

Los municipios con mayor superficie agropecuaria son Balancán, Huimanguillo, Macuspana, Centla, Centro, Cárdenas y Tenosique con superficies mayores a las 114 mil

ha; caso contrario son los municipios de Teapa, Emiliano Zapata, Jalpa de Méndez y Paraíso con superficies menores a las 45 mil ha.

Tabla 5. Superficie total de las unidades de producción por municipio, según uso de suelo.

Municipio	Total	De labor	Con pastos no cultivados, de		Con bosque o selva	Sin vegetación
			agostadero o enmontada	principalmente pastos		
			Total			
Tabasco	1 734 545.1	622 179.0	1 053 010.1	211 325.0	23 532.2	35 821.9
Balancán	276 853.1	64 690.0	194 589.7	27 533.1	3 350.7	14 222.7
Huimanguillo	258 924.6	11 749.5	141 120.0	12 007.2	4 977.6	1 077.5
Macuspana	173 8830.6	41 825.4	129 723.1	18 440.7	308.3	1 973.8
Centla	124 627.6	34 715.3	83 872.4	11 402.2	1 486.0	4 553.9
Centro	119 536.7	30 640.9	83 018.2	20 243.4	250.9	5 626.8
Cárdenas	119 217.4	82 523.5	32 636.2	9 029.6	702.4	3 355.3
Tenosique	114 262.0	44 824.6	63 448.2	22 811.5	4 967.8	1 021.4
Jonuta	98 378.2	27 452.4	66 343.6	16 992.4	4 213.9	368.3
Jalapa	74 857.8	12 105.7	62 148.9	24 229.2	414.6	188.6
Tacotalpa	66 022.7	31 187.7	34 654.8	5 218.6	118.4	61.7
Comalcalco	60 899.2	36 194.5	23 573.2	5 740.5	286.5	845.0
Cunduacán	59 204.4	32 008.7	26 977.3	13 200.9	72.3	146.1
Teapa	43 732.0	14 427.4	29 040.3	12 015.8	73.9	1904.0
Emiliano Zapata	42 397.1	9 358.0	30 707.5	4 855.9	1 163.3	1 168.3
Jalpa de Méndez	41 032.4	17 398.2	22 684.0	2 472.8	610.0	340.2
Nacajuca	39 642.9	20 536.5	18 725.2	2 967.5	173.8	207.4
Paraíso	21 126.4	10 540.8	9 749.5	2 163.8	361.7	474.4

Fuente: INEGI. Dirección General de Estadísticas Económicas. Estados Unidos Mexicanos. VII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007.

En Tabasco 81.3% de las unidades de producción con actividad agropecuaria o forestal (73,265) tienen superficie agrícola, la cual representa 53.9% de la superficie total con esta actividad en el estado. Son 597,933.9 ha que están destinadas a actividades agrícolas.

Dentro de los cultivos anuales que se siembran en la entidad se encuentran el arroz, el maíz blanco, maíz amarillo, calabaza y frijol. En esta entidad se desarrollan una gran cantidad de cultivos y plantaciones perennes. Los más importantes por la superficie plantada son: los pastos cultivados con 283,163.0 ha, el cacao 60,161.3 ha, la caña de azúcar 25,732.0 ha, el plátano 14,428.6ha y el coco 11,811.7 ha.

Problemática para el desarrollo de las actividades agropecuarias.

Los resultados que se obtuvieron en el Censo Agropecuario 2007 y que se muestran en el Panorama Agropecuario de Tabasco enuncian los principales problemas para el desarrollo de las actividades agropecuarias que van desde las climáticas, edafológicas hasta las económicas y son las siguientes:

- La principal problemática que presentaron 67,997 unidades de producción fueron las de tipo climático, causada por fenómenos naturales: heladas, sequías, vientos, granizo, inundaciones, etcétera.
- Otro factor importante por el que se afectó a 31,258 unidades de producción fue la pérdida de fertilidad de suelo por el uso excesivo del terreno, la erosión, salinidad, entre otras.
- Dentro de los factores económicos que perjudicaron la productividad, la falta de créditos por parte de alguna institución bancaria o privada es la principal.
- Los altos costos de insumos (semilla, combustible, fertilizante, alimentos, etc.)
- La falta de capacitación y asistencia técnica para el aumento de la producción
- Problemas para la comercialización e insuficiencia de infraestructura.
- Conflictos de linderos, falta de acreditación de la tierra y otros.

1.7. Situación de la cadena agroproductiva del cacao en Tabasco

1.7.1. Producción a nivel mundial y nacional

Del periodo de 1970 hasta 2012, la región que contribuye con la mayor producción de cacao en grano en el mundo es África con 63.9%, seguida de América con 20.3%, Asia con 14.2% y Oceanía con 1.5%. Los 5 países que tienen la mayor producción son (Figura 5) Côte d'Ivoire (también es conocida como Costa de Marfil) con 839,457.5 miles de toneladas; Ghana con 410,736.7 miles de toneladas; Indonesia con 298,858.3 miles de toneladas; Nigeria con 276,059 miles de toneladas y Brasil con 273,082.3 miles de toneladas. México figura en el lugar 10 a nivel mundial con 43,494.3 miles de toneladas (FAOSTAT, 2015).

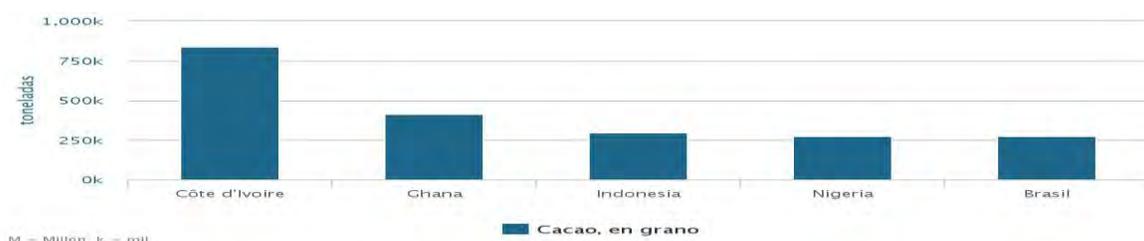


Figura 5. Países con la mayor producción de cacao a nivel mundial (1970-2012). Fuente: FAOSTAT, 2015.

Para ese mismo periodo de tiempo, se muestran nuevamente países africanos como los principales exportadores de cacao en grano (Figura 6). Aguirre *et al.* (2010) citado por Gallardo y Avendaño (2011) encuentran un dato importante ya que estos autores mencionan que Holanda y Bélgica aparecen como importantes exportadores de almendra

de cacao, aun cuando no son productores, es decir, estos países son reconocidos como fuentes de cacao de primera calidad, bajo el contexto de recolecta, segmentación y selección de los cacaos provenientes de varias partes del mundo, para luego ser reexportados según su calidad y características especiales. Mientras que los países que tienen la mayor importación de este producto son países europeos y Estados Unidos de América.

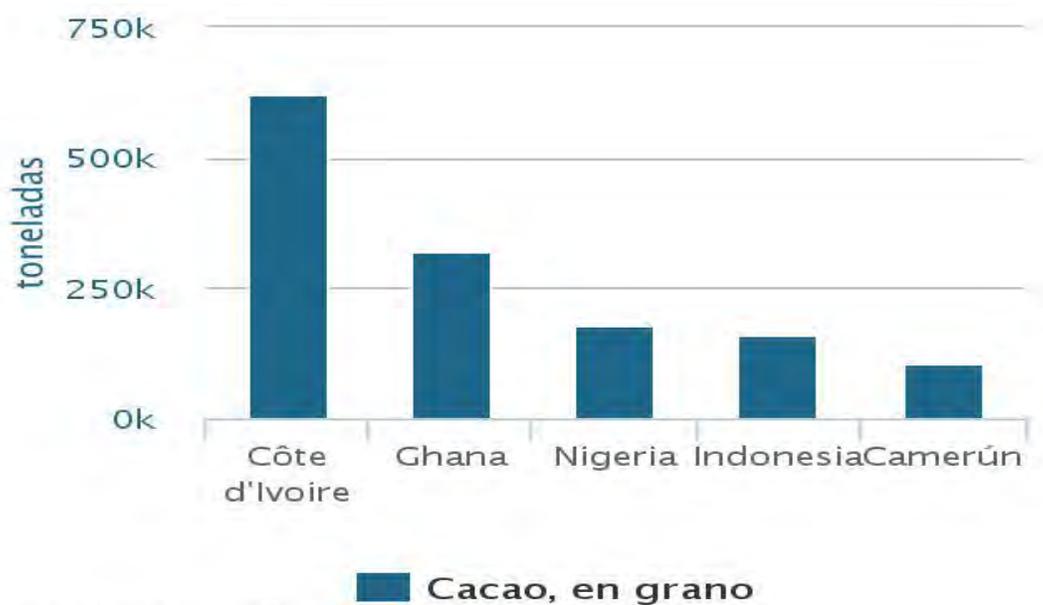


Figura 6. Principales exportadores de cacao en grano, 1970-2012. Fuente: FAOSTAT, 2015.

Mendoza *et al.* (2011) reportan que de la demanda de cacao, la Comunidad Europea, Estados Unidos y la región de Asia encabezan la lista a nivel mundial. Las multinacionales que procesan alrededor de 40% de los granos de cacao en el mundo son Archer Daniels Midland (USA), 15%; Cargill (USA), 14%; Barry Callcabaut (Suiza) 13%; y la más conocida en México, Nestlé (Suiza), con 5% (ICCO, 2008 en Avendaño-Arrazate *et al.*, 2010).

En México, la producción de cacao en grano para el periodo 1970-2012 ha tenido un comportamiento con altibajos durante este periodo (Figura 7).

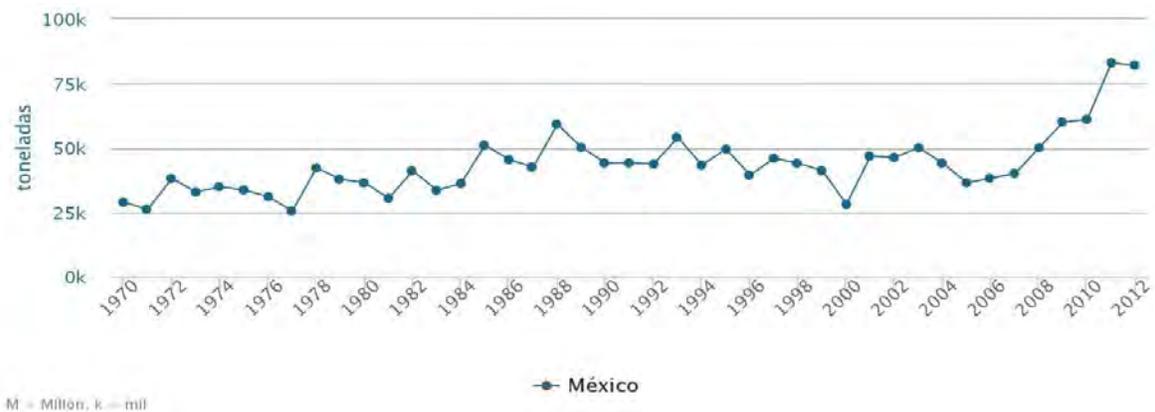


Figura 7. Producción de cacao en grano en México, 1970-2012. Fuente: FAOSTAT, 2015.

Sin embargo, a partir del 2008 la producción ha ido en aumento; los valores máximos históricos se presentaron durante 2010-2012.

En cuanto a las exportaciones e importaciones de cacao en grano que realiza el país se presenta una situación interesante. En la Figura 8 y Figura 9 se muestran las exportaciones e importaciones del producto para el país.

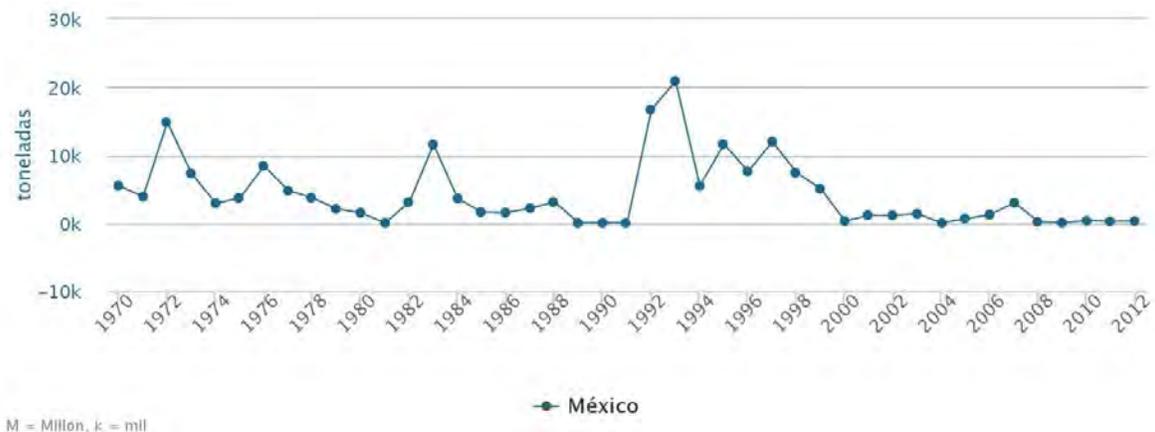


Figura 8. Exportaciones de cacao en grano para México, 1970-2012. Fuente: FAOSTAT, 2015.

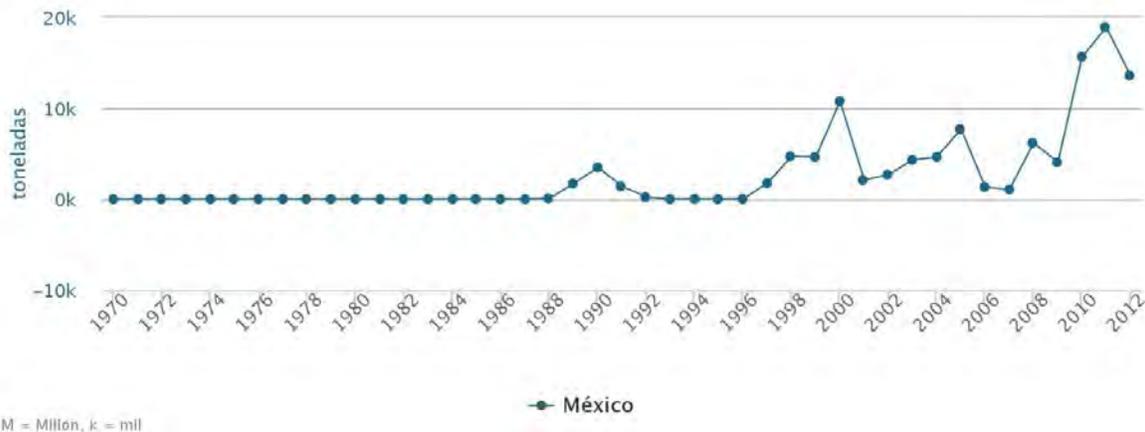


Figura 9. Importaciones de cacao en grano para México, 1970-2012. Fuente: FAOSTAT, 2015.

A partir del nuevo milenio, la relación entre las exportaciones e importaciones del producto tienen un comportamiento distinto a lo sucedido en décadas atrás. Durante el periodo 1970 hasta los últimos años de la década de los 90s, la producción de cacao en grano daba para exportar el producto a otros países, mientras que prácticamente las importaciones eran casi nulas, situación que cambia a partir del 2000, donde la producción comienza a tener más altibajos que repercuten en la exportación del producto. A pesar de que los datos reportan un aumento en la producción a partir del 2008 hasta el 2012, las cifras de exportación se mantienen bajas y aumentan las importaciones de cacao que realizó el país.

Las entidades que tienen mayor producción de cacao en el país son Tabasco, Chiapas, Guerrero y Oaxaca. Desafortunadamente no se encuentran (al menos no están disponibles) los datos de producción y rendimiento de cacao a nivel nacional para el periodo aquí propuesto, no obstante, se presentan estas cifras a partir del 2003 hasta el 2012, y son éstas las que nos dan un panorama de los estados y sus respectivos municipios que contribuyen con la producción del cacao, concentrándose principalmente en el estado de Tabasco.

Como se muestra en la Tabla 6, el cacao es una de las plantaciones perenes más importantes en la entidad por superficie plantada (60,161.3 ha). El cacao se cultiva en 28,637 unidades de producción, 97.2% de la superficie plantada está en producción y de ella se cosecharon para ese año 30,620.0 toneladas, lo que da un rendimiento promedio de 0.5 toneladas por hectárea.

Los principales municipios productores de cacao en la entidad son: Cárdenas, Comalcalco y Cunduacán, además de Huimanguillo, estos municipios producen siete de cada diez toneladas en el estado.

Tabla 6. Unidades de producción con cultivos y plantaciones perennes, superficie plantada, en producción y volumen cosechado de los principales cultivos o plantaciones perennes en Tabasco.

Cultivo	Unidades de producción	Superficie plantada (ha)	Superficie en producción (ha)	Volúmen cosechado (miles de toneladas)
Pasto cultivado	22 360	283 163.0	280 124.7	5 178.0
Cacao	28 637	60 161.3	58 492.4	30.6
Caña de azúcar	5 422	25 732.0	24 809.5	1 792.9
Plátano	4 101	14 428.6	11 135.3	293.6
Coco	3 929	11 811.7	10 702.1	16.9

Fuente: INEGI. Dirección General de Estadísticas Económicas. Estados Unidos Mexicanos. VII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007.

De acuerdo a los datos consultados del SIAP (2014) desde el año 2005 la superficie sembrada con cacao en Tabasco disminuyó de 60,000 ha a poco más de 40,000 ha, así como la producción (t/ha) y el rendimiento como se muestra en la Tabla 7:

Tabla 7. Superficie sembrada y cosechada (ha); producción, rendimiento y valor de la producción 1999-2012.

Entidad	Año	Sup. Sembrada (ha)	Sup Cosechada (ha)	Producción (t/ha)	Rendimiento (t/ha)	PMR (\$/t)	Valor Producción (Miles de pesos)
Tabasco	1999	60,014.00	59,981.00	28,550.00	0.48	11,560.20	330,043.64
	2000	59,975.00	59,975.00	21,800.14	0.36	8,534.09	186,044.38
	2001	60,104.00	60,065.00	33,791.00	0.56	8,017.73	270,927.00
	2002	60,104.00	60,065.00	33,460.00	0.56	14,987.33	501,476.00
	2003	60,106.00	60,077.00	32,947.00	0.55	17,523.83	577,357.50
	2004	60,006.00	59,967.00	29,585.00	0.49	17,975.70	531,811.00
	2005	40,831.55	40,792.55	24,077.43	0.59	17,494.93	421,233.04
	2006	40,833.00	40,794.00	26,704.80	0.66	15,430.24	412,061.60
	2007	40,833.00	40,800.00	22,321.40	0.55	16,548.56	369,387.01
	2008	41,028.58	41,028.58	19,437.88	0.47	26,253.09	510,304.39
	2009	41,024.58	41,024.58	14,609.05	0.36	34,171.51	499,213.35
	2010	41,024.58	41,024.58	18,320.45	0.45	39,701.09	727,341.80
	2011	41,026.58	41,026.58	13,155.66	0.32	42,669.48	561,345.22
	2012	41,027.58	41,027.58	18,339.74	0.45	40,134.94	736,064.38

Fuente: SIAP, (2014). Producción agrícola por estado. Nota: el valor de la producción se multiplica por mil.

Si tomamos en cuenta el año 2003 (por la disponibilidad de datos) y las superficies sembradas, cosechadas y su rendimiento de los principales municipios productores de cacao en el estado se puede notar algunos cambios significativos: en el caso de Comalcalco (Tabla 8), durante el año 2003 se tenían sembradas 16,807 ha con un rendimiento de 0.6; dos años más tardes la superficie disminuyó a 10,894 ha para que en el año 2008 se quedara con la cifra definitiva de 11,055 ha. Los rendimientos en todo este periodo han ido variando, los valores más bajos se presentaron en 2009 y 2011, con un promedio de 0.47 en este periodo.

Tabla 8. Comalcalco; superficie sembrada, cosechada, rendimiento y valor de producción. Periodo 2003-2012.

Municipio	Año	Sup. Sembrada (ha)	Sup. Cosechada (ha)	Rendimiento (t/ha)	Valor Producción (ha) (Miles de pesos)
Comalcalco	2003	16,807.00	16,807.00	0.6	176,837.50
	2004	16,807.00	16,807.00	0.5	151,254.00
	2005	10,894.00	10,894.00	0.59	109,259.00
	2006	10,894.00	10,894.00	0.59	99,782.93
	2007	10,894.00	10,894.00	0.58	98,985.97
	2008	11,057.00	11,057.00	0.48	143,769.00
	2009	11,055.00	11,055.00	0.24	91,504.20
	2010	11,055.00	11,055.00	0.5	224,436.80
	2011	11,055.00	11,055.00	0.24	120,285.00
	2012	11,055.00	11,055.00	0.43	196,712.67

Fuente: SIAP. Producción agrícola por estado. Nota: el valor de la producción se multiplica por mil.

Para Cunduacán, en el 2003-2004 se tenían 11,457 ha de superficie sembrada y a partir del 2005 hasta el 2012 la superficie sembrada disminuyó a las 8,700 – 8,500 hectáreas. Los rendimientos no han variado demasiado en este periodo de tiempo, en promedio el valor fue de 0.49 (Tabla 9).

Tabla 9. Cunduacán; superficie sembrada, cosechada, rendimiento y valor de producción. Periodo 2003-2012.

Municipio	Año	Sup. Sembrada (ha)	Sup. Cosechada (ha)	Rendimiento (t/ha)	Valor Producción (ha) (Miles de pesos)
Cunduacán	2003	11,457.00	11,457.00	0.58	117,197.50
	2004	11,457.00	11,457.00	0.49	101,304.00
	2005	8,740.00	8,740.00	0.6	89,148.00
	2006	8,740.00	8,740.00	0.69	93,102.17
	2007	8,740.00	8,740.00	0.53	78,457.76
	2008	8,506.00	8,506.00	0.5	113,194.75
	2009	8,511.00	8,511.00	0.24	65,659.75
	2010	8,511.00	8,511.00	0.43	137,883.00
	2011	8,511.00	8,511.00	0.39	148,164.99
	2012	8,511.00	8,511.00	0.45	153,406.00

Fuente: SIAP. Producción agrícola por estado. Nota: el valor de la producción se multiplica por mil.

En el año 2003, el municipio de Cárdenas contaba con 8,855 ha de superficie sembrada con cacao, dos años más tarde la superficie aumentó a más de 10,000 ha. El rendimiento promedio en este periodo es de 0.49, y fue en 2011 donde se presentó el rendimiento más bajo con 0.29. Este es uno de los municipios que al contrario de los dos anteriores aumentó la superficie sembrada con cacao (Tabla 10).

Tabla 10. Cárdenas; superficie sembrada, cosechada, rendimiento y valor de la producción. Periodo 2003-2012.

Municipio	Año	Sup. Sembrada (ha)	Sup. Cosechada (ha)	Rendimiento (t/ha)	Valor Producción (ha) (Miles de pesos)
Cárdenas	2003	8,855.00	8,855.00	0.6	93,607.50
	2004	8,855.00	8,855.00	0.6	95,634.00
	2005	10,654.00	10,654.00	0.58	113,295.00
	2006	10,654.00	10,654.00	0.57	109,405.95
	2007	10,654.00	10,654.00	0.56	101,463.73
	2008	10,486.00	10,486.00	0.45	135,185.20
	2009	10,487.00	10,487.00	0.45	174,532.00
	2010	10,487.00	10,487.00	0.41	176,059.00
	2011	10,487.00	10,487.00	0.29	128,394.00
	2012	10,487.00	10,487.00	0.43	180,372.09

Fuente: SIAP. Producción agrícola por estado. Nota: el valor de la producción se multiplica por mil.

Huimanguillo es otro de los municipios que aumentó la superficie sembrada con cacao; en 2003-2004 tenía una superficie sembrada de 4 861 ha mientras que a partir del 2005 la superficie aumentó a más de 5,000 ha. Es el municipio en el que se registraron los mejores rendimientos, con un promedio de 0.53 (Tabla 11).

Tabla 11. Huimanguillo; superficie sembrada, cosechada, rendimiento y valor de la producción. Periodo 2003-2012.

Municipio	Año	Sup. Sembrada (ha)	Sup. Cosechada (ha)	Rendimiento (t/ha)	Valor Producción (ha) (Miles de pesos)
Huimanguillo	2003	4,861.00	4,861.00	0.61	52,080.00
	2004	4,861.00	4,861.00	0.65	56,700.00
	2005	5,495.00	5,495.00	0.58	57,490.00
	2006	5,495.00	5,495.00	0.68	57,509.32
	2007	5,495.00	5,495.00	0.52	47,996.28
	2008	5,782.00	5,782.00	0.47	52,850.00
	2009	5,774.00	5,774.00	0.47	81,935.00
	2010	5,774.00	5,774.00	0.47	102,450.00
	2011	5,774.00	5,774.00	0.44	100,920.01
	2012	5,774.00	5,774.00	0.47	106,413.88

Fuente: SIAP, (2014) Producción agrícola por estado. Nota: el valor de la producción se multiplica por mil.

A continuación se presentan algunas de las características generales de la cadena productiva del cacao en Tabasco que ayudan a comprender el comportamiento de la producción y su relación con factores tanto ambientales como sociales.

1.7.2. Características generales de la cadena agroproductiva del cacao

La comercialización del cacao y de sus subproductos se presenta de la siguiente manera, en especial, después de la desincorporación de CONADECA y la apertura del mercado del producto: los productores envían el cacao en haba o lavado para su fermentación y beneficio a los centros de recepción propiedad de las asociaciones de productores. Posteriormente la Unión Nacional de Productores de Cacao (UNPC) se encarga de clasificar y vender el cacao en grano o en sus derivados, que son distribuidos a los fabricantes de cocoa y chocolates a otros agentes relacionados con la industria de dulces y confitería (Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios, 1994), esta situación se mantiene en la mayoría de los productores de cacao (aunque no en todos) en la actualidad, lo que se corrobora con el trabajo de campo que se realizó para este trabajo. González y Amaya (2005) describen la cadena de valor de cacao de la siguiente manera: 1) productor primario o agricultor; 2) acopiadores y beneficiadores; 3) industriales de producto final para consumo y/o industria transformadora a productos secundarios para la industria final; 4) distribuidores; y 5) consumidores (Figura 10).

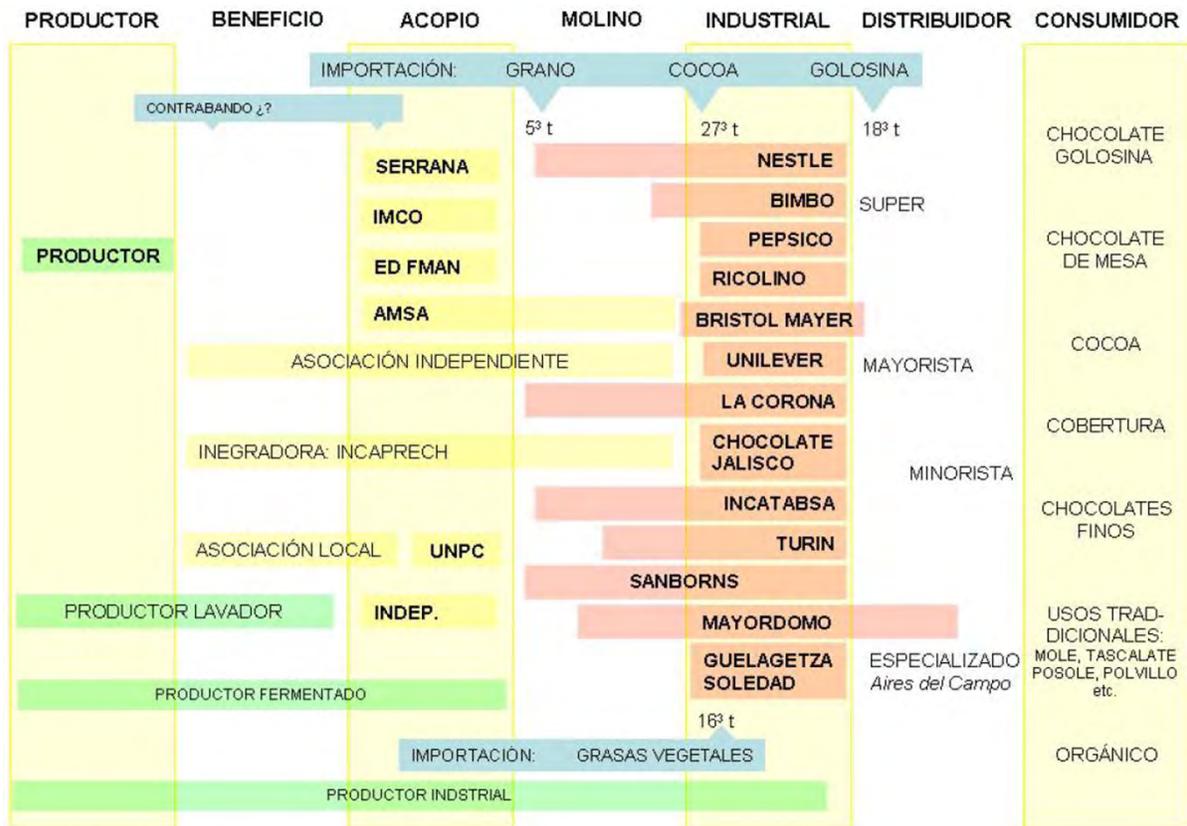


Figura 10. Cadena de valor de cacao en México con algunos actores claves en cada eslabón. Fuente: González y Amaya, (2005).

El proceso de transformación del grano de cacao para su aprovechamiento en la elaboración de productos comienza con el proceso de beneficiado donde, el grano fresco (grano verde o baba) recién extraído del fruto es transformado a grano seco. Son tres tipos de beneficiado que se realizan en el país: fermentado, beneficiado y lavado. El proceso posterior corresponde al de transformación donde, a partir del grano seco se transforma en productos semielaborados los cuales son: licor o pasta de cacao, cocoa en polvo y manteca de cacao.

La historia del cacao en México está íntimamente relacionada con el mercado mundial, donde, la etapa dorada de altos precios y presencia de la Comisión Nacional del Cacao (CONADECA) de los años setenta y ochenta fue seguida por la etapa del efecto africano, una etapa de saturación del mercado internacional y bajos precios, y por último la etapa reciente de gran dinamismo con muchos cambios rápidos (González y Amaya, 2005).

Los altos precios del cacao durante la etapa dorada (70's y 80's) no hicieron atractivas las importaciones de cacao para la industria en el país, además, se negociaron buenos precios

que impulsarían la siembra de nuevas superficies, aumentando el volumen de producción total y de productividad por hectárea.

La desincorporación de la Comisión Nacional de Cacao en 1989 (organismo gubernamental encargado de determinar los volúmenes que se entregaban a la industria así como fijar el precio) y la liberalización del cacao provocaron efectos inmediatos sobre los productores, reduciendo los subsidios (crédito a fertilizantes, plaguicidas, etc.) y convirtiéndolo en una plantación de alto riesgo. Necesariamente esto repercutió en los costos de producción debido a que las zonas tradicionales tuvieron que reducir el uso de insumos presentándose efectos negativos en la producción (Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios, 1994), al mismo tiempo, la expansión de cacao en África saturaba los mercados y empujaron los precios a la baja (González y Amaya, 2005). Esta situación genera lo que llaman González y Amaya (2005) “una demora en la respuesta que causaría un desfase en México de entre cinco y diez años entre el estímulo y la respuesta de la cadena de valor a él, en particular, al sector primario, tiempo que corresponde con el inicio y maduración de las nuevas plantaciones, además, la industria, intermediarios, instituciones y organizaciones también presentan este desfase y tiempo de demora para el aprendizaje y adecuación ante las situaciones (nuevas) que se iban presentando”, este desfase repercutirá gravemente en la producción del país lo que se prolongaría hasta décadas posteriores.

El llamado efecto africano de los años noventa se caracterizó por una sobreproducción y la disminución de los precios internacionales (ocasionadas por la misma sobreproducción), situación que fue aprovechada por la industria mexicana, es decir, comienzan a importar (ya que es más barato importar el cacao de otros países que comprar el que se produce en el país, además, la oferta nacional no satisfacía a la demanda), disminuye la demanda interna y el precio. Otros efectos importantes son: la disminución de la productividad por hectárea, el descuido y abandono de las plantaciones, se reduce la superficie sembrada, así como la situación en la que el productor de cacao se descapitaliza, teniendo repercusiones en el ámbito familiar buscando compensar la situación vendiendo su mano de obra fuera de la unidad de producción y el cambio de uso de suelo comienza a manifestarse en mayor medida (González y Amaya, 2005).

En la etapa de cambios a partir del 2000, el chocolate procesado entra libre de arancel en México proveniente de los Estados Unidos y Canadá. Un término acuñado por el sector industrial es la retórica llamada “incongruencia arancelaria” que se trata del tránsito sin

aranceles para productos elaborados de chocolate, sin embargo, se mantienen los aranceles de importación para grano de cacao y para cocoa; esto representa una desventaja para la industria nacional con respecto a la de Estados Unidos, quienes no pagan arancel en su país por la importación de cacao pero exportan sus productos a México sin castigo. El sector primario bien podría llamarla “bendición arancelaria” (González y Amaya, 2005) donde el Gobierno de México protege al productor nacional y vigila mediante cuotas de importación asegurar que la industria nacional consuma el grano de cacao que se produce en el país, independientemente de su precio y calidad.

1.7.3. Puntos críticos de la cadena agroproductiva

El cacao en México, a pesar de que posee las características naturales para ser un producto competitivo capaz de obtener buenos precios en el mercado internacional, actualmente no puede competir en el mercado internacional. Hay desabasto interno y la mayoría del grano no cuenta con la calidad de las normas internacionales. Por otro lado, los costos de producción son elevados en México, en comparación con otros oferentes en gran escala (González y Amaya, 2005).

Ramírez (2007) identifica la participación de los productores de cacao a menor escala en el contexto de la globalización. Como resultado de su investigación, menciona que los productores de cacao de pequeña escala se enfrenta a un mundo totalmente globalizado donde el trabajo industrial y los servicios especializados son la base del crecimiento económico, en el cual, su participación es cada vez más marginal. Consecuencia de ello es también la otra situación a la que se enfrentan; a la pérdida de una cultura local que lo aleja cada vez más de su tierra y de su ambiente. Aunque el cacao es un producto global, muchas veces sólo es un producto local debido a que los productores no han estado articulados directamente a éste mercado al depender de los actores del segundo nivel de la cadena de valor.

El productor de cacao históricamente ha sido impactado por el vaivén del precio en el mercado internacional, así también se puede mencionar que alguna parte del cacao no cumple con los requisitos del mercado nacional e internacional especializado. Otra importante amenaza al sector es el aumento del costo de mano de obra, la oferta de empleo fuera de la unidad de producción, la dificultad de generar ingresos. Una razón más por la que los productores nacionales de cacao no compiten con productores en otras partes del mundo es por el alto precio que puede llegar a establecer por su producto, así mismo,

un factor importante es el abandono o cambio de los cacaotales por pastizales u otra actividad. Factores como las enfermedades, plagas y el mantenimiento de la plantación influyen también en la cadena productiva del cacao.

De acuerdo al trabajo en campo realizado se encontraron aspectos importantes que se consideran críticos en la producción de cacao y que repercuten en la cadena productiva, mismos que coinciden con los que han encontrado otros autores en su investigación. En resumen, factores como la falta de financiamiento repercuten en la producción e interés por mantener las plantaciones de cacao: si de alguna manera se proporciona algún tipo de subsidio para la renovación y mantenimiento del cacao, estos subsidios son utilizados por los campesinos para otras cosas menos para el cacao y esto es entendible; no es que quede en ellos la falta de interés por el cacao, es más bien un problema de carácter social ya que los productores cuentan con plantaciones con pocas hectáreas (donde se ha encontrado que para que el producto sea rentable en la región los productores deberán poseer mínimo 10 hectáreas) y los ingresos de las familias no dependen totalmente del cacao por lo que tienen otras actividades o simplemente no cuentan con empleo, es entonces que ocupan los subsidios para otras actividades o bien para la manutención de sus familias. La susceptibilidad del precio es otro factor que interviene para que los pequeños productores de cacao renueven sus plantaciones o por lo menos que las mantengan, ya que al ver que otros cultivos tienen de alguna manera un precio fijo prefieren tirar el cacaotal viejo y plantar otro cultivo, de igual manera, prefieren comprar animales y dejarlos pastar porque saben que al menos tendrán su dinero invertido en ganado. La inversión en el mantenimiento de la plantación repercute en la producción y rendimiento. Se ha demostrado que los productores que invierten más en gastos de mantenimiento obtienen mejores rendimientos, aunque no necesariamente se tiene que tener un gasto importante para obtener este rendimiento; si se realiza el mantenimiento con fuerza laboral familiar el gasto se reduce, sin embargo, como se ha mencionado, el abandono por parte de las personas no es solamente hacia las plantaciones de cacao, sino en general, al sector agrícola.

Si bien las enfermedades son un factor importante que limita la producción y rendimiento, además de la calidad del cacao, actualmente es una amenaza más a la que se tienen que enfrentar los productores de cacao y que está catalogada como plaga son los roedores, específicamente, las ardillas. Las plantaciones de cacao (bajo sombra) forman parte de un sistema forestal o agroforestal, según se quiera ver, consecuencia de ello, coexisten

diversas especies de plantas y animales de una manera armónica, ya que estos mismos animales contribuyen, por ejemplo, a proporcionar materia orgánica para el suelo por medio de sus desechos; los insectos ayudan a polinizar las flores de cacao, no obstante, las ardillas han alterado el equilibrio que existía. Las ardillas abren la mazorca madura y se comen las semillas de cacao, esta situación no se presentaba anteriormente, no obstante, al verse afectada las zonas en las que normalmente se encontraban las ardillas estas comenzaron a invadir los cacaotales y comer sus frutos.

Los productores también mencionan el factor climático como benefactor o limitante para la producción de cacao, en especial la disponibilidad de agua. La mayoría de los productores no cuentan con sistema de riego, por lo que de prolongarse el periodo seco la plantación correrá peligro de deficiencia hídrica mientras que algunos productores si cuentan con sistema de riego en sus plantaciones, estos podrán compensar esos déficit hídricos, no obstante, algunos de ellos padecen de las fallas en el sistema de riego ocasionadas arbitrariamente por personas ajenas. Respecto a este último punto, un fenómeno que ha ido en aumento en la entidad está ligado a cuestiones sociales, específicamente de inseguridad. Ésta situación ha repercutido incluso en los productores de cacao, bajo testimonio de ellos mismos, que se suman a los problemas políticos-sociales que se han suscitado en fechas recientes como las ocurridas en Huimanguillo.

A pesar de los puntos críticos y factores que se han presentado, las condiciones ambientales que influyen en la planta del cacao, y que es tema central de este trabajo, parecen ser favorables para la mayor parte del territorio tabasqueño, no obstante, se encuentran algunas restricciones de tipo y uso del suelo. En los siguientes apartados se describe a detalle esta condición y se corroborará con los análisis correspondientes.

Capítulo 2. Agroclimatología y fenología del cacao

2.1. El cacao: origen, domesticación y distribución

2.1.1. Origen

Cuenta la leyenda que fue Quetzalcóatl quien robo la planta a sus hermanos dioses, pues se decía que la bebida que se obtenía solo estaba destinada a ellos. Quetzalcóatl tomó la planta y la plantó en los campos de Tula y pidió a Tláloc que le proporcionara lluvia y a Xochiquetzal que la adornara con flores. La planta creció y se convirtió en árbol. El árbol dio frutos y cuando estos maduraron Quetzalcóatl recogió sus vainas, hizo tostar el fruto, enseñó a las mujeres a molerlo y a batirlo con agua en las jícaras, obteniendo así el chocolate (Andrade, 2007).

Linneo debió de conocer el mito sobre el origen del cacao y pudo ser por esta razón que asignará a la especie como *Theo* (dios) y *broma* (alimento), es decir, alimento de los dioses.

El cacao (*Theobroma Cacao* L.) es una planta originaria del continente americano. Enríquez (1985) toma como base los estudios de diversos autores para referirse a cuál es el origen de la planta, menciona que el cacao se originó en el área del Alto Amazonas que comprende países como Colombia, Ecuador, Perú y Brasil, es en éste último donde se han encontrado mayor variedad de la especie. Leal *et al.* (1999) mencionan que el género se originó entre los 18°N y los 15°S y entre los 45° a 80°W, específicamente en la cuenca oriental de los Andes colombianos y ecuatorianos. Resulta difícil aun para muchos autores definir el centro de origen del cacao. No obstante, concuerdan que el centro de domesticación ocurrió en Mesoamérica.

Cuatrecasas (1968) citado por Leal *et al.* (1999) nos dicen que el género está formado por 22 especies, entre las cuales el cacao tiene 2 subespecies: *Theobroma cacao subsp. Cacao* (cacao criollo) y *Theobroma cacao subsp. Sphaerocarpum* (cacao amazónico). En tiempos remotos las poblaciones de cacao se dispersaron junto con otras especies: al este, hacia el Amazonas, el Orinoco y hasta las Guayanas, y hacia el norte; Colombia, Panamá, Centroamérica y México (Smith *et al.*, 1992; Leal *et al.*, 1999). Aún es incierto para muchos autores el definir si la dispersión se dio de manera natural o a través de los grupos indígenas que habitaban en el continente. Entonces, se tiene dos poblaciones de cacao que iban a evolucionar de forma separada y una más producto de ambas: los cacaos criollos

(*Theobroma cacao subsp.*), es decir, las subespecies y sus parientes que se dispersaron hacia Centroamérica y México que se originaron como mutaciones debido al aislamiento geográfico y las selecciones hechas por los Mayas y Aztecas de éstos cacaos criollos. Entre las plantas de cacao que se dispersaron hacia el este se encuentra *Theobroma cacao subsp. Sphaerocarpum*, el cacao llamado forastero. Por último, al encontrarse la subespecie *Theobroma cacao subsp. Sphaerocarpum* y sus parientes con los criollos, se hibridarían naturalmente participando así en la constitución del complejo de los trinitarios (Leal *et al.*, 1999).

Actualmente la delimitación clásica de los grupos de cacao se resumen de la siguiente manera (Dostert *et al.*, 2011):

- Criollos: hasta la mitad del siglo XVIII esta era la forma de cacao que más se cultivaba. El cacao criollo comprende árboles delgados, los frutos tienen una cubierta delgada y escultrada y una pigmentación rojiza. Son más susceptibles a plagas y suelen tener bajos rendimientos, aunque es esta variedad la de mayor calidad por su aroma y sabor. El cultivo comercial se desarrolla principalmente en las áreas de origen.
- Forastero: son las originarias de la cuenca superior del Amazonas y comprenden las formas de cacao que no son criollos ni de origen híbrido. Se caracteriza principalmente por su fruto color verde, una cubierta del fruto (pericarpo) gruesa, por sus semillas redondeadas y aplanadas. La mayoría del cacao que se cultiva en Brasil, África Occidental, América Central y el Caribe pertenece a la variedad de forastero, por lo que lo convierte en el grupo comercialmente más importante.
- Trinitario: este grupo es de origen híbrido entre formas criollo y forastero, las que desde mediados del siglo XVIII han surgido en los territorios donde se cultiva cacao. Las plantas son normalmente robustas con frutos verdes o pigmentados y con semillas de color violeta claro u oscuro. Entre el 10 y 15% de la producción mundial corresponden a este grupo.

2.1.2. Domesticación

Los registros más antiguos que se tienen de la domesticación y manejo de la semilla de cacao indican que fueron los grupos del Golfo de México y de las tierras bajas y selváticas del sur de México por lo menos hacia 1750 a.C. quienes habían encontrado la forma de

procesarlo para convertirlo en una bebida (Attolini, 2011). Fue herencia de la cultura olmeca que los Mixezoqueanos (2500-1000 a.C.) cultivaron cacao, sobre todo en Izapa, en la zona que ahora es el Soconusco y estos a su vez heredaron este conocimiento a la cultura maya (Andrade, 2007).

Los europeos vieron por primera vez el cacao en 1502, este formaba parte de un cargamento a bordo de una canoa indígena cerca de la costa de Honduras, en su cuarto viaje al Nuevo Mundo (Enríquez, 1985). Algunos autores indican que el cultivo del cacao se inició en México y Centroamérica y señalan al mismo tiempo que los españoles no lo vieron cultivado en América del Sur cuando arribaron a este continente, aunque lo vieron creciendo de forma natural en las regiones del Amazonas y el Orinoco (Batista, 2009). Alrededor de 20 años después, los conquistadores españoles de México se asombraron de las grandes cantidades de cacao que encontraron en los almacenes de Moctezuma y de la popularidad de la bebida que se hacía con él. En los tiempos del descubrimiento y posterior conquista de América los mayas eran los que cultivaban cacao; perfeccionaron el cultivo, aprendieron a curar y conservar las semillas y a preparar bebidas con ellas. Todas las clases sociales consumían esta bebida y utilizaban las semillas como moneda de cambio con los aztecas (Enríquez, 1985).

Para los Mayas y Mexicas, el cacao y los productos derivados de él eran de importancia económica, gastronómica y simbólica, desde la bebida preparada por mayas (granos fermentados mezclados con agua) hasta la elaborada por los mexicas (las semillas se tostaban y trituraban hasta obtener una pasta, la cual se mezclaba con agua caliente hasta que la grasa subía y esta era removida); las semillas utilizadas para el intercambio comercial o como pago tributario; y que decir de la carga simbólica del cacao, era utilizada en las ceremonias para nombrar caballeros águila, también se entregaban a los comerciantes antes y después de su partida, y del chocolate que estaba reservado para los dignatarios. Era sin duda, un elemento que formaba parte de la vida diaria de aquellas culturas.

2.1.3. Distribución

Moctezuma dio a Cortés y a sus acompañantes españoles en su banquete de bienvenida una bebida preparada con cacao y fue el conquistador quien se dio cuenta del posible valor comercial de éste. Los granos de cacao fueron llevados por Cortés en 1528, pero el primer cargamento comercial de cacao no llegó a España sino hasta 1585 (Enríquez, 1985). España fue el primer país europeo en usar cacao monopolizando su uso por muchos años

(Hardy, 1960). Pronto se hizo popular en Europa la bebida preparada con cacao y fueron estos quienes le agregaron varios condimentos (azúcar, vainilla, pimienta, canela, clavo, anís, etcétera).

A mediados del siglo XVII el chocolate se había convertido en una bebida de moda entre las personas que la podían pagar. España monopolizaba el mercado de chocolate ya que todo el cacao que se producía en las colonias españolas se tenía que exportar exclusivamente a España. Para poder abastecer la creciente demanda del cacao pronto se sembró en muchas islas del Caribe como en Trinidad en 1525 y en Jamaica mucho antes de la captura de la Isla por los ingleses en 1655. Fue sembrado por los franceses en Martinica y Haití en 1660, por los portugueses en 1740, en Bahía (actualmente Brasil) en 1755 y finalmente en las Filipinas, a donde los españoles lo habían llevado en 1614. Los árboles de cacao fueron introducidos en Ghana y Fernando Po (actualmente Guinea) en 1879, después en Nigeria en 1847 y en Camerún en 1925, además de Costa de Marfil y el Congo. La producción que se obtenía en estos países comenzaba a rivalizar con las haciendas productoras de cacao más antiguas de otros países. La proporción fue tan rápida que pocos años después el continente africano producía más que el resto del mundo combinado, situación que se presenta hasta la fecha.

Fueron varios motivos por los que llegó a presentarse una creciente demanda de cacao, entre ellos están los avances en la mezcla y composición del chocolate. Fue Henry Nestlé quien tuvo la idea de mezclar leche condensada azucarada con cacao. En 1828 C.J. Van Houten inventa la prensa de cacao, herramienta que servía para separar la manteca de cacao, con esto lograban quitarle acidez y amargura al cacao. Lindt fue quien mezcló la manteca de cacao con chocolate y leche, lo que lo convertiría en un producto sólido y cremoso a la vez, surgiría así el chocolate-golosina como lo conocemos popularmente. El cacao se cultiva actualmente en África Occidental, América Central, Suramérica y Asia.

2.2. Requerimientos agroclimáticos del cacao

2.2.1. Elementos climáticos que inciden en las plantas

Dentro de la agroclimatología se señala que la temperatura, la disponibilidad de agua y radiación solar son los principales elementos climático-meteorológicos que influyen en las plantas. La temperatura y precipitación se consideran variables aleatorias mientras que la variación periódica de la duración del día o fotoperiodo es una variable fija. Se debe de

tomar en cuenta que la temperatura y la duración del día son elementos que tienen una importancia relevante como factores causantes de los fenómenos periódicos en los vegetales (Arteaga y Romo, 1983).

De acuerdo a la etapa fenológica o subperíodo en que se encuentren los cultivos, requieren de diferentes cantidades de temperatura, luz y humedad, que se indican en unidades calor, horas-frío, fotoperíodo y precipitación, etc., o sea que para cada subperíodo fenológico varían las condiciones meteorológico-climáticas necesarias para el buen desempeño de la planta.

2.2.2. Hábitat del cacao

Al ser originario de regiones húmedas con condiciones particulares, el cacao se cultiva en zonas que cumplen estas características. La formación vegetal de que es componente el cacao es el bosque húmedo tropical. Su cultivo está limitado a las regiones que se sitúan a 20° de latitud Norte y 20° de latitud Sur.

Crece en topografía plana u ondulada (300 msnm) aunque también llega a crecer en lugares en donde sobrepasan el 50% de pendiente. Requiere de suelos profundos, de 1 m como mínimo, fértiles y bien drenados. Deben evitarse suelos arcillosos, arenosos, con mal drenaje o muy superficiales con rocas y un nivel freático poco profundo. Exige elevadas temperaturas medias anuales, con poca fluctuación, una gran humedad, gran cantidad de precipitación (entre 1,300 y 2,800 mm anuales) y una cubierta vegetal que lo proteja de la insolación directa y de la evapotranspiración (CONABIO).

2.2.3. Requerimientos agroclimáticos

Existen trabajos realizados en distintas partes del mundo, principalmente en países de centro y sur de América en donde mencionan los requerimientos agro-ecológicos del cacao. En México, CONABIO y el INIFAP han realizado trabajos de investigación acerca de esta planta orientados mayormente a temas biológicos y de reproducción, sin embargo, provén información sobre requerimientos ambientales de la planta, los cuales son de utilidad para trabajos de zonificación.

Enríquez (1985) señala que entre los factores de carácter ecológico que tienen gran relevancia para el cacao, la temperatura y la lluvia son considerados como los elementos climáticos críticos para su desarrollo. La radiación solar también es importante, dado que el

cacao se puede cultivar en lugares a plena exposición con condiciones especiales de luminosidad y distribución de agua, aunque en la mayoría de los casos son cultivos bajo sombra.

A continuación se presenta en la Tabla 12 realizada con los requerimientos climáticos que se establecen en los distintos trabajos consultados:

Tabla 12. Requerimientos climáticos para el cacao según fuentes consultadas

Autor	Año	País	Temperatura óptima	T. max	T. min	T. min absoluta	Precipitación	Prec. óptima	HR (%)
Leal <i>et al.</i>	1999	Venezuela	21-32.2	32.2	15	10	1200-3000	1500-2000	Alta
Gómez y Azócar	2002	Venezuela	25.5	30	15	10	1200-1500	1200-2500	Alta
Suárez <i>et al.</i>	2006	Cuba	22-28	30	15	-	1500	100 mm (mensual)	60-90
Enríquez	1985	Costa Rica	23-26	30	15	10	1500-2500	100 mm (mensual)	-
Dosert <i>et al.</i>	2011	Perú	-	30-32	18-21	10	1500-2800	-	-
Hardy	1961	Costa Rica	25.5 + 4.5	30-32	15.5	10	1000-5000	100 mm (mensual)	-
Batista	2009	Rep. Dominicana	24.5-25.5	30	15	10	1500-2500	-	70-80
CONABIO	-	México	20-30	-	16	-	1300-2800	-	-
INIFAP	-	México	25.5	-	-	-	1800-2500	100 mm (mensual)	70-80
Burgos J., y Reyes, H.	1965	Venezuela	21-25	-	15	10	-	-	-
Ministerio de Agricultura y Riego	-	Perú	25	32	23	-	1600-2500	1600-2500	-
Rojas F. y Sacristán Sánchez, E. J.	2013	Colombia	24-28	32	18	-	1800-2600	1800-2600	>40
Torres G., L. A.	2012	Ecuador	23-25	30	15	-	1600-2500	1600-2500	-
M. Estrada, J. W. et al	2011	El Salvador	21	-	-	-	1500-2500	1500-2500	-
Salvador N., Espinoza E., Rojas J.C	2012	Perú	25	32	23	-	1600-2500	-	70-80

Fuente: Elaboración propia con información consultada en bibliografía.

De primer momento se pueden deducir los valores ambientales para el cacao de acuerdo a las fuentes consultadas: la temperatura óptima para el cacao es de 25.5°C, con temperaturas mínimas de 15°C y temperatura máxima de 30°C. La precipitación acumulada anual óptima entre los 1,800 a 2,500 mm, con un mínimo mensual de 100 mm y un corto periodo seco menor a dos meses y medio y una humedad relativa entre el 70 y 80%. El valor de la radiación solar como factor agroclimático de relevancia va a depender del tipo de cultivo, si es bajo sombra, con ligera exposición o totalmente expuesto.

Más adelante se corroborarán estos valores con las condiciones ambientales del estado de Tabasco, principalmente con las condiciones climáticas de los municipios productores de cacao que servirán como base para establecer las condiciones agroclimáticas del cacao en Tabasco.

2.2.4. Suelos

En cuanto al factor edáfico (Hardy, 1960; Smyth, 1975; Leal *et al.*, 1999) mencionan que un buen suelo para cacao debe tener una adecuada retención de humedad todo el año, pero al mismo tiempo debe tener un drenaje bueno que facilite que el exceso de agua se percole internamente y pueda suministrar una buena aireación que permita un crecimiento irrestricto

de las raíces. De acuerdo a Leal *et al.*, (1999) viene a ser la profundidad el factor que diferencie un suelo bueno de uno malo para el cacao.

Deben evitarse suelos arcillosos, arenosos, mal drenados o muy superficiales con presencia de rocas y un nivel freático poco profundo, es decir, suelos negro rocoso, café rojizo barroso, aluvial (CONABIO).

En cuanto a las propiedades físicas de los suelos se recomiendan (INIFAP, 2011):

- Profundidad: de 0.80-1.50 metros. Tolera condiciones de hasta 60 cm.
- Textura: mediana (serie de los francos, franco, franco-arcilloso, franco-arenoso): 30-40% de arcilla, 50% arena y 10-20% limo. No son recomendables suelos demasiado finos o gruesos. Su tolerancia a suelos arcillosos es mediana, lo cual se relaciona con una baja aireación y anegamiento. Suelos con buena retención de humedad
- Drenaje: un buen drenaje es esencial y deseable. El manto freático deberá de estar a una profundidad mayor de 1.5m.

Sobre las propiedades químicas se recomiendan suelos con las siguientes características:

- Ph: un óptimo de 6.0 a 7.0
- Materia orgánica: mayor de 3 %
- Relación carbono nitrógeno (C/N): mínimo 9.
- Capacidad de intercambio catiónico: más de 12 miliequivalentes por 100 g de suelo en la superficie y más de cinco en el subsuelo.
- Requiere una fertilidad de media a alta.

2.3. Fenología del cacao

2.3.1. Descripción fisiológica del cacao

Es un árbol de pequeña talla, perennifolio de 4 a 7 m de altura cuando es cultivado, mientras que el cacao silvestre puede llegar a medir más de 20 m (CONABIO, s.f.). Las flores se producen en el tronco, ramas y tallos leñosos y sus frutos o mazorcas crecen directamente del tronco y de las ramas más antiguas; en la parte externa del fruto presenta una cáscara

o pericarpio y en la parte interna está compuesto por semillas o granos ordenados por hileras alrededor de un eje central llamado placenta, en el cual los granos están cubiertos por un mucílago rico en azúcares. La maduración del fruto ocurre entre los 150 y 180 días después de la polinización de la flor, lo cual depende del origen genético y del clima donde se desarrolla (Arbeláez, 2010).

El cacao por ser una planta tropical, y a pesar de tener condiciones climáticas poco variables en la zona de desarrollo, no presenta un crecimiento continuo sino que tiene fases de reposo vegetativo: las plantas jóvenes presentan un crecimiento rítmico con periodos de estancamiento más o menos constantes, en comparación con las plantas adultas que siguen un patrón de crecimiento con periodos de desarrollo y reposo irregulares, lo cual sugiere que el crecimiento de las plantas jóvenes es controlado por mecanismos endógenos y en las adultas, por factores externos, influenciado por las condiciones ambientales (Mejía, 1995). Lo anterior prevé un dato importante ya que en la mayor parte de las plantaciones en Tabasco los árboles de cacao son de edad adulta.

El árbol tradicional de cacao en todo el mundo normalmente demora de 6 a 7 años en empezar a dar fruto, no obstante, los nuevos híbridos y variedades comienzan a producir desde los primeros dos años y son las plantas que actualmente se utilizan en los principales países productores en África. Bajo este tenor, en Tabasco también han comenzado a utilizar estas variedades para la renovación de las plantaciones; uno de ellos pertenece a la variedad criollo, llamado Carmelo C1. Se trata de un cacao precoz que tarda menos en crecer y producir, de hecho, los árboles de 18 meses ya comienzan a tener algunas mazorcas, sin embargo, tiene su rendimiento óptimo a los 8 años, con una vida útil de 35 años y es resistente a plagas y enfermedades. La calidad de este cacao es considerada alta, por lo que parte de la producción está destinada a la exportación.

2.3.2. Fenología del cacao

Arbeláez (2010) menciona que se presentan cuatro etapas para el desarrollo de la planta de cacao:

- Periodo de reposo: corresponde a la condición climática “seca”. Formación escasa de frutos.

- Periodo vegetativo: corresponde al inicio de las lluvias. El árbol presenta una actividad fisiológica abundante, con menor prioridad en frutos y mayor prioridad en crecimiento vegetativo.
- Periodo reproductivo: el árbol desarrolla gran parte de sus flores y frutos.
- Periodo de cosecha: varía dependiendo el lugar.

El Ministerio de Agricultura y Riego (s. f.) de Perú describe el ciclo fenológico con las siguientes etapas (Figura 11):

1. Botón floral: los botones tienen cerca de un centímetro de tamaño.
2. Floración: se abren los botones florales, las flores permanecen abiertas por un corto tiempo.
3. Fructificación: el fruto crece (se anota la fase cuando el fruto alcanza 2 cm).
4. Maduración: los frutos alcanzan su máximo tamaño y el color típico de la variedad.

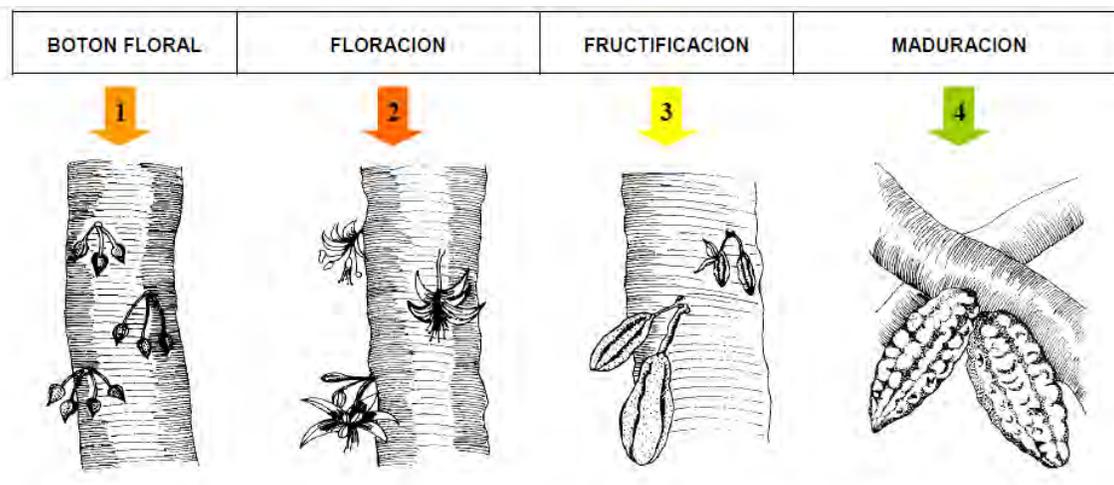


Figura 11. Fenología del cacao (Ministerio de Agricultura y Riego de Perú). Fuente: Ministerio de Agricultura y Riego de Perú, (s.f.).

En el calendario fenológico para el cacao propuesto por el Ministerio de Agricultura y Riego de Perú se puede observar (Figura 12) que la fase de inducción floral comienza en agosto y dura de 18-25 días, esta fase es donde los botones tienen cerca de un centímetro de tamaño; de septiembre a noviembre se presenta la etapa de floración, en un primer momento se observan los botones florales los cuales se abren por un tiempo (de 24 a 48

horas) para su reproducción y una vez que se han polinizado comienza a surgir el llamado “chilillo”, el cual, al alcanzar los 2 cm de tamaño da pauta para la etapa de fructificación en noviembre y hasta principios de marzo. La etapa de madurez es donde los frutos alcanzan su tamaño máximo y el color típico de la variedad y abarca los meses de marzo hasta mayo, no obstante, marcan en el calendario que comienzan a cosechar desde abril a mayo. Prácticamente para la mayoría de las etapas la temperatura óptima es entre 22 a 25°C, con temperaturas críticas menores a los 20°C y por encima de los 32°C aunado a valores altos de humedad, mientras únicamente consideran a la etapa de fructificación como tolerante a un déficit hídrico.

Meses	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Etapas Fenológicas	Crecimiento vegetativo		Crecimiento de hojas		Reposo - Poda		Crecimiento vegetativo				
	Ciclo Vegetativo		Crecimiento de hojas		Reposo - Poda		Formación de yemas foliares				
Ciclo Reproductivo	Crecimiento de los órganos reproductivos		Llenado de mazorcas (4)		Maduración de frutos		Inducción (1)		Crecimiento de los órganos reproductivos		Fructificación (4)
	Llenado de mazorcas (4)		Maduración de frutos		Cosecha comercial		Inducción (1)		Botones florales (2) y Floración (3)		Fructificación (4)
Parte aérea	Hincazón de Yemas (1)		Botón Floral (2)		Floración (3)		Fructificación (4)				
Parte radicular	Desarrollo y crecimiento de raíces										
Descripción de la Fase	Los botones tienen cerca de un centímetro de tamaño.		Se abren los botones florales, las flores permanecen abiertas por un corto tiempo (24 horas).		El fruto crece, se anota la fase cuando el fruto alcanza 2 centímetros.		Los frutos alcanzan su tamaño máximo y el color típico de la variedad.				
Ocurrencia de la fase (días)	18 - 25		42 - 60		66 - 110		120 - 210				
Temperatura Óptima	22°C a 25°C		22°C a 25°C		22°C a 25°C		22°C a 25°C				
Temperatura Crítica	< 20°C		< 20°C a 32°C >		< 20°C a 32°C >		< 20°C a 32°C >				
Humedad óptima	70% - 80%		70% - 80%		70% - 80%		70% - 80%				
Déficit hídrico	Sensible		Sensible		Sensible		Tolerante				

Figura 12. Requerimientos climáticos por estado fenológico del cacao en Perú. Fuente: www.senamhi.gob.pe.

De acuerdo a los resultados obtenidos en campo se elaboró un cuadro con las etapas fenológicas del cacao a lo largo del año. Es importante destacar que en los lugares tropicales no existe una diferenciación en la fenología de las plantas, como es el caso del cacao, esto es, un mismo árbol de cacao puede encontrarse en la etapa de floración, de fructificación y que algunos de sus frutos se encuentren maduros y listos para cosecharse (Figura 13) por lo que se tomaron como referencia la etapa en la que la mayoría de los árboles se encuentra en ese momento del año (Figura 14).



Figura 13. Árbol de cacao con presencia de tres etapas fenológicas. Foto tomada por Eduardo Pérez S.



Figura 14. a) árbol de cacao con mayor presencia de floración. b) árbol de cacao con mayor presencia de fructificación. c) árbol de cacao con mayor presencia de madurez del fruto. d) árbol de cacao con frutos maduros a punto de cosechar. Fotos tomadas por Eduardo Pérez S.

Así se logró identificar que en las plantaciones con condiciones adecuadas se puede cosechar durante todo el año, con picos de una o dos cosechas; son cinco meses que dura la cosecha la que se realiza semanalmente. Con estos datos se hizo el cuadro del ciclo de crecimiento y desarrollo del cacao para los doce meses y posteriormente se comprobó con los datos obtenidos en la búsqueda bibliográfica (Figura 15). De tal manera que el periodo vegetativo y reproductivo a lo largo de un año en Tabasco es similar con lo propuesto por el Ministerio de Agricultura y Riego, especialmente en el periodo de la primera cosecha.

Se dividieron las etapas fenológicas para el periodo reproductivo del cacao en Tabasco en dos, uno correspondiente a la primera cosecha y otro al de la segunda cosecha, dado que en la mayoría de las plantaciones se tienen precisamente este número de cosechas, donde es posible que se tenga mayor cosecha en uno u otro periodo. De lo anterior, resulta similar el calendario de los estados fenológicos del cacao a lo largo del año en Perú con el periodo de la primera cosecha en Tabasco, donde solamente existe una diferencia de un mes aproximadamente, ya que en Tabasco la floración comienza en octubre y continua hasta noviembre (la inducción comenzaría un mes antes, es decir, en septiembre, mientras que en Perú comienza en agosto), la fructificación va de diciembre a febrero, mientras que en Perú va de noviembre a marzo, los frutos maduran de marzo a abril en Tabasco y en Perú de marzo a mayo y se cosecha de mayo a septiembre mientras que en Perú es en abril hasta mayo.

E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Continúa fructificación		Madurez		Primera cosecha					Floración de primera cosecha.		Inicio de fructificación
Segunda cosecha		Floración segunda cosecha		Inicio de fructificación	Continúa fructificación		Madurez		Segunda cosecha		

Figura 15. Etapas fenológicas del cacao en Tabasco durante un año. Elaboración propia.

A continuación se describe el comportamiento del cacao de acuerdo a la fase o etapa fenológica en la que se encuentre, y más adelante, se enuncia la relación de la fenología con los elementos climáticos para el cacao.

Las inflorescencias se localizan en la base de las hojas. El cacao es cauliflor, es decir que florece en las partes viejas o troncos maduros y florece todo el año salvo algunas variedades que florecen sólo durante una pequeña parte del año. Las primeras hojas de un árbol generalmente se asoman pasado los 3 años de vida, pero en híbridos interclonales la floración es mucho más temprana, entre 14 y 18 meses (Enríquez, 1985).

El cacao difícilmente se puede autofecundar en la misma flor, en general se poliniza por medio de insectos, es decir, por medio de polinización entomófila.

El fruto es el resultado de la maduración del ovario una vez fecundado y en muchos casos, la variación del tamaño del fruto dentro de un árbol no sólo está afectada por los factores ambientales sino por el número de semillas formadas en el fruto y esto depende de la fecundación individual de los ovarios.

El tiempo de maduración del fruto varía por genotipos y ambiente; por genotipos hay una variación de 5 a 7 meses (150-210 días); por ambiente, entre más cálido y húmedo, más rápido puede madurar (Enríquez, 1985).

2.4. Relación entre agua y la planta del cacao

No sólo basta con definir las condiciones adecuadas para el cultivo sino que es necesario enunciar los efectos que tienen los elementos y factores climáticos principales (agua, luz y temperatura) sobre el ciclo vegetativo y reproductivo de los cultivos, en este caso, sobre la planta del cacao.

Las plantas de cacao reaccionan en forma sensible a la cantidad de agua en el suelo y son susceptibles a la sequedad (Almeida y Valle, 2007). El cacao requiere lluvias uniformemente repartidas a lo largo del año de un total de 1,500-2,800 mm (Dostert *et al.*, 2011).

Enríquez (1985) menciona que la planta de cacao es sumamente sensible al déficit hídrico, puesto que los estomas se cierran con pequeños cambios en el contenido de agua de ellos (3.3%), esto significa que el cierre de los estomas induce a una baja rápida del poder fotosintético de las hojas, en consecuencia, al poder de producción de la planta.

En lugares donde no hay ningún déficit mensual de precipitaciones, los hace ideales para las plantaciones bajo poca sombra, con uso intensivo de fertilizantes y prácticas que permiten altos rendimientos. Si la época seca se prolonga relativamente en una zona, la cosecha se puede concentrar en periodos cortos, mientras que en lugares en donde no hay ese periodo seco largo, se puede tener una cosecha permanente durante todo el año, con dos o tres picos no muy pronunciados (Enríquez, 1985). Los montos anuales de precipitación son el factor climático más importante y tiene una gran influencia en la producción (Duke, 1983).

Las precipitaciones han constituido un tema de debate entre algunos autores. De acuerdo a lo propuesto por Suárez (2006) “no puede fijarse un límite de lluvias más allá del cuál estas comienzan a ser perjudiciales, porque es la frecuencia de lluvias más que el total precipitado lo que tiene mayor importancia, aunque uno y otro no dejan de estar aparentemente relacionados”.

Dependiendo del autor varían las condiciones de precipitación como evapotranspiración (ET) para el desarrollo óptimo del cacao y su relación con la producción y el rendimiento. Hay que tener presente que en la mayoría de las regiones cacaoteras la cantidad de lluvia excede la evapotranspiración y que las inundaciones constituyen una barrera para el crecimiento inicial y establecimiento del cacao.

Leal *et al.* (1999) recalcan que, en general, en las regiones cacaoteras del mundo la precipitación excede la evapotranspiración de 7-9 meses del año, hecho que se corroboró cuando se realizó el balance hídrico en Tabasco y que se presenta más adelante.

Se ha observado que los rendimientos anuales de cacao seco aumentan paralelamente a los aumentos de excesos de agua del suelo hasta llegar a su valor óptimo y que la producción se reduce una vez rebasado ese nivel como consecuencia del exceso de agua en el suelo y la incidencia de enfermedades (García y Montoya, 1968; Leal *et al.*, 1999).

Aunque en la literatura reportan que como mínimo se deben presentar 100 mm mensuales de precipitación no se tiene presente la reserva de agua que llegara a tener el suelo y que puede ser utilizada por las plantas, ni los excesos ni déficit que puedan presentarse, es por eso que para el análisis de las precipitaciones se realizará el balance hídrico calculado por el método directo, ya que, pueden haber meses con precipitación menor a 100 mm mensuales pero aún hay agua en la reserva del suelo por lo que se deduce que podrían ser no tan perjudiciales para la planta de cacao.

2.5. Relación entre radiación solar, temperatura y la planta de cacao

Leal *et al.* (1999) mencionan que la radiación solar y la humedad relativa obviamente afectan a los procesos fisiológicos en la planta, pero se piensa que no juegan un papel tan importante al momento de definir las condiciones ecológicas del cacao.

Debido a que el cacao se le ha encontrado creciendo bajo otros árboles más grandes y que su cultivo ha sido tradicionalmente bajo sombra, se ha dicho que es típicamente umbrófilo

(Enríquez, 1985). No obstante, diversos estudios demuestran que el cacao también puede crecer a plena exposición o con poca sombra.

Las plantaciones a plena exposición o con poco sombreado aumentan su ritmo de crecimiento y desarrollo, debido a la mayor actividad fotosintética, resultando en mayor producción y mejores rendimientos, sin embargo, la demanda de nutrimentos aumenta (por lo que puede llevar el uso de fertilizantes en plantaciones sin sombra) y la muerte regresiva de la planta (después de 2-5 años de buena producción) son dos factores que se deben considerar, además de que se cumplan los requerimientos hídricos para la planta, por lo que su aplicación es restringida.

El cultivar cacao bajo sombra tiene algunas ventajas y desventajas: el sombreado sirve como barrera para los vientos y para la radiación solar, que aunado a los otros factores ambientales, se crean microclimas en las plantaciones. Enríquez (1985) menciona que se ha visto en experimentos que las abundantes floraciones acompañadas de grandes fructificaciones sólo tienen lugar durante los periodos uniformes de humedad. Otras ventajas son: menor demanda de nutrimentos (debido a las cantidades bajas de los productos fotosintéticos), mejor uso de fertilizantes aplicados (si es que se ocupan), protección a las hojas de la planta contra el efecto directo del Sol, la sombra adecuada disminuye la incidencia de enfermedades y plagas, dan mayor longevidad a la plantación, la intercepción de lluvias y por supuesto el factor ecológico y económico, ya que la planta crecería en un ambiente cercano al natural, formaría parte de un sistema agroforestal en el cual las personas también pueden beneficiarse con los otros productos de los árboles que sirven como sombra. La mayor desventaja para el cacao bajo sombra es sin duda la disminución de la producción. Los árboles de sombra compiten por suelo, agua, luz y nutrimentos con el cacao, además, si existe un exceso de sombra, la incidencia de plagas y enfermedades es una desventaja latente.

Los autores recomiendan un uso en la sombra equivalente al 50%. La luminosidad disminuye un poco en las primeras etapas de desarrollo (40-50%) y aumenta cuando el árbol pueda proporcionarse sombra por sí mismo (60-75%).

El crecimiento y desarrollo del cacao depende en gran medida de la temperatura, ya que afecta principalmente el crecimiento vegetativo, la floración y el desarrollo del fruto (Almeida y Valle, 2007). El cero fisiológico o cero vital es la temperatura a la cual el cultivo comienza a crecer. Se ha establecido que para los frutales, el cero vital es de 12° C (Reyna, 1977:

Campos, 2005) y este valor es el que se tomará en cuenta, aunque Burgos y Reyes (1965) utilizaron un valor de 15°C para realizar la sumatoria de temperaturas, tomándolo como base ya que consideran que es la temperatura mínima para el cacao.

Cabe mencionar que el cacao no soporta temperaturas bajo cero. La temperatura influye sobre algunos factores pertinentes del árbol de cacao, tales como la formación de flores y madurez del fruto (Enríquez, 1985). Como ejemplo, se ha visto que en lugares menos cálidos, la maduración de frutos tarda desde 167 hasta 205 días, mientras que las zonas más calientes con promedios de 25 a 26°C las mazorcas maduran en 140 a 175 días (Leal *et al.*, 1999; Johnson *et al.*, 2008). Aunque los autores no especifican si esta duración es desde la etapa de floración o de la fructificación, se deduce que es precisamente desde la segunda etapa ya que, al compararlo con los resultados obtenidos en campo correspondientes al ciclo de crecimiento y desarrollo de la planta los resultados son similares: de 151 a 153 días son los que tardan en madurar desde la etapa de fructificación.

Algunos autores exponen los efectos que ejerce la temperatura sobre la planta de cacao. En el estudio realizado por las Zonas Productoras de Cacao en Venezuela (2002) mencionan que la temperatura y sus fluctuaciones estacionales o diarias ejercen sobre el cacao un efecto sobre el ritmo de los brotes foliares, superficie foliar total, crecimiento secundario y floración. La formación de flores tiene su óptimo alrededor de los 27°C. Las temperaturas constantes de 31°C durante el día y noche impiden la floración.

Leal *et al.* (1999) hacen notar que a temperaturas altas de 30°C o más el sistema hormonal del árbol se transtorna, y se muestra en la pérdida de la dominancia apical, como consecuencia de ello, los árboles son más pequeños y con muchas yemas axilares. Las temperaturas en el rango de los 30°C afectan a la floración, pero el número de flores aumenta a medida que aumenta la temperatura.

Según Heuveltop (1986) el cacao a 40.5°C puede hacer cesar el crecimiento y a 54.4°C puede ser letal si se mantiene por algún tiempo.

La formación de flores depende mucho de la temperatura. Cuando esta fluctúa alrededor de 21°C o menos casi no hay formación de flores, mientras que al alcanzar 25°C las flores se forman normalmente. En temperaturas que no bajan de los 22.8°C se pueden tener mazorcas durante todo el año, aunque en algunos meses las cosechas van a ser bajas. La temperatura puede influir en el desarrollo de algunas enfermedades criptogámicas cuya

diseminación y ataque se hace severo cuando la temperatura baja de 15.5°C (Enríquez, 1985).

2.6. Análisis de las precipitaciones

2.6.1 Estaciones meteorológicas en Tabasco

Del total de estaciones meteorológicas del estado (en total 53) se seleccionaron sólo las que tienen por lo menos 25 años de funcionamiento. El promedio general de años efectivos de las estaciones es de 40.9. La estación Humanguillo (SMN) es la de menor años efectivos con 25.1 y la estación Tenosique (SMN) la que mayor cantidad de años efectivos tiene con 70.6. Las bases de datos se obtuvieron del portal <http://clicom-mex.cicese.mx/> del Sistema CLICOM del CICESE.

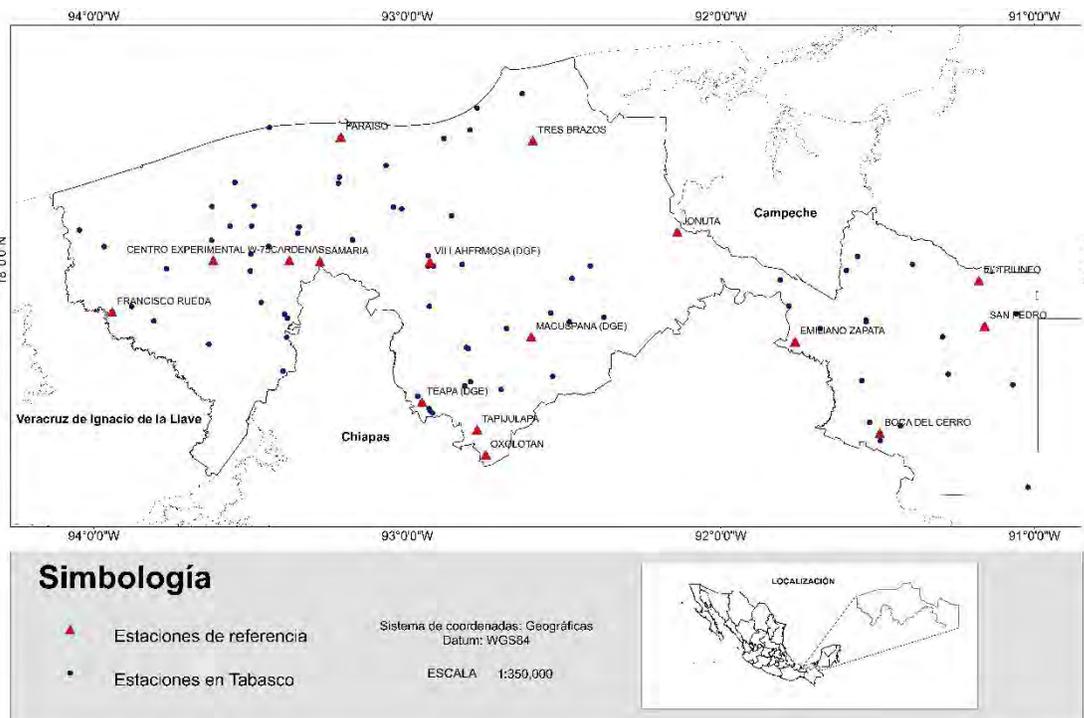


Figura 16. Distribución de las estaciones meteorológicas en Tabasco. Elaboración propia.

El promedio de años en la que iniciaron operaciones fue en 1956 mientras que los años efectivos de operación en promedio son de 51 años y es el año 2012 el último con datos efectivos para las 16 estaciones (Figura 16).

2.6.2. Prueba de homogeneidad

El análisis que se debe de realizar antes de iniciar cualquier evaluación cuantitativa de la agroclimatología de cultivos es la verificación de la homogeneidad de las series pluviométricas que se utilizarán (Campos, 2005). La prueba de homogeneidad se realizó para la variable de precipitación de las series históricas por cada estación meteorológica, por medio de la prueba de Helmert (Tabla 13).

Tabla 13. Prueba de homogeneidad para 16 estaciones de Tabasco.

ESTACIÓN	NOMBRE	MUNICIPIO	AÑOS EFECTIVOS	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	PRUEBA HELMERT
27004	Boca del Cerro	Tenosique	63.2	17°26'58" N	91°29'35" W	14.0 m.s.n.m	HOMOGENEA
27007	Cent Exp W75	Cárdenas	44.8	18°00'05" N	93°37'09" W	12.0 m.s.n.m	HOMOGENEA
27008	Cárdenas	Cárdenas	52.4	18°00'04" N	93°22'35" W	25.0 m.s.n.m	HOMOGENEA
27012	Emiliano Zapata	Emiliano Zapata	37.5	17°44'31" N	91°45'47" W	26.0 m.s.n.m	HOMOGENEA
27015	Francisco Rueda	Humanguillo	38.8	17°50'12" N	93°56'30" W	7.0 m.s.n.m	NO HOMOGENEA
27028	Jonuta	Jonuta	42.6	18°05'31" N	92°08'20" W	6.0 m.s.n.m	NO HOMOGENEA
27030	Macuspana (DGE)	Macuspana	63.7	17°45'24" N	92°36'18" W	11.0 m.s.n.m	HOMOGENEA
27034	Paraiso	Paraiso	59.8	18°23'44" N	93°12'44" W	6.0 m.s.n.m	HOMOGENEA
27039	Samaria	Cunduacán	62	17°59'51" N	93°16'43" W	23.0 m.s.n.m	HOMOGENEA
27040	San Pedro	Balancán	60.2	17°47'30" N	91°09'30" W	44.0 m.s.n.m	HOMOGENEA
27042	Tapijulapa	Tacotalpa	48.3	17°27'40" N	92°46'39" W	44.0 m.s.n.m	HOMOGENEA
27044	Teapa (DGE)	Teapa	50.3	17°32'56" N	92°57'12" W	51.0 m.s.n.m	HOMOGENEA
27050	Tres Brazos	Centla	61.1	18°23'03" N	92°36'00" W	2.0 m.s.n.m	HOMOGENEA
27054	Villahermosa (DGE)	Centro	61.8	17°59'48" N	92°55'42" W	24.0 m.s.n.m	HOMOGENEA
27059	El Triunfo	Balancán	37.5	17°56'12" N	91°10'38" W	41.0 m.s.n.m	NO HOMOGENEA
27070	Oxolotan	Tacotalpa	37.4	17°22'50" N	92°45'00" W	63.0 m.s.n.m	NO HOMOGENEA

Los factores que intervinieron para la selección de las estaciones de referencia fueron: la cantidad de años operando, el comportamiento cronológico de la serie, número de datos faltantes y su distribución o concentración, es decir, si son meses o años de datos faltantes y si están dispersos o son seguidos, y por último el resultado de la prueba de homogeneidad, por lo que, las estaciones de referencia y con las que se procedió a realizar los análisis son 16.

Con todo lo anterior se puede afirmar que las estaciones de referencia utilizadas para este trabajo presentan valores adecuados para poder hacer el análisis correspondiente y a su vez, para la estimación de los índices e indicadores requeridos.

2.6.3. Balance hídrico con base en la temperatura

Se realizó un primer balance hídrico con base en la temperatura utilizando los datos de precipitación promedio mensual, temperatura promedio mensual y adicionalmente la ETP de las estaciones disponibles con los que se construyeron diagramas ombrotérmicos de Gausen para detectar los periodos secos y húmedos de acuerdo al ajuste propuesto por

García *et al.* (1983). No obstante, el periodo seco o húmedo puede definirse de acuerdo a las variables de precipitación y evapotranspiración potencial como se realizó en el balance hídrico que se presenta más adelante (Figura 17)

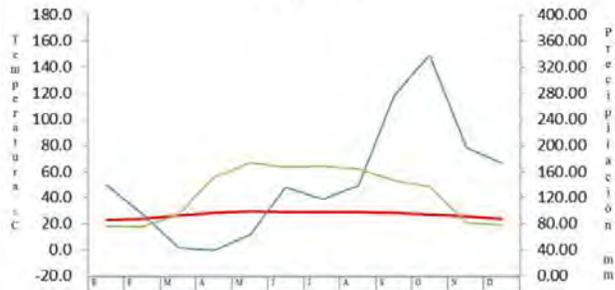
En la mayor parte del territorio tabasqueño posee climas $Am(f)$ que son climas cálidos húmedos con lluvias en verano y con un importante porcentaje de lluvia invernal. Corresponden los municipios de Cárdenas, Emiliano Zapata, Huimanguillo, Jonuta, Paraíso, Cunduacan y Centro. Los valores de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial (ETP).

Los lugares con climas cálido húmedos con un régimen de lluvias intermedio y alto porcentaje de lluvia invernal, climas $Af(m)$, corresponden a los municipios de Tenosique y Macuspana.

Las estaciones Boca del Cerro y Macuspana no presentan periodos secos marcados durante todo el año, con lo que se puede deducir que no se presenta un riesgo de déficit hídrico en el suelo, por el contrario, cabe el riesgo de un exceso hídrico. Las temperaturas máximas se presentan en el mes de mayo y el máximo de precipitación en septiembre. La ETP de marzo a mayo es superior a las precipitaciones de esos meses. Aunque en los meses de febrero a abril la curva de precipitación queda por debajo de las temperaturas, no se cumple el ajuste realizado por García *et al.* (1983) en el que señala que $p = 2t + 14$ para este caso, es decir, la temperatura no es mayor a las precipitaciones promedio mensuales de esos meses, por lo que más adelante se utiliza el balance hídrico para reclasificar los meses en húmedos o secos de acuerdo a la precipitación y ETP.

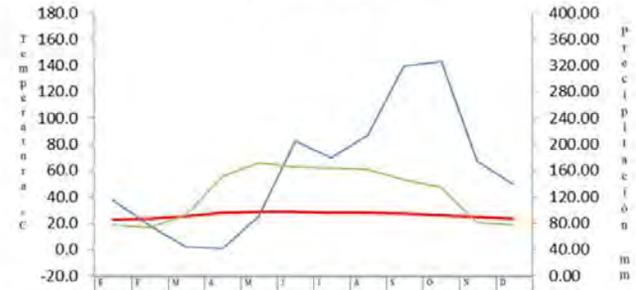
Los climas tipo Aw_2 son climas cálidos subhúmedos con lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10 %, estos se encuentran al este del territorio de Tabasco en el municipio de Balancán y corresponde a las estaciones San Pedro y El triunfo cuyas precipitaciones anuales acumuladas oscilan entre los 1,530 y 1,590 mm.. En estos lugares se tiene un periodo seco de 5 meses, de diciembre a abril con la temperatura máxima en mayo. En esta zona se corre el riesgo de que la humedad del suelo no sea suficiente para satisfacer las necesidades hídricas, esto para los meses de diciembre a abril, donde la precipitación es menor que la ETP y las temperaturas se encuentran por arriba de los 20°C.

Paraíso



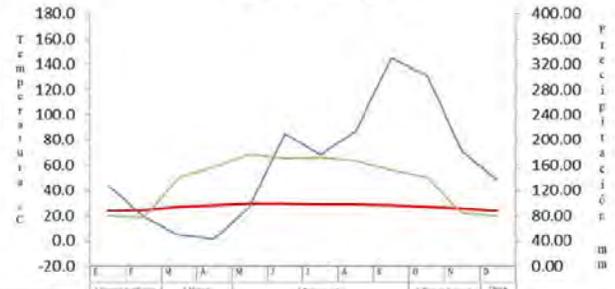
CLIMOGRAMA	
—	Temperatura
—	Precipitación
—	Evapotranspiración potencial

Samaria



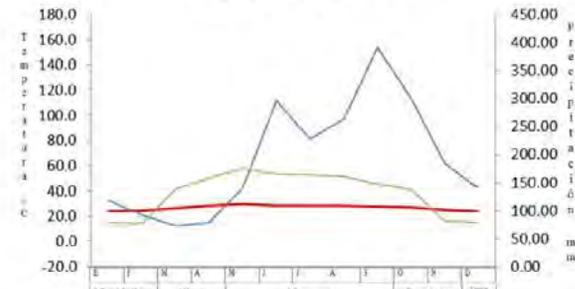
CLIMOGRAMA	
—	Temperatura
—	Precipitación
—	Evapotranspiración potencial

Villahermosa



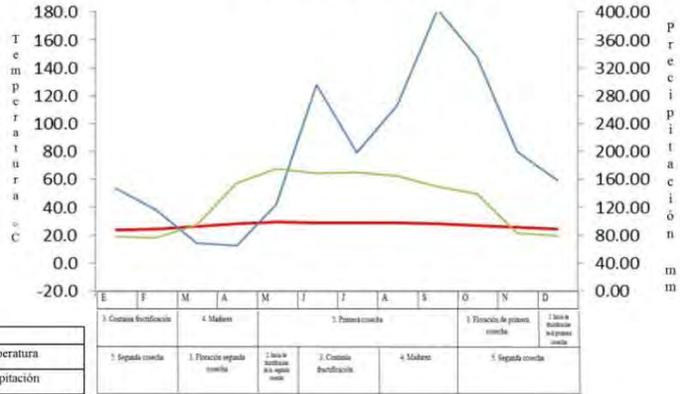
CLIMOGRAMA	
—	Temperatura
—	Precipitación
—	Evapotranspiración potencial

Boca del Cerro



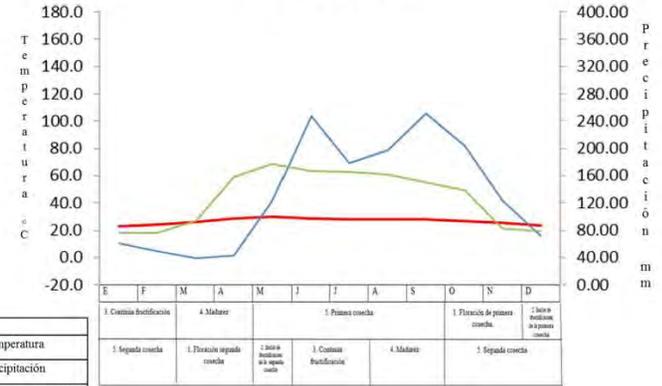
CLIMOGRAMA	
—	Temperatura
—	Precipitación
—	Evapotranspiración potencial

Macuspana



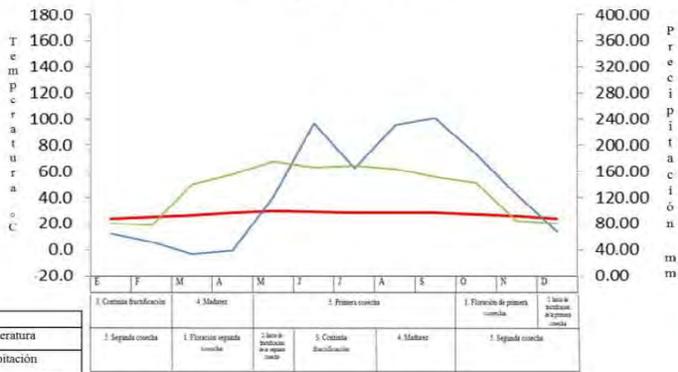
CLIMOGRAMA	
—	Temperatura
—	Precipitación
—	Evapotranspiración potencial

San Pedro



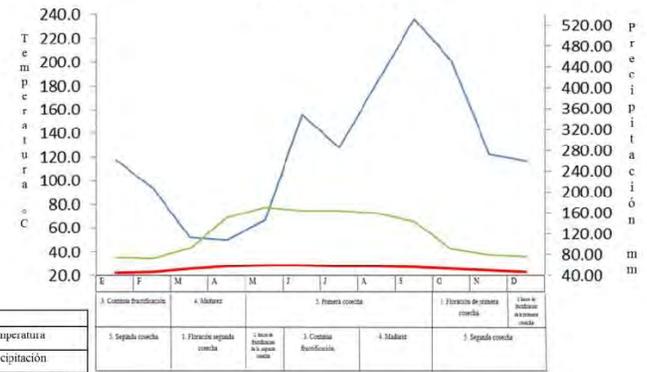
CLIMOGRAMA	
—	Temperatura
—	Precipitación
—	Evapotranspiración potencial

El Triunfo



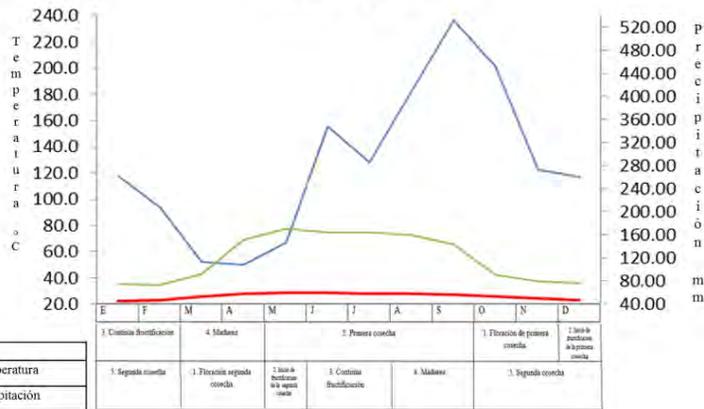
CLIMOGRAMA	
—	Temperatura
—	Precipitación
—	Evapotranspiración potencial

Teapa (DGE)



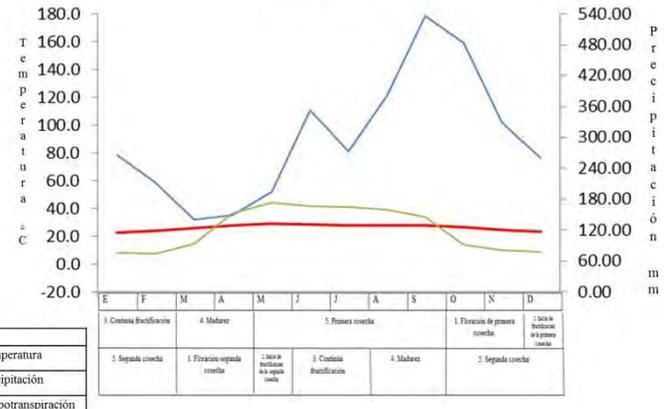
CLIMOGRAMA	
—	Temperatura
—	Precipitación
—	Evapotranspiración potencial

Teapa (DGE)



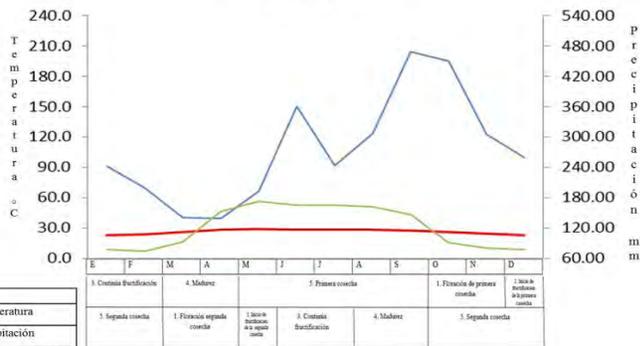
CLIMOGRAMA	
	Temperatura
	Precipitación
	Evapotranspiración potencial

Tapijulapa



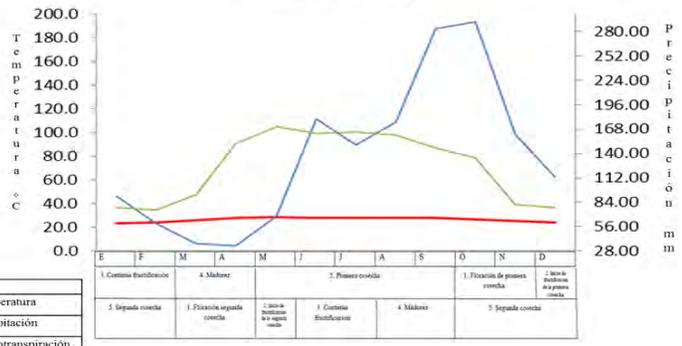
CLIMOGRAMA	
	Temperatura
	Precipitación
	Evapotranspiración potencial

Oxolotan



CLIMOGRAMA	
	Temperatura
	Precipitación
	Evapotranspiración potencial

Tres Brazos



CLIMOGRAMA	
	Temperatura
	Precipitación
	Evapotranspiración potencial

Figura 17. Diagramas ombrotérmicos de 16 estaciones de Tabasco.

Las estaciones Teapa, Tapijulapa y Oxolotan que se encuentran en la parte sur del estado y coinciden con algunas elevaciones del relieve, donde el clima es tipo *Af*, es decir, cálidos húmedos con lluvias abundantes durante todo el año. En estos lugares, no existe una sequía relativa al contrario, la condición húmeda permanece durante todo el año. La precipitación total acumulada está por arriba de los 3,000 mm y de igual manera la lluvia es bimodal. En cuanto a la evapotranspiración potencial, en los meses de abril y mayo ésta variable supera ligeramente a las precipitaciones de esos meses en la estación Teapa. Mientras que para el municipio de Tacotalpa, la condición es mayormente húmeda en todo el año, donde el comportamiento entre estas dos variables similar.

Por último, la estación Tres Brazos ubicada en el municipio de Centla, al norte del estado, resultó de acuerdo a los datos de la estación que se presenta un clima (o microclima) *Aw₂x'*, es decir, clima cálido subhúmedo con lluvias en verano pero con un porcentaje de lluvia invernal mayor de 10.2 %. Se presenta un periodo seco entre febrero y abril, la temperatura más alta se registra en mayo, mientras que la precipitación anual acumulada se encuentra por encima de los 1,600 mm donde la evapotranspiración potencial supera a las precipitaciones en los meses de marzo, abril, mayo y julio que podrían afectar a la reserva de agua en el suelo y en consecuencia a la planta de cacao.

2.6.4. Balance hídrico con base en la ETP

En el método directo según Almorox (2003) “el agua del suelo se va perdiendo mes a mes hasta agotar la reserva para poder cubrir las necesidades de agua (evapotranspiración)...en el método exponencial, la reserva de humedad del suelo se va agotando exponencialmente, la pérdida de agua durante el periodo seco se ajusta a una exponencial negativa de manera que cuanto más seco está el suelo más difícil es extraer agua y por tanto, más difícil es llegar a la evapotranspiración”.

El cálculo del balance hídrico por el método directo, consiste en definir mes a mes los siguientes parámetros (en mm):

- P: Precipitación media mensual.
- ETP: Evapotranspiración potencial.

- P-ETP: Diferencia entre la P y la ETP. Es el balance mensual de entradas y salidas potenciales de agua en el suelo. La diferencia clasifica a los meses en secos ($P-ETP < 0$) y en húmedos ($P-ETP > 0$).
- R: Reserva de agua en el suelo. Cuando en un mes se produzcan más entradas que salidas, el agua sobrante pasará a engrosar la reserva del suelo, por el contrario, cuando las salidas sean mayores que las entradas se reducirá la reserva del suelo.
- VR: Variación de la reserva. Es la diferencia entre la reserva del mes en el que se está realizando el cálculo y la reserva del mes anterior.
- ETR: Evapotranspiración real. Es el volumen de agua que realmente se evapotranspira en el mes dependiendo de que haya suficiente agua disponible para evaporar y así llegar a la ETP o no. El agua disponible para evaporar será la que cae como precipitación en el mes considerado y la existente en la reserva del suelo.
- F: Falta de agua. Es el volumen de agua que falta por cubrir las necesidades potenciales de la vegetación (para evaporar y transpirar) también es conocido como déficit.
- Ex: Exceso de agua. Es el agua que excede de la reserva máxima y que se habrá perdido por escorrentía superficial o profunda.
- Ds: Desagüe. El exceso de agua se dirigirá hacia los niveles de aguas freáticas y los ríos. Thornthwaite propuso que el 50% del excedente de agua de un mes se escurra hacia los ríos durante un mes en cuestión y el resto se infiltra hacia las capas profundas. Algunos autores llaman al desagüe escurrimiento, no obstante, en este trabajo se seguirá llamando desagüe para apegarnos al método propuesto por el autor.

Las tablas que contienen los datos de los resultados del balance hídrico se agrupan por mes y contienen los siguientes campos: precipitación (PREC), evapotranspiración potencial (ETP), la clasificación por mes en húmedo o seco conforme a la temperatura y precipitación de acuerdo a García *et al.* (1983) (H/S), la clasificación por mes en húmedo y seco de acuerdo al criterio de Thornthwaite (H/S THORN), la diferencia entre la precipitación y la etp (P-ETP), la reserva de agua en el suelo (R), la variación de la reserva en el suelo (VR),

la evapotranspiración real (ETR), el déficit o falta de agua (F), el exceso de agua (EX) y el valor del desagüe o escorrentía ajustado (DS).

Así tenemos que para la estación Centro experimental W75 del municipio de Cárdenas, registra una precipitación anual de 2,121.6 mm. Se presentan 9 meses húmedos, de junio a febrero y 3 meses secos (marzo, abril y mayo) esto con relación a la diferencia de la precipitación y a la ETP. Se puede apreciar en la Tabla 14 que de agosto a febrero la reserva de agua será igual a la reserva máxima que puede retener el suelo, decrece a partir de marzo hasta agotarse en mayo. La evapotranspiración real es menor en cuanto a la evapotranspiración potencial de los meses del periodo seco pero mayor a las precipitaciones, esto significa que se ha evaporado el agua de la reserva de esos meses, mientras que en abril y mayo la falta de agua corresponde a 61 y 110.3 mm respectivamente. Por otra parte, los meses en los que se presenta el mayor exceso de agua son septiembre, octubre y noviembre.

Tabla 14. Balance hídrico de la estación Centro experimental W75, municipio de Cárdenas.

MES	PREC	ETP	H/S	H/S THORN	P-ETP	R	VR	ETR	F	EX	DS
ENE	150.3	75.4	húmedo	húmedo	74.9	100	0	75.4	0.0	74.9	96.2
FEB	85.0	73.4	húmedo	húmedo	11.6	100.0	0	73.4	0.0	11.6	53.9
MAR	40.2	92.6	seco	seco	-52.4	47.6	-52.4	92.6	0.0	0.0	26.9
ABR	46.8	155.4	seco	seco	-108.6	0.0	-47.6	94.4	61.0	0.0	13.4
MAY	64.8	175.1	seco	seco	-110.3	0.0	0	64.8	110.3	0.0	6.7
JUN	210.3	167.4	húmedo	húmedo	42.9	42.9	42.9	167.4	0.0	0.0	3.3
JUL	198.1	166.7	húmedo	húmedo	31.4	74.3	31.4	166.7	0.0	0.0	1.6
AGO	242.4	162.0	húmedo	húmedo	80.4	100.0	25.7	162	0.0	54.7	28.1
SEP	345.3	146.2	húmedo	húmedo	199.1	100.0	0	146.2	0.0	199.1	113.6
OCT	375.4	91.5	húmedo	húmedo	283.9	100.0	0	91.5	0.0	283.9	198.7
NOV	221.4	79.7	húmedo	húmedo	141.7	100.0	0	79.7	0.0	141.7	170.2
DIC	141.3	76.5	húmedo	húmedo	64.8	100.0	0	76.5	0.0	64.8	117.5
TOTAL	2121.6	1461.9	húmedo								

En la estación Francisco Rueda, la precipitación anual es de 2,428.3 mm; la mayor parte de los meses que corresponden al periodo húmedo (junio-febrero) se observa una reserva de agua igual a la reserva máxima, presentándose un exceso de agua durante todo ese periodo y es en octubre en donde se tienen 261.4 mm de agua en exceso, de los cuales 210.2 mm son para el desagüe. Son tres meses de periodo seco, de marzo a junio. Es en abril y mayo en donde la falta de agua en el suelo es de 32.4 y 67.8 mm (Tabla 15).

Tabla 15. Balance hídrico de la estación Francisco Rueda, municipio de Huimanguillo.

MES	PREC	ETP	H/S	H/S THORN	P-ETP	R	VR	ETR	F	EX	DS
ENE	137.3	76.9	húmedo	húmedo	60.4	100	0	76.9	0.0	60.3	91.7
FEB	95.9	74.8	húmedo	húmedo	21.1	100	0	74.8	0.0	21.1	56.4
MAR	67.6	94.3	seco	seco	-26.7	73.4	-26.6	94.2	0.1	0	28.2
ABR	47.7	153.5	seco	seco	-105.8	0	-73.4	121.1	32.4	0	14.1
MAY	106.7	174.5	húmedo	seco	-67.8	0	0	106.7	67.8	0	7
JUN	310.2	165.1	húmedo	húmedo	145.1	100	100	165.1	0.0	45.1	3.5
JUL	258.0	165.0	húmedo	húmedo	93.0	100	0	165	0.0	93.0	48.2
AGO	285.4	160.7	húmedo	húmedo	124.7	100	0	160.7	0.0	124.7	86.4
SEP	377.9	146.2	húmedo	húmedo	231.7	100	0	146.2	0.0	231.7	159
OCT	353.2	91.8	húmedo	húmedo	261.4	100	0	91.8	0.0	261.4	210.2
NOV	209.3	129.1	húmedo	húmedo	80.2	100	0	129.1	0.0	80.2	145.2
DIC	178.9	77.6	húmedo	húmedo	101.3	100	0	77.6	0.0	101.3	123.2
TOTAL	2428.3	1509.5	húmedo								

En Samaria la precipitación anual es de 1,930.4 mm. Son 9 meses húmedos, de junio a febrero; la reserva de agua es igual a la reserva máxima de agosto a febrero; el mes en donde el excedente es mayor es octubre con 191.6 mm de los cuales 139.9 mm son para desagüe. El periodo seco es durante marzo, abril y mayo, sin embargo, es en estos dos últimos meses en donde la reserva de agua es cero, con déficit de 57.1 y 81.3 mm respectivamente (Tabla 16).

Tabla 16. Balance hídrico de la estación Samaria, municipio de Cunduacán.

MES	PREC	ETP	H/S	H/S THORN	P-ETP	R	VR	ETR	F	EX	DS
ENE	115.5	77.4	húmedo	húmedo	38.1	100	0	77.4	0.0	38.1	63.6
FEB	76.4	74.6	húmedo	húmedo	1.8	100	0	74.6	0.0	1.8	32.6
MAR	45.1	92.8	seco	seco	-47.7	52.3	-47.7	92.8	0.0	0	16.3
ABR	42.5	151.9	seco	seco	-109.4	0	-52.3	94.8	57.1	0	8.1
MAY	90.8	172.1	húmedo	seco	-81.3	0	0	90.8	81.3	0	4
JUN	205.0	165.9	húmedo	húmedo	39.1	39.1	39.1	165.9	0.0	0.0	2
JUL	180.3	165.0	húmedo	húmedo	15.3	54.4	15.3	165	0.0	0.0	1
AGO	215.1	161.5	húmedo	húmedo	53.6	100	45.6	161.5	0.0	8.0	4.5
SEP	319.1	147.1	húmedo	húmedo	172.0	100	0	147.1	0.0	172.0	88.2
OCT	326.3	134.7	húmedo	húmedo	191.6	100	0	134.7	0.0	191.6	139.9
NOV	174.7	81.4	húmedo	húmedo	93.3	100	0	81.4	0.0	93.3	116.6
DIC	139.6	78.0	húmedo	húmedo	61.6	100	0	78	0.0	61.6	89.1
TOTAL	1930.4	1502.4	húmedo								

En Villahermosa, la precipitación anual es de 1,941.4 mm y se presentan 9 meses húmedos, de los cuales cinco meses superan la reserva de agua máxima (septiembre-enero) y es en el mes de septiembre en donde el exceso de agua es mayor con 168.6 de los cuales 84.5 mm son para el desagüe. El periodo seco se presenta de marzo a mayo, con dos meses donde la reserva de agua es cero (abril-mayo), con déficit de 105.5 y 83.3 mm de agua respectivamente (Tabla 17).

Tabla 17. Balance hídrico de la estación Villahermosa, municipio Centro.

MES	PREC	ETP	H/S	H/S THORN	P-ETP	R	VR	ETR	F	EX	DS
ENE	127.6	79.2	húmedo	húmedo	48.4	100	0	79.2	0.0	48.4	65.9
FEB	78.3	77.1	húmedo	húmedo	1.2	98.8	-1.2	77.1	0.0	2.4	34.1
MAR	49.5	140.2	seco	seco	-90.7	8.1	-90.7	140.2	0.0	0	17
ABR	43.1	156.7	seco	seco	-113.6	0	-8.1	51.2	105.5	0	8.5
MAY	93.4	176.7	húmedo	seco	-83.3	0	0	93.4	83.3	0	4.2
JUN	210.0	170.6	húmedo	húmedo	39.4	39.4	39.4	170.6	0.0	0.0	2.1
JUL	176.5	171.8	húmedo	húmedo	4.7	44.1	4.7	171.8	0.0	0.0	1
AGO	214.2	167.3	húmedo	húmedo	46.9	91	46.9	167.3	0.0	0.0	0.5
SEP	329.5	151.9	húmedo	húmedo	177.6	100	9	151.9	0.0	168.6	84.5
OCT	301.4	140.0	húmedo	húmedo	161.4	100	0	140	0.0	161.4	122.9
NOV	181.2	83.3	húmedo	húmedo	97.9	100	0	83.3	0.0	97.9	110.4
DIC	138.6	79.9	húmedo	húmedo	56.7	100	0	79.9	0.0	56.7	83.5
TOTAL	1941.4	1594.7	húmedo								

En cuanto a la relación de la disponibilidad de agua y el ciclo de crecimiento de la planta de cacao para los municipios de Cárdenas, Huimanguillo, Centro, Cunduacán y seguramente Comalcalco se observa lo siguiente: durante enero y febrero algunas plantas estarán en la etapa de fructificación mientras que otras tendrán las condiciones para cosechar y la humedad en el suelo será suficiente, aunque se presentan excesos de agua en estos meses; en marzo y abril se encontrará en la etapa de madurez y algunas otras en floración que coinciden con el periodo seco donde la reserva de agua en el suelo se encontrará en reposición ya que se ha evaporado el agua en la reserva de acuerdo a los valores de la evapotranspiración real y es solamente en el mes de abril que se presenta un déficit hídrico. De acuerdo a Arbeláez (2010) durante este periodo (seco) la formación de frutos es escasa. Durante el periodo de cinco meses, de mayo a septiembre se presenta una de las cosechas, mientras que otros árboles entran en la etapa de fructificación de mayo a junio y la madurez en agosto y septiembre que se efectúa en el periodo húmedo del año; en la mayor parte de este periodo la reserva de agua se encuentra en su máxima capacidad debido a la cantidad de precipitaciones que se presentan en esta época, es durante junio y julio que el agua de la reserva comienza a reponerse. Para los últimos meses, durante octubre y noviembre algunas plantas se encontrarán en la etapa de floración mientras que de otras se puede obtener otra cosecha que se prolonga hasta febrero, mientras que en el mes de diciembre se entra a la etapa de fructificación. Si bien las precipitaciones disminuyen durante estos meses, la evapotranspiración no es suficiente y esto se refleja en el agua almacenada en el suelo y los excesos que se presentan. Enríquez (1985) menciona que se ha visto en experimentos que las abundantes floraciones acompañadas de grandes fructificaciones sólo tienen lugar durante los periodos uniformes de humedad como puede ser el caso de estos municipios ya que en sus respectivas estaciones el periodo húmedo y seco está bien definido.

La estación Tapijulapa se encuentra en la parte sur del estado y coincide con algunas elevaciones donde el clima es de tipo Af, es decir, cálido húmedo con lluvias abundantes durante todo el año.

En la estación Tapijulapa (Tabla 18) correspondiente al municipio de Tacotalpa, la precipitación anual oscila en los 3,000 mm. Se presentan 11 meses húmedos (mayo-marzo) y en la mayoría se tiene la reserva máxima de agua en el suelo, en consecuencia, se presentan excedentes de agua. Se considera abril como mes seco, no obstante se tiene reserva de agua en el suelo suficiente como para que la planta pueda satisfacer sus necesidades hídricas.

Tabla 18. Balance hídrico de la estación Tapijulapa, municipio de Tacotalpa.

MES	PREC	ETP	H/S	H/S THORN	P-ETP	R	VR	ETR	F	EX	DS
ENE	261.0	74.9	húmedo	húmedo	186.1	100	0	74.9	0.0	186.1	203.6
FEB	207.8	73.7	húmedo	húmedo	134.1	100	0	73.7	0.0	134.1	168.8
MAR	113.9	91.8	húmedo	húmedo	22.1	100	0	91.8	0.0	22.1	95.4
ABR	108.4	151.1	húmedo	seco	-42.7	57.3	-42.7	151.1	0.0	0.0	47.7
MAY	147.4	171.4	húmedo	seco	-24.0	33.3	-24	171.4	0.0	0.0	23.8
JUN	348.4	164.3	húmedo	húmedo	184.1	100	184.1	164.3	0.0	0.0	11.9
JUL	286.4	164.1	húmedo	húmedo	122.3	100	-84.1	164.1	0.0	206.4	109.1
AGO	410.5	158.9	húmedo	húmedo	251.6	100	0	158.9	0.0	251.6	180.3
SEP	531.6	143.8	húmedo	húmedo	387.8	100	0	143.8	0.0	387.8	284
OCT	452.0	91.1	húmedo	húmedo	360.9	100	0	91.1	0.0	360.9	322.4
NOV	273.1	79.7	húmedo	húmedo	193.4	100	0	79.7	0.0	193.4	257.9
DIC	260.5	75.9	húmedo	húmedo	184.6	100	0	75.9	0.0	184.6	221.2
TOTAL	3400.9	1440.7	húmedo								

Este municipio, durante los últimos años, se ha desempeñado como uno de los lugares que comienza a tener una producción y rendimiento de cacao importante, y quizá llegará a compararse con los municipios que históricamente han producido la mayor cantidad de cacao para la entidad.

En cuanto a la relación entre la planta de cacao y el agua en este municipio el panorama es el siguiente: durante los primeros dos meses del año se cumple con los requerimientos hídricos del cacao para la etapa en la que se encuentre (fructificación y cosecha); para marzo y abril la planta requiere normalmente condiciones relativamente secas para las etapas de madurez y floración, y en estos municipios solamente el mes de abril es considerado como seco, aunque se tendrá una reserva de agua importante y ésta pueda llegar a evaporarse. Para el periodo de mayo a septiembre se presentan excesos de agua que pueden repercutir sobre todo a la etapa de fructificación ya que si existe un exceso de humedad y precipitación los frutos tardan en madurar y llegan a morir. Durante octubre y noviembre las precipitaciones son mayores a la ETP, por lo tanto se mantiene el exceso de agua durante la etapa de floración y de cosecha, así como para el mes de diciembre, la

condición es igualmente húmeda y aquí también puede afectar a una de las etapas de floración. Salef (1970) citado por García y Maquín (1972) encontró la relación entre la humedad almacenada en el suelo y la etapa de floración y fructificación, indica que para humedades cercanas a la capacidad de campo del suelo existen mayor número de flores.

Aunque la literatura propone como umbral de precipitación anual entre 1,800 a 2,500 mm anuales, este municipio se encuentra en la subprovincia de la Sierra Norte de Chiapas, lo que podría ser favorable para el escurrimiento del agua en exceso. No obstante, condiciones de alta humedad y precipitación traen consigo la propagación de infecciones en los árboles que de no tener un mantenimiento adecuado pueden afectar gravemente a los árboles de cacao, así también, las inundaciones que se pueden presentar constituyen una barrera para el crecimiento inicial y establecimiento. Un factor a favor para este municipio es que se ha observado que los rendimientos anuales de cacao seco aumentan paralelamente a los aumentos de excesos de agua del suelo hasta llegar a su valor óptimo y que la producción se reduce una vez rebasado ese nivel como consecuencia del exceso de agua en el suelo y la incidencia de enfermedades. García y Maquín (1972) concluyen que las altas precipitaciones tienen efectos favorables en los rendimientos de cacao aunque, también en lugares en donde no hay ningún déficit mensual de precipitaciones los hace ideales para plantaciones bajo poca sombra.

Recordemos que el rango de precipitaciones totales anuales para el cacao propuesto por la literatura es de 1,800 – 2,500 mm y como se ha observado con el balance hídrico, este valor resulta adecuado para las condiciones climáticas del estado de Tabasco por lo que es el que se ha seleccionado para la zonificación que se presenta en el siguiente apartado.

En las estaciones que corresponden a los municipios de Emiliano Zapata, Tenosique, Macuspana y Teapa se presentan condiciones similares a las de los municipios en los que se produce cacao por lo que el ciclo de crecimiento y la relación con el agua a lo largo del año es casi el mismo que en esos lugares. Aunque en estos municipios no se produce cacao es probable que si se logra establecer plantaciones de cacao se pueden tener buenos resultados, lo anterior sólo en función al factor de disponibilidad de agua, no obstante, el uso de suelo puede ser uno de los limitantes, ya que en la mayor parte de estos municipios la superficie está ocupada por pastizal cultivado, lo que supone una actividad mayormente ganadera. Mientras que el resto de las estaciones con las que se trabajaron (excepto Centro experimental W75 y Oxolotan que se encuentran en los municipios de Cárdenas y

Tacotalpa respectivamente) presentan de 4 a 7 meses de periodo seco por lo que se pueden presentar de 3 a 4 meses con déficit hídrico.

2.7. Análisis de la radiación y temperatura

2.7.1. Análisis de la radiación

La radiación solar es importante en los cultivos bajo tres aspectos: 1) Intensidad de la luz, 2) Duración Astronómica del Día o Fotoperiodo y 3) Calidad de la luz. Debido a la ausencia de mediciones sobre la calidad de la luz, este indicador no podrá ser estimado.

2.7.2. Intensidad de la luz

De acuerdo al mapa estacional de irradiación solar global, en Tabasco, durante la primavera se recibe de 19 MJ/m² (en la parte oeste), 20 MJ/m² en la mayor parte del territorio y 21 MJ/m² en la parte limitante con Campeche (Figura 18).



Figura 18. Mapa de irradiación solar en la República Mexicana durante primavera. Fuente: Instituto de Geofísica. UNAM. http://www.geofisica.unam.mx/radiacion_solar

Durante el verano se reciben 17 y 18 MJ/m², en el centro y este 19 MJ/m² (Figura 19). Para el otoño, en la mayor parte del territorio tabasqueño se recibe 16 MJ/m², excepto en la parte sureste que se recibe 15 MJ/m² y noreste que se recibe 17 MJ/m².



Figura 19. Mapa de irradiación solar de la República Mexicana durante verano. Fuente: Instituto de Geofísica. UNAM. http://www.geofisica.unam.mx/radiacion_solar

Finalmente, para el invierno (Figura 20) la radiación solar global que se recibe es de 12 y 13 MJ/m^2 en la parte occidental y en el resto del territorio tabasqueño 14 MJ/m^2 .



Figura 20. Mapa de irradiación solar de la República Mexicana durante invierno. Fuente: Instituto de Geofísica. UNAM. http://www.geofisica.unam.mx/radiacion_solar

2.7.3. Duración astronómica del día o fotoperiodo

En la Tabla 19 se muestra el fotoperiodo N medio en horas para cada mes obtenido de Torres (1995) para la latitud 17 y 18° que corresponden a la localización de las estaciones utilizadas, donde se puede observar que la duración lumínica de abril a septiembre supera las 12 horas para ambas latitudes.

Tabla 19. Fotoperiodo medio en horas para cada mes. Latitud 17° y 18°.

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Latitud 17°	11.11	11.46	11.91	12.40	12.81	13.00	12.90	12.56	12.08	11.59	11.18	11.00
Latitud 18°	11.06	11.42	11.91	12.43	12.86	13.06	12.96	12.60	12.08	11.57	11.13	10.94

Fuente: Torres Ruíz, E. (1995)

Con base en lo propuesto por Torres (1995) el cacao (las platas tropicales en general) se produce en regiones tropicales en el que el día tiene una duración cercana a las 12 hrs por lo que se considera como una planta de fotoperiodo corto.

La duración astronómica del día es fundamental para la inducción floral (Gómez, 1988) y es menester referir este indicador en la zona en la que se realiza el estudio. De manera general se puede deducir que para la etapa en donde se identifica que la planta de cacao se encuentra en floración (marzo-abril y octubre-noviembre), la duración lumínica oscila entre 11.91 y 12.40 horas para marzo-abril y de 11.59 a 11.18 horas para octubre-noviembre para los 17° de latitud. Por otro lado, para la latitud 18° la duración astronómica del día para estos mismos periodos oscila entre 11.91 y 12.43 horas y para octubre-noviembre de 11.57 y 11.13 horas. Los cambios entre la duración lumínica de un periodo y otro así como entre latitud son menores.

Si bien el conocimiento de la influencia de la duración del día sobre el cacaotero no es amplia (Burgos y Reyes, 1965), aún hasta la fecha, son pocas las referencias del comportamiento de esta planta con relación al fotoperiodo a tal punto que las referencias de este comportamiento se enfocan al crecimiento del tronco de los árboles y al de los tallos de las plantas jóvenes y su ramificación de acuerdo a lo realizado por Hardy (1960) en Costa Rica. No obstante, es prudente considerarlo para cualquier estudio de carácter agroclimático.

2.7.4. Unidades fototérmicas

En las siguientes tablas se muestran las unidades fototérmicas de las estaciones estudiadas (Tabla 20 y Tabla 21)

Tabla 20. Unidades fototérmicas para las estaciones del paralelo 17° en Tabasco.

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Boca del Cerro	396.07	401.10	535.35	617.52	698.91	647.40	639.84	626.87	576.22	531.75	442.73	405.79
Emiliano Zapata	399.52	391.96	513.17	563.28	616.49	569.94	571.72	568.28	536.61	513.17	446.62	413.29
Francisco Rueda	378.85	367.07	492.51	536.61	599.27	553.28	554.50	554.50	523.28	492.51	496.62	392.63
Macuspana	389.18	382.63	492.51	543.28	602.72	566.61	575.16	571.72	536.61	516.62	446.62	409.85
Samaria	385.74	367.07	478.73	529.95	588.94	556.61	554.50	557.94	526.61	499.39	433.29	399.52
San Pedro	389.18	388.85	495.95	556.61	613.05	563.28	557.94	561.39	539.95	516.62	443.29	406.40
Tapijulapa	378.85	370.19	482.17	533.28	599.27	563.28	557.94	554.50	523.28	495.95	429.96	392.63
Teapa	358.19	354.63	468.40	526.61	585.50	549.95	551.06	547.61	513.28	485.62	416.63	375.41
Villahermosa	402.96	388.85	506.28	549.95	609.61	576.61	582.05	582.05	546.61	520.06	453.29	416.74
El Triunfo	413.29	404.40	506.28	546.61	602.72	559.94	568.28	568.28	546.61	530.39	459.95	420.18
Oxolotan	378.85	370.19	478.73	536.61	595.83	553.28	554.50	557.94	523.28	492.51	423.29	389.18
PROMEDIO	388.24	380.63	495.46	549.12	610.21	569.11	569.77	568.28	535.67	508.60	444.75	401.96

Tabla 21. Unidades fototérmicas para las estaciones del paralelo 18° en Tabasco.

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Centro experimental W75	366.9	367.7	509.5	607.8	693.7	658.2	650.9	632.8	569.0	512.9	420.7	383.2
Cárdenas	373.7	362.3	480.0	534.2	582.9	613.8	548.6	548.6	514.3	490.3	421.4	384.0
Jonuta	394.3	387.1	497.1	547.5	606.9	560.7	565.7	572.6	540.8	517.7	447.9	421.7
Paraíso	373.7	365.4	483.4	527.6	589.7	557.4	565.7	565.7	524.2	507.4	438.0	390.9
Tres Brazos	384.0	371.6	476.6	524.2	576.0	537.5	548.6	552.0	520.9	497.1	434.7	404.6
PROMEDIO	378.52	370.84	489.33	548.26	609.82	585.55	575.89	574.33	533.85	505.10	432.53	396.88

Los municipios productores de cacao; Huimanguillo, Cunduacán, Comalcalco y Tacotalpa (en el paralelo 17°), además de Cárdenas (en el paralelo 18°) y sus respectivas estaciones, es decir, las estaciones de Francisco Rueda y Samaria para Huimanguillo y Cunduacán respectivamente y las estaciones Centro experimental W75 y Cárdenas para el municipio del mismo nombre, se tomaron como referencia para determinar las unidades fototérmicas del cacao por etapa fenológica y para el periodo de crecimiento desde la floración hasta la madurez del fruto. Se presentan los resultados en dos tablas que corresponden a la primera y segunda cosecha (Tabla 22 y Tabla 23).

Tabla 22. Unidades fototérmicas del cacao, periodo de la primer cosecha.

Etapa fenológica	Floración	Fructificación	Madurez	Ciclo
Estación / Periodo	octubre-noviembre	diciembre-febrero	marzo-abril	Vegetativo
Centro Experimental W75	933.6	1117.8	1117.3	3168.8
Cárdenas	911.7	1120.0	1014.2	3045.9
Francisco Rueda	989.1	1138.6	1029.1	3156.8
Samaria	932.6	1152.3	1008.7	3093.6
PROMEDIO	941.8	1132.2	1042.3	3116.3

Tabla 23. Unidades fototérmicas del cacao, periodo de la segunda cosecha.

Etapa fenológica	Floración	Fructificación	Madurez	Ciclo
Estación / Periodo	marzo-abril	mayo-julio	agosto-septiembre	Vegetativo
Centro Experimental W75	1117.3	2002.7	1201.7	4321.8
Cárdenas	1014.2	1745.3	1062.9	3822.3
Francisco Rueda	1029.1	1707.1	1077.8	3814.0
Samaria	1008.7	1700.1	1084.6	3793.3
PROMEDIO	1042.3	1788.8	1106.7	3937.8

Durante el periodo de octubre y noviembre las unidades fototérmicas oscilan entre 911.7 y 989.1 con un promedio de 941.8 u.f., con una duración del día entre las 11.13 a 11.59 hrs; en este periodo las plantas de cacao se encuentran en las etapas de floración y cosecha y es precisamente la etapa de floración la que resulta interesante relacionar con las unidades fototérmicas. El otro periodo del año donde la planta se encuentra en la etapa de floración es durante marzo y abril donde las unidades fototérmicas en este periodo van de 1,008.7 a 1,117.3, con un promedio de 1,042.3 u.f., se puede observar que los valores aumentan con respecto al periodo octubre-noviembre, esto se debe a la duración del día que oscila en 11.91 a 12.43 hrs.

En diciembre hasta febrero se forman los frutos correspondientes a la primera cosecha mientras que las plantas que presentaban mayor floración en marzo y abril son las que se cosechan en diciembre y febrero. Para este periodo las unidades fototérmicas van de 1,117.8 a 1,152.3 con un promedio de 1,132.2 u.f., la duración del día para estos tres meses oscila entre las 10.94 y 11.46 horas. El otro periodo del año donde la planta de cacao tiene formación de frutos va de mayo a julio donde la cantidad de unidades fototérmicas es mayor esto debido a que la duración del día va de las 12.81 a las 13.06 horas y por otro lado, las temperaturas son mayores durante esta época del año, no obstante las unidades fototérmicas se encuentran por encima de mil y no bajo este valor para ambas épocas del año donde se presenta esta etapa (diciembre-febrero y mayo-julio), esto nos da pauta para definir el rango mínimo de unidades fototérmicas necesarias para esta etapa.

Para la etapa de madurez que se presenta durante marzo y abril para la primera cosecha donde las unidades fototérmicas en este periodo van de 1,008.7 a 1,117.3, con un promedio de 1,042.3 u.f. con una duración del día de 11.91 a 12.43 hrs. El otro periodo en el año donde la planta de cacao se encuentra en la etapa de madurez del fruto es durante agosto y septiembre donde las unidades fototérmicas van de 1,062.9 a 1,201.7 con un promedio de 1,106.7 u.f.

Ahora bien, es posible visualizar en las tablas anteriores las unidades fototérmicas totales para que el cacao complete su ciclo reproductivo, desde la formación de flores hasta la madurez del fruto. Para las plantas que comienzan a formar sus flores a partir de octubre y noviembre y termina su ciclo en el mes de abril para que después se puedan cosechar sus frutos durante los siguientes cinco meses. La suma de unidades fototérmicas de octubre a abril para los municipios de referencia corresponden al rango de 3,045.9 a 3,168.8, en promedio 3,116.3 u.f. La segunda época del año donde se presenta la floración es durante

marzo y abril; termina el ciclo en septiembre para cosechar durante los siguientes cinco meses; para este periodo la suma de las unidades fototérmicas va de 3,822.3 a 4,321.8 con un promedio de 3,937.8 unidades fototérmicas.

Con lo anterior se puede deducir que las unidades fototérmicas que necesita la planta de cacao desde la floración hasta la madurez del fruto se encuentran por encima de los 3,000 hasta las 4,321 unidades fototérmicas, este valor depende del periodo del año en el que se presenten estas etapas. En el punto titulado unidades calor se presenta este indicador para la planta de cacao donde se hacen evidentes la sumatoria de temperaturas necesarias para cada etapa y la constante térmica desde la floración hasta que los frutos maduran.

2.8. Análisis de las temperaturas

Como se ha dicho anteriormente, la temperatura es un elemento importante para el crecimiento, desarrollo y rendimiento de todas las plantas. El crecimiento y desarrollo del cacao depende en gran medida de la temperatura porque influye en dos etapas clave: la floración y el desarrollo del fruto. La etapa de floración es de suma importancia para la producción y rendimiento del cacao ya que cada flor que se presenta en la planta de cacao es un fruto potencial que puede ser cosechado. En cuanto a la madurez, si se presentan temperaturas altas además de poca humedad y poca cantidad de lluvias, los “chilillos” tienen una maduración temprana, se pueden observar como chilillos secos y maduros (Figura 21). Algunos autores han demostrado que el crecimiento y maduración de los frutos se logra con mayor rapidez con temperaturas máximas de 32°C que con 28°C. Los valores de temperaturas máximas y mínimas mensuales y promedio, así como otras variables, se pueden consultar en el Anexo 2. Para una floración abundante y una buena fructificación la temperatura no debe descender de 22°C (Burgos y Reyes, 1965), aunque algunos autores sugieren que bajo los 25°C no se forman flores (Moscol y Espinoza, 2012).



Figura 21. Madurez temprana del fruto de cacao causado por factores ambientales. Foto tomada por Eduardo Pérez S.

La literatura propone rangos de temperatura óptima para el desarrollo del cacao de entre 20 a 30°C en promedio, sin embargo, es un rango amplio y son 25.5°C el valor que más se repite de acuerdo a varios autores, incluyendo lo recomendado por el INIFAP. No obstante, la temperatura promedio de Tabasco oscila en los 26°C por lo que se prefirió utilizar como temperatura óptima el promedio de las temperaturas de las estaciones correspondientes a los municipios que históricamente han producido cacao, estos son Huimanguillo, Cárdenas y Cunduacán, de tal manera que, el rango de temperatura óptima para el desarrollo de cacao en Tabasco es de 26.4°C a 26.7°C

A continuación se presenta un análisis de las temperaturas (Tabla 24) y las etapas fenológicas del cacao por estación meteorológica en Tabasco, principalmente en las estaciones que corresponden a los municipios productores de cacao, enfatizando en las etapas de floración y madurez.

Tabla 24. Temperaturas mensuales de las estaciones meteorológicas de Tabasco.

NOMBRE	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	T. ANUAL
Boca del Cerro	27004	23.5	24.5	26.5	28.6	29.6	28.6	28.0	28.1	27.9	26.8	25.2	23.9	26.8
Cent Exp W75	27007	22.7	23.5	25.8	28.3	29.4	28.8	28.2	28.2	27.7	26.3	24.6	23.3	26.4
Cárdenas	27008	22.9	23.7	26.0	28.1	29.0	30.5	28.0	28.0	27.5	26.3	24.7	23.2	26.5
Emiliano Zapata	27012	23.6	24.6	26.9	28.9	29.9	29.1	28.6	28.5	28.1	26.9	25.4	24.0	27.0
Francisco Rueda	27015	23.0	23.8	26.3	28.1	29.4	28.6	28.1	28.1	27.7	26.3	26.9	23.4	26.7
Jonuta	27028	23.5	24.5	26.5	28.5	29.7	28.9	28.5	28.7	28.3	27.1	25.5	24.3	27.0
Macuspana (DGE)	27030	23.3	24.3	26.3	28.3	29.5	29.0	28.7	28.6	28.1	27.0	25.4	23.9	26.8
Paraiso	27034	22.9	23.8	26.1	27.9	29.2	28.8	28.5	28.5	27.8	26.8	25.2	23.4	26.6
Samaria	27039	23.2	23.8	25.9	27.9	29.1	28.7	28.1	28.2	27.8	26.5	25.0	23.6	26.5
San Pedro	27040	23.3	24.5	26.4	28.7	29.8	28.9	28.2	28.3	28.2	27.0	25.3	23.8	26.9
Tapajulapa	27042	23.0	23.9	26.0	28.0	29.4	28.9	28.2	28.1	27.7	26.4	24.9	23.4	26.5
Teapa (DGE)	27044	22.4	23.4	25.6	27.8	29.0	28.5	28.0	27.9	27.4	26.1	24.5	22.9	26.1
Tres Brazos	27050	23.2	24.0	25.9	27.8	28.8	28.2	28.0	28.1	27.7	26.5	25.1	23.8	26.4
Villahermosa (DGE)	27054	23.7	24.5	26.7	28.5	29.7	29.3	28.9	28.9	28.4	27.1	25.6	24.1	27.1
El Triunfo	27059	24.0	25.0	26.7	28.4	29.5	28.8	28.5	28.5	28.4	27.4	25.8	24.2	27.1
Oxolotan	27070	23.0	23.9	25.9	28.1	29.3	28.6	28.1	28.2	27.7	26.3	24.7	23.3	26.4

Las dos estaciones que se describen a continuación pertenecen al municipio de Cárdenas. En la estación Centro experimental W75 la temperatura promedio anual es de 26.4°C. Para los meses de marzo y abril las temperaturas son de 25.8 a 28.3, con un promedio de 27.1°C este valor supera ligeramente el rango óptimo de temperatura para la floración, sin embargo, hay que recordar que la temperatura tiene una relación directa con la floración: el número de flores aumenta a medida que aumenta la temperatura (Leal *et al.*, 1999). Para octubre y noviembre donde se presenta también la etapa de floración las temperaturas son de 26.3 y 24.6°C respectivamente con un promedio de 25.5°C con este valor el comportamiento de la floración es normal. En agosto y septiembre las temperaturas son de 28.2 y 27.7°C, con un promedio de 28°C, en ambos periodos donde se presenta la etapa de madurez, las temperaturas están por encima de los 22.8°C donde, presuntamente por debajo de este valor la cantidad de mazorcas de cacao pueden disminuir.

Las estaciones Francisco Rueda (perteneciente al municipio de Huimanguillo) y Samaria (del municipio de Cunduacán) corresponden a municipios que ha producido cacao durante años, por lo que la descripción de las variables son de importancia para usarlas como referencia.

En la estación Francisco Rueda la temperatura promedio anual es de 26.7°C; en los meses de marzo y abril, las temperaturas son de 23 y 23.8°C respectivamente, con un promedio de 27.2°C el cual supera ligeramente al valor óptimo de temperatura para la floración; para octubre y noviembre las temperaturas son de 26.3 y 26.9°C, con un promedio de 26.6°C, es decir, en este periodo la floración tendrá un comportamiento por encima de lo normal. Para los meses de agosto y septiembre, donde se presenta la etapa de madurez se tienen temperaturas de 28.1 y 27.7°C, con un promedio de 27.9°C. En ambos periodos de madurez

(marzo-abril y agosto septiembre) la temperatura supera el rango que es considerado como perjudicial para esta etapa.

En Samaria, la temperatura promedio anual es de 26.5°C; para los meses de marzo y abril las temperaturas son de 25.9 y 27.9°C, con un promedio de 26.9°C donde la floración tendrá un comportamiento por encima de lo normal; en los meses de octubre y noviembre donde se presenta también la etapa de floración, las temperaturas son de 26.5 y 25°C, con un promedio de 25.8°C, por lo que las flores se formaran normalmente. Para los meses agosto y septiembre también se presenta la etapa de madurez, en estos meses las temperaturas son de 28.2 y 27.8°C respectivamente, con un promedio de 28°C. En ambos periodos de madurez (marzo-abril y agosto septiembre) la temperatura supera el rango que es considerado como perjudicial para esta etapa.

La estación Tapijulapa pertenece al municipio de Tacotalpa, el cual, está convirtiéndose en productor de cacao en los últimos años por lo que es conveniente apreciar el comportamiento de las variables climáticas en este lugar.

En Tapijulapa la temperatura promedio anual es de 26.5°C; en los meses de marzo y abril las temperaturas son de 26 y 28°C con un promedio de 27°C lo que demuestra que la floración tendrá un comportamiento óptimo. Durante octubre y noviembre donde también se presenta la etapa de floración, las temperaturas son de 26.4 y 24.9°C con un promedio de 25.7°C, en este periodo la etapa de floración será normal. Para los meses de agosto y septiembre las temperaturas son de 28.1 y 27.7°C con un promedio de 27.9°C. En ambos periodos de madurez (marzo-abril y agosto septiembre) la temperatura supera el rango que es considerado como perjudicial para esta etapa.

Por último, para Villahermosa la temperatura promedio anual es de 27.1°C. Durante los meses de marzo y abril las temperaturas son de 26.7 y 28.5°C con un promedio de 27.6°C, este valor supera el valor óptimo para la floración. En los meses de octubre y noviembre las temperaturas son de 27.1 y 25.6°C con un promedio de 26.4°C; la floración en este periodo tendría un comportamiento superior al óptimo. Para agosto y septiembre las temperaturas son de 28.9 y 28.4°C con un promedio de 28.7°C. En ambos periodos de madurez (marzo-abril y agosto septiembre) la temperatura supera el rango que es considerado como perjudicial para esta etapa.

Se tomaron en cuenta los valores de temperatura de las estaciones que se encuentran en los municipios de Huimanguillo y Cárdenas, con los que se obtuvieron los rangos de temperatura para ambos periodos de cosecha a lo largo del año donde se presentan las etapas de floración y madurez. Estos serán los valores de temperatura promedio mensual de referencia donde las etapas de floración y madurez tendrían un comportamiento óptimo, esto adaptado a las condiciones climáticas del estado de Tabasco (Tabla 25).

Tabla 25. Rangos de temperatura para las etapas de floración y madurez del fruto de cacao en Tabasco.

Etapa fenológica	Floración	Madurez
Temperatura promedio (°C)	25.5 - 27.2	26.9 - 28

Si se considera sólo la variable de temperatura y su relación con las etapas de floración y madurez del fruto de cacao, los municipios con condiciones óptimas de temperatura para ambas etapas, es decir, estaciones cuyos valores de temperatura se encuentran dentro del rango de condiciones óptimas de acuerdo a las estaciones de referencia de los municipios productores de cacao serán: Paraíso, Tacotalpa y Centla. Lo anterior no significa que el rendimiento y la producción serían las adecuadas en estos municipios ya que, únicamente se está tomando en cuenta la temperatura y su relación con dos de las etapas fenológicas fundamentales del cacao, sin embargo, es un buen acercamiento para la zonificación del cacao, la cual se abordará con detalle en el siguiente apartado.

2.8.1. Unidades calor

Para realizar el cálculo es necesario conocer el cero fisiológico de la planta de cacao. Se tomó como referencia a los árboles frutales cuyo cero vital es de 12°C (Campos, 2005) para determinar el cero vital del cacao. Una vez que se obtienen los valores de las unidades calor (Tabla 26) es necesario relacionarlas con cada etapa del cacao (Torres, 1995).

Tabla 26. Unidades calor mensuales para 16 estaciones meteorológicas de Tabasco (sobre 12°C).

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Boca del cerro	356.5	350.0	449.5	498.0	545.6	498.0	496.0	499.1	477.0	458.8	396.0	368.9	5393.4
Centro Experimental W75	331.7	322.0	427.8	489.0	539.4	504.0	502.2	502.2	471.0	443.3	378.0	350.3	5260.9
Cárdenas	337.9	327.6	434.0	483.0	527.0	555.0	496.0	496.0	465.0	443.3	381.0	347.2	5293.0
Emiliano Zapata	359.6	352.8	461.9	507.0	554.9	513.0	514.6	511.5	483.0	461.9	402.0	372.0	5494.2
Francisco Rueda	341.0	330.4	443.3	483.0	539.4	498.0	499.1	499.1	471.0	443.3	447.0	353.4	5348.0
Jonuta	356.5	350.0	449.5	495.0	548.7	507.0	511.5	517.7	489.0	468.1	405.0	381.3	5479.3
Macuspana	350.3	344.4	443.3	489.0	542.5	510.0	517.7	514.6	483.0	465.0	402.0	368.9	5430.7
Paraiso	337.9	330.4	437.1	477.0	533.2	504.0	511.5	511.5	474.0	458.8	396.0	353.4	5324.8
Samaria	347.2	330.4	430.9	477.0	530.1	501.0	499.1	502.2	474.0	449.5	390.0	359.6	5291.0
San Pedro	350.3	350.0	446.4	501.0	551.8	507.0	502.2	505.3	486.0	465.0	399.0	365.8	5429.8
Tapijulapa	341.0	333.2	434.0	480.0	539.4	507.0	502.2	499.1	471.0	446.4	387.0	353.4	5293.7
Teapa	322.4	319.2	421.6	474.0	527.0	495.0	496.0	492.9	462.0	437.1	375.0	337.9	5160.1
Tres Brazos	347.2	336.0	430.9	474.0	520.8	486.0	496.0	499.1	471.0	449.5	393.0	365.8	5269.3
Villahermosa	362.7	350.0	455.7	495.0	548.7	519.0	523.9	523.9	492.0	468.1	408.0	375.1	5522.1
El Triunfo	372.0	364.0	455.7	492.0	542.5	504.0	511.5	511.5	492.0	477.4	414.0	378.2	5514.8
Oxolotan	341.0	333.2	430.9	483.0	536.3	498.0	499.1	502.2	471.0	443.3	381.0	350.3	5269.3

Para obtener los valores de la constante térmica para el cacao se tomaron los valores de las unidades calor de las estaciones de los municipios que producen cacao, estas son: Centro experimental W75 y Cárdenas para el municipio homónimo, además de Francisco Rueda y Samaria para el municipio de Huimanguillo para después relacionarlas con cada una de las etapas fenológicas de cacao en un año, esto en principio y posteriormente enfocado en la transición donde se inicia la fructificación del fruto del cacao hasta la madurez del mismo.

Debido a la naturaleza propia del cacao pueden estar presentes en un mismo árbol varias de las etapas fenológicas del cacao, es decir, un árbol tiene floración, formación de frutos y frutos maduros en un mismo momento. De acuerdo a los resultados obtenidos en el trabajo de campo, los productores de cacao identifican dos picos de cosechas, mismas que coinciden con lo propuesto en la literatura. Son los mismos productores los que tienen el conocimiento para señalar las épocas del año donde la mayoría de las plantas de sus cacaotales se encuentran en cierta etapa de crecimiento, y es precisamente con esta información con la que se construyó el calendario que se ha presentado en puntos anteriores. Con esta información se abordará la cantidad de unidades calor que necesita el cacao por etapa fenológica, dividiéndola en dos periodos de tiempo: la primera cosecha y la segunda cosecha para las estaciones que se encuentran en los municipios productores de cacao en Tabasco (Tabla 27 y Tabla 28).

Tabla 27. Unidades calor y Constante térmica del cacao, periodo de la primera cosecha.

Etapa fenológica	Floración	Fructificación	Madurez	
Estación / Periodo	octubre-noviembre	diciembre-febrero	marzo-abril	Constante Térmica
Centro Experimental W75	821.3	1004.0	916.8	2742.1
Cárdenas	824.3	1012.7	917.0	2754.0
Francisco Rueda	890.3	1024.8	926.3	2841.4
Samaria	839.5	1037.2	907.9	2784.6
PROMEDIO	843.9	1019.7	917.0	2780.5

Como se puede observar, el rango necesario para la etapa de floración está entre 821.3 y 890.3°C, en promedio 843.9; se necesitan entre 1,004 y 1,037.2°C para la etapa donde se forman los frutos del cacao, en promedio 1,019.7; la cantidad de unidades calor necesarias para la etapa de madurez se encuentra entre 907.9 y 926.3°C, con un promedio de 917°C. La constante térmica del cacao durante el periodo de la primera cosecha está entre 2,742.1 y 2,841.4°C, en promedio se necesitan 2,780.5°C para que el cacao cumpla con su ciclo desde la floración hasta la madurez del fruto.

Tabla 28. Unidades calor y Constante térmica del cacao, periodo de la segunda cosecha.

Etapa fenológica	Floración	Fructificación	Madurez	
Estación / Periodo	marzo-abril	mayo-julio	agosto-septiembre	Constante Térmica
Centro Experimental W75	916.8	1545.6	973.2	3435.6
Cárdenas	917.0	1578.0	961.0	3456.0
Francisco Rueda	926.3	1536.5	970.1	3432.9
Samaria	907.9	1530.2	976.2	3414.3
PROMEDIO	917.0	1547.6	970.1	3434.7

Para el periodo de la segunda cosecha, durante la etapa de floración se necesitan entre 907.9 y 926.3°C, en promedio 917°C; para la etapa de fructificación de 1,530.2 a 1,578°C, mientras que para la etapa de madurez del fruto de 961 a 976.2°C. La constante térmica del cacao en este periodo de segunda cosecha es de 3,414.3 a 3,456°C, en promedio 3,434.7°C para que el cacao cumpla con su ciclo reproductivo desde la floración hasta la madurez.

Se puede apreciar en ambos casos, independientemente del periodo en el que se encuentre (primera o segunda cosecha), es en la etapa de la fructificación donde la planta de cacao necesita de entre 1,000 y poco más de 1,500°C, en cambio, para la floración y madurez del fruto la demanda de unidades calor se encuentra entre los 800 y casi los 1,000°C por lo que se deduce que, si las temperaturas diarias o mensuales se encuentran por debajo de lo normal y se prolonga por varios meses es probable que la planta no alcance su valor óptimo de unidades calor que necesita para cierta etapa, por el contrario, si las temperaturas son

cercanas a los 30°C y se mantienen constantes, habría un exceso de energía para la planta. Habría que estudiar los efectos de éste en la planta de cacao.

2.8.2. Termoperiodismo

En este apartado se hace referencia al termoperiodo anual y a las oscilaciones térmicas a nivel mensual y su relación con el crecimiento y desarrollo del cacao.

Como señalan adecuadamente Burgos y Reyes (1965) “el hecho de que el cacao sea una especie de origen y de cultivo intertropicales, demuestra su particular adaptación a variaciones anuales de temperaturas muy pequeñas” quizá por esta razón aún a la fecha no existen trabajos en los que se trate de establecer la relación entre el termoperiodo y el ciclo de crecimiento y desarrollo del cacao, salvo un estudio realizado en donde se señala el efecto del termoperiodo diario por lo menos en los fenómenos de brotación de las yemas y de las hojas, para lo anterior, los autores tomaron en cuenta que son las elevadas temperaturas diarias y la gran amplitud de la temperatura las que determinan la brotación excesiva y el debilitamiento de los árboles, al mismo tiempo, estos valores representan un importante factor en el crecimiento y maduración de los frutos. Así mismo, no fueron tomados en cuenta los valores de la termofase negativa del cacao ya que no reviste la misma importancia que la termofase positiva.

Aunque también se necesita tomar en cuenta que no solo las variables ambientales determinan el ritmo de crecimiento y desarrollo de la planta, o su cambio de una fase o etapa a otra; existen factores endógenos que inciden en el crecimiento y desarrollo de la misma.

Dentro de los factores internos que controlan la floración se tiene que esta fase reproductiva obedece a estímulos químicos, pero la edad, los anillamientos o daños de la corteza también inciden en la floración. La variación de la floración tiene un aumento proporcional en forma directa con la edad de la planta, en regiones donde hay variaciones altas de periodos de invierno y verano, las fluctuaciones de la floración son más pronunciadas en las plantas adultas que las jóvenes (INFOCAFES, s.f.).

Los valores anteriores se utilizaron como referencia para identificar qué tipo de termoperiodo y termofase positiva correspondía a la planta de cacao en el estado de Tabasco, con lo cual, se obtuvo lo siguiente (Tabla 29): si se consideran las 16 estaciones, el valor promedio de la temperatura del mes más cálido (mayo) es de 29.5°C; la temperatura

máxima del mes más cálido es de 35.4°C lo cual nos indica una termofase positiva diaria cálida para Tabasco, mientras que la amplitud media diaria del mes más caliente es de 4.8°C, lo que indica que el termoperiodo diario tiene una amplitud pequeña.

Ahora bien, bajo este tenor y para el caso de los municipios productores de cacao se presenta lo siguiente: la temperatura promedio del mes más caliente es de 29.6°C, la temperatura máxima del mes más caliente es de 35.1°C, es decir, la termofase positiva diaria es cálida, mientras que la amplitud media diaria del mes más cálido es de 5.5°C, esto nos indica que el termoperiodo diario tiene una amplitud pequeña para estos municipios.

Tabla 29. Temperaturas promedio y máxima del mes más cálido; temperaturas promedio y mínimas del mes más frío en Tabasco.

NOMBRE	Temperatura promedio del mes más cálido	Temperatura máxima promedio del mes más cálido	Temperatura promedio del mes más frío	Temperatura mínima promedio del mes más frío
Boca del Cerro	29.6	35.7	23.5	18.7
Cent Exp W75	29.4	36.2	22.7	17.9
Cárdenas	30.5	34.2	22.9	18.2
Emiliano Zapata	29.9	36.1	23.6	18.9
Francisco Rueda	29.4	36.1	23.0	18.6
Jonuta	29.7	36.0	23.5	18.5
Macuspana (DGE)	29.5	34.9	23.3	18.1
Paraiso	29.2	34.9	22.9	18.5
Samaria	29.1	34.1	23.2	18.5
San Pedro	29.8	36.7	23.3	17.9
Tapijulapa	29.4	35.3	23.0	18.4
Teapa (DGE)	29.0	35.0	22.4	17.9
Tres Brazos	28.8	34.7	23.2	18.6
Villahermosa (DGE)	29.7	35.1	23.7	19.3
El Triunfo	29.5	36.2	24.0	18.4
Oxolotan	29.3	35.3	23.0	18.3
PROMEDIO	29.5	35.4	23.2	18.4

De manera general, la termofase positiva es cálida en el territorio tabasqueño, mientras que el termoperiodo tiene una amplitud pequeña.

Burgos y Reyes (1965) señalan que la variación diaria de la temperatura de 9°C es la más conveniente para la floración y fructificación del cacaotero, sobre todo si las temperaturas mínimas no descienden por debajo de 22°C. Rojas y Sacristán (2013) mencionan que las variaciones mayores a los 9°C entre el día y la noche afectan la polinización y la formación de los frutos.

2.9. Zonificación agroclimática del cacao en Tabasco

Se realizó la zonificación actual potencial del cacao en el estado de Tabasco tomando en cuenta variables ambientales, edáficas y de uso del suelo. A cada variable ocupada se le asignó un peso de acuerdo a la influencia que tiene sobre el cacao. Dado que se trata en sí de una zonificación agroclimática se le dio mayor peso a las variables climáticas, aunque se tomó en cuenta la profundidad del suelo y el uso del suelo en la entidad. En el Anexo 3

se muestran los mapas correspondientes a las variables utilizadas para la zonificación del cacao.

Los rangos de las variables que se utilizaron para definir la aptitud para el cacao se tomaron de las fuentes bibliográficas, adaptándolos a las condiciones climáticas propias del estado. Los valores se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30. Rangos de los valores utilizados para la zonificación del cacao.

Clasificación	Temperatura anual (°C)	Precipitación anual (mm)	Evapotranspiración potencial (mm)	Profundidad (cm)
Apto con restricciones de suelo (1)	25	1,562 – 1,799	1,100 – 1,264	<50
Apto con restricciones (2)	27	2,501 – 3,575	1,264 – 1,429	51 – 78
Muy Apto (3)	26	1,800 – 2,500	1,429 – 1,594	79 – 134

Como se ha reportado anteriormente, el estado de Tabasco tiene pocas variaciones de carácter climático como lo son la temperatura media anual o los rangos de precipitación acumulada en el año, así también en el aspecto edáfico predomina el tipo de suelo gleysol. Lo anterior condiciona las áreas con potencial óptimo para el cacao. Como se muestra en la Figura 22, la mayor parte del territorio tiene aptitud para el cacao, no obstante, el área con mayor aptitud y que cumple con los rangos antes mencionados corresponde a 446,815.25 hectáreas que se encuentran distribuidas en la mayoría de los municipios, concentrándose en el centro del estado. El área de potencial apto con algunas restricciones es el que presenta una mayor cobertura en el estado, corresponden a 1,248,279 hectáreas. Se puede observar que los municipios productores de cacao tienen una mayor superficie de potencial apto con restricciones que un potencial muy apto, a excepción del municipio de Cunduacán. La superficie con aptitud para el cacao pero con restricciones del tipo de suelo y su uso se concentra en su mayoría en el municipio de Centla y hacia el norte de la entidad.

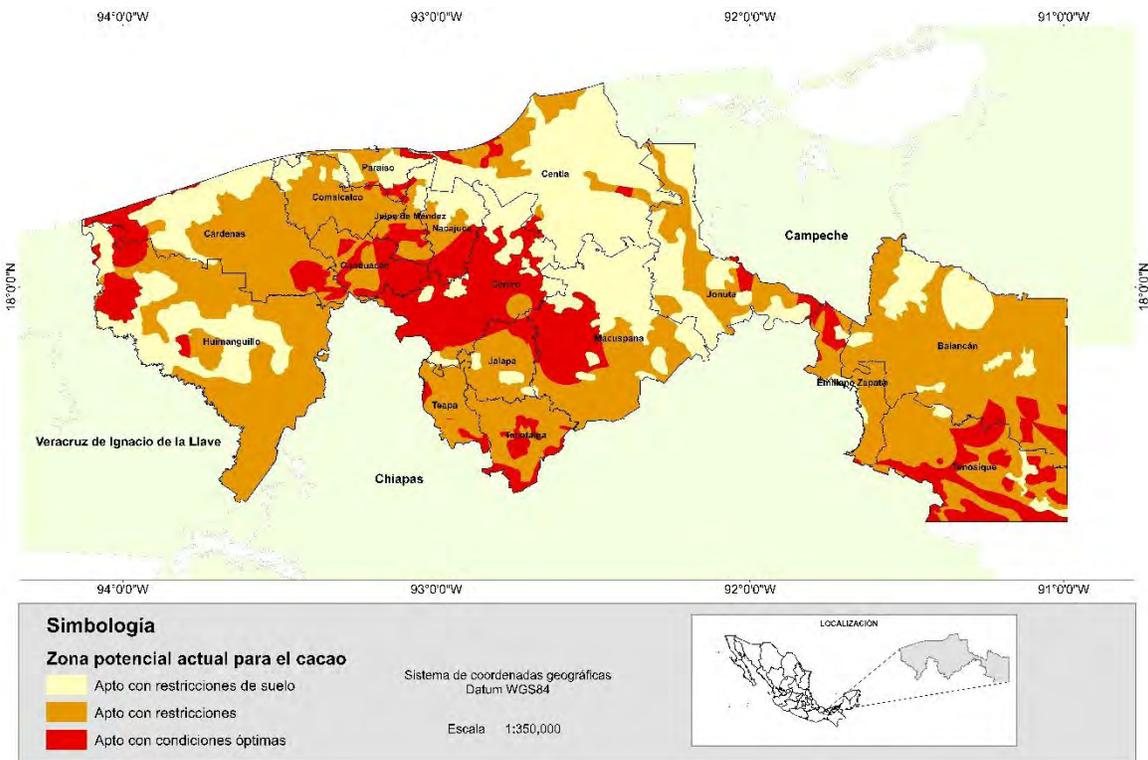


Figura 22. Zonificación actual potencial del cacao en Tabasco. Elaboración propia.

En el apartado donde se analizaron los elementos y factores que influyen en el crecimiento y desarrollo del cacao se adelantaron algunos resultados donde se evidenciaban los municipios que tendrían una aptitud favorable para el cacao. Con la zonificación realizada ahora, se pueden comparar esos resultados.

En los municipios de Cárdenas, Emiliano Zapata, Huimanguillo, Centro y Cunduacán los requerimientos hídricos, en función con la fenología de la planta, coinciden normalmente, donde los excedentes de agua no afectarían a las plantaciones de cacao ya que el periodo húmedo y seco del año está bien definido en estos lugares, a excepción de presentarse anomalías climáticas o eventos extremos. En cuanto a la temperatura, el valor óptimo es de 26°C en las zonas de aptitud. Causa especial atención que, de todos los municipios, sea el del Centro el que presenta una superficie mayor en cuanto a aptitud para el cacao, esto se debe a que cumple con las condiciones ambientales y de profundidad de suelo para el cacao, no obstante, la mayor parte del uso del suelo en el Centro es destinada a los pastizales cultivados los que se emplean de manera excesiva para la ganadería por lo que parece difícil poder establecer plantaciones de cacao en este municipio dadas las condiciones alteradas de la vegetación además de una probable extensión de las zona urbana.

Otro aspecto a resaltar es la superficie baja de aptitud óptima para el cacao que resultó de la zonificación en los municipios productores de cacao (a excepción de Cunduacán); los lugares que presentaron la mejor aptitud coinciden con un uso de suelo destinado a la agricultura de temporal y en las zonas donde se encuentra algún tipo de selva (al oeste de los municipios de Huimanguillo y Cárdenas), a excepción de Comalcalco donde la superficie con la más alta aptitud resultó en los límites con el municipio de Paraíso. No obstante, la mayor parte de la superficie de estos municipios tiene aptitud para las plantaciones con algunas restricciones o factores a tomar en cuenta, como un exceso de precipitaciones, suelos de mediana profundidad y temperaturas alrededor de 27°C. Aun así, con factores que pueden amenazar la producción de cacao en los estos municipios, son éstos los que aportan las mayores producciones de cacao en la entidad.

En los municipios de Jalpa de Méndez y Nacajuca existe aptitud para el cacao, en la parte sur y centro de los municipios, donde el uso del suelo es destinado a la agricultura de temporal y pastizal cultivado, sin embargo, estos municipios tienen actividades económicas como la extracción de petróleo, extracción forestal o la ganadería. En Jonuta también se muestra una superficie apta para el cacao, pero las temperaturas, el tipo de suelo, aunado a excesos de humedad pueden ser factores limitantes para el cacao.

Ahora bien, los municipios que cumplen con la mayoría de las condiciones óptimas para la zona potencial del cacao son Tenosique, Macuspana y Tacotalpa.

En Tenosique, la superficie que se considera con condiciones óptimas para el cacao se distribuye en el sur del municipio, que coinciden con el uso del suelo destinado para la agricultura, algunas zonas de pastizal cultivado y principalmente con algún tipo de selva, mientras que en Macuspana la zonas con aptitud para el cacao se localizan al sur del municipio donde el uso del suelo es para pastizal cultivado. Para ambos municipios, se presentan condiciones similares en cuanto a la disponibilidad de agua a las de los municipios donde se produce cacao, por lo que el ciclo de crecimiento tendría un comportamiento parecido al cultivo de la planta en esos lugares. La temperatura media anual oscila alrededor de los 26°C y temperaturas promedio mensuales que favorecen algunas etapas fenológicas del cacao.

El uso del suelo en Tacotalpa se compone de pastizal cultivado y selvas, y es uno de los municipios con una presencia forestal importante en el estado, no obstante, predomina la actividad pecuaria en este municipio. Prácticamente la mayor parte del municipio tiene

aptitud para el cacao, en algunas zonas con ciertas consideraciones a tomar en cuenta, principalmente por exceso de agua. En cuanto al comportamiento fenológico y su relación con las variables climáticas, estas sólo tendrían el inconveniente antes mencionado (exceso de agua) ya que cuenta con las temperaturas óptimas para la floración y madurez. Las zonas donde se tiene mayor aptitud coinciden donde se encuentran las selvas, en el límite con Chiapas. Es conocido que actualmente este municipio empieza a contribuir con la producción de cacao. Quizá pueden comenzar a replantearse la idea de establecer plantaciones de cacao (tal vez en sistemas agroforestales) ya que cuentan con dos factores importantes para obtener buenas producciones bajo un manejo adecuado de la plantación; elementos climáticos favorables y que se encuentran zonas del hábitat original del cacao.

Por otra parte, con la zonificación realizada por la SAGARPA-INIFAP en 2012, las áreas con aptitud se distribuyen de la siguiente manera: los municipios con una mayor superficie con potencial productivo son Cárdenas, Comalcalco, Cunduacan, Huimanguillo, Jalpa de Méndez, Nacajuca, Paraíso, Centro y en algunas zonas de Macuspana, Jonuta, Balancán, Emiliano Zapata y Tenosique, mientras que Huimanguillo, Teapa, Tacotalpa y Balancán tienen también zonas con un potencial medio. Por último, la franja que limita con el Golfo de México de los municipios de Cárdenas, Comalcalco, Paraíso y Centla es la que tiene un potencial productivo no apto (Figura 23).

Ahora bien, al realizar la comparación entre ambos mapas se observan que existen coincidencias entre las áreas catalogadas como aptas para el cacao, en especial en los municipios de Cárdenas, Cunduacán, Jalpa de Méndez y Centro. La segunda categoría de aptitud media para el mapa de potencial productivo y apta con restricciones para el mapa de zonificación actual potencial del cacao es la que coincide mayormente. Resulta necesario tomar en cuenta como se generó cada mapa, ya que uno se hizo a nivel nacional y el otro se realizó sólo para la entidad. Recordemos que para generar las coberturas ambientales en este trabajo, sólo se tomaron en cuenta aquellas estaciones que cumplieran con ciertos requisitos por lo que la variación entre los valores ambientales es menor.

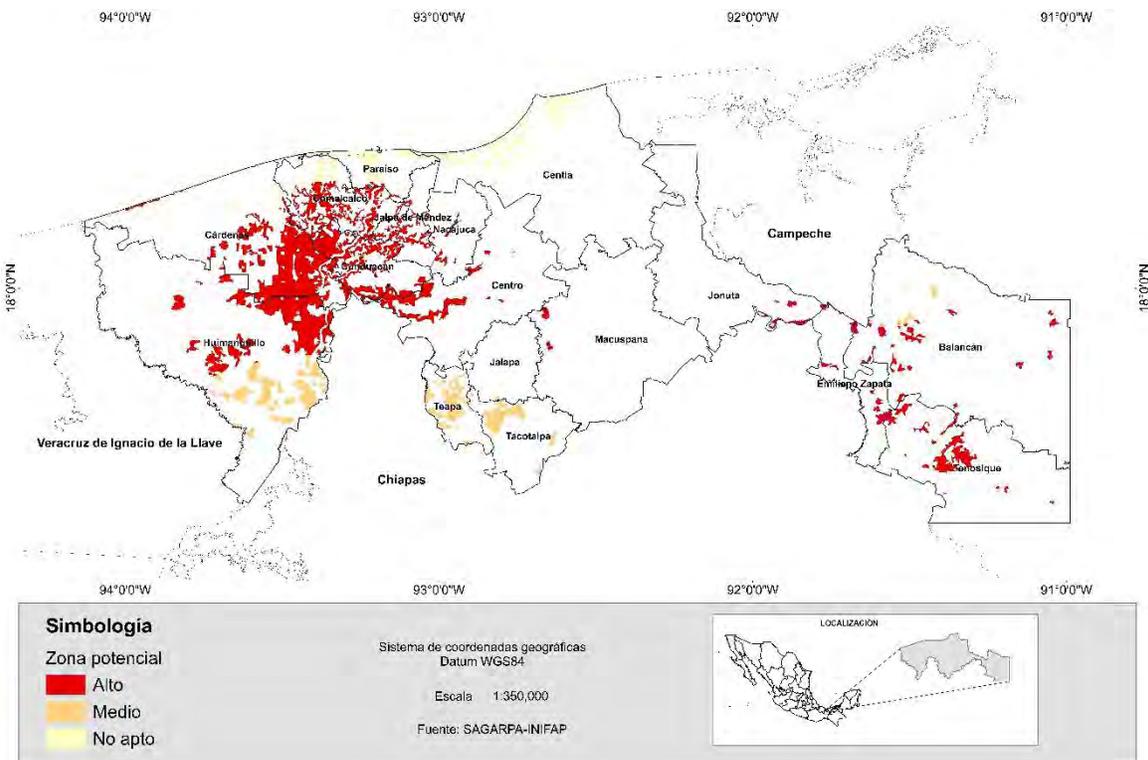


Figura 23. Zonificación de potencial productivo del cacao en Tabasco, SAGARPA, 2012. Elaboración propia con insumos de SAGARPA 2012.

Es notorio que existe mayor superficie con condiciones óptimas para el cacao en el mapa de zonificación potencial actual del cacao, lo que pareciera ser una sobreestimación del modelo, no obstante, en este mapa se han agregado variables de importancia para el cacao como son la profundidad del suelo y la evapotranspiración potencial, variables a las que también se les ha asignado un peso al momento de realizar la zonificación, sin embargo, fueron las variables climáticas las que tuvieron mayor peso en el proceso de generar el mapa. De manera general las zonas que fueron predichas con potencial apto para el cacao en ambos mapas coinciden casi en su totalidad, independientemente de la categoría que se le haya asignado, por lo que la zonificación de este estudio tuvo un buen resultado. Como un producto más se presenta en la Figura 24 el mapa con las condiciones óptimas para el cacao, resultado de la sobreposición de ambos mapas de zonificación.

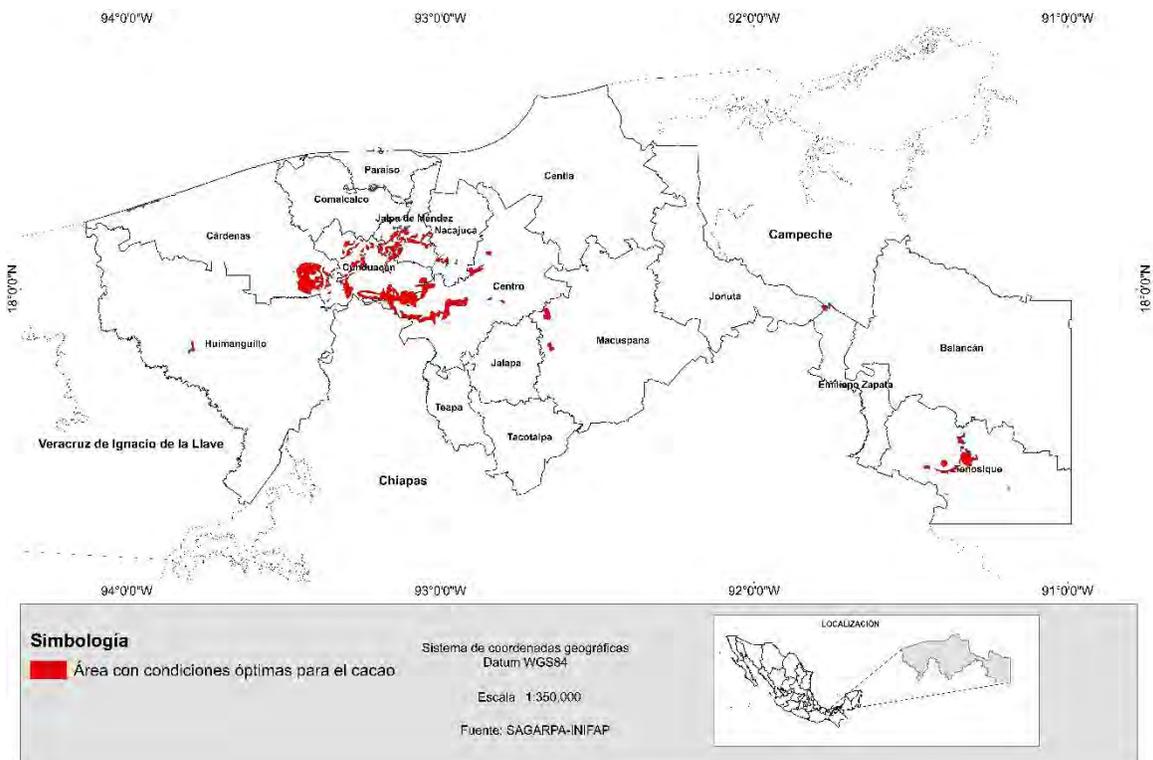


Figura 24. Área con condiciones óptimas para el cacao en Tabasco. Elaboración propia.

Es interesante que el municipio de Tacotalpa no aparezca con áreas óptimas para el cacao y esto se explica porque la profundidad y uso del suelo fueron factores que se tomaron en cuenta para la zonificación del estado, mismos que no se utilizaron para generar el mapa a nivel nacional, por lo que no se tiene que desechar la idea de que no cuenta con áreas óptimas para la planta del cacao, al contrario, se aclara con los indicadores agroclimáticos anteriores que puede cumplir con las condiciones óptimas para el cacao.

Capítulo 3. Cambio climático y agricultura. El caso del cacao

3.1. El cacao y cambio climático

Existen diversos estudios donde el tema del cambio climático y su repercusión en algunos cultivos toman relevancia como fuente de información, con cierto grado de incertidumbre, para dar a conocer los efectos futuros y posibles soluciones ante este evento.

Ojeda *et al.* (2011) analizaron el impacto esperado del cambio climático en las demandas hídricas y en el desarrollo de los cultivos con proyecciones para el escenario de emisiones medio-moderado (A1B) para las condiciones del Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México donde el mayor impacto por incremento de la temperatura será en la reducción del ciclo fenológico de los cultivos anuales. El acortamiento del ciclo fenológico puede reducir el rendimiento potencial de los cultivos, al disminuir el periodo de intercepción de la radiación (Monteith, 1981). En cuanto al impacto proyectado en los requerimientos hídricos de los cultivos, estos autores anticipan una disminución en los valores de la evapotranspiración diaria, máxima y acumulada del año agrícola en esta región. Las posibles acciones de adaptación que proponen son el restringir el periodo de siembra a los periodos fríos para que generen mayor duración del ciclo del cultivo y usar variedades de ciclo largo resistentes al estrés térmico e hídrico y soporten temperaturas mayores a las que se presentan actualmente.

En Monterroso *et al.* (2007) indican que para el año 2020 y bajo el escenario A2 más del 80% de la superficie de la Región Centro del Estado de Veracruz destinadas para el café no presentan cambios en la superficie con aptitud, en cambio, bajo el modelo GFDL apunta un aumento en la aptitud en cerca del 5% al igual que el modelo ECHAM, mientras que el modelo HADLEY es el que apunta una disminución en la aptitud para el café en cerca de 19%. Mientras que para el cultivo del maíz en esa región, para el horizonte 2020 bajo escenarios de cambio climático la mayor parte de la superficie en esa cuenca las condiciones no cambian. Los cambios que indican un aumento en las mejoras de la aptitud para este cultivo son en los modelos GFDL y HADLEY, no así para el escenario ECHAM que sugiere disminuciones en la aptitud.

Eakin *et al.* (2004) utilizaron un modelo econométrico para explorar la sensibilidad del café en Veracruz a cambios en variables climáticas y económicas. Utilizaron los escenarios

climáticos de los modelos HadCM2 y ECHAM4 para el año 2050 y estimaron la producción futura de café en el estado analizando los posibles efectos en el ingreso de los productores. En su estudio presentan al país afectado y vulnerable con incrementos en las temperaturas de entre 2 y 4°C en todo el país, con problemas crecientes de sequía y erosión y en el manejo de recursos hídricos. Para el 2050, la producción que se esperaría se reduce de manera importante (tomando como referencia la producción en la que se realizó el estudio), podría disminuir entre un 73 y 78% para los escenarios catalogados como optimista y pesimista respectivamente. La superficie apta para el café, con un aumento de 2°C se reduciría en la región de Veracruz.

Ruíz *et al.* (2009) realizaron los diagramas ombotérmicos del escenario de clima base de una estación en Veracruz y utilizan los resultados obtenidos de dos Modelos de Circulación General. Construyeron los diagramas para el escenario futuro, aunado al calendario fenológico de dos variedades de café. Como resultado de su investigación encontraron que debido al cambio climático y un aumento en la temperatura se alteraría el inicio de la floración del café, debido a que ésta se relaciona con el promedio de lluvia mensual y la amplitud de la sequía preestival. Esta condición puede provocar que el disparo del inicio de la floración sea en un número reducido de flores, probablemente a la mitad ya que esta fenofase se reduciría de cuatro a dos meses.

En Länderach *et. al* (2013) se enunciaron los efectos del cambio climático en los dos países con mayor contribución de producción de cacao en el mundo. Utilizaron para su investigación: a) 19 modelos de circulación de la atmósfera, donde muestra aumentos de hasta 2°C con cambios en la precipitación anual y mensual mínimos, donde la evapotranspiración potencial se incrementa; b) puntos de presencia donde se encuentra el cacao tomados en campo y de otras fuentes (un total de 235 puntos) que fueron utilizados para estimar los lugares que presentarían las condiciones ambientales óptimas para el cacao en el año 2050. De acuerdo a sus resultados obtenidos algunas zonas productoras de cacao actuales se harán inadecuadas que requerirán un cambio a otro cultivo, mientras que otras requerirán adaptaciones en la gestión agronómica y en otras la idoneidad climática para el cacao se aumentará. Señalan que la región con las mejores condiciones ambientales para la planta corresponde al cinturón de selva tropical de África Occidental, no obstante, para el 2050 el modelo predice una disminución de la idoneidad climática de las regiones de las plantaciones actuales, ellos mencionan que esto era de esperarse por el aumento de la temperatura y de la evapotranspiración, mientras que la precipitación no

podrá compensarlo, situación que aumentará el riesgo de sequía a la que el cacao es susceptible.

Torquebiau *et al.* (2015) utilizaron 19 modelos de circulación de la atmósfera para el horizonte 2050 para la distribución geográfica del cacao y el café donde los resultados mostraron una reducción significativa del área favorable para la producción de estas plantaciones. Además, mencionan que la disminución de la producción en áreas de Costa de Marfil y Ghana se debe principalmente a las condiciones secas más que al posible aumento (de 2°C) de temperatura para el 2050. El clima más seco resultará en una mayor evapotranspiración causada por el aumento de las temperaturas y precipitaciones anuales que no serán compensadas, lo que reducirá la disponibilidad de agua para las plantas y una desaparición del cacao en lugares de pendiente menor a 200 m, en las costas y en la transición de bosque-sabana.

En este tenor, el aumento de temperatura y el cambio en el régimen de precipitación podrían influir en el ciclo fenológico del cacao. En general, la temperatura óptima del cacao en Tabasco oscila en los 26°C con precipitaciones entre los 1,800 y 2,500 mm, valores que probablemente cambiaran para el futuro.

A continuación se presenta el análisis de los cambios en las variables de temperatura, precipitación y ETP y su impacto en la planta del cacao bajo dos escenarios: RCP4.5 GFDL-CM3 y RCP4.5 HADGEM2-ES para el horizonte 2015-2039.

3.2. Análisis de las temperaturas bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3 y su efecto en la fenología del cacao en los municipios productores de cacao

A continuación se presenta un análisis de los cambios en las temperaturas, donde se comparan los valores de la variable del escenario base y el escenario RCP4.5 del modelo GFDL-CM3 para el horizonte 2015-2039 y las etapas fenológicas del cacao por estación meteorológica en Tabasco. Únicamente se presentan las estaciones correspondientes a los municipios productores de cacao y aquellas donde los cambios sean significativos. Se enfatizó en las etapas de floración y madurez. En la Tabla 31 se muestran las temperaturas promedio mensuales bajo el escenario RCP4.5 GFDL-CM3 para el 2015-2039.

Tabla 31. Temperaturas promedio mensuales en Tabasco bajo escenarios RCP4.5 GFDL-CM3 (2015-2039).

NOMBRE	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	T PROM
Boca del Cerro	27004	24.4	25.9	28.6	30.5	30.8	30.4	30.4	30.1	29.3	28.0	26.2	24.9	28.3
Cent Exp W75	27007	23.4	24.6	27.1	28.9	29.8	29.5	29.5	29.4	28.8	27.7	26.0	24.9	27.5
Cárdenas	27008	23.6	25.1	27.2	28.9	29.8	29.5	29.5	29.5	28.8	27.7	26.1	25.0	27.6
Emiliano Zapata	27012	24.1	26.2	28.2	29.9	30.7	30.1	30.1	30.0	29.2	28.0	26.3	25.2	28.2
Francisco Rueda	27015	23.3	24.2	26.9	29.1	29.6	29.3	29.3	28.9	28.6	27.4	25.6	24.5	27.2
Jonuta	27028	24.2	26.0	28.1	29.6	30.5	30.1	30.1	30.0	29.2	28.1	26.4	25.6	28.2
Macuspana (DGE)	27030	23.7	25.3	27.6	29.4	29.8	29.4	29.4	29.6	28.8	27.3	25.9	24.9	27.6
Paraiso	27034	23.8	25.3	27.5	29.2	29.7	30.0	30.0	29.8	28.9	27.8	26.4	25.2	27.8
Samaria	27039	23.7	25.3	27.6	29.3	29.9	29.8	29.8	29.9	29.1	28.0	26.2	25.1	27.8
San Pedro	27040	23.8	25.2	27.9	29.9	30.2	29.6	29.6	29.6	28.8	27.7	25.8	24.6	27.7
Tapijulapa	27042	23.5	25.1	27.2	29.0	29.6	29.3	29.3	29.2	28.4	27.2	25.4	24.7	27.3
Teapa (DGE)	27044	23.5	24.8	27.0	28.9	29.6	29.1	29.1	29.1	28.3	27.2	25.4	24.7	27.2
Tres Brazos	27050	24.0	25.3	27.3	29.1	29.4	29.4	29.4	29.3	28.5	27.6	26.1	25.3	27.6
Villahermosa (DGE)	27054	24.2	26.1	28.4	30.1	30.6	30.5	30.5	30.3	29.7	28.5	26.9	25.7	28.5
El Triunfo	27059	23.9	25.3	28.0	29.9	30.2	29.7	29.7	29.6	28.7	27.5	25.8	24.5	27.7
Oxolotan	27070	23.3	24.9	27.0	28.8	29.4	28.8	28.8	28.7	28.0	27.0	25.2	24.4	27.0

En la estación Cárdenas, la temperatura promedio anual pasó de 26.5°C a 27.6°C, es decir, se presenta un aumento de 1.1°C, presentándose una situación similar en la estación Centro experimental W75. Mientras que en Samaria, la temperatura promedio anual pasó de 26.5 a 27.8°C de temperatura promedio anual, es decir, se presenta un aumento de 1.3°C. En la estación Francisco Rueda del municipio de Huimanguillo, la temperatura promedio anual pasó de 26.7 a 27.3, es decir, se presentaría un aumento de 0.6°C.

Debido a los aumentos de temperatura (y la diferencia mensual al respecto al escenario base) bajo los escenarios de cambio climático, se tomó el supuesto que el calendario fenológico del cacao podría verse modificado por lo que se analizaron los cambios en las temperaturas a nivel mensual y su relación con la fenología del cacao en los municipios productores en Tabasco. Se consideró como base la temperatura correspondiente al inicio de cada etapa fenológica y se realizó una analogía con las temperaturas del escenario de cambio climático para identificar si se presentaban cambios en la duración de la fenológica de la planta.

Como la temperatura del mes en el que inicia la floración (ambos periodos) no coincide con los valores del escenario base, hipotéticamente se estableció que el inicio de la floración en el mes de marzo podría comenzar en febrero dado que la temperatura de ese mes era más similar a la del escenario base. Con este principio y con el análisis de las temperaturas, se propuso el cambio en el calendario agrícola del cacao como se muestra en la Figura 25, no obstante, también se analizaron las temperaturas y su relación con la duración de la fenología de permanecer el ciclo agrícola tal como se presenta en la actualidad.

Calendario fenológico actual (sin cambio)

E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Continúa fructificación		Madurez			Primera cosecha				Floración de primera cosecha		Inicio de fructificación
Segunda cosecha		Floración segunda cosecha		Inicio de fructificación	Continúa fructificación		Madurez		Segunda cosecha		

Calendario fenológico a futuro (con cambios)

E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Inicio de fructificación	Continúa fructificación	Madurez			Primera cosecha				+ Cosecha o Floración	Floración de primera cosecha	
+ Cosecha o Floración	Floración segunda cosecha		Inicio de fructificación	Continúa fructificación	Madurez		Segunda cosecha				

+ Se refiere a la probable prolongación de la cosecha o al inicio de la floración

Figura 25. Cambios probables en la duración de algunas etapas fenológicas del cacao en Tabasco.

Una vez establecido lo anterior, se compararon los valores de temperatura del inicio de cada etapa fenológica, primero bajo el supuesto cambio en la duración de las etapas y después, adoptando el mismo ciclo fenológico que se presenta actualmente. Los resultados se muestran en las tablas siguientes.

Tabla 32. Analogía de las temperaturas y el comienzo de las etapas fenológicas del cacao en el periodo de inicio de floración de marzo, con cambio en el calendario fenológico.

Etapas fenológicas	Floración				Inicio Fructificación		Fructificación				Madurez			
	MAR (BASE)	FEB (GFDL)	ABR (BASE)	MAR (GFDL)	MAY (BASE)	ABR (GFDL)	JUN (BASE)	MAY (GFDL)	JUL (BASE)	JUN (GFDL)	AGO (BASE)	JUL (GFDL)	SEP (BASE)	AGO (GFDL)
Centro exp. W75	25.8	24.6	28.3	27.1	29.4	28.9	28.8	29.8	28.2	29.5	28.2	28.2	27.7	29.4
Samaria	25.9	25.3	27.9	27.6	29.1	29.3	28.7	29.9	28.1	29.8	28.2	29.8	27.8	29.9
Francisco Rueda	26.3	24.2	28.1	26.9	29.4	29.1	28.6	29.6	28.1	29.3	28.1	29.3	27.7	28.9

Tabla 33. Analogía de las temperaturas y el comienzo de las etapas fenológicas del cacao en el periodo de inicio de floración de marzo, sin cambio en el calendario fenológico.

Etapas fenológicas	Floración				Inicio Fructificación		Fructificación				Madurez			
	MAR (BASE)	MAR (GFDL)	ABR (BASE)	ABR (GFDL)	MAY (BASE)	MAY (GFDL)	JUN (BASE)	JUN (GFDL)	JUL (BASE)	JUL (GFDL)	AGO (BASE)	AGO (GFDL)	SEP (BASE)	SEP (GFDL)
Centro exp. W75	25.8	27.1	28.3	28.9	29.4	29.8	28.8	29.5	28.2	29.5	28.2	29.4	27.7	28.8
Samaria	25.9	27.6	27.9	29.3	29.1	29.9	28.7	29.8	28.1	29.8	28.2	29.9	27.8	29.1
Francisco Rueda	26.3	26.9	28.1	29.1	29.4	29.6	28.6	29.3	28.1	29.3	28.1	28.9	27.7	28.6

Para la Tabla 34 y Tabla 37 se sumaron los valores de los cambios en las temperaturas del periodo de la etapa completa, por ejemplo, la diferencia entre el mes de marzo (base) y febrero (GFDL) bajo la hipótesis de que exista un cambio en la fenología es de 1.2°C y la diferencia entre abril (base) y marzo (GFDL) es igual de 1.2°C que sumados son -2.4°C para la estación Centro experimental W75.

Tabla 34. Diferencia de temperaturas totales por etapa fenológica según exista o no cambio en el calendario agrícola del cacao en Tabasco bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3 (2015-2039) en el periodo de inicio de floración de marzo.

Etapas fenológicas	Floración		Inicio fructificación		Fructificación		Madurez	
	Con cambio	Sin cambio	Con cambio	Sin cambio	Con cambio	Sin cambio	Con cambio	Sin cambio
Centro exp W75	-2.4°C	1.9°C	-0.5°C	0.4°C	2.3°C	2.0°C	3.0°C	2.3°C
Samaria	-0.9°C	3.1°C	0.2°C	0.8°C	2.9°C	2.8°C	3.7°C	3.0°C
Francisco Rueda	-3.3°C	1.6°C	-0.3°C	0.2°C	2.2°C	1.9°C	2.4°C	1.7°C

Tabla 35. Analogía de las temperaturas y el comienzo de las etapas fenológicas del cacao en el periodo de inicio de floración de octubre, con cambio en el calendario fenológico.

Etapas fenológicas	Floración				Inicio Fructificación		Fructificación				Madurez			
	OCT (BASE)	NOV (GFDL)	NOV (BASE)	DIC (GFDL)	DIC (BASE)	ENE (GFDL)	ENE (BASE)	FEB (GFDL)	FEB (BASE)	MAR (GFDL)	MAR (BASE)	ABR (GFDL)	ABR (BASE)	MAY (GFDL)
Centro exp. W75	26.3	26.0	24.6	24.9	23.3	23.4	22.7	24.6	23.5	27.1	25.8	28.9	28.3	29.8
Samaria	26.5	26.2	25.0	25.1	23.6	23.2	23.2	25.3	23.8	27.6	25.9	29.3	27.9	29.9
Francisco Rueda	26.3	25.6	26.9	24.5	23.4	23.3	23.0	24.2	23.8	26.9	26.3	29.1	28.1	29.6

Tabla 36. Analogía de las temperaturas y el comienzo de las etapas fenológicas del cacao en el periodo de inicio de floración de octubre, sin cambio en el calendario fenológico.

Etapas fenológicas	Floración				Inicio Fructificación		Fructificación				Madurez			
	OCT (BASE)	OCT (GFDL)	NOV (BASE)	NOV (GFDL)	DIC (BASE)	DIC (GFDL)	ENE (BASE)	ENE (GFDL)	FEB (BASE)	FEB (GFDL)	MAR (BASE)	MAR (GFDL)	ABR (BASE)	ABR (GFDL)
Centro exp. W75	26.3	27.7	24.6	26.0	23.3	24.9	22.7	23.4	23.5	24.6	25.8	27.1	28.3	28.9
Samaria	26.5	28.0	25.0	26.2	23.6	25.1	23.2	23.7	23.8	25.3	25.9	27.6	27.9	28.3
Francisco Rueda	26.3	27.4	26.9	25.6	23.4	24.5	23.0	23.3	23.8	24.2	26.3	26.9	28.1	29.1

Tabla 37. Diferencia de temperaturas totales por etapa fenológica según exista o no cambio en el calendario agrícola del cacao en Tabasco bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3 (2015-2039) en el periodo de inicio de floración de octubre.

Etapas fenológicas	Floración		Inicio fructificación		Fructificación		Madurez	
	Con cambio	Sin cambio	Con cambio	Sin cambio	Con cambio	Sin cambio	Con cambio	Sin cambio
Centro exp W75	0°C	2.2°C	0.1°C	1.3°C	5.5°C	1.0°C	4.6°C	2.2°C
Samaria	-0.2°C	2.7°C	0.1°C	1.5°C	5.9°C	2.0°C	5.4°C	3.1°C
Francisco Rueda	-3.1°C	-0.2°C	-0.1°C	1.1°C	4.3°C	0.7°C	4.3°C	1.6°C

De aceptar la hipótesis de un cambio en la duración de algunas etapas a lo largo del año para el cacao el análisis sería el siguiente:

Para los municipios de Cárdenas, Cunduacán y Huimanguillo, el inicio de la floración para el periodo de marzo y abril comenzaría un mes antes, es decir, a partir del mes de febrero y no en marzo, con una duración de dos meses, mientras que la etapa de fructificación se reduciría de 3 a 2 meses, esto por el aumento de temperatura de un mes a otro, lo que hace pensar que la fructificación podrá darse más rápido, con inicio en abril y no en mayo; continuaría con la madurez del fruto en junio y julio y no en agosto y septiembre, por último, la duración de la cosecha podría durar probablemente un mes más (agosto-enero), aunque esto no significa que tendría una mayor producción, o bien, se tendría una etapa de floración pero con un comportamiento por debajo de lo normal (ya que las temperaturas serán por debajo de los 25°C). En el municipio de Cunduacán el comportamiento de la fenología con relación a la temperatura para el periodo donde la floración comienza en marzo sería parecido al actual, dado que las temperaturas del escenario actual y las del escenario de cambio climático presentan cambios ligeros.

Una situación similar ocurriría para el periodo en el que la floración comienza en octubre; la etapa de floración comenzaría en noviembre y no en octubre, es decir, se atrasaría un mes esta etapa; continuaría en enero el inicio de la fructificación, prolongándose hasta febrero, reduciendo su duración de dos meses a uno, mientras que la madurez permanecería igual al escenario actual (de marzo a abril). Por último, la duración de la cosecha comenzaría en mayo donde podría durar un mes más (mayo a octubre) o bien, la floración probablemente pueda comenzar en octubre con un comportamiento similar al del escenario actual, aunque con una reducción en la duración de la etapa de fructificación.

Es necesario recordar que los posibles aumentos de temperatura no serán de manera inmediata, en este horizonte se contemplan 25 años (2015-2039) por lo que el cambio de temperatura puede ser paulatino lo que hace pensar que se tendría tiempo suficiente para una posible adaptación de las plantas o bien una adaptación asistida. De presentarse una modificación en la duración de la fenología del cacao debido al aumento de temperatura se tiene que tomar en cuenta que si se mantienen los dos picos de cosecha a lo largo del año, de 2 a 3 meses podrían conjugarse los periodos en los que se tiene una cosecha (de agosto a septiembre u octubre), una a punto de finalizar y la otra casi al comienzo. En los meses de octubre y enero se tiene cierta incertidumbre porque podría prolongarse la cosecha o bien, comenzar la floración con restricciones de temperatura; por un lado, en enero con

temperaturas inferiores al valor con el que se tendría una floración normal (25°C) y por otro, con temperaturas que lo superan.

Por otra parte, si rechazamos la hipótesis antes mencionada y se mantiene el ciclo fenológico tal como se presenta en la actualidad, algunas etapas fenológicas se verían influidas por los aumentos de temperatura, en especial, las de fructificación y madurez para ambos periodos de inicio de floración (marzo y en octubre), es decir, probablemente se necesitaría menos tiempo para que el fruto se desarrolle y madure, acorde a lo mencionado por Adams y Mc. Kelvie (1955) el crecimiento y maduración de los frutos es más rápido con temperaturas más altas, no obstante, si se presentan temperaturas altas (y se prolongan) además de poca humedad y poca cantidad de lluvias los “chilillos” tienen una maduración temprana y esto es algo que se tiene que tomar en cuenta, lo que supone un comportamiento similar al propuesto en la hipótesis.

A pesar de esto, la diferencia entre las temperaturas sin cambio en la duración de las etapas es menor si se considera el calendario actual que si lo comparamos con las temperaturas bajo un cambio en el calendario fenológico. De manera general y de acuerdo a esos valores, es en el municipio de Huimanguillo donde los cambios no son tan marcados para ambos periodos de floración.

3.3. Cálculo de la ETP según Thornthwaite bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3

Se utilizaron los valores de temperatura de este escenario para calcular la ETP, la cual se realizó de acuerdo al criterio de Thornthwaite descrita a detalle en el capítulo 2 de este trabajo. Los resultados se presentan en la Tabla 38.

Tabla 38. Evapotranspiración potencial según Thornthwaite bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3.

NOMBRE	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ETP ACUM
Boca del Cerro	27004	81.9	81.7	156.3	170.7	184.1	178.3	178.3	176.0	158.6	147.5	85.6	82.7	1681.6
Cent Exp W75	27007	78.0	77.2	143.9	160.2	178.1	172.9	177.3	171.6	154.9	144.8	84.4	82.1	1625.6
Cárdenas	27008	78.7	78.8	144.8	160.2	178.1	172.9	172.9	172.9	172.9	144.8	84.8	82.5	1644.3
Emiliano Zapata	27012	80.8	82.6	101.4	166.9	183.4	176.3	180.7	175.3	157.8	147.5	85.9	83.7	1622.4
Francisco Rueda	27015	81.6	84.7	142.1	161.3	175.9	170.6	175.0	167.3	153.4	142.6	89.6	85.8	1629.9
Jonuta	27028	84.8	91.1	152.4	165.2	182.9	177.1	181.6	175.9	157.8	156.2	92.5	89.7	1707.4
Macuspana (DGE)	27030	79.4	79.7	148.2	163.5	177.4	171.4	171.4	172.5	154.9	141.7	84.5	82.6	1627.1
Paraiso	27034	79.4	79.4	147.4	162.4	177.4	176.4	180.9	174.5	155.7	145.7	85.8	83.2	1648.1
Samaria	27039	79.4	79.7	148.2	162.8	178.1	174.2	178.6	174.7	157.1	147.5	85.5	83.3	1649.2
San Pedro	27040	79.8	79.4	150.8	166.9	180.1	176.9	181.4	176.6	154.9	145.0	84.2	81.6	1657.6
Tapijulapa	27042	78.7	79.0	144.8	160.6	175.9	170.6	175.0	169.6	151.9	140.9	82.8	81.9	1611.8
Teapa (DGE)	27044	78.7	78.1	143.1	159.9	175.9	169.1	173.4	168.8	151.1	140.9	82.8	81.9	1603.7
Tres Brazos	27050	80.0	79.4	145.6	161.7	175.2	172.2	176.6	170.9	152.7	146.5	84.8	83.5	1628.9
Villahermosa (DGE)	27054	81.2	82.3	154.8	168.1	182.9	179.0	183.5	177.4	161.3	151.4	87.9	85.4	1695.2
El Triunfo	27059	80.1	79.7	151.6	166.9	180.1	173.6	178.0	172.5	154.2	143.4	84.2	81.3	1645.5
Oxolotan	27070	78.0	78.4	143.1	159.0	174.5	166.7	171.0	165.7	148.8	139.2	82.2	80.9	1587.4

De manera general se puede apreciar un aumento en los valores de ETP respecto al escenario base, esto se debe al aumento de las temperaturas y un cambio en las precipitaciones. Lo que es necesario analizar es si el aumento de la evapotranspiración potencial puede ocasionar condiciones secas en algunos lugares o bien, prolongar el periodo seco de la estacionalidad. Para ello, se presenta a continuación el análisis del balance hídrico para los municipios productores de cacao.

3.4. Balance hídrico para los municipios productores de cacao en Tabasco bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3

El balance hídrico se calculó por el método directo de Thornthwaite descrito en el capítulo 2. Se ocuparon los valores de la precipitación bajo el escenario RCP4.5 GFDL-CM3 para el horizonte 2015-2039 (Tabla 39) y los valores de la ETP que se presentaron anteriormente.

Tabla 39. Valores de precipitación bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3 en Tabasco.

NOMBRE	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PREC ACUM
Boca del Cerro	27004	104.0	80.0	54.0	62.0	147.0	270.0	210.0	253.0	401.0	305.0	174.0	155.0	2215.0
Cent Exp W75	27007	145.0	78.0	42.0	47.0	86.0	242.0	186.0	261.0	351.0	377.0	181.0	145.0	2141.0
Cárdenas	27008	124.0	94.0	43.0	39.0	96.0	223.0	188.0	238.0	344.0	374.0	144.0	148.0	2055.0
Emiliano Zapata	27012	100.0	67.0	45.0	47.0	131.0	239.0	200.0	230.0	374.0	301.0	177.0	157.0	2068.0
Francisco Rueda	27015	144.0	76.0	45.0	47.0	103.0	306.0	251.0	347.0	415.0	405.0	213.0	164.0	2516.0
Jonuta	27028	102.0	67.0	48.0	52.0	97.0	222.0	194.0	246.0	348.0	309.0	177.0	145.0	2007.0
Macuspana (DGE)	27030	151.0	98.0	71.0	75.0	124.0	282.0	216.0	284.0	397.0	352.0	216.0	169.0	2435.0
Paraiso	27034	152.0	75.0	46.0	43.0	78.0	154.0	124.0	139.0	316.0	344.0	186.0	164.0	1821.0
Samaria	27039	135.0	88.0	45.0	40.0	94.0	229.0	183.0	245.0	342.0	354.0	169.0	149.0	2073.0
San Pedro	27040	61.0	55.0	34.0	36.0	107.0	227.0	163.0	222.0	304.0	216.0	149.0	100.0	1674.0
Tapijulapa	27042	237.0	192.0	123.0	129.0	187.0	351.0	280.0	388.0	557.0	499.0	323.0	258.0	3524.0
Teapa (DGE)	27044	260.0	218.0	126.0	118.0	163.0	363.0	310.0	422.0	590.0	491.0	356.0	308.0	3725.0
Tres Brazos	27050	113.0	68.0	33.0	35.0	71.0	189.0	156.0	200.0	290.0	299.0	182.0	127.0	1763.0
Villahermosa (DGE)	27054	132.0	85.0	46.0	45.0	87.0	219.0	177.0	220.0	324.0	306.0	182.0	146.0	1969.0
El Triunfo	27059	56.0	54.0	30.0	32.0	105.0	231.0	173.0	268.0	303.0	214.0	154.0	94.0	1714.0
Oxolotan	27070	189.0	155.0	99.0	111.0	183.0	340.0	270.0	358.0	505.0	441.0	274.0	215.0	3140.0

A continuación se presentan los balances hídricos de las estaciones correspondientes a los municipios que productores de cacao.

En la estación Centro experimental W75 (Tabla 40) del municipio de Cárdenas se mantendrían 9 meses de periodo húmedo y 3 meses de periodo seco. A partir de junio y julio la reserva de agua en el suelo se mantiene en reposición del periodo seco que lo precede y es a partir de agosto que la reserva de agua en el suelo llega a su máximo prolongándose hasta febrero. Los meses con mayor cantidad de excesos de agua son septiembre y octubre, aunque también durante esos meses se presentan valores altos de desagüe o escorrentía. El periodo seco corresponde a los meses de marzo, abril y mayo al igual que en el escenario base. Durante el mes de marzo la variación en la reserva de agua en el suelo es negativa, es decir, el agua que estaba en reserva comienza a ser utilizada.

Dado que los valores de ETP sobrepasan las precipitaciones en este periodo, la falta de agua en el suelo es de 1.9 mm en marzo; 113.2 mm en abril y 92.1 mm en mayo.

Tabla 40. Balance hídrico de la estación Centro Experimental W75, municipio de Cárdenas bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3 (2015-2039).

MES	PREC	ETP	H/S THORN	P-ETP	R	VR	ETR	F	EX	DS
ENE	145.0	78.0	HÚMEDO	67.0	100.0	0.0	78.0	0.0	67.0	83.0
FEB	78.0	77.2	HÚMEDO	0.8	100.0	0.0	77.2	0.0	0.8	41.9
MAR	42.0	143.9	SECO	-101.9	0.0	-100.0	142.0	1.9	0.0	20.9
ABR	47.0	160.2	SECO	-113.2	0.0	0.0	47.0	113.2	0.0	10.4
MAY	86.0	178.1	SECO	-92.1	0.0	0.0	86.0	92.1	0.0	5.2
JUN	242.0	172.9	HÚMEDO	69.1	69.1	69.1	172.9	0.0	0.0	2.6
JUL	186.0	177.3	HÚMEDO	8.7	77.8	8.7	177.3	0.0	0.0	1.3
AGO	261.0	171.6	HÚMEDO	89.4	100.0	22.2	171.6	0.0	67.2	34.2
SEP	351.0	154.9	HÚMEDO	196.1	100.0	0.0	154.9	0.0	196.1	115.1
OCT	377.0	144.8	HÚMEDO	232.2	100.0	0.0	144.8	0.0	232.2	173.6
NOV	181.0	84.4	HÚMEDO	96.6	100.0	0.0	84.4	0.0	96.6	135.1
DIC	145.0	82.1	HÚMEDO	62.9	100.0	0.0	82.1	0.0	62.9	99.0
TOTAL	2141.0	1625.6								

De presentarse el cambio en la duración de algunas etapas fenológicas la relación entre estas y la disponibilidad de agua sería de la siguiente manera:

En el municipio de Cárdenas durante la etapa de floración del periodo de febrero y marzo aún existe agua en la reserva del suelo, no obstante, al finalizar esta etapa la reserva que se tiene comenzará a ser utilizada para compensar el déficit de lo que queda del periodo seco. Durante abril y mayo se presenta la etapa de fructificación donde la disponibilidad de agua es baja y acompañada de temperaturas altas. En julio y julio comenzaría la etapa de madurez del fruto que viene acompañado del inicio del periodo húmedo.

El otro periodo donde se presenta la floración en algunas plantas de cacao sería durante noviembre y diciembre, en este periodo se tiene reserva de agua en el suelo mientras que la precipitación, la ETP y las temperaturas comienzan a disminuir. En los meses de enero y febrero se presenta la fructificación donde las condiciones son más frescas y se tiene disponibilidad de agua en el suelo. Para la etapa de madurez las condiciones serían más secas, se tendría un mes con la reserva de agua en el suelo en utilización.

De lo contrario, si se mantiene el calendario fenológico como en la actualidad, la situación sería similar a las condiciones del escenario base, las cuales fueron descritas anteriormente.

En la estación Samaria del municipio de Cunduacán (Tabla 41) se tiene una situación similar a la del municipio de Cárdenas. Se presentan 9 meses de periodo húmedo con 3 meses de periodo seco. Durante junio y julio la reserva de agua es de 54.8 y 59.2 mm

respectivamente, la variación en la reserva empieza a reponerse desde junio hasta agosto y es precisamente que a partir de este mes la reserva de agua en el suelo alcanza su máximo prolongándose hasta febrero, los mayores excesos de agua se presentan en septiembre y octubre. El periodo seco abarca de marzo a mayo y es en el mes de marzo donde el agua que se tiene en el suelo comienza a utilizarse, el mayor déficit de agua es en el mes de abril.

Tabla 41. Balance hídrico de la estación Samaria, municipio de Cunduacán bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3 (2015-2039).

MES	PREC	ETP	H/S THORN	P-ETP	R	VR	ETR	F	EX	DS
ENE	135.0	79.4	HÚMEDO	55.6	100.0	0.0	79.4	0.0	55.6	73.8
FEB	88.0	79.7	HÚMEDO	8.3	100.0	0.0	79.7	0.0	8.3	41.0
MAR	45.0	148.2	SECO	-103.2	0.0	-100.0	145.0	3.2	0.0	20.5
ABR	40.0	162.8	SECO	-122.8	0.0	0.0	40.0	122.8	0.0	10.2
MAY	94.0	178.1	SECO	-84.1	0.0	0.0	94.0	84.1	0.0	5.1
JUN	229.0	174.2	HÚMEDO	54.8	54.8	54.8	174.2	0.0	0.0	2.5
JUL	183.0	178.6	HÚMEDO	4.4	59.2	4.4	178.6	0.0	0.0	1.2
AGO	245.0	174.7	HÚMEDO	70.3	100.0	40.8	174.7	0.0	29.5	15.3
SEP	342.0	157.1	HÚMEDO	184.9	100.0	0.0	157.1	0.0	184.9	100.1
OCT	354.0	147.5	HÚMEDO	206.5	100.0	0.0	147.5	0.0	206.5	153.3
NOV	169.0	85.5	HÚMEDO	83.5	100.0	0.0	85.5	0.0	83.5	118.4
DIC	149.0	83.3	HÚMEDO	65.7	100.0	0.0	83.3	0.0	65.7	92.0
TOTAL	2073.0	1649.2								

El ciclo fenológico del cacao y su relación con la disponibilidad de agua sería similar al del municipio de Cárdenas, bajo este escenario a futuro como en el escenario base, dado que tienen la misma duración de periodo seco y húmedo en ambos casos.

En la estación Francisco Rueda del municipio de Huimanguillo si se presentaría un cambio bajo este escenario respecto al escenario base esto es, de tener 9 meses de periodo húmedo (junio-febrero) y 3 de periodo seco (marzo-mayo) en el escenario base, se presentarían 8 meses de periodo húmedo (junio-enero) y 4 meses de periodo seco (febrero-mayo). El periodo húmedo comienza en junio con abundantes precipitaciones, llegan a su valor máximo la reserva del agua en el suelo a partir de este mes y continúa de esta manera hasta el término de este periodo (enero), no obstante, durante junio y julio la variación de agua en la reserva del suelo se encuentra en reposición. Los excesos de agua se presentarían de julio hasta noviembre. El periodo seco comienza en febrero donde a partir de este mes se comienza a utilizar el agua que se tiene en el suelo, aunque el periodo seco es de 4 meses, en el mes de febrero no se presenta una falta de agua, el mayor déficit se presenta en el mes de abril (Tabla 42).

Aunque el periodo seco se alargaría en este municipio, se piensa que no tendría una repercusión importante ya que la diferencia entre la precipitación y la ETP del mes de

febrero es de 8.7 y aún se tendrían 91.3 mm de agua en la reserva del suelo. Durante este mes se presentan dos etapas; la floración y fructificación.

Tabla 42. Balance hídrico de la estación Francisco Rueda, municipio de Huimanguillo bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3 (2015-2039)

MES	PREC	ETP	H/S THORN	P-ETP	R	VR	ETR	F	EX	DS
ENE	144.0	81.6	HÚMEDO	62.4	100.0	0.0	81.6	0.0	62.4	94.4
FEB	76.0	84.7	SECO	-8.7	91.3	-8.7	84.7	0.0	0.0	47.2
MAR	45.0	142.1	SECO	-97.1	0.0	-91.3	136.3	5.8	0.0	23.6
ABR	47.0	161.3	SECO	-114.3	0.0	0.0	47.0	114.3	0.0	11.8
MAY	103.0	175.9	SECO	-72.9	0.0	0.0	103.0	72.9	0.0	5.9
JUN	306.0	170.6	HÚMEDO	135.4	100.0	135.4	170.6	0.0	0.0	2.9
JUL	251.0	175.0	HÚMEDO	76.0	100.0	-35.4	175.0	0.0	111.4	57.1
AGO	347.0	167.3	HÚMEDO	179.7	100.0	0.0	167.3	0.0	179.7	118.4
SEP	415.0	153.4	HÚMEDO	261.6	100.0	0.0	153.4	0.0	261.6	190.0
OCT	405.0	142.6	HÚMEDO	262.4	100.0	0.0	142.6	0.0	262.4	226.2
NOV	213.0	89.6	HÚMEDO	123.4	100.0	0.0	89.6	0.0	123.4	174.8
DIC	164.0	85.8	HÚMEDO	78.2	100.0	0.0	85.8	0.0	78.2	126.5
TOTAL	2516.0	1629.9								

Dado que en el municipio de Tacotalpa también se llega a producir cacao aunado a que presenta condiciones óptimas para su desarrollo, en especial, a la disponibilidad de agua, también se tomó en cuenta para el análisis.

En la estación Tapijulapa (Tabla 43) del municipio de Tacotalpa se presentan 10 meses de periodo húmedo y 2 de periodo seco, en comparación con el escenario base, se efectúa un aumento (de uno a dos meses) en el periodo seco e inicia en marzo bajo este escenario y no en abril. El periodo húmedo comienza en mayo donde la variación de agua en la reserva se encuentra en reposición, a partir de junio la reserva de agua en el suelo alcanza su máximo prolongándose hasta febrero; prácticamente durante la mayoría del periodo húmedo se presentan excesos de agua. El periodo seco abarca los meses de marzo y abril, no obstante no se presenta un déficit hídrico a lo largo del año.

Tabla 43. Balance hídrico de la estación Tapijulapa, municipio de Tacotalpa bajo escenario RCP4.5 GFDL-CM3 (2015-2039)

MES	PREC	ETP	H/S THORN	P-ETP	R	VR	ETR	F	EX	DS
ENE	237.0	78.7	HÚMEDO	158.3	100.0	0.0	78.7	0.0	79.6	153.7
FEB	192.0	79.0	HÚMEDO	113.0	100.0	0.0	79.0	0.0	34.0	93.8
MAR	123.0	144.8	SECO	-21.8	78.2	-21.8	144.8	0.0	0.0	46.9
ABR	129.0	160.6	SECO	-31.6	46.6	-31.6	160.6	0.0	0.0	23.4
MAY	187.0	175.9	HÚMEDO	11.1	57.7	11.1	175.9	0.0	0.0	11.7
JUN	351.0	170.6	HÚMEDO	180.4	100.0	42.3	170.6	0.0	138.1	74.9
JUL	280.0	175.0	HÚMEDO	105.0	100.0	0.0	175.0	0.0	105.0	89.9
AGO	388.0	169.6	HÚMEDO	218.4	100.0	0.0	169.6	0.0	218.4	154.1
SEP	557.0	151.9	HÚMEDO	405.1	100.0	0.0	151.9	0.0	405.1	279.6
OCT	499.0	140.9	HÚMEDO	358.1	100.0	0.0	140.9	0.0	358.1	318.8
NOV	323.0	82.8	HÚMEDO	240.2	100.0	0.0	82.8	0.0	240.2	279.5
DIC	258.0	81.9	HÚMEDO	176.1	100.0	0.0	81.9	0.0	176.1	227.8
TOTAL	3524.0	1611.8								

Bajo el escenario RCP4.5 GFDL-CM3 para el horizonte 2015-2039 la temperatura tendrá un aumento entre 0.1 y 1.5°C, mientras que las precipitaciones tendrán un comportamiento similar al del escenario base con algunos aumentos o disminuciones en los promedios mensuales, en general, las precipitaciones totales acumuladas en un año serán mayores a las del escenario base, por otra parte, la ETP si tendrá un aumento bajo este escenario.

Como se ha mencionado, el ciclo fenológico del cacao en este escenario podría sufrir un cambio en el inicio y duración de ciertas etapas, en especial las que están ligadas con la temperatura como lo es la floración.

3.5. Análisis de las temperaturas bajo escenario RCP4.5 HADGEM2-ES y su efecto en la fenología del cacao

Se mantuvo el mismo método de análisis que se ocupó con el escenario GFDL-CM3; se analizaron los valores de las temperaturas de las 16 estaciones bajo el escenario RCP4.5 HADGEM2-ES para el horizonte 2015-2039 que se presentan en la Tabla 44.

Tabla 44. Temperaturas promedio mensuales en Tabasco bajo escenario RCP4.5 HADGEM2-ES (2015-2039).

NOMBRE	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	T PROM
Boca del Cerro	27004	25.3	26.9	28.5	30.5	31.0	30.5	29.7	29.8	29.0	27.5	26.6	25.5	28.4
Cent Exp W75	27007	23.6	24.8	26.8	28.9	30.0	29.6	29.2	29.3	28.6	27.3	25.7	24.5	27.4
Cárdenas	27008	23.8	25.4	27.0	28.9	30.0	29.7	29.2	29.4	28.6	27.3	26.0	24.8	27.5
Emiliano Zapata	27012	24.8	27.2	28.3	30.0	30.8	30.5	29.8	29.7	28.8	27.4	26.5	25.8	28.3
Francisco Rueda	27015	23.9	24.9	26.9	29.2	29.8	29.6	28.9	28.9	28.4	26.8	25.3	24.2	27.2
Jonuta	27028	24.5	26.6	27.9	29.6	30.6	30.3	29.7	29.9	29.0	27.7	26.6	25.9	28.2
Macuspana (DGE)	27030	24.4	26.1	27.6	29.5	30.0	29.7	29.1	29.5	28.5	26.7	25.8	25.0	27.7
Paraíso	27034	24.0	25.6	27.3	29.2	29.9	30.0	29.7	29.7	28.7	27.4	26.3	25.0	27.7
Samaria	27039	24.4	26.0	27.7	29.4	30.1	29.9	29.4	29.8	28.9	27.3	26.0	25.0	27.8
San Pedro	27040	24.5	26.1	27.8	29.9	30.4	29.9	29.2	29.4	28.6	27.4	26.2	25.3	27.9
Tapijulapa	27042	24.4	26.1	27.4	29.1	29.8	29.1	28.9	29.1	28.0	26.4	25.3	24.8	27.4
Teapa (DGE)	27044	24.2	25.6	27.0	29.0	29.8	29.3	28.8	29.0	28.0	26.6	25.3	24.8	27.3
Tres Brazos	27050	24.3	25.8	27.0	29.0	29.5	29.2	29.1	29.1	28.3	27.2	26.1	25.4	27.5
Villahermosa (DGE)	27054	24.9	26.9	28.4	30.2	30.8	30.4	30.2	30.2	29.4	27.9	26.8	25.8	28.5
El Triunfo	27059	24.6	26.2	27.9	29.9	30.4	30.1	29.3	29.4	28.5	27.2	26.2	25.2	27.9
Oxolotan	27070	24.2	25.9	27.2	28.9	29.6	28.8	28.4	28.6	27.6	26.2	25.1	24.5	27.1

Las dos estaciones que se describen a continuación pertenecen al municipio de Cárdenas. En la estación Centro experimental W75 la temperatura promedio anual pasa de 26.4°C en el escenario base a 27.3°C bajo el escenario RCP4.5 HADGEM2-ES, es decir, existe un aumento de temperatura de 0.9°C, mientras que en la estación Cárdenas la temperatura promedio anual es de 26.5°C en el escenario base, en el RCP4.5 HADGEM2-ES la temperatura aumentó a 27.5°C, es decir, 1°C.

En la estación Samaria del municipio de Cunduacán la temperatura promedio anual bajo el escenario base es de 26.5°C y en este escenario a futuro es de 27.8°C, es decir, aumentó

en 1.3°C y para el municipio de Huimanguillo la temperatura promedio anual es de 26.7°C en el escenario base y bajo este escenario es de 27.2°C, es decir, un aumento de 0.5°C.

La relación entre la temperatura y las etapas fenológicas del cacao fueron nuevamente comparadas con el calendario fenológico actual y con cambios en su duración utilizando el proceso descrito en la página 116. Los resultados se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 45. Analogía de las temperaturas y el comienzo de las etapas fenológicas del cacao en el periodo de inicio de floración de marzo, con cambio en el calendario fenológico. Escenario RCP4.5 HADGEM2-ES.

Etapas fenológicas	Floración				Inicio Fructificación		Fructificación				Madurez			
	MAR (BASE)	FEB (GFDL)	ABR (BASE)	MAR (GFDL)	MAY (BASE)	ABR (GFDL)	JUN (BASE)	MAY (GFDL)	JUL (BASE)	JUN (GFDL)	AGO (BASE)	JUL (GFDL)	SEP (BASE)	AGO (GFDL)
Centro exp. W75	25.8	24.8	28.3	26.8	29.4	28.9	28.8	30.0	28.2	29.6	28.2	29.2	27.7	29.3
Samaria	25.9	26.0	27.9	27.7	29.1	29.4	28.7	30.1	28.1	29.9	28.2	29.4	27.8	29.8
Francisco Rueda	26.3	24.9	28.1	26.9	29.4	29.2	28.6	29.8	28.1	29.6	28.1	28.9	27.7	28.9

Tabla 46. Analogía de las temperaturas y el comienzo de las etapas fenológicas del cacao en el periodo de inicio de floración de marzo, sin cambio en el calendario fenológico. Escenario RCP4.5 HADGEM2-ES.

Etapas fenológicas	Floración				Inicio Fructificación		Fructificación				Madurez			
	MAR (BASE)	MAR (GFDL)	ABR (BASE)	ABR (GFDL)	MAY (BASE)	MAY (GFDL)	JUN (BASE)	JUN (GFDL)	JUL (BASE)	JUL (GFDL)	AGO (BASE)	AGO (GFDL)	SEP (BASE)	SEP (GFDL)
Centro exp. W75	25.8	26.8	28.3	28.9	29.4	30.0	28.8	29.6	28.2	29.2	28.2	29.3	27.7	28.6
Samaria	25.9	27.7	27.9	29.4	29.1	30.1	28.7	29.8	28.1	29.4	28.2	29.8	27.8	28.9
Francisco Rueda	26.3	26.9	28.1	29.2	29.4	29.8	28.6	29.6	28.1	28.9	28.1	28.9	27.7	28.4

Tabla 47. Diferencia de temperaturas totales por etapa fenológica según exista o no cambio en el calendario fenológico del cacao en Tabasco bajo escenario RCP4.5 HADGEM2-ES (2015-2039) en el periodo de inicio de floración de marzo.

Etapas fenológicas	Floración		Inicio fructificación		Fructificación		Madurez	
	Con cambio	Sin cambio	Con cambio	Sin cambio	Con cambio	Sin cambio	Con cambio	Sin cambio
Centro exp W75	-2.5°C	1.6°C	-0.5°C	0.6°C	2.6°C	1.8°C	2.6°C	2.0°C
Samaria	-0.1°C	3.3°C	0.3°C	1.0°C	3.2°C	2.5°C	3.2°C	2.7°C
Francisco Rueda	-2.6°C	1.7°C	-0.2°C	0.4°C	2.7°C	1.8°C	2.0°C	1.5°C

Tabla 48. Analogía de las temperaturas y el comienzo de las etapas fenológicas del cacao en el periodo de inicio de floración de octubre, con cambio en el calendario fenológico. Escenario RCP4.5 HADGEM2-ES.

Etapas fenológicas	Floración				Inicio Fructificación		Fructificación				Madurez			
	OCT (BASE)	NOV (GFDL)	NOV (BASE)	DIC (GFDL)	DIC (BASE)	ENE (GFDL)	ENE (BASE)	FEB (GFDL)	FEB (BASE)	MAR (GFDL)	MAR (BASE)	ABR (GFDL)	ABR (BASE)	MAY (GFDL)
Centro exp. W75	26.3	25.7	24.6	24.5	23.3	23.6	22.7	24.8	23.5	28.6	25.8	28.9	28.3	30
Samaria	26.5	26.0	25.0	25.0	23.6	24.4	23.2	26.0	23.8	27.7	25.9	29.4	27.9	30.1
Francisco Rueda	26.3	25.3	26.9	24.2	23.4	23.9	23.0	24.9	23.8	26.9	26.3	29.2	28.1	29.8

Tabla 49. Analogía de las temperaturas y el comienzo de las etapas fenológicas del cacao en el periodo de inicio de floración de octubre, sin cambio en el calendario fenológico. Escenario RCP4.5 HADGEM2-ES.

Etapas fenológicas	Floración				Inicio Fructificación		Fructificación				Madurez			
	OCT (BASE)	OCT (GFDL)	NOV (BASE)	NOV (GFDL)	DIC (BASE)	DIC (GFDL)	ENE (BASE)	ENE (GFDL)	FEB (BASE)	FEB (GFDL)	MAR (BASE)	MAR (GFDL)	ABR (BASE)	ABR (GFDL)
Centro exp. W75	26.3	27.3	24.6	25.7	23.3	24.5	22.7	23.6	23.5	24.8	25.8	26.8	28.3	28.9
Samaria	26.5	27.3	25.0	26.0	23.6	25.0	23.2	24.4	23.8	26.0	25.9	27.7	27.9	29.4
Francisco Rueda	26.3	26.8	26.9	26.9	23.4	24.2	23.0	23.9	23.8	24.9	26.3	26.9	28.1	29.2

Tabla 50. Diferencia de temperaturas totales por etapa fenológica según exista o no cambio en el calendario fenológico del cacao en Tabasco bajo escenario RCP4.5 HADGEM2-ES (2015-2039) en el periodo de inicio de floración de octubre.

Etapas fenológicas	Floración		Inicio fructificación		Fructificación		Madurez	
	Con cambio	Sin cambio	Con cambio	Sin cambio	Con cambio	Sin cambio	Con cambio	Sin cambio
Centro exp W75	-0.7°C	1.5°C	0.3°C	0.9°C	5.4°C	1.4°C	1.9°C	4.8°C
Samaria	-0.5°C	1.8°C	0.8°C	1.4°C	6.7°C	3.4°C	5.7°C	3.3°C
Francisco Rueda	-3.7°C	0.5°C	0.5°C	0.8°C	5.0°C	2.0°C	4.6°C	1.7°C

De acuerdo a los valores presentados se puede notar que los aumentos de temperatura son menores que en el escenario GFDL-CM3, sobre todo, en las etapas de fructificación y madurez, por lo que se deduce que el ciclo fenológico del cacao tendría el mismo comportamiento que el actual, es decir, bajo el escenario RCP4.5 HADGEM2-ES los aumentos en la temperaturas promedio de las estaciones productoras de cacao no afectarían de una manera importante la duración del ciclo fenológico del cacao.

3.6. Cálculo de la ETP según Thornthwaite bajo escenario RCP4.5. HADGEM2-ES

Se utilizaron los valores de temperatura de este escenario para calcular la ETP, la cual se realizó de acuerdo al criterio de Thornthwaite descrita a detalle en el Capítulo 2 de este trabajo. Los resultados se presentan en la Tabla 51.

Tabla 51. Evapotranspiración potencial según Thornthwaite bajo escenario RCP4.5 HADGEM2-ES.

NOMBRE	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ETP ACUM
Boca del Cerro	27004	84.9	124.6	155.6	170.7	185.3	179.0	178.0	173.9	156.4	143.4	126.6	84.7	1763.2
Cent Exp W75	27007	78.7	77.8	141.2	160.2	179.5	173.6	175.0	170.9	153.4	141.5	83.4	80.8	1616.1
Cárdenas	27008	79.4	79.7	143.1	160.2	179.5	174.4	175.0	171.6	153.4	141.5	84.4	81.8	1624.0
Emiliano Zapata	27012	83.2	127.0	153.9	167.5	184.1	179.0	178.6	173.3	154.9	142.6	125.8	85.7	1755.6
Francisco Rueda	27015	80.0	78.4	142.1	162.0	177.4	172.8	171.8	167.3	151.9	137.4	82.5	80.2	1604.0
Jonuta	27028	81.8	121.8	150.8	165.2	183.6	178.5	178.8	175.2	156.4	144.8	126.0	85.5	1748.5
Macuspana (DGE)	27030	81.8	82.2	148.2	164.2	178.8	173.6	173.4	171.9	152.7	136.5	84.2	82.9	1630.3
Paraiso	27034	80.1	80.4	145.6	162.4	178.8	176.4	178.8	173.8	154.2	142.4	85.4	82.5	1640.9
Samaria	27039	81.8	81.9	149.0	163.5	179.5	175.0	175.7	173.9	155.7	141.7	84.9	83.0	1645.5
San Pedro	27040	82.1	82.2	149.9	166.9	181.6	175.0	174.2	171.1	153.4	142.6	85.5	84.0	1648.5
Tapijulapa	27042	81.7	82.2	146.6	161.3	177.4	169.1	171.8	168.8	148.8	92.2	82.5	82.2	1564.7
Teapa (DGE)	27044	81.0	80.6	143.1	160.6	177.4	170.6	171.0	168.1	148.8	135.6	82.5	82.2	1601.5
Tres Brazos	27050	81.0	81.0	143.1	161.0	176.0	170.7	174.2	169.4	151.1	140.7	84.8	83.8	1616.5
Villahermosa (DGE)	27054	83.6	124.6	154.8	168.7	184.1	178.3	181.4	176.6	159.3	146.7	128.3	85.7	1772.2
El Triunfo	27059	82.5	82.6	150.8	166.9	181.6	176.3	175.0	171.1	152.7	140.9	85.5	83.6	1649.3
Oxolotan	27070	81.0	81.5	144.8	159.9	175.9	166.7	167.6	164.8	145.5	91.5	81.8	81.2	1542.4

Se puede apreciar un aumento en los valores de ETP respecto al escenario base esto se debe al aumento de las temperaturas y un cambio en las precipitaciones. Lo que es necesario analizar es si el aumento de la evapotranspiración potencial puede ocasionar condiciones secas en algunos lugares o bien, prolongar el periodo seco. Para ello, se presenta a continuación el análisis del balance hídrico para los municipios productores de cacao bajo este escenario.

3.7. Balance hídrico para los municipios productores de cacao en Tabasco bajo escenario RCP4.5. HADGEM2-ES

El balance hídrico se calculó por el método directo de Thornthwaite descrito en el Capítulo 2. Se utilizaron los valores de la precipitación bajo el escenario RCP4.5 HADGEM2-ES para el horizonte 2015-2039 (Tabla 52) y los valores de la ETP que se presentaron anteriormente.

Tabla 52. Valores de precipitación bajo escenario RCP4.5 HADGEM2-ES en Tabasco.

NOMBRE	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PREC ANUAL
Boca del Cerro	27004	80.0	52.0	46.0	55.0	143.0	279.0	225.0	253.0	407.0	318.0	164.0	135.0	2157.0
Cent Exp W75	27007	94.0	32.0	8.0	41.0	82.0	259.0	205.0	262.0	363.0	409.0	181.0	113.0	2049.0
Cárdenas	27008	79.0	50.0	13.0	32.0	90.0	237.0	204.0	239.0	355.0	402.0	139.0	115.0	1955.0
Emiliano Zapata	27012	73.0	34.0	33.0	37.0	121.0	243.0	210.0	230.0	384.0	319.0	166.0	129.0	1979.0
Francisco Rueda	27015	105.0	44.0	25.0	38.0	99.0	316.0	258.0	339.0	416.0	423.0	215.0	147.0	2425.0
Jonuta	27028	68.0	26.0	27.0	42.0	83.0	231.0	206.0	247.0	358.0	332.0	165.0	106.0	1891.0
Macuspana (DGE)	27030	118.0	65.0	55.0	65.0	116.0	289.0	224.0	281.0	403.0	371.0	211.0	146.0	2344.0
Paraiso	27034	107.0	31.0	16.0	36.0	72.0	168.0	140.0	140.0	327.0	372.0	181.0	131.0	1721.0
Samaria	27039	99.0	56.0	27.0	30.0	88.0	238.0	191.0	239.0	345.0	373.0	167.0	129.0	1982.0
San Pedro	27040	36.0	23.0	25.0	28.0	98.0	233.0	177.0	223.0	310.0	227.0	136.0	71.0	1587.0
Tapijulapa	27042	209.0	168.0	111.0	119.0	183.0	358.0	284.0	380.0	560.0	515.0	321.0	244.0	3452.0
Teapa (DGE)	27044	227.0	185.0	110.0	108.0	155.0	370.0	318.0	419.0	596.0	510.0	351.0	285.0	3634.0
Tres Brazos	27050	73.0	25.0	8.0	26.0	61.0	201.0	170.0	201.0	301.0	325.0	173.0	91.0	1655.0
Villahermosa (DGE)	27054	99.0	52.0	30.0	35.0	79.0	226.0	185.0	217.0	330.0	325.0	177.0	123.0	1878.0
El Triunfo	27059	31.0	22.0	21.0	24.0	96.0	237.0	187.0	269.0	309.0	225.0	141.0	65.0	1627.0
Oxolotan	27070	161.0	131.0	87.0	101.0	179.0	347.0	274.0	350.0	508.0	457.0	272.0	201.0	3068.0

A continuación se presentan los balances hídricos de las estaciones correspondientes a los municipios que producen cacao.

En la estación Centro experimental W75 (Tabla 53) del municipio de Cárdenas los periodos húmedos y secos cambiarían respecto al escenario base y GFDL-CM3, esto es, bajo el escenario HADGEM2-ES se presentan 8 meses de periodo húmedo y 4 meses de periodo seco. En junio y julio la reserva de agua se encuentra en reposición en respuesta al periodo seco que lo precede, a partir de agosto la reserva de agua en el suelo llega a su máximo prolongándose hasta enero, de este periodo húmedo, los meses que presentan los mayores excesos son septiembre y octubre. El periodo seco corresponde a los meses de febrero hasta mayo (comienza un mes antes a diferencia del escenario base); durante febrero aún existe agua en el suelo la cual se encuentra en utilización hasta marzo, lo que resta del periodo seco no se encuentra una reserva de agua por lo que la disponibilidad de ésta depende de la cantidad de lluvia que se presente. Los meses con déficit hídrico son marzo, abril y mayo.

Tabla 53. Balance hídrico de la estación Centro Experimental W75, municipio de Cárdenas bajo escenario RCP4.5 HADGEM2-ES (2015-2039).

MES	PREC	ETP	H/S THORN	P-ETP	R	VR	ETR	F	EX	DS
ENE	94.0	78.7	HÚMEDO	15.3	100.0	0.0	78.7	0.0	15.3	52.7
FEB	32.0	77.8	SECO	-45.8	54.2	-45.8	77.8	0.0	0.0	26.3
MAR	8.0	141.2	SECO	-133.2	0.0	-54.2	62.2	79.0	0.0	13.1
ABR	41.0	160.2	SECO	-119.2	0.0	0.0	41.0	119.2	0.0	6.5
MAY	82.0	179.5	SECO	-97.5	0.0	0.0	82.0	97.5	0.0	3.2
JUN	259.0	173.6	HÚMEDO	85.4	85.4	85.4	173.6	0.0	0.0	1.6
JUL	205.0	175.0	HÚMEDO	30.0	100.0	14.6	175.0	0.0	15.4	8.5
AGO	262.0	170.9	HÚMEDO	91.1	100.0	0.0	170.9	0.0	91.1	49.8
SEP	363.0	153.4	HÚMEDO	209.6	100.0	0.0	153.4	0.0	209.6	129.7
OCT	409.0	141.5	HÚMEDO	267.5	100.0	0.0	141.5	0.0	267.5	198.6
NOV	181.0	83.4	HÚMEDO	97.6	100.0	0.0	83.4	0.0	97.6	148.1
DIC	113.0	80.8	HÚMEDO	32.2	100.0	0.0	80.8	0.0	32.2	90.1
TOTAL	2049.0	1616.1								

En la estación Samaria del municipio de Cunduacán (Tabla 54) se presentan 8 meses de periodo húmedo y 3 meses de periodo seco bajo este escenario. Durante junio y julio la reserva de agua en el suelo se encuentra en reposición, de agosto a enero, la reserva de humedad llega a su máximo. Los mayores excesos de humedad se presentan en septiembre y octubre. El periodo seco comenzaría un mes antes a diferencia del escenario base, donde se utilizaría el agua de la reserva a partir de febrero hasta marzo. El déficit hídrico sería de marzo a mayo. En este municipio, el balance hídrico es similar al de la estación Centro experimental W75 del municipio de Cárdenas.

Tabla 54. Balance hídrico de la estación Samaria, municipio de Cunduacán bajo escenario RCP4.5 HADGEM2-ES (2015-2039).

MES	PREC	ETP	H/S THORN	P-ETP	R	VR	ETR	F	EX	DS
ENE	99.0	81.8	HÚMEDO	17.2	100.0	0.0	81.8	0.0	17.2	51.4
FEB	56.0	81.9	SECO	-25.9	74.1	-25.9	81.9	0.0	0.0	25.7
MAR	27.0	149.0	SECO	-122.0	0.0	-74.1	101.1	47.9	0.0	12.8
ABR	30.0	163.5	SECO	-133.5	0.0	0.0	30.0	133.5	0.0	6.4
MAY	88.0	179.5	SECO	-91.5	0.0	0.0	88.0	91.5	0.0	3.2
JUN	238.0	175.0	HÚMEDO	63.0	63.0	63.0	175.0	0.0	0.0	1.6
JUL	191.0	175.7	HÚMEDO	15.3	78.3	15.3	175.7	0.0	0.0	0.8
AGO	239.0	173.9	HÚMEDO	65.1	100.0	21.7	173.9	0.0	43.4	22.1
SEP	345.0	155.7	HÚMEDO	189.3	100.0	0.0	155.7	0.0	189.3	105.7
OCT	373.0	141.7	HÚMEDO	231.3	100.0	0.0	141.7	0.0	231.3	168.5
NOV	167.0	84.9	HÚMEDO	82.1	100.0	0.0	84.9	0.0	82.1	125.3
DIC	129.0	83.0	HÚMEDO	46.0	100.0	0.0	83.0	0.0	46.0	85.6
TOTAL	1982.0	1645.5								

Para la estación Francisco Rueda (Tabla 55) del municipio de Huimanguillo se presentan 8 meses de periodo húmedo y 4 meses de periodo seco. Durante todo el periodo húmedo la reserva de agua en el suelo se encuentra en su máxima capacidad, presentándose excesos durante la mayor parte del periodo. De igual manera que en los municipios anteriores, el periodo seco comenzaría en febrero hasta mayo, donde los meses con déficit son marzo,

abril y mayo, es decir, durante este periodo la ETP es mayor que las precipitaciones, no obstante, se cuenta con agua en el suelo que puede ser utilizada.

Tabla 55. Balance hídrico de la estación Francisco Rueda, municipio de Huimanguillo bajo escenario RCP4.5 HADGEM2-ES (2015-2039).

MES	PREC	ETP	H/S THORN	P-ETP	R	VR	ETR	F	EX	DS
ENE	105.0	80.0	HÚMEDO	25.0	100.0	0.0	80.0	0.0	25.0	75.7
FEB	44.0	78.4	SECO	-34.4	65.6	-34.4	78.4	0.0	0.0	37.8
MAR	25.0	142.1	SECO	-117.1	0.0	-65.6	90.6	51.5	0.0	18.9
ABR	38.0	162.0	SECO	-124.0	0.0	0.0	38.0	124.0	0.0	9.4
MAY	99.0	177.4	SECO	-78.4	0.0	0.0	99.0	78.4	0.0	4.7
JUN	316.0	172.8	HÚMEDO	143.2	100.0	0.0	172.8	0.0	143.2	73.9
JUL	258.0	171.8	HÚMEDO	86.2	100.0	0.0	171.8	0.0	86.2	80.0
AGO	339.0	167.3	HÚMEDO	171.7	100.0	0.0	167.3	0.0	171.7	125.8
SEP	416.0	151.9	HÚMEDO	264.1	100.0	0.0	151.9	0.0	264.1	194.9
OCT	423.0	137.4	HÚMEDO	285.6	100.0	0.0	137.4	0.0	285.6	240.2
NOV	215.0	82.5	HÚMEDO	132.5	100.0	0.0	82.5	0.0	132.5	186.3
DIC	147.0	80.2	HÚMEDO	66.8	100.0	0.0	80.2	0.0	66.8	126.5
TOTAL	2425.0	1604.0								

Bajo este escenario a futuro, en los municipios productores de cacao el periodo seco podría comenzar antes prolongándose de 4 a 5 meses, a diferencia del escenario base que comienza en marzo y dura 3 meses. Aun así, existe disponibilidad de agua en el suelo y la mayoría de los meses del año son húmedos por lo que probablemente este no sea un impedimento para la producción, esto si se solventa los meses de déficit hídrico con riego.

El adelanto del periodo seco (con inicio en febrero y no en marzo) en este escenario también se puede relacionar con el ciclo fenológico del cacao. Durante estos meses en el periodo donde la floración comienza en marzo (del escenario base) se relaciona con el inicio del periodo seco, entonces, de presentarse este adelanto con este escenario a futuro, podría presentarse lo que se ha reportado con anterioridad, un cambio en el calendario fenológico, es decir, la floración comenzaría en febrero y no en marzo, relacionándose de igual manera que con el escenario base, con el inicio del periodo seco.

En los municipios de Tacotalpa y Teapa, bajo el escenario base, el periodo seco comienza en abril y dura de uno a dos meses (hasta mayo) y bajo este escenario el periodo seco se adelanta, comienza en marzo y dura hasta abril.

En la estación Tapijulapa (Tabla 56) del municipio de Tacotalpa se presentan 10 meses de periodo húmedo y dos de periodo seco. Durante mayo el agua en el suelo aún está en reposición, es a partir de junio que la reserva en el suelo llega a su máximo prolongándose hasta febrero. La mayor parte del periodo se tiene excesos de agua y son los meses de septiembre y octubre donde estos excesos son mayores. El periodo seco comienza en

marzo hasta abril, no obstante, existe agua en la reserva del suelo para que se pueda utilizar.

Tabla 56. Balance hídrico de la estación Tapijulapa, municipio de Tacotalpa bajo escenario RCP4.5 HADGEM2-ES (2015-2039).

MES	PREC	ETP	H/S THORN	P-ETP	R	VR	ETR	F	EX	DS
ENE	209.0	81.7	HÚMEDO	127.3	100.0	0.0	81.7	0.0	127.3	177.8
FEB	168.0	82.2	HÚMEDO	85.8	100.0	0.0	82.2	0.0	85.8	131.8
MAR	111.0	146.6	SECO	-35.6	64.4	-35.6	146.6	0.0	0.0	65.9
ABR	119.0	161.3	SECO	-42.3	22.1	-42.3	161.3	0.0	0.0	32.9
MAY	183.0	177.4	HÚMEDO	5.6	27.7	5.6	177.4	0.0	0.0	16.4
JUN	358.0	169.1	HÚMEDO	188.9	100.0	83.5	169.1	0.0	105.4	60.9
JUL	284.0	171.8	HÚMEDO	112.2	100.0	0.0	171.8	0.0	112.2	86.5
AGO	380.0	168.8	HÚMEDO	211.2	100.0	0.0	168.8	0.0	211.2	148.8
SEP	560.0	148.8	HÚMEDO	411.2	100.0	0.0	148.8	0.0	411.2	280.0
OCT	515.0	92.2	HÚMEDO	422.8	100.0	0.0	92.2	0.0	422.8	351.4
NOV	321.0	82.5	HÚMEDO	238.5	100.0	0.0	82.5	0.0	238.5	294.9
DIC	244.0	82.2	HÚMEDO	161.8	100.0	0.0	82.2	0.0	161.8	228.3
TOTAL	3452.0	1564.7								

De acuerdo a los resultados, los municipios de Tacotalpa y Teapa tendrán las condiciones de humedad favorables para el cacao, ya que tendrían a lo largo del año reserva de agua en el suelo, por lo que la planta de cacao no sufriría de algún déficit hídrico.

Para ambos escenarios, RCP4.5 GFDL-CM3 y RCP4.5 HADGEM2-ES existen aumentos en las temperaturas promedio anual, de 0.6 a 1.5°C y 0.5°C a 1.6°C respectivamente y cambios en las precipitaciones, acentuándose mayormente en el escenario HADGEM2-ES, así como un aumento de la ETP para ambos escenarios respecto al escenario base.

Los aumentos en las temperaturas promedio mensuales del escenario RCP4.5 GFDL-CM3 repercutirían en la duración de la fenología del cacao en dos casos: 1) la planta del cacao buscaría temperaturas similares (durante el año) al comienzo de cada etapa respecto a los valores históricos que son tomados como el escenario base, es decir, una modificación en el calendario fenológico, o bien 2) una adaptación de la planta a estos aumentos de temperatura con posibles cambios en la duración de ciertas etapas (como en la fructificación y madurez del fruto), manteniendo el calendario fenológico similar al actual.

En cuanto a la disponibilidad de agua bajo el escenario RCP4.5 GFDL-CM3 el panorama es similar al del escenario base, presentándose de 3 a 4 meses de periodo seco, con inicio en ambos casos, en marzo, y de 8 a 9 meses de periodo húmedo, por lo que el aumento de la ETP bajo este escenario no parece influir demasiado en los periodos húmedos a lo largo del año en los municipios productores de cacao.

Mientras que los aumentos en las temperaturas promedio mensuales del escenario RCP4.5 HADGEM2-ES no parecen detonar una posible modificación en el calendario fenológico del cacao, por lo que podría mantenerse tal cual como en la actualidad.

En relación con la disponibilidad de agua bajo el escenario RCP4.5 HADGEM2-ES, el periodo seco se adelanta, comienza en febrero y se prolonga de uno a dos meses más para los municipios productores de cacao, aunque mantienen una reserva de agua en el suelo. Al parecer los municipios con las condiciones más adecuadas para el cacao en este escenario son los de Tacotalpa y Teapa.

De acuerdo a Länderach *et al.*, (2013) uno de los factores que determinaran la distribución del cacao bajo escenarios de cambio climático es la ETP, que combinada con altas temperaturas y pocas precipitaciones pueden dar paso a ambientes más secos.

Discusión

El calendario fenológico que se utilizó para este trabajo resultó ser similar al propuesto por el Ministerio de Agricultura y Riego de Perú, especialmente en el periodo de la primera cosecha, mientras que el periodo de la segunda cosecha coincide con las fechas encontradas por González y Amaya (2005) que corresponden a la cosecha principal de noviembre a febrero y una cosecha secundaria más corta por los meses de marzo y mayo. Aunque pudo haber sido más práctico utilizar sólo el periodo de cosecha principal para establecer el calendario fenológico de la planta de cacao y realizar el análisis de los factores ambientales que influyen en él, fue más adecuado utilizar el calendario con los dos picos de cosecha que se presentan en el año ya que es indispensable identificar las etapas fenológicas para cada periodo de cosecha porque pueden variar a lo largo del año. Como menciona Porras y Sánchez (1991) “aunque varía ligeramente según a la zona y el tipo de cacao, los procesos de floración y fructificación del árbol ocurren de manera constante. Sin embargo, y para las condiciones de trópico-húmedo-caluroso, que es el ambiente que más favorece al cacao, estos procesos fisiológicos se acentúan cada cinco o seis meses con lo que la producción de frutos de cacao se concentran en dos picos, uno por semestre”. Aunque será preciso corroborar con observaciones fenológicas más a detalle lo cual se lograría con trabajo de campo en las plantaciones, diferenciando entre las tres variedades de cacao.

Uno de los factores que determinan el número de cosechas en las plantaciones de cacao es la disponibilidad de agua. Si la época seca se prolonga en una zona, la cosecha se puede concentrar en periodos cortos mientras que en lugares donde no se presenta un periodo seco largo, se puede tener cosecha en el año con 2 o 3 picos no muy pronunciados. De acuerdo a los resultados del balance hídrico realizado para las estaciones que se trabajaron se presenta una situación como la que describe Enríquez (1985) donde el periodo seco y húmedo están bien definidos, situación que favorece a las abundantes floraciones acompañadas de grandes fructificaciones. Duke (1983) menciona que “los montos anuales de precipitación son el factor climático más importante y tienen gran influencia en la producción” refiriéndose quizás a esta relación de humedad y las etapas fenológicas que describió años más tarde Enriquez.

En las estaciones pertenecientes a los municipios de Cárdenas, Huimanguillo y Cunduacán se presentan 9 meses de periodo húmedo y 3 meses de periodo seco, sin embargo, sólo

dos de esos tres meses llegan a presentar déficit hídrico, mientras que la precipitación acumulada anual se encuentra en el rango de 1,500-2,800 mm, rango considerado como el óptimo para el cultivo del cacao. Adams & McKelvie (1955) citado por Burgos y Reyes (1965) observaron que 4 meses secos constituían el límite de la posibilidad del cultivo en Ghana. Otros municipios donde las condiciones relacionadas con la disponibilidad de agua pueden ser favorables para el cultivo son los pertenecientes a la región de la Chontalpa y los municipios de Tacotalpa y Teapa al sur del estado, sin embargo, en estos dos últimos municipios se corre el riesgo de presentar excedentes de agua.

En las regiones cacaoteras del mundo la precipitación suele ser mayor a la evapotranspiración potencial entre 7 y 9 meses al año (hecho que también se presenta en Tabasco) y el tipo de suelo que se encuentra en los municipios que producen cacao que en su mayoría son gleysol y vertisol los cuales se caracterizan por una buena capacidad de retención de humedad no así de drenaje suelen llegar a ocasionar encharcamientos en las plantaciones que pueden ser perjudiciales para la producción. Aunque, de acuerdo a Hardy (1960) es la profundidad del suelo la que diferencia un suelo bueno para el cacao, se requieren al menos 1.5 metros, sin embargo, en la mayoría de los países con plantaciones comerciales de cacao la profundidad del suelo es de 60 a 70 cm de profundidad (Leal *et al.*, 1999). La humedad en el suelo en las plantaciones de cacao es importante como mencionan Leal *et al.* (1999) el cacao es extremadamente sensible a las reducciones de humedad en el suelo ya que se afectan los procesos de crecimiento al reducirse la humedad en el suelo mucho antes de que el suelo esté tan seco que las raíces no puedan absorberlo. Torres (1995) indica que para que las condiciones de humedad del suelo se consideren óptimas, deben mantenerse valores cercanos a la capacidad de campo, y la humedad relativa en las proximidades de la superficie del suelo debe conservarse en valores cercanos al 100%. Como se ha indicado anteriormente, en los municipios donde producen cacao en Tabasco solamente dos meses en el año llegarían a presentar un déficit hídrico (entre abril y mayo) donde algunas plantas estarán en la última parte de la maduración y otras en floración e inicio de fructificación por lo que sería preciso atender las necesidades hídricas en esas etapas.

La planta de cacao parece tolerar en cierta medida los excesos de agua que se puedan presentar. La mayor preocupación son los encharcamientos que facilitan las condiciones para la presencia de algunas enfermedades como la moniliasis (*Monilophthora roreri*) y la mazorca negra (*Phytophthora palmivora*) que afectan a los árboles y frutos del cacao

llegando a causar la pérdida de la producción si no se controla, es por eso que la plantación debe contar con buen drenaje.

Los elementos como la radiación solar y la humedad relativa no juegan un papel importante al momento de definir las condiciones ecológicas del cultivo (Leal *et al.*, 1999), sin embargo, ambos son de suma importancia para considerarlos, en especial, para el manejo del cultivo debido a que en condiciones de alta humedad y con un mal sombreado en la plantación, aunado a excesos de agua propician la generación de enfermedades que repercuten en la producción.

Se corroboró de acuerdo a Torres (1995) que la planta de cacao es de fotoperiodo corto ya que esta se produce en lugares donde la duración astronómica del día es de entre 11 y 12.40 hrs. El rango de temperatura promedio es de 25-27°C y 26-28°C para las etapas de floración y madurez respectivamente, rangos que superan el valor óptimo para estas etapas propuestas por Burgos y Reyes (1965) “para una floración abundante y buena fructificación la temperatura no debe de descender de 22°C”, por otra parte, Moscol y Espinoza (2012) mencionan que bajo los 25°C no se forman flores. En cuanto a la madurez del fruto Adams & McKelvie (1955) demuestran que esta se presenta con mayor rapidez por encima de los 28°C. Las unidades fototérmicas para el ciclo reproductivo de la planta (desde la floración hasta la madurez del fruto) se encuentra por encima de las 3,000. Como no hay antecedentes al respecto, los valores propuestos con relación a las unidades calor y para el periodo de la primer cosecha en Tabasco permiten un primer acercamiento en cuanto a este factor y el ciclo fenológico del cacao cuyos valores oscilan entre las 8,000 para la floración; ligeramente mayor a las 1,000 para la fructificación y cercana a las 900 para la madurez mientras que la constante térmica es superior a las 2,000 unidades calor. Para el periodo de la segunda cosecha los valores aumentan y esto se explica porque durante ese periodo del año se presentan temperaturas más altas a diferencia del periodo de la primera cosecha, sin embargo tienen el mismo comportamiento anterior, éste es, durante la etapa de floración las unidades calor se encuentran entre las 900; aumentan para la etapa de fructificación (superiores a las 1,500) y disminuyen nuevamente para la etapa de madurez, por lo que la etapa que requiere mayores unidades calor es la de fructificación. En cuanto al termoperiodo diario para los lugares donde se produce cacao tiene una amplitud pequeña (5.5°C aproximadamente). Burgos y Reyes (1965) hacen notar el efecto del termoperiodo diario y su influencia en los fenómenos de la brotación de las yemas y de las hojas “si este llega a tener una gran amplitud de la temperatura y elevadas temperaturas diarias se

presentarán un debilitamiento de los árboles así como una brotación excesiva”. La temperatura es un elemento a resaltar ya que de él depende la formación de flores, la maduración de los frutos y en consecuencia, la producción de la plantación. Si hay poca humedad y altas temperaturas, los frutos maduran antes y se pierden para la cosecha. En Tabasco, los frutos de cacao tardarían en madurar (desde el inicio de la etapa de fructificación) aproximadamente 151 a 153 días. Leal *et al.* (1999) y Johnson *et al.* (2008) han encontrado que en lugares con temperaturas promedio de entre 25 a 26°C los frutos tardan de 140 a 175 días en madurar, situación similar a la de Tabasco, en cambio, en lugares menos cálidos la maduración de los frutos tarda de 167 a 205 días.

Estos indicadores resultan más precisos para futuros estudios ya que se presentan por etapa fenológica para ambos periodos con dos cosechas al año, así como los requerimientos para el ciclo completo que pueden ser útiles para análisis detallados. Así tenemos, por ejemplo, que los requerimientos agroclimáticos para la etapa de floración en Tabasco son: entre 25 y 27°C de temperatura promedio mensual, con una amplitud pequeña en el termoperiodo diario, con una demanda de entre 800 y 900 unidades calor (según la época del año), o bien, entre 900 y 1,000 unidades fototérmicas, con precipitaciones mayores a los 100 mm mensuales y donde la ETP sea menor a las precipitaciones.

La zonificación agroclimática que se realizó, fue resultado de la sobreposición de las coberturas ambientales y de profundidad y uso del suelo. Se incluyeron estas dos últimas variables para disminuir las áreas que resultaban como óptimas para el cacao, convirtiéndose en un método similar al utilizado por Leal *et al.* (1999), Zonas Productoras de Cacao en Venezuela (2002) y Suárez (2006). A pesar de lo anterior, en el mapa se encontró que la mayoría del estado cuenta con las condiciones para el cacao, algunas con restricciones de tipo y uso del suelo y otras por restricciones en cuanto a humedad, sin embargo, las zonas con mayor aptitud se encuentran en la parte central del estado y algunas zonas del sur, sureste y noreste de la entidad. Al sobreponer este mapa con el de aptitud para el cultivo realizado por la SAGARPA-INIFAP (2012), las zonas aptas para el cacao se concentraron en los municipios productores, pertenecientes a la región de la Chontalpa. Uno de los inconvenientes al momento de generar las coberturas para la zonificación es precisamente el número de estaciones que se encuentran en el estado; del total de estaciones, sólo se utilizaron entre 16 y 18 para realizar las interpolaciones, en este caso se prefirió trabajar solamente con estaciones que cumplieran las condiciones de

depuración para obtener datos confiables. Se estima que cada dato reportado en una estación meteorológica es representativo de un área de 100 Km² en una zona plana (Daly, 2006) condición que se cumple en la mayor parte del territorio tabasqueño. La World Meteorological Organization (WMO) (2006) indica que “los errores producidos por toma de datos de estaciones poco representativas pueden ser mucho mayores que los que pueden esperarse de una estación aislada”.

Se analizaron los cambios en la temperatura y precipitación bajo dos escenarios de cambio climático en el horizonte de 2015-2039 los cuales corresponden a las RCP4.5 GFDL-CM3 y RCP4.5 HADGEM2-ES. Se utilizaron estos escenarios ya que fueron adaptados al país y forman parte de los modelos actuales para estudios de cambio climático.

El aumento de temperatura promedio anual bajo el escenario RCP4.5 GFDL-CM3 al 2039 en los municipios que producen cacao oscila entre los 0.5 y 1.3°C, sin embargo, los cambios en las temperaturas mensuales suelen variar por lo que se propusieron dos situaciones a futuro: la primera, que existiría un cambio en la duración de las etapas fenológicas y la segunda, que la fenología se mantenga igual que el escenario actual, en ambos casos, esperando los mismos picos de cosechas. Se tomó a consideración el probable cambio en la fenología del cacao por lo que indican Alvarado *et al.* (2002) sobre los efectos que tendrían las plantas ante el aumento de temperatura sobre su fenología; ellos mencionan que podría verse reflejado en un desfase temporal de los mismos, se adelantarían o atrasarían los eventos fenológicos como la floración. De lo anterior resultó que la diferencia entre las temperaturas sin cambio en la fenología es menor que si se toma como verdadera la hipótesis del cambio en la duración de la fenología. Bajo este mismo escenario, se presentaría un aumento en la ETP y cambios en las precipitaciones, no obstante, se mantendrían 9 meses de periodo húmedo para los municipios de Cárdenas y Cuenduacán, mientras que en Huimanguillo sería un mes menos de humedad. En los tres municipios se presentarían 3 meses de déficit hídrico en el suelo. Ruíz *et al.* (2009) encontraron que bajo el escenario GFDL-R30 en la región de Huatusco la floración del café puede verse afectada ya que presentaría un incremento en la precipitación, ésta condición provocaría que el disparo de la floración sea en un número reducido de flores, ya que la fenofase se reduciría de cuatro a dos meses.

En el escenario RCP4.5 HADGEM2-ES el aumento en la temperatura promedio anual oscila entre 0.5 y 1°C, mientras que los cambios en las temperaturas mensuales son menores, similares a las del escenario actual, por lo que, probablemente el comportamiento de la

fenología sea similar al actual. En cuanto a la ETP, también existiría un aumento que aunado a los cambios en las precipitaciones el balance hídrico resultaría en un aumento del periodo seco y un adelanto del mismo, es decir, duraría 4 meses y comenzaría en febrero, sin embargo, la falta de agua en la reserva en el suelo se mantendría en 3 meses, por lo que no se trata de una situación que llegue a afectar gravemente la producción. Eakin, Estrada y Conde (2004) presentan al país con problemas crecientes de sequía y erosión, con aumentos de la temperatura de entre 2 y 4°C para el año 2050 bajo dos escenarios, con una disminución de la producción del café por encima del 70%.

Es probable que bajo estos escenarios no se presentarían condiciones más secas que afecten a la producción de cacao, al menos en estos municipios y es porque bajo estos escenarios el aumento de temperatura no llegaría a 2°C. Landerach *et. al* (2013) y más tarde Torquebiau *et al.* (2015) encontraron que ante el probable aumento de 2°C en los países productores de cacao en África algunas zonas productoras de cacao actuales se haran inadecuadas que requeriran un cambio de cultivo, en consecuencia del aumento de temperatura y precipitaciones que no seran compensadas y que propician condiciones más secas, mientras que otras requeriran adaptaciones en la gesti3n agron3mica y en otras la idoneidad climática para el cultivo de cacao se aumentara.

Otros factores a considerar respecto al aumento de temperatura y las plantas son la distribuci3n de recursos en las plantas ya que pueden haber implicaciones en los sistemas de polinizaci3n (necesarias para que se produzca el fruto de cacao) así como se puede llegar a incrementar el tamaño, la riqueza de especies y la diversidad gen3tica intraespecífica del banco de semillas del suelo (Alvarado *et al.*, 2002), aunque estas últimas observaciones probablemente no se veran reflejadas en las plantas de cacao por tartarse de una plantaci3n.

Es menester recalacar que si se presenta este aumento en la temperatura no sera de una manera brusca, sino de una manera paulatina por lo que la planta de cacao podra adaptarse a esos cambios ambientales o bien, buscara (de manera asistida) condiciones similares de temperatura, precipitaci3n, ETP, radiaci3n solar, etc3tera, a las actuales, tal como señalan Etterson & Shaw (2001) "se sabe que las plantas han respondido al cambio climático en dos formas principales; migraci3n y adaptaci3n".

Conclusiones

- Las características físico geográficas de la entidad, especialmente las ambientales, son óptimas para la planta de cacao. En consecuencia, posiciona al estado como el principal productor de este cultivo en el país.
- Los factores socio-políticos juegan un papel importante al momento de decidir si el productor de cacao invierta en elementos que favorezcan a las plantaciones, tales como el manejo de la plantación, la renovación de árboles viejos, cambios a sistemas agroforestales o agroecológicos, prevención ante amenazas que dañen al cacao, entre otros, que además pueden aumentar el valor del cacao producido en ésta entidad.
- El análisis de los elementos y factores ambientales, a través de los diferentes indicadores, permitieron definir los requerimientos agroclimáticos del cacao en Tabasco por etapa fenológica. La temperatura y precipitación son los elementos ambientales más importantes para el cultivo.
- Al tratarse de una planta originaria y adaptada a las condiciones del trópico húmedo, la planta de cacao no presenta una diferenciación en su fenología, esto es; un mismo árbol de cacao puede encontrarse en la etapa de floración, de fructificación y que algunos de sus frutos se encuentren maduros y listos para cosecharse por lo que basados en el trabajo de campo y algunos autores se identifican los “picos” de mayor actividad en cada etapa, adaptándolo a la duración de un año.
- Las zonas donde se produce cacao actualmente cumplen con las condiciones ambientales óptimas, por lo que no es una limitante para el establecimiento del cultivo. Además, la mayor parte del territorio en Tabasco contiene condiciones que pueden resultar aceptables para la planta de cacao.
- Las condiciones ambientales bajo los escenarios de cambio climático RCP4.5 GFDL-CM3 y RCP4.5 HADGEM2-ES para el horizonte 2015-2039 podría propiciar una adaptación por parte de la planta que ocasionaría un desfase temporal dado el aumento de temperatura. Sin embargo, estas condiciones no repercutirían de manera grave a la disponibilidad de agua en los municipios productores de cacao, ya que presentarían un patrón similar al del escenario actual y es precisamente la disponibilidad de agua un factor que se relaciona con la producción.

Literatura citada

- Adams, S. N. & McKelvie, A. D. (1955). Environmental requirement of Cocoa in the Gold Coast. Cocoa Conference 1955. London. Cocoa Chocolate and Confectionary.
- Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios. (1994). El cacao en Tabasco. *Clariades Agropecuarias*(16), 5-23.
- Almeida de A., A. F. & Valle, R. R. (2007). Ecophysiology of the cacao tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 425-448.
- Almorox, J. (2003). *Climatología aplicada al medio ambiente y agricultura*. Madrid, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.
- Alvarado Vázquez, M. A., Foroughbakhch Pournavab, R., Jurado Ybarra, E. y Rocha, A. (2002). El cambio climático y la fenología de las plantas. *Ciencia UANL*, 5(4), 493-500.
- Andrade Aguirre, C. M. (2007). *La variabilidad económica del cultivo del cacao en México a través de una economía sostenible (Tesis Licenciatura)*. Departamento de Relaciones Internacionales y Ciencias Políticas. Escuela de Ciencias Sociales, Artes y Humanidades. Universidad de las Américas, Puebla.
- Arbeláez, M. L. (2010). *Análisis de la diversidad genética intraespecie de *Moniliophthora roreri* (Cif) Evans et al. por medio de marcadores morfológicos y genéticos (Tesis Maestría)*. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Arteaga Ramírez, R. y Romo González, J. R. (1983). *Meteorología agrícola*. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Attolini Lecón, A. (2011). *Cuentas, dares y tomares del cacao: delicia, convite, rito mesoamericano*. Obtenido de Revista Digital Universitaria. Recuperado el 17 de octubre de 2014, de <http://www.revista.unam.mx/vol.12/num4/art38/index.html>
- Batista, L. (2009). *El cultivo de cacao. Guía técnica: el cultivo de cacao en la República Dominicana*. Santo Domingo, República Dominicana: CEDAE.
- Braudeau, J. (1969). *El cacao*. (Á. Hernández Cardona, Trad.) Barcelona, España: Blume.

- Burgos, J. y Reyes, H. (1965). Tipos agroclimáticos mundiales del cacao. *Revista Agronomía Tropical*(15).
- Campos Aranda, D. F. (2005). *Agroclimatología cuantitativa de cultivos*. México: Trillas.
- Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. de Grau, R. Prieto González, A. C. Conde Álvarez, A. Quintanar Isaías, J. S. Santana Sepúlveda, R. Romero Centeno, M. E. Maya Magaña, J. G. Rosario de La Cruz, Ma. del R. Ayala Enríquez, H. Carrillo. (2013). *Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. Informe Final del Proyecto al INECC*. Obtenido de <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>
- Cervantes-Zamora, Y., Cornejo-Olgín, S. L., Lucero-Márquez, R., Espinoza-Rodríguez, J. M., Miranda-Viquez, E. y Pineda-Velázquez, A. (1990). *Provincias Fisiográficas de México*. Extraído de Clasificación de Regiones Naturales de México II, IV. 10.2. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- CONABIO. (s.f.). *Theobroma cacao*. *Species Plantarum*, 2(782), 253-258. Recuperado el 23 de octubre de 2014, de http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/68-sterc03m.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)-Subdirección Técnica. (2007). *Regiones Hidrológicas, escala 1:250000. República Mexicana*. México.
- Cuatrecasas J. (1968). *Cacao and its allies; Taxonomic revision of fenus Theobroma Bull*. Washington, D. C.: United States National Museum.
- Daly, C. (2006). Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *Int. J. Climatol*, 26, 707-721. Published online 27 March 2006 in Wiley InterScience www.interscience.wiley.com. DOI: 10.1002/joc.1322.
- Dostert N., Roque J., Cano A., La Torre M. I. & Weigend M. (2011). *Hoja Botánica: cacao Theobroma cacao L*. Perú: Cooperación Alemana al Desarrollo-Agencia de la GiZ. Obtenido de <http://bibliotecavirtual.minam.gob.pe/biam/handle/minam/1426>

- Duke, J. S. (1983). *Theobroma cacao* L. Recuperado el 20 de octubre de 2015, de http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Theobroma_cacao.html.
- Eakin, H., Gay, C., Estrada, F. y Conde, C. (2004). Impactos potenciales del Cambio Climático en la agricultura: escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz (México). *Aportaciones presentadas al IV Congreso de la Asociación Española de Climatología* (págs. 651-660). Santander: El clima, entre la mar y la montaña.
- Enríquez, G. (1985). *Curso sobre el cultivo del cacao*. Costa Rica: IICA-CATIE.
- Etterson, J. R. & R. G. Shaw. (2001). Constraint to adaptative evolution in response to global warming. *Science*, 294, 151-154.
- FAO. (1997). *Zonificación agro-ecológica. Guía general*. Recuperado el 6 de septiembre de 2015, de <https://www.mpl.ird.fr/crea/taller-colombia/FAO/AGLL/pdfdocs/aezs.pdf>.
- FAOSTAT. (2015). *Producción de cacao en grano*. Recuperado el 16 de marzo de 2016, de <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/S>
- Field C. H., F. S. Chapin III, P. A. Matson & H. A. Mooney. (1992). Responses of terrestrial ecosystems to the changing atmosphere: a resource-based approach. *Rev. Ecol. Syst*, 23, 201-235.
- García Benavides, J., Benacchio Scotton, S., Benavides G., J. Canet Brenes, G. Papadakis., J. Benacchio, S. E. F. y Munguía H. (1998). Zonificación ecológica-económica: una propuesta metodológica para la Amazonia. *Noticiero del Café*, 10(91), 1-6.
- García González, J. A. y Cebrián Abellán, F. (2006). *La interpolación como método de representación cartográfica para la distribución de la población: aplicado a la provincia de Albacete*. Obtenido de http://www.age-tig.es/docs/XII_1/012%20-%20Garcia%20y%20Cebrian.pdf
- García J. y Maquín, Y. J. M. (1972). Relación entre la magnitud de excesos hídricos y la producción de cacao (*Theobroma cacao*) en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Tropical*, 28(1), 57-66.

- García J. y Montoya A. (1968). *Zonas de vida de Venezuela. Memoria explicativa sobre el mapa ecológico*. Caracas, Venezuela: Ministerio de Agricultura y Cría.
- García Marín, M. J., López Guemez, A. del R., Hernández Rivera, M. A., Ojeda Morales, M. E., Ángeles Padilla, A., Ruíz Nájera, J. A. y Palma González, B.,. (2007). Caracterización Físicoquímica de los Suelos Predominantes en el Estado de Tabasco. *Conciencia Tecnológica*, 45-46. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/944/94403412.pdf>
- García, E. (1983). *Las Gráficas Ombrotérmicas y los Régimenes Pluviométricos en la República Mexicana*. (L. R. Orellana, Ed.) México: Instituto de Geografía, UNAM.
- García, E. (2004). *Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen* (Quinta ed.). México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Gobierno del Estado de Tabasco. (2006). *Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco*. México: Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente.
- Gómez Rojas, J. C. (1988). *Agroclimatología y espacio geográfico en el noreste del Estado de Morelos (Tesis Doctorado)*. México: UNAM.
- González, V. y Amaya, G. (2005). *Cacao en México: competitividad y medio ambiente con alianzas. (Diagnostico rápido de producción y mercado)*. México: INIFAP E IPRC para USAID.
- Gotway C. A., Ferguson R. B., Hegert G. W. & Peterson T. A. (1996). Comparison of Kriging and Inverse Distance Methods for mapping soil parameters. *Soil Science of American Journal*(60), 1237-1247.
- Hardy, T. (1960). *Cacao Manual*. Costa Rica: I. A. A. S.
- Heuveldop, J. (1986). *Agroclimatología tropical*. San José, Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- INAFED. (2015). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. Recuperado el 13 de diciembre de 2014, de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM27tabasco/index.html>.

- INEGI. (2006). *División municipal de México, 2005, escala 1:250000*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Obtenido de Marco Geoestadístico Municipal, II Censo de Población y Vivienda 2005. México.
- INEGI. (2007). *Panorama agropecuario en Tabasco*. México: Censo agropecuario 2007.
- INEGI. (2007). *VII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal*. México: Dirección General de Estadísticas Económicas.
- INEGI. (2012). *Anuario Estadístico de Tabasco*. Obtenido de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/anuario_14/702825066420.pdf.
- INEGI. (2012-2013). *Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Climas Escala 1:1 000 000, serie I. Anuario estadístico de Tabasco*.
- INEGI. (2013). *Conjunto de datos vectorial Edafológico escala 1:250000 Serie II (Continuo Nacional)*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- INEGI. (2015). *Guía para la interpretación de Cartografía Edafológica*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EdafIII.pdf>.
- INFOCAFES. (s.f.). *Cultivo del cacao*. Recuperado el 27 de abril de 2016, de www.infocafes.com.
- INIFAP. (2011). *Paquete tecnológico Cacao (Theobroma cacao L.). Establecimiento y mantenimiento. Programa estratégico para el Desarrollo Rural Sustentable de la Región Sur-Sureste de México: Trópico Húmedo*. Huimanguillo, Tabasco: SAGARPA-INIFAP.
- Instituto de Geofísica. (s.f.). *Irradiación Solar de la República Mexicana*. Recuperado el 23 de febrero de 2016, de http://www.geofisica.unam.mx/radiacion_solar.
- IPCC. (2013). *Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

- IPCC. (2014). *El Quinto Reporte de Evaluación del IPCC ¿Qué implica para Latinoamérica?* Recuperado el 30 de marzo de 2016, de <http://cdkn.org/wp-content/uploads/2014/12/INFORME-del-IPCC-Que-implica-para-Latinoamerica-CDKN.pdf>.
- IPCC-WGI. (2007). Summary for Policymakers. En Q. D. Solomon S. (Ed.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pág. 996). Cambridge, R.U.: Cambridge University Press.
- Jiménez López, J. (1978). *Cálculo del clima de acuerdo al segundo Sistema de Thornthwaite*. México: Dirección General de Estudios, SARH.
- Johnson J., Bonilla J. C. y Agüero, L. (2008). *Manual de Manejo de Producción del Cacaotero*. León, Nicaragua. Obtenido de <http://cenida.una.edu.ni/relectronicos/RENF01J71.pdf>
- Johnston K., Ver Hoef J. M., Krivoruchko K., Lucas N. . (2001). *Using ArcGis Geostatistical Analyst*. ESRI.
- Kravchenko, A. & Bullock, D. G. (1999). A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal*(91), 393-400.
- Kravchenko, A. (2003). Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Science Society of American Journal*(67), 1564-1571.
- Länderach, P., Martínez Valle, A., Schrot, G. & Castro, N. (2013). Predicting the future climatic suitability for cocoa farming of the world's leading producer countries, Ghana and Cote d'Ivoire. *Climatic Change*, 119(3-4), 841-854.
- Leal, F., Avilán L. y Valderrama, E. (1999). Áreas potenciales para el desarrollo del cacao en Venezuela. *Revista agroalimentaria*, 5(8), 39-45.
- López Andrade, P., Ramírez G. M. y Mendoza López, A. (2011). *Programa Estratégico para el Desarrollo Rural Sustentable de la Región Sur-Sureste de México: Trópico Húmedo 2011. Paquete tecnológico cacao (theobroma cacao L.). Establecimiento y mantenimiento*. Tabasco, México: SAGARPA-INIFAP.

- Mejía F. (1995). *Aspectos fisiológicos relacionados con el cultivo del cacao*. Obtenido de www.turipana.org.
- Mendoza López A., R. A. Gallardo Méndez y H. Avendaño Arrazate. (2011). El mundo del cacao. *Theobroma cacao L., Kakaw (Maya). Cacahuatl (Nahuatl). Agroproductividad, 4(2), 18-27.*
- Ministerio de Agricultura y Riego. (s. f.). *Ficha técnica núm. 11. Requerimientos agroclimáticos del cultivo de cacao*. Obtenido de www.senamhi.gob.pe
- Monteith, J. L. (1981). Climatic variation and the growth of crops. *Quart J. Royal Meteorol. Soc, 107, 749-774.*
- Monterroso Rivas, A., Álvarez, A. C., Díaz, J. G. y García, J. L. (2007). Vulnerabilidad y riesgo en agricultura por cambio climático en la Región Centro del Estado de Veracruz. *Zonas áridas, 11, 47-60.*
- Moore, B. y Allard, G. (2008). *Los impactos del cambio climático en la sanidad forestal. Documentos de Trabajo sobre Sanidad y Bioseguridad Forestal*. Obtenido de www.fao.org: <http://www.fao.org/3/a-k3837s.pdf>
- Moscol Saavedra, y Espinoza Tamariz, E. (2012). *Manual técnico del cultivo de cacao blanco de Piura*. Lima, Perú: Ministerio de Agricultura.
- Ojeda Bustamante, W., Sifuentes Ibarra, E., Íñiguez Covarrubias, M. y Montero Martínez M. J. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia, 45(1), 1-11.*
- Porras, V. H. y Sánchez, L. (1991). *Enfermedades del cacao*. Venezuela: IICA Biblioteca Venezuela.
- Ramírez Martínez, M. A. (2007). Los productores de cacao de pequeña escala en el contexto de la globalización. *Hitos de Ciencias Económico Administrativas, 13(37), 103-112.*
- Reyna R., T. (1977). Características climático-frutículas en Cuautitlán, Estado de México. *Boletín del Instituto de Geografía(8), 55-66.*

- Rojas, F. y Sacristán, E. (2013). *Guía ambiental para el cultivo del cacao* (Segunda ed.). Bogotá, Colombia: Ministerio de agricultura y desarrollo rural.
- Rubio Garay, F. B. (1961). *Influencia del fotoperiodo en el crecimiento y desarrollo del cacao*. Costa Rica: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Centro Tropical de Investigación y Enseñanza Graduada.
- Ruíz Álvarez, O., Arteaga Ramírez R., Vázquez Peña, Ontiveros Capurata, R. E. y López López, R. (2012). Balance hídrico y clasificación climática del Estado de Tabasco México. *Universidad y Ciencia*, 28(1), 1-14.
- Ruíz, L. V., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C. y Hernández, J. (2009). Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*, 34(5), 322-329.
- SAGARPA. (2012). Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. Cacao (*Theobroma cacao* L.). *SAGARPA-INIFAP Publicación especial*(8), 60-62.
- Salef, P. J. M. (1970). Growth, flowering and fruiting of cacao under controlled soil moisture conditions. *Journal of Horticultural Science*, 45(2), 99-118.
- SIAP. (2014). *Producción anual por producto*. Recuperado el 30 de octubre de 2014, de <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>
- SIAP. (2016). *Theobroma cacao*,. Recuperado el 12 de agosto de 2016, de <http://www.siap.gob.mx/cacao>
- Smyth, A. J. (1975). *Soils In: Cocoa*. (G. A. Wood, Ed.) London: Longman.
- Suárez Venero, M. G. (2006). *Zonificación agroecológica de Theobroma cacao L., para el Macizo montañoso Nipe-Sagua-Baracoa*. El Salvador, Guantánamo, Cuba: Centro de Desarrollo de la Montaña-CITMA.
- Suárez, G. M., Bacallao, R. F., Soto Carreño, F. & Caballero Nuñez, A. (2013). Bases para la zonificación agroecológica en el cultivo del cacao (*Theobroma cacao*, Lin) por medio de criterio de expertos. *Cultivos Tropicales*, 34(2), 30-37.

- Thorhallsdottir, T. E. (1997). Flowering phenology in the central Highland of Iceland and implications for climatic warming in the Arctic. *Oecologia*, 114(1), 43-49.
- Thornthwaite, C. W. & Mather, R. J. (1955). *The water balance*. New Jersey: Laboratory of climatology.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
- Torquebiau, E., Manley D. & Cowan, P. (2015). Climatic Change and Agriculture Worldwide. *Springer*, 210-212.
- Torres Ruíz, E. (1995). *Agrometeorología*. México: Trillas.
- UNIATMOS. (2016). *Atlas Climático Digital de México*. Obtenido de http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/Docs/f_escenarios.html#ModelosGlobales5ta.
- Villatoro M., Henríquez C. y Sancho F. (2007). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, CA y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95-105.
- White, D. H. (2011). Agroclimatic classification systems for estimating the global distribution of livestock numbers commodities. *Environment international*, 27(2-3), 181-187.
- Wood, G. A. (1959). *El cultivo de cacao en Venezuela, Colombia y Ecuador: con notas sobre tres enfermedades del cacao*. Inglaterra: Cadbury Brothers.
- WMO, (World Meteorological Organization). 2006. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Preliminary seventh edition. Suiza: WMO-No. 8.
- Zonas Productoras de Cacao en Venezuela. (2002). Áreas potenciales para el desarrollo del cultivo de cacao en el Estado de Mérida. *Agronomía Tropical*, 52(4), 403-425.

ANEXO 1

1) Precipitación, Temperatura y ETP de 16 estaciones meteorológicas en Tabasco

CENTRO EXPERIMENTAL W75

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	22.7	150.3	75.4	húmedo
FEB	23.5	85.0	73.4	húmedo
MAR	25.8	40.2	92.6	seco
ABR	28.3	46.8	155.4	seco
MAY	29.4	64.8	175.1	seco
JUN	28.8	210.3	167.4	húmedo
JUL	28.2	198.1	166.7	húmedo
AGO	28.2	242.4	162.0	húmedo
SEP	27.7	345.3	146.2	húmedo
OCT	26.3	375.4	91.5	húmedo
NOV	24.6	221.4	79.7	húmedo
DIC	23.3	141.3	76.5	húmedo
TOTAL	26.4	2121.6	1461.9	húmedo

CÁRDENAS

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	22.9	138.5	76.1	húmedo
FEB	23.7	90.2	74.1	húmedo
MAR	26.0	42.1	93.1	seco
ABR	28.1	48.4	153.9	seco
MAY	29.0	68.3	172.0	seco
JUN	30.5	218.5	179.7	húmedo
JUL	28.0	178.6	164.9	húmedo
AGO	28.0	235.8	160.3	húmedo
SEP	27.5	338.4	144.6	húmedo
OCT	26.3	350.4	91.6	húmedo
NOV	24.7	208.0	80.0	húmedo
DIC	23.2	131.8	76.4	húmedo
TOTAL	26.5	2048.9	1466.7	húmedo

EMILIANO ZAPATA

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	23.6	99.8	79.0	húmedo
FEB	24.6	80.1	77.5	húmedo
MAR	26.9	49.0	142.1	seco
ABR	28.9	55.5	159.5	seco
MAY	29.9	106.8	178.1	húmedo
JUN	29.1	267.4	169.1	húmedo
JUL	28.6	195.5	169.2	húmedo
AGO	28.5	240.7	164.0	húmedo
SEP	28.1	348.4	149.0	húmedo
OCT	26.9	294.1	138.3	húmedo
NOV	25.4	168.0	82.7	húmedo
DIC	24.0	141.6	79.4	húmedo
TOTAL	27.0	2046.8	1587.9	húmedo

FRANCISCO RUEDA

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	23.0	137.3	76.9	húmedo
FEB	23.8	95.9	74.8	húmedo
MAR	26.3	67.6	94.3	seco
ABR	28.1	47.7	153.5	seco
MAY	29.4	106.7	174.5	húmedo
JUN	28.6	310.2	165.1	húmedo
JUL	28.1	258.0	165.0	húmedo
AGO	28.1	285.4	160.7	húmedo
SEP	27.7	377.9	146.2	húmedo
OCT	26.3	353.2	91.8	húmedo
NOV	26.9	209.3	129.1	húmedo
DIC	23.4	178.9	77.6	húmedo
TOTAL	26.7	2428.3	1509.5	húmedo

JONUTA

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	23.5	83.0	78.3	húmedo
FEB	24.5	60.7	76.8	seco
MAR	26.5	47.7	138.4	seco
ABR	28.5	57.7	157.1	seco
MAY	29.7	96.1	177.4	húmedo
JUN	28.9	226.9	168.3	húmedo
JUL	28.5	199.0	169.2	húmedo
AGO	28.7	247.0	166.2	húmedo
SEP	28.3	320.9	151.1	húmedo
OCT	27.1	291.8	139.7	húmedo
NOV	25.5	146.0	82.8	húmedo
DIC	24.3	111.0	80.0	húmedo
TOTAL	27.0	1887.8	1585.3	húmedo

PARÁISO

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	22.9	139.4	76.0	húmedo
FEB	23.8	94.9	74.4	húmedo
MAR	26.1	42.5	93.7	seco
ABR	27.9	39.6	152.2	seco
MAY	29.2	63.7	173.6	seco
JUN	28.8	135.6	167.4	húmedo
JUL	28.5	116.9	169.2	húmedo
AGO	28.5	137.2	164.5	húmedo
SEP	27.8	276.6	147.1	húmedo
OCT	26.8	338.3	137.1	húmedo
NOV	25.2	197.3	81.7	húmedo
DIC	23.4	173.6	77.2	húmedo
TOTAL	26.6	1755.6	1514.1	húmedo

SAMARIA

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	23.2	115.5	77.4	húmedo
FEB	23.8	76.4	74.6	húmedo
MAR	25.9	45.1	92.8	seco
ABR	27.9	42.5	151.9	seco
MAY	29.1	90.8	172.1	húmedo
JUN	29.7	205.0	165.9	húmedo
JUL	28.1	180.3	165.0	húmedo
AGO	28.2	215.1	161.5	húmedo
SEP	27.8	319.1	147.1	húmedo
OCT	26.5	326.3	134.7	húmedo
NOV	25.0	174.7	81.4	húmedo
DIC	23.6	139.6	78.0	húmedo
TOTAL	26.5	1930.4	1502.4	húmedo

VILLAHERMOSA

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	23.7	127.6	79.2	húmedo
FEB	24.5	78.3	77.1	húmedo
MAR	26.7	49.5	140.2	seco
ABR	28.5	43.1	156.7	seco
MAY	29.7	93.4	176.7	húmedo
JUN	29.3	210.0	170.6	húmedo
JUL	28.9	176.5	171.8	húmedo
AGO	28.9	214.2	167.3	húmedo
SEP	28.4	329.5	151.9	húmedo
OCT	27.1	301.4	140.0	húmedo
NOV	25.8	181.2	83.3	húmedo
DIC	24.1	136.8	79.9	húmedo
TOTAL	27.1	1941.4	1594.7	húmedo

BOCA DEL CERRO

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	23.5	119.8	78.6	húmedo
FEB	24.5	91.7	77.0	húmedo
MAR	26.5	72.8	138.4	húmedo
ABR	28.6	78.4	157.4	húmedo
MAY	29.8	140.9	175.9	húmedo
JUN	29.6	295.6	165.1	húmedo
JUL	28.0	228.8	164.1	húmedo
AGO	28.1	263.3	160.7	húmedo
SEP	27.9	390.6	147.9	húmedo
OCT	26.8	299.3	137.4	húmedo
NOV	25.2	184.2	82.1	húmedo
DIC	23.9	140.1	78.9	húmedo
TOTAL	26.8	2304.6	1563.5	húmedo

MACUSPANA

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	23.3	146.8	77.8	húmedo
FEB	24.3	115.4	76.2	húmedo
MAR	26.3	68.3	94.3	húmedo
ABR	28.3	64.4	155.1	húmedo
MAY	29.5	123.9	175.2	húmedo
JUN	29.0	295.8	168.3	húmedo
JUL	28.7	197.7	170.1	húmedo
AGO	28.6	266.5	164.0	húmedo
SEP	28.1	402.8	149.5	húmedo
OCT	27.0	335.2	139.2	húmedo
NOV	25.4	199.9	82.6	húmedo
DIC	23.9	158.1	79.1	húmedo
TOTAL	26.8	2374.8	1532.2	húmedo

SAN PEDRO

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	23.3	60.7	76.0	seco
FEB	24.5	49.7	76.9	seco
MAR	26.4	30.4	94.7	seco
ABR	28.7	42.9	158.3	seco
MAY	29.8	123.0	177.3	húmedo
JUN	28.9	247.5	167.5	húmedo
JUL	28.2	178.9	165.9	húmedo
AGO	28.3	197.3	162.3	húmedo
SEP	28.2	251.4	150.3	húmedo
OCT	27.0	204.2	139.2	húmedo
NOV	25.3	124.1	82.5	húmedo
DIC	23.8	72.5	78.8	seco
TOTAL	26.9	1591.3	1529.7	húmedo

EL TRIUNFO

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	24.0	65.1	80.4	seco
FEB	25.0	52.4	70.0	seco
MAR	26.7	24.6	140.2	seco
ABR	28.4	39.3	155.9	seco
MAY	29.5	120.3	175.2	húmedo
JUN	28.8	234.0	166.7	húmedo
JUL	28.5	164.8	168.5	húmedo
AGO	28.5	230.8	164.0	húmedo
SEP	28.4	241.9	151.9	húmedo
OCT	27.4	187.1	142.6	húmedo
NOV	25.8	125.3	84.0	húmedo
DIC	24.2	67.4	80.1	seco
TOTAL	27.1	1562.9	1588.1	húmedo

TEAPA (DGE)

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	22.4	261.0	74.9	húmedo
FEB	23.4	207.8	73.7	húmedo
MAR	25.6	113.9	91.8	húmedo
ABR	27.8	108.4	151.1	húmedo
MAY	29.0	147.4	171.4	húmedo
JUN	28.5	348.4	164.3	húmedo
JUL	28.0	286.4	164.1	húmedo
AGO	27.9	410.5	158.9	húmedo
SEP	27.4	531.6	143.8	húmedo
OCT	26.1	452.0	91.1	húmedo
NOV	24.5	273.1	79.7	húmedo
DIC	22.9	260.5	75.9	húmedo
TOTAL	26.1	3400.9	1440.7	húmedo

TAPIJULAPA

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	23.0	265.2	77.0	húmedo
FEB	23.9	212.6	75.0	húmedo
MAR	26.0	140.7	93.1	húmedo
ABR	28.0	148.7	152.7	húmedo
MAY	29.4	193.9	174.5	húmedo
JUN	28.9	352.8	167.5	húmedo
JUL	28.2	272.5	165.9	húmedo
AGO	28.1	380.3	160.7	húmedo
SEP	27.7	535.8	146.2	húmedo
OCT	26.4	483.5	92.2	húmedo
NOV	24.9	328.2	81.1	húmedo
DIC	23.4	260.7	77.6	húmedo
TOTAL	26.5	3575.1	1463.5	húmedo

OXOLOTAN

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	23.0	241.7	76.9	húmedo
FEB	23.9	199.1	75.2	húmedo
MAR	25.9	140.8	93.0	húmedo
ABR	28.1	139.6	153.5	húmedo
MAY	29.3	193.1	173.7	húmedo
JUN	28.6	360.8	165.1	húmedo
JUL	28.1	243.1	165.0	húmedo
AGO	28.2	306.6	161.5	húmedo
SEP	27.7	467.9	146.2	húmedo
OCT	26.3	450.8	91.8	húmedo
NOV	24.7	304.8	80.4	húmedo
DIC	23.3	259.6	77.1	húmedo
TOTAL	26.4	3308.0	1459.4	húmedo

TRES BRAZOS

MES	TEMP	PREC	ETP	H/S
ENE	23.2	91.1	77.4	húmedo
FEB	24.0	59.4	75.1	seco
MAR	25.9	36.2	92.8	seco
ABR	27.8	33.8	151.4	seco
MAY	28.8	68.5	170.4	húmedo
JUN	28.2	179.3	162.5	húmedo
JUL	28.0	149.7	164.9	húmedo
AGO	28.1	175.7	161.2	húmedo
SEP	27.7	283.4	146.2	húmedo
OCT	26.5	291.1	134.5	húmedo
NOV	25.1	162.0	81.5	húmedo
DIC	23.8	113.3	78.2	húmedo
TOTAL	26.4	1643.4	1496.1	húmedo

ANEXO 2

Tabla 57. Temperatura promedio a nivel mensual y anual para 16 estaciones de Tabasco

NOMBRE	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	T. ANUAL
Boca del Cerro	27004	23.5	24.5	26.5	28.6	29.6	28.6	28.0	28.1	27.9	26.8	25.2	23.9	26.8
Cent Exp W75	27007	22.7	23.5	25.8	28.3	29.4	28.8	28.2	28.2	27.7	26.3	24.6	23.3	26.4
Cárdenas	27008	22.9	23.7	26.0	28.1	29.0	30.5	28.0	28.0	27.5	26.3	24.7	23.2	26.5
Emiliano Zapata	27012	23.6	24.6	26.9	28.9	29.9	29.1	28.6	28.5	28.1	26.9	25.4	24.0	27.0
Francisco Rueda	27015	23.0	23.8	26.3	28.1	29.4	28.6	28.1	28.1	27.7	26.3	26.9	23.4	26.7
Jonuta	27028	23.5	24.5	26.5	28.5	29.7	28.9	28.5	28.7	28.3	27.1	25.5	24.3	27.0
Macuspana (DGE)	27030	23.3	24.3	26.3	28.3	29.5	29.0	28.7	28.6	28.1	27.0	25.4	23.9	26.8
Paraiso	27034	22.9	23.8	26.1	27.9	29.2	28.8	28.5	28.5	27.8	26.8	25.2	23.4	26.6
Samaria	27039	23.2	23.8	25.9	27.9	29.1	28.7	28.1	28.2	27.8	26.5	25.0	23.6	26.5
San Pedro	27040	23.3	24.5	26.4	28.7	29.8	28.9	28.2	28.3	28.2	27.0	25.3	23.8	26.9
Tapijulapa	27042	23.0	23.9	26.0	28.0	29.4	28.9	28.2	28.1	27.7	26.4	24.9	23.4	26.5
Teapa (DGE)	27044	22.4	23.4	25.6	27.8	29.0	28.5	28.0	27.9	27.4	26.1	24.5	22.9	26.1
Tres Brazos	27050	23.2	24.0	25.9	27.8	28.8	28.2	28.0	28.1	27.7	26.5	25.1	23.8	26.4
Villahermosa (DGE)	27054	23.7	24.5	26.7	28.5	29.7	29.3	28.9	28.9	28.4	27.1	25.6	24.1	27.1
El Triunfo	27059	24.0	25.0	26.7	28.4	29.5	28.8	28.5	28.5	28.4	27.4	25.8	24.2	27.1
Oxolotan	27070	23.0	23.9	25.9	28.1	29.3	28.6	28.1	28.2	27.7	26.3	24.7	23.3	26.4

Tabla 58. Temperaturas máximas mensuales y anuales de 16 estaciones de Tabasco.

NOMBRE	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TMAX_PROM
Boca del Cerro	27004	28.3	29.8	32.5	34.8	35.7	34.1	33.4	33.6	32.9	31.3	29.8	28.5	32.4
Cent Exp W75	27007	33.9	28.7	32.2	35.1	36.2	34.9	35.0	33.8	33.0	31.2	29.5	28.0	32.5
Cárdenas	27008	27.5	28.8	31.9	34.4	35.3	34.2	33.5	33.6	32.6	31.0	29.4	28.1	32.1
Emiliano Zapata	27012	28.4	29.9	32.9	35.3	36.1	34.7	34.1	34.0	33.2	31.3	29.9	28.5	32.7
Francisco Rueda	27015	27.4	28.7	32.0	34.5	36.1	34.4	33.4	33.4	32.7	30.8	29.4	27.9	32.1
Jonuta	27028	28.5	29.7	32.5	34.7	36.0	34.6	34.0	34.2	33.4	31.7	31.4	28.9	32.8
Macuspana (DGE)	27030	27.6	28.9	31.4	33.6	34.9	33.8	33.5	33.4	32.4	30.9	29.4	28.0	31.8
Paraiso	27034	27.2	28.3	31.4	33.4	34.9	34.0	33.5	33.6	32.5	31.1	29.5	27.7	31.8
Samaria	27039	27.1	28.1	30.6	32.9	34.1	33.2	32.2	32.5	31.5	30.0	28.6	27.2	31.0
San Pedro	27040	28.8	30.6	33.3	35.9	36.7	34.9	34.0	34.3	33.7	32.1	30.5	28.9	33.2
Tapijulapa	27042	27.7	28.9	31.8	34.2	35.3	34.3	33.7	33.4	32.4	30.8	29.3	27.9	32.0
Teapa (DGE)	27044	26.8	28.3	31.4	33.9	35.0	34.1	33.6	33.4	32.3	30.6	29.0	27.3	31.7
Tres Brazos	27050	27.8	29.0	31.6	33.7	34.7	33.7	33.3	33.5	32.6	30.9	29.5	28.1	31.9
Villahermosa (DGE)	27054	28.0	29.3	32.0	34.0	35.1	34.5	33.9	34.0	32.9	31.1	29.7	28.3	32.3
El Triunfo	27059	30.0	31.6	33.2	34.5	36.2	35.6	35.7	40.3	34.6	34.8	32.6	29.6	34.4
Oxolotan	27070	27.7	29.0	33.8	34.4	35.3	34.1	33.8	35.5	32.6	30.8	32.0	27.7	32.6

Tabla 59. Temperaturas mínimas mensuales y anuales de 16 estaciones de Tabasco.

NOMBRE	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TMIN_PROM
Boca del Cerro	27004	18.7	19.2	20.6	22.4	23.6	23.4	22.8	22.8	22.9	22.2	20.6	19.3	21.5
Cent Exp W75	27007	17.9	17.9	19.4	21.4	22.6	22.7	22.5	22.5	22.4	21.4	19.7	18.5	20.7
Cárdenas	27008	18.2	18.5	20.0	21.8	22.8	22.9	22.5	22.5	22.4	21.6	20.0	18.8	21.0
Emiliano Zapata	27012	18.9	19.4	21.0	22.5	23.6	23.5	23.0	23.1	23.1	22.5	20.9	19.5	21.7
Francisco Rueda	27015	18.6	18.9	20.5	21.7	22.8	22.8	22.8	22.8	22.7	21.8	20.5	19.0	21.2
Jonuta	27028	18.5	19.0	20.6	22.2	23.4	23.4	23.0	23.1	23.2	22.6	21.0	19.8	21.6
Macuspana (DGE)	27030	18.1	18.6	20.1	21.9	23.0	23.1	22.8	22.8	22.8	22.2	20.5	18.9	21.3
Paraiso	27034	18.5	19.2	20.9	22.4	23.5	23.7	23.5	23.4	23.2	22.4	20.9	19.2	21.7
Samaria	27039	18.5	18.7	20.2	22.0	23.2	23.5	23.1	23.1	23.2	22.3	20.6	19.2	21.5
San Pedro	27040	17.9	18.3	19.5	21.5	22.8	22.9	22.3	22.4	22.7	21.9	20.2	18.6	20.9
Tapijulapa	27042	18.4	18.9	20.1	21.9	23.3	23.4	22.8	22.8	23.0	22.0	20.5	19.0	21.3
Teapa (DGE)	27044	17.9	18.5	19.9	21.7	23.0	23.0	22.4	22.5	22.5	21.6	20.0	18.5	21.0
Tres Brazos	27050	18.6	19.0	20.2	21.9	22.8	22.7	22.7	22.7	22.8	22.1	20.8	19.4	21.3
Villahermosa (DGE)	27054	19.3	19.8	21.4	23.1	24.2	24.2	23.8	23.9	23.8	23.0	21.5	20.0	22.3
El Triunfo	27059	18.4	19.1	20.5	21.9	23.3	23.1	22.8	22.9	23.0	22.2	20.5	18.7	21.4
Oxolotan	27070	18.3	18.8	19.9	21.8	23.2	23.2	22.5	22.7	22.7	21.8	20.2	18.9	21.2

Tabla 60. Precipitación promedio a nivel mensual y total acumulada anual para 16 estaciones de Tabasco.

NOMBRE	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PREC TOTAL
Boca del Cerro	27004	118.8	91.7	72.8	78.4	140.9	295.6	228.8	263.3	390.6	299.3	184.2	140.1	2304.6
Cent Exp W75	27007	150.3	85.0	40.2	46.8	64.8	210.3	198.1	242.4	345.3	375.4	221.4	141.3	2121.6
Cárdenas	27008	138.5	90.2	42.1	48.4	68.3	218.5	178.6	235.8	338.4	350.4	208.0	131.8	2048.9
Emiliano Zapata	27012	99.8	80.1	49.0	55.5	106.8	267.4	195.5	240.7	348.4	294.1	168.0	141.6	2046.8
Francisco Rueda	27015	137.3	95.9	67.6	47.7	106.7	310.2	258.0	285.4	377.9	353.2	209.3	178.9	2428.3
Jonuta	27028	83.0	60.7	47.7	57.7	96.1	226.9	199.0	247.0	320.9	291.8	146.0	111.0	1887.8
Macuspana (DGE)	27030	146.8	115.4	68.3	64.4	123.9	295.8	197.7	266.5	402.8	335.2	199.9	158.1	2374.8
Paraiso	27034	139.4	94.9	42.5	39.6	63.7	135.6	116.9	137.2	276.6	338.3	197.3	173.6	1755.6
Samaria	27039	115.5	76.4	45.1	42.5	90.8	205.0	180.3	215.1	319.1	326.3	174.7	139.6	1930.4
San Pedro	27040	60.7	49.7	39.4	42.9	123.0	247.5	178.9	197.3	251.4	204.2	124.1	72.5	1591.3
Tapijulapa	27042	265.2	212.6	140.7	148.7	193.9	352.8	272.5	380.3	535.8	483.5	328.2	260.7	3575.1
Teapa (DGE)	27044	261.0	207.8	113.9	108.4	147.4	348.4	286.4	410.5	531.6	452.0	273.1	260.5	3400.9
Tres Brazos	27050	91.1	59.4	36.2	33.8	68.5	179.3	149.7	175.7	283.4	291.1	162.0	113.3	1643.4
Villahermosa (DGE)	27054	127.6	78.3	49.5	43.1	93.4	210.0	176.5	214.2	329.5	301.4	181.2	136.6	1941.4
El Triunfo	27059	65.1	52.4	34.6	39.3	120.3	234.0	164.8	230.8	241.9	187.1	125.3	67.4	1562.9
Oxolotan	27070	241.7	199.1	140.8	139.6	193.1	360.8	243.1	306.6	467.9	450.8	304.8	259.6	3308.0

Tabla 61. Evapotranspiración potencial mensual y anual para 16 estaciones de Tabasco.

NOMBRE	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ETP TOTAL
Boca del Cerro	27004	78.6	77	138.4	157.4	175.9	165.1	164.1	160.7	147.9	137.4	82.1	78.9	1563.5
Cent Exp W75	27007	75.4	73.4	92.6	155.4	175.1	167.4	166.7	162	146.2	91.5	79.7	76.5	1461.9
Cárdenas	27008	76.1	74.1	93.1	153.9	172	179.7	164.9	160.3	144.6	91.6	80	76.4	1466.7
Emiliano Zapata	27012	79	77.5	142.1	159.5	178.1	169.1	169.2	164	149	138.3	82.7	79.4	1587.9
Francisco Rueda	27015	76.9	74.8	94.3	153.5	174.5	165.1	165	160.7	146.2	91.8	129.1	77.6	1509.5
Jonuta	27028	78.3	76.8	138.4	157.1	177.4	168.3	169.2	166.2	151.1	139.7	82.8	80	1585.3
Macuspana (DGE)	27030	77.8	76.2	94.3	155.1	175.2	168.3	170.1	164.8	149.5	139.2	82.6	79.1	1532.2
Paraiso	27034	76	74.4	93.7	152.2	173.6	167.4	169.2	164.5	147.1	137.1	81.7	77.2	1514.1
Samaria	27039	77.4	74.6	92.8	151.9	172.1	165.9	165	161.5	147.1	134.7	81.4	78	1502.4
San Pedro	27040	76	76.9	94.7	158.3	177.3	167.5	165.9	162.3	150.3	139.2	82.5	78.8	1529.7
Tapijulapa	27042	77	75	93.1	152.7	174.5	167.5	165.9	160.7	146.2	92.2	81.1	77.6	1463.5
Teapa (DGE)	27044	74.9	73.7	91.8	151.07	171.4	164.3	164.1	158.9	143.8	91.1	79.7	75.9	1440.7
Tres Brazos	27050	77.4	75.1	92.8	151.4	170.4	162.5	164.9	161.2	146.2	134.5	81.5	78.2	1496.1
Villahermosa (DGE)	27054	79.2	77.1	140.2	156.7	176.7	170.6	171.8	167.3	151.9	140	83.3	79.9	1594.7
El Triunfo	27059	80.4	78.6	140.2	155.9	175.2	166.7	168.5	164	151.9	142.6	84	80.1	1588.1
Oxolotan	27070	76.9	75.2	93	153.5	173.7	165.1	165	161.5	146.2	91.8	80.4	77.1	1459.4

ANEXO 3

