

Duración del periodo de lluvias y aptitud de tierras para la agricultura de temporal

Duration of the rain period and land suitability for rainfed agriculture

Carmen Delgado¹, Francisco Bautista^{2*}, Thomas Ihl², David Palma-López³

¹Unidad de Recursos Naturales, Centro de Investigación Científica de Yucatán.

²Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, Morelia, Michoacán, México. CP. 58190; Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Murcia, E-30100, España.

³Colegio de Posgraduados-Campus Tabasco.

*Autor de correspondencia: leptosol@ciga.unam.mx

Artículo científico recibido: 15 de diciembre de 2016 aceptado: 21 de marzo de 2017

RESUMEN. El concepto duración del periodo de lluvias (DPLL) es una propuesta de mejoramiento de otro denominado longitud del periodo de crecimiento (LPC). El objetivo fue realizar un mapa de aptitud para la agricultura de temporal basado en la selección de un modelo de la duración del periodo de lluvias con el índice de humedad. Se utilizaron los datos de 65 estaciones meteorológicas del estado de Yucatán y zonas circundantes. Se analizó la relación entre el resultado del modelo con el mapa de la vegetación potencial. Se encontró que el índice de humedad es mayor cuando proviene del método de Thornthwaite (MT), con el que se obtuvo el mejor modelo cartográfico con valor de definición de un mes húmedo cuando es mayor a 0.65. El variograma fue tipo Gaussiano con una $r^2 = 0.98$ y el porcentaje de la varianza explicada $C/(C_0+C) = 74 \%$. La validación cruzada de la interpolación presentó una $r = 0.63$ y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM) = 1.34. Los cinco intervalos de meses húmedos de interés agrícola fue de tres a cuatro meses, de cuatro a cinco meses, de cinco a seis meses, de seis a siete meses, y de siete a ocho meses.

Palabras clave: Evapotranspiración, geoestadística, índice de humedad, precipitación, Thornthwaite

ABSTRACT. The concept of rainfall season duration (DPLL) is an improvement of another concept known as length of the growing season (LPC). The objective was to develop a suitability map for rainfed agriculture, based on the selection of a rainfall season duration model that includes the humidity index. Data from 65 weather stations in the state of Yucatan and surrounding areas were used. The relationship between the result of the model and the potential vegetation map was analyzed. The humidity index was higher when the Thornthwaite method (MT) was used; this method was also used to obtain the best cartographic model, defining a humid month as the period in which humidity was higher than 0.65. The Gaussian variogram was used, with $r^2 = 0.98$ and a percentage of explained variance of $C/(C_0+C) = 74 \%$. The cross-validation of the interpolation showed a $r = 0.63$ and a square root of the mean square error (RECM) = 1.34. For agricultural purposes, five intervals of humid months were recorded: three to four months, four to five months, five to six months, six to seven months, and seven to eight months.

Key words: Evapotranspiration, geostatistic, humidity index, pluvial precipitation, Thornthwaite

INTRODUCCIÓN

La metodología adoptada por la FAO para el establecimiento de una zonificación agroecológica, consiste en definir áreas homogéneas de tierras en términos de integración de clima, fisiografía, suelos y usos de la tierra (FAO 1996). El clima se incluye mediante el concepto de Longitud del período de

crecimiento (LPC) que es una traducción literal del término en inglés Length of the growing period, que se refiere al periodo continuo del año en que las condiciones de humedad y temperatura son las adecuadas para el crecimiento de los cultivos de temporal, o bien para saber cuándo es necesario utilizar riego de auxilio en los periodos de sequía intraestival (Holden y Brereton 2004).

De acuerdo con la FAO (1996) la duración del período de lluvias (DPLL) se determina por el índice (IH) que es el cociente entre la precipitación y la evapotranspiración potencial (Thornthwaite 1948, Bautista *et al.* 2016). La estimación de la evapotranspiración potencial (Et_0) con el método de Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998), tiene la desventaja de requerir parámetros que no se tienen en la mayoría de las estaciones meteorológicas de Latinoamérica. Al respecto Bautista *et al.* (2009) calibraron, para las condiciones del estado de Yucatán métodos alternos de estimación de la Et_0 , los cuales usan las variables de temperatura, insolación y precipitación pluvial. Encontrando que, durante la época de lluvias, la Et_0 calculada con el método Thornthwaite proporciona valores cercanos a la Et_0 calculada con el modelo de Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998). Por ello, Delgado *et al.* (2011) con el método Thornthwaite estimaron la Et_0 y definieron el periodo de lluvias de manera gráfica como lo sugiere la FAO; pero los criterios de inicio y término del periodo de lluvias son imprecisos. Esta deficiencia puede ser superada contabilizando sólo los meses en donde el valor del IH sea mayor a 0.5 o mayor a 0.65, valores que caracterizan a los climas que predominan en el estado de Yucatán (Bautista *et al.* 2016).

En el estado de Yucatán, México, se dedican 780 170 ha para actividades agrícolas, de las cuales el 5 % de esta superficie se cultiva bajo riego y el 95 % es de temporal (SAGARPA 2011). Ocupando el cultivo de maíz 161 014 ha, mientras que la superficie bajo riego es mínima (INEGI 2013). Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue la selección y propuesta de un modelo de la DPLL en el estado de Yucatán, México calculado con dos valores del índice de humedad y su distribución espacial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

En el estado de Yucatán los principales paisajes geomorfológicos y los tipos de suelos son: planicies costeras con Arenosols, Regosols y Solonchak; planicies kársticas con Leptosols, Cambisols

y Luvisols; lomeríos alineados con Leptosols y Luvisols; y lomeríos aislados con Vertisols, Gleysols y Leptosols (Bautista *et al.* 2015). La vegetación presenta de la costa noroeste al sur-sureste: matorral de dunas, manglar rodeando de sistemas lagunares, selva baja caducifolia, pastizales, selva mediana subcaducifolia y subperennifolia (Olmsted *et al.* 1999).

Los factores que conforman el clima en el estado de Yucatán son: ausencia de elevaciones considerables, mar cálido al norte y noroeste, marcado gradiente de presión atmosférica e influencia del anticiclón Bermuda Azores del Atlántico y presencia estival de vientos alisios y ondas tropicales, recurrencia del fenómeno de sequía intraestival, influencia de tormentas tropicales, frentes fríos que atraviesan el estado de Yucatán en periodos invernales y la influencia de la corriente cálida del Canal de Yucatán (Orellana *et al.* 1999). Lo que ocasiona, que el clima en la franja del extremo noroeste entre Sisal y Progreso presenta los siguientes subtipos climáticos: muy cálido árido con lluvias en verano y alto porcentaje de lluvia invernal $BS_0(h')w(x')$, circundado por el muy cálido semiárido con lluvias de verano, $BS_1(h')w$ desde Celestún hasta Telchac; al sur y hacia el Golfo de México, están los climas cálidos y muy cálidos, los más secos de los subhúmedos con lluvias en verano con mediano y alto porcentaje de lluvia invernal Aw_0 y $Aw_0(x')$, así como los cálidos y muy cálidos, los más secos de los subhúmedos con lluvias uniformemente repartidas $Ax'w_0$, y al este, el clima cálido subhúmedo con régimen de lluvias intermedio y alto porcentaje de lluvia invernal $Ax'w_1(i')$ (García 2004).

Bases de datos

Se elaboró una base de datos de precipitación mensual (P), temperatura media (T_m), mínima y temperatura máxima mensual. Los datos se obtuvieron de 65 estaciones meteorológicas del estado de Yucatán, y de los estados de Campeche y Quintana Roo. Para determinar el espacio entre las estaciones de Yucatán al extremo y el límite del estado, con información comprendida entre 1961 y 2006. Esta información se usó para estimar la Et_0 con los métodos de Thornthwaite (Et_0 -MT) (Thornthwaite

1948, Bautista *et al.* 2009) y Hargreaves (Et₀-MH) (Hargreaves *et al.* 1985, Hargreaves y Samani 1985, Bautista *et al.* 2009), con el software Clic-MD (Bautista *et al.* 2016).

El cálculo de la DPLL se realizó para los valores de IH mayores a 0.5 y 0.65. El IH es ampliamente utilizado para datos anuales, los intervalos son: menor a 0.05 (hiperárido), de 0.05 a 0.20 (árido), de 0.20 a 0.50 (semiárido), de 0.50 a 0.65 (subhúmedo seco), de 0.65 a 1 (subhúmedo húmedo) y mayor a 1 (húmedo) (Bautista *et al.* 2016). La DPLL se calculó con la fórmula:

$$DPLL = IH = \frac{P}{Et_0}$$

Donde: DPLL = Duración del periodo de lluvias, IH = Índice de humedad mayor a 0.5 o mayor a 0.65, P = precipitación pluvial, Et₀: Evapotranspiración estimada con el método de Thornthwaite (Et₀-MT) o con el de Hargreaves (Et₀-MH).

Considerando los dos métodos de la Et₀ y los dos niveles del IH se definieron los métodos de cálculo de la DPLL: 1) IH 0.5-MT = duración del periodo de lluvias con IH mayor de 0.5, a partir de la Et₀ calculada con el método de Thornthwaite; 2) IH 0.5-MH = duración del periodo de lluvias con IH mayor de 0.5, a partir de la Et₀ calculada con el método de Hargreaves; 3) IH 0.65-MT = duración del periodo de lluvias con IH mayor de 0.65, a partir de la Et₀ calculada con el método de Thornthwaite; y 4) IH 0.65-MH = duración del periodo de lluvias con IH mayor de 0.65, a partir de la Et₀ calculada con el método de Hargreaves.

Análisis espacial

Para el análisis espacial se formó una base de datos georreferenciada de las estaciones meteorológicas y el número de meses de la DPLL resultantes en cada una de las cuatro combinaciones: IH 0.5-MT, IH 0.5-MH, IH 0.65-MT e IH 0.65-MH. El análisis espacial se realizó con el software GS+ (Robertson 2008). Se elaboró el semivariograma experimental para seleccionar el mejor modelo teórico; luego se realizó la estimación de los puntos no me-

didados utilizando el método *Kriging*; para luego por validación de la interpolación obtener la validación cruzada de los puntos estimados y los puntos medidos, y calcular la raíz cuadrada del error medio al cuadrado (RMSE) (Hernández-Stefanoni y Ponce-Hernández 2006, Delgado *et al.* 2010). Por último, la representación cartográfica se realizó con el software Arc Gis 9.0. Para la georreferenciación se usó la proyección UTM zona 16 Norte con el World Geodetic System 84 (WGS84). La evaluación de tierras para determinar la aptitud para la agricultura de temporal se realizó integrando el mapa geomorfoedafológico (Bautista *et al.* 2015) y el mapa de la DPLL a partir del método IH 0.65-MT, con las fronteras geomorfoedafológicas, ya que las agroclimáticas (DPLL) son fronteras difusas.

RESULTADOS

Duración del periodo de lluvias (DPLL) calculado con el método IH 0.5-MT

La moda de la duración del periodo de lluvias (DPLL) con el método H 0.5-MT fue de cinco meses (Tabla 1). El inicio de la DPLL se presentó en el mes de mayo y junio en el 55 y 42 % de las estaciones, respectivamente. Mientras que el final del periodo se tiene en el mes de octubre en el 45 % y en noviembre en el 17 % de las estaciones (Tabla 2). Las estaciones costeras, excepto Celestún, presentaron sequía intraestival con merma de la lluvia en los meses de julio y agosto.

Duración del periodo de lluvias calculada con el método IH 0.5-MH

La duración del periodo de lluvias (DPLL) con el método IH 0.5-MH fue de cinco meses (Tabla 1). El inicio de la DPLL fue principalmente en junio con el 60 % y en mayo con el 37 % de las estaciones; el final del periodo se registró en octubre en el 80 % y en noviembre en el 9 % de las estaciones (Tabla 2). Tres estaciones costeras tuvieron sequía intraestival con merma de la lluvia en los meses de julio y agosto, mientras que Celestún no tuvo sequía intraestival.

Tabla 1. Estadística descriptiva de la duración del periodo de lluvias (DPLL) en las estaciones meteorológicas con los diferentes métodos.

Estaciones	IH 0.5-MT	IH 0.5-MH	IH 0.65-MT	IH 0.65-MH
Promedio	7	5	5	5
Moda	5	5	5	5
Mediana	7	5	5	5
Mínimo	3	2	0	1
Máximo	11	9	9	8
Desviación estándar	2	1	2	1

IH 0.5-MT = Método índice de humedad mayor de 0.5 y la Et_0 de acuerdo con Thornthwaite; IH 0.5-MH = Método índice de humedad mayor de 0.5 y la Et_0 de acuerdo con Hargreaves; IH 0.65-MT = Método índice de humedad mayor de 0.65 y la Et_0 de acuerdo con Thornthwaite; IH 0.65-MH = Método índice de humedad mayor de 0.65 y la Et_0 de acuerdo con Hargreaves.

Duración del periodo de lluvias calculada con el método IH 0.65-MT

La duración del periodo de lluvias (DPLL) con el método IH 0.65-MT fue de cinco meses (Tabla 1). El inicio de la DPLL fue en el mes de junio con el 63 % y en mayo con el 34 % de las estaciones; el final del periodo se registró en octubre con el 72 % y en noviembre con el 14 % de las estaciones (Tabla 2). La estación meteorológica de Progreso tuvo 0 meses de lluvias; sólo una estación costera presentó sequía intraestival con merma de la lluvia en los meses de julio y agosto y Celestún no presentó lluvias.

Duración del periodo de lluvias calculada con el método IH 0.65-MH

La duración del periodo de lluvias (DPLL) con el método IH 0.65-MH fue de cinco meses (Tabla 1). El inicio de la DPLL fue en el mes de junio con el 86 % de las estaciones; el final del periodo se registró en octubre en el 97 % de las estaciones (Tabla 2). De las estaciones costeras, cinco iniciaron la DPLL en septiembre con una duración de uno y dos meses; otras dos estaciones presentaron sequía intraestival en julio y agosto; y Celestún no presentó sequía intraestival. La DPLL calculada con los diferentes métodos fue de cinco meses, comenzando en los meses de mayo y junio, finalizando en el mes de octubre, con excepción de algunas estaciones que terminaron en noviembre. La DPLL con el método de Thornthwaite tuvo mayor variabilidad que la calculada con el método de Hargreaves. En general, las estaciones costeras, excepto Celestún,

presentaron sequía intraestival y tienen los valores menores de DPLL, desde cero hasta cinco meses de duración. Los valores de la DPLL siguen el mismo gradiente del índice de humedad, de menor a mayor valor, en las estaciones que están en el noroeste con dirección al sureste, respectivamente; representando la estación meteorológica Progreso a las estaciones costeras del noroeste; la estación Mérida a las centrales y la estación Calotmul a las orientales.

Los modelos espaciales

Los cuatro modelos de semivariogramas de la distribución espacial de la DPLL tuvieron modelos adecuados con r^2 de 0.88 a 0.98; grado de dependencia espacial mayor del 74 %, lo que garantiza los pesos asignados al estimador de kriging. El coeficiente de correlación entre los valores estimados y medidos fueron moderados de 0.60 a 0.65, sólo con el modelo DPLL IH 0.65-MH fue bajo; la medida de las diferencias entre los valores estimados y medidos (RMSE) fue adecuada, con valores menores a 2 (Tabla 3). La distribución espacial de la DPLL en los mapas de los modelos geoestadísticos, muestran un gradiente de menor a mayor número de meses de la DPLL en dirección del noroeste al sur y sureste del estado de Yucatán (Figuras 1, 2 y 3), con excepción del modelo DPLL IH 0.65-MH que no sigue el gradiente (Figura 4). El mapa de la DPLL a partir del método IH 0.5-MT (Figura 1) tuvo siete niveles, de tres hasta 10 meses de duración. Los niveles mayores de siete meses parecen ser muy altos respecto del tipo de vegetación que allí se reporta, de selva mediana subcaducifolia.

Tabla 2. Distribución anual del porcentaje de estaciones al inicio y final de la duración del periodo de lluvias (DPLL) calculado con los diferentes métodos.

Métodos de la DPLL	Inicio (%)					Final (%)						
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Septiembre	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
IH 0.5-MT	3	55	42	-	-	-	45	17	17	11	9	1
IH 0.5-MH	-	37	60	-	3	2	80	9	6	3	-	-
IH 0.65-MT	-	34	63	-	3	9	72	14	-	5	-	-
IH 0.65-MH	-	3	86	3	8	-	97	1.5	1.5	-	-	-

DPLL = Duración del periodo de lluvias; IH 0.5-MT = Método índice de humedad mayor de 0.5 y la E_{t0} de acuerdo con Thornthwaite; IH 0.5-MH = Método índice de humedad mayor de 0.5 y la E_{t0} de acuerdo con Hargreaves; IH 0.65-MT = Método índice de humedad mayor de 0.65 y la E_{t0} de acuerdo con Thornthwaite; IH 0.65-MH = Método índice de humedad mayor de 0.65 y la E_{t0} de acuerdo con Hargreaves.

Tabla 3. Resumen geoestadístico de los diferentes métodos de cálculo de la duración del periodo de lluvias (DPLL).

Métodos	Parámetros de la autocorrelación espacial				Parámetros de la interpolación	
	Modelo	r^2	$C/(C_0+C)$ (%)	R Distancia	r	RMSE
IH 0.5-MT	Gaussiano	0.88	74	1.33	0.65	1.67
IH 0.5-MH	Exponencial	0.9	92	1.7	0.6	1.14
IH 0.65-MT	Gaussiano	0.98	74	1.35	0.63	1.34
IH 0.65-MH	Exponencial	0.9	99	1.53	0.51	1.06

$C/(C_0+C)$ = varianza con dependencia espacial; RMSE = raíz cuadrada del error medio al cuadrado; DPLL = Duración del periodo de lluvias; IH 0.5-MT = Método índice de humedad mayor de 0.5 y la E_{t0} de acuerdo con Thornthwaite; IH 0.5-MH = Método índice de humedad mayor de 0.5 y la E_{t0} de acuerdo con Hargreaves; IH 0.65-MT = Método índice de humedad mayor de 0.65 y la E_{t0} de acuerdo con Thornthwaite; IH 0.65-MH = Método índice de humedad mayor de 0.65 y la E_{t0} de acuerdo con Hargreaves.

En el mapa de la DPLL con el método IH 0.5-MH (Figura 2) se determinaron seis niveles, desde dos hasta ocho meses de duración. El nivel de siete a ocho meses no corresponde con el tipo de vegetación. Se presenta un área de alta DPLL al oriente del estado, dentro de uno de menor duración, que interrumpe el gradiente noroeste-sureste, y no se explica con el tipo de vegetación. La presencia de esta área podría explicarse porque es una zona donde hay alta incidencia de paso de huracanes. El mapa de la DPLL con el método IH 0.65-MT (Figura 3) define cinco niveles, desde tres hasta ocho meses de duración, lo cual concuerda con el gradiente de humedad del mapa de la vegetación potencial. Desde el punto de vista geoestadístico, el modelo de la DPLL es el más adecuado y preciso, considerando los parámetros del semivariograma, la r^2 del modelo, el índice de correlación y la RMSE de la interpolación. En este mapa, el nivel de tres meses coincide con la vegetación de manglar, selva baja inundable y una porción de la selva baja caducifolia; en los niveles de cuatro y cinco meses, se ubica

la vegetación de selva baja caducifolia; en el nivel de seis meses se presenta selva mediana subcaducifolia; y en el nivel de siete meses la selva mediana subperennifolia.

El mapa que corresponde a la DPLL del método IH 0.65-MH (Figura 4) se definieron seis niveles; desde dos hasta ocho meses de duración. Donde no se observa el gradiente de menor a mayor en la duración del periodo de lluvias, sólo en el noroeste se percibe un ligero incremento. Al tratar de validar las diferentes zonas con los tipos de vegetación potencial, sólo en la parte noroeste se ve un gradiente de menor a mayor duración del periodo de lluvias; hacia el sur y sureste no se mantiene ese gradiente, lo cual no permite encontrar alguna relación con los tipos de vegetación.

La agricultura de temporal usando el método DPLL IH 0.65-MT

El análisis de los resultados de la DPLL a partir del IH 0.65-MT considerado el mejor modelo geoestadístico (Tabla 4), muestra que la menor hu-

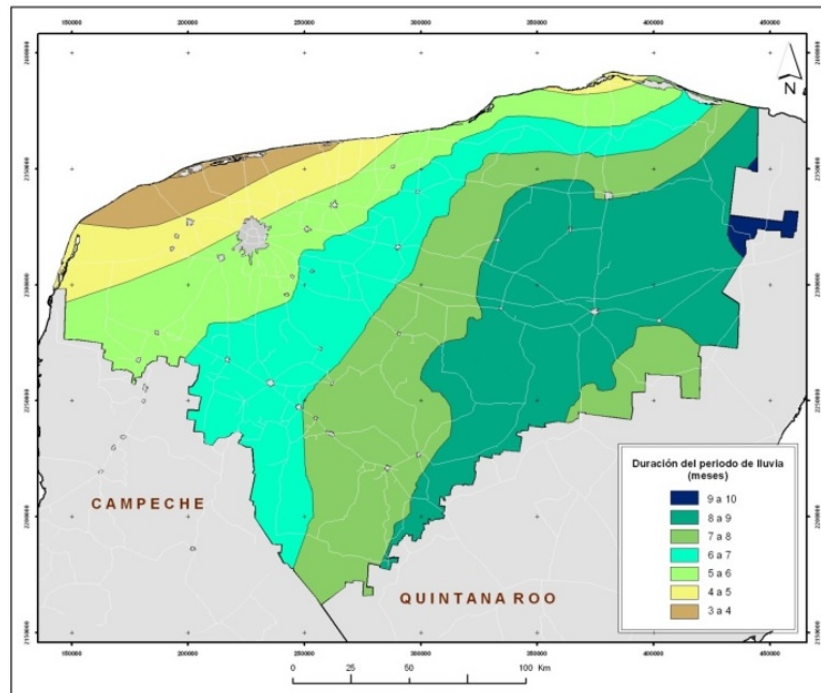


Figura 1. Duración del periodo de lluvias (DPLL) a partir del método IH 0.5-MT.

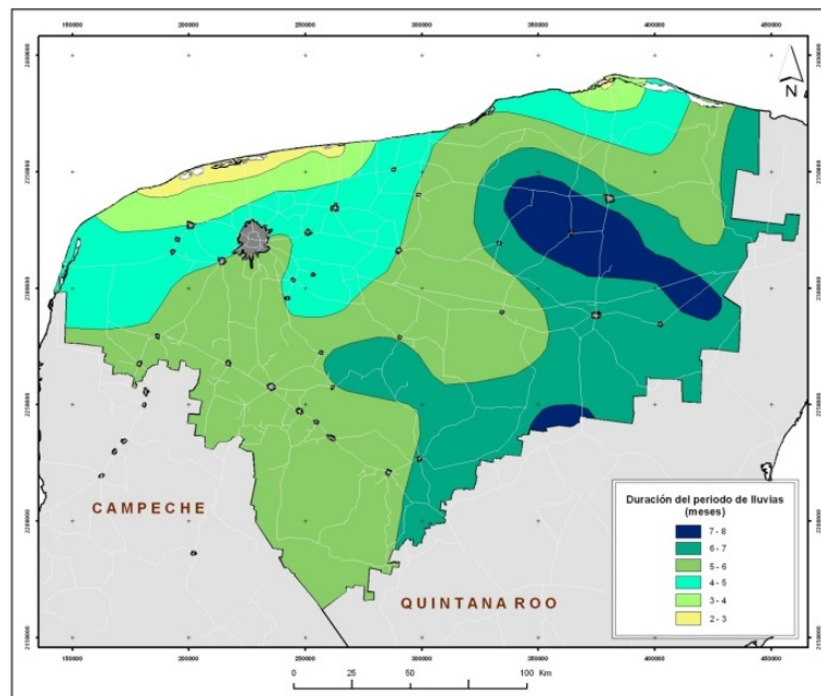


Figura 2. Duración del periodo de lluvias (DPLL) a partir del método IH 0.5-MH.

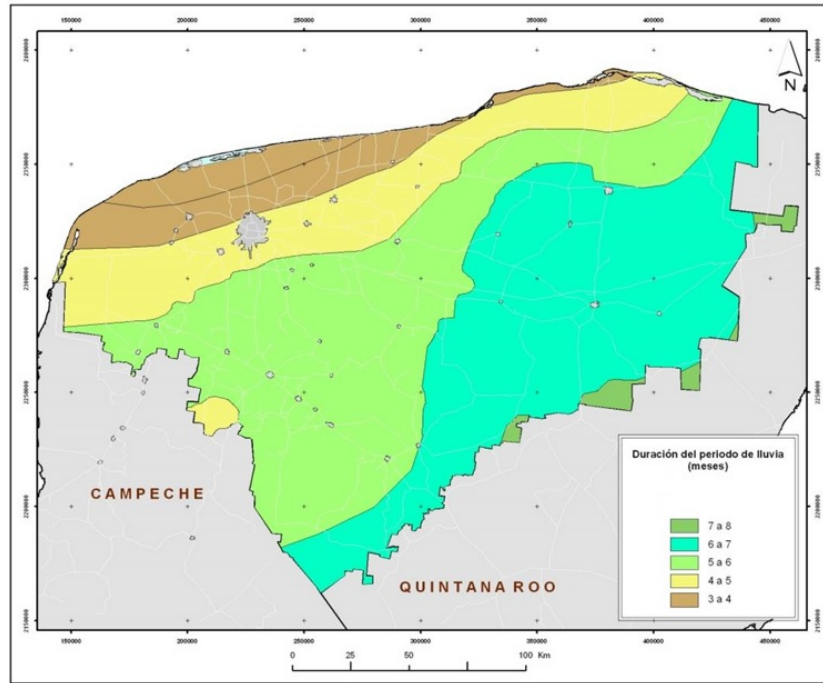


Figura 3. Duración del periodo de lluvias (DPLL) a partir del método IH 0.65-MT.

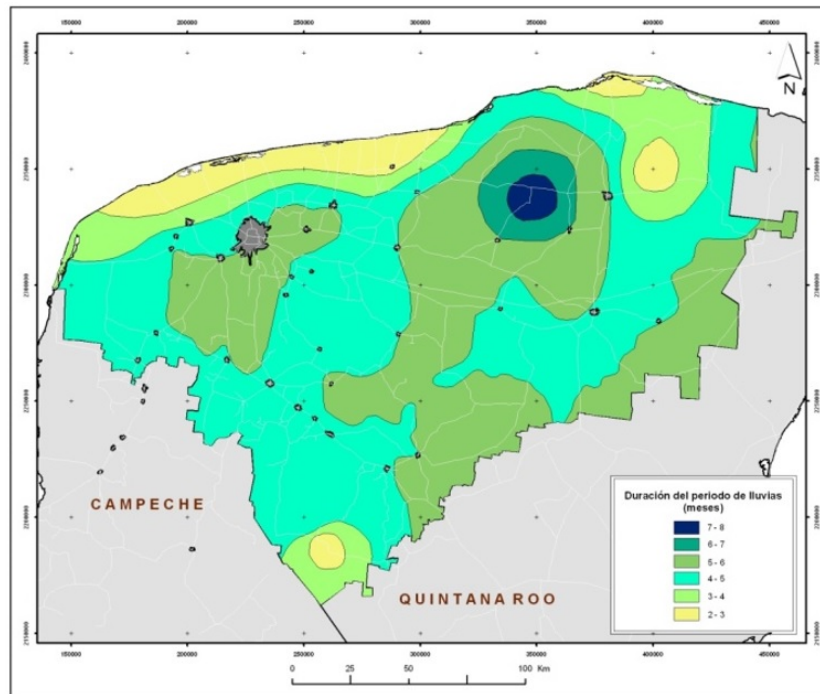


Figura 4. Duración del periodo de lluvias (DPLL) a partir del método IH0.65-MH.

medad se localiza, en las estaciones costeras de Progreso, con ningún mes húmedo. Mientras que Sisal y Telchac Puerto tienen un mes; en tanto que Río Lagartos y Chicxulub Puerto con dos meses y el último con sequía intraestival. Un segundo grupo de cuatro meses de DPLL, sin sequía intraestival. Un tercer grupo de 32 estaciones meteorológicas tuvieron una DPLL de cinco meses iniciando en junio y finalizando en octubre. Mientras que un cuarto grupo de 16 estaciones meteorológicas tuvieron una DPLL de seis meses, iniciando en mayo y finalizando en octubre. Las zonas más húmedas tuvieron una DPLL de siete, ocho y nueve meses. En general, los meses menos húmedos fueron marzo y abril, y los que tienen mayor humedad son junio, julio, agosto, septiembre y octubre, destacando septiembre como el mes de mayor humedad. En tanto que muchas de las estaciones costeras inician y terminan la DPLL en septiembre.

La integración del mapa de la DPLL IH MT-0.65 con el mapa geomorfo-pedológico compuesto por el relieve y los suelos se denominó mapa de aptitud para la agricultura de temporal; permite la evaluación de las zonas para este tipo de agricultura (Figura 5). Las zonas no aptas (NA) para la agricultura de temporal se ubican en el norte y noroeste de Yucatán, se definen por una DPLL menor de tres meses con suelos Solonchaks, Arenosols, Regosols, Gleysols e Histosols. Las zonas marginalmente aptas (A4) se ubican al noroeste y al noreste, se definen por una DPLL de cuatro a seis meses con predominio de Leptosols o suelos con problemas de inundación como Gleysols y Stagnosol. Cuando los suelos cambian a Cambisols/Leptosol y una DPLL de cuatro a seis meses la aptitud es media (A3) y se ubican en la mayor parte de Yucatán. Los suelos de mayor profundidad con asociaciones de Vertisols con DPLL entre seis o más meses se califican como aptos (A2), encontrándose en la parte noreste de la Sierrita de Ticul y en el sur del Estado. Mientras que cuando los suelos son profundos (Luvisols, Cambisols y Vertisols) y bien aireados (Luvisols, Cambisols) con seis o más meses de DPLL se alcanza la categoría de muy aptos (A1) para la agricultura de temporal, ubicados en las partes bajas de la Sierrita de Ticul

en el noroeste y sureste.

DISCUSIÓN

La sequía meteorológica en la península de Yucatán ha sido estudiada teniendo en cuenta la precipitación pluvial y el índice estandarizado de sequía, tanto en zonas pequeñas como en la península completa (Márdero *et al.* 2012, Estrada *et al.* 2016). Estos estudios revelan que la sequía meteorológica es muy variable tanto en el espacio como en el tiempo (Márdero *et al.* 2012) y que no se presenta de manera intensa (Estrada *et al.* 2016).

El índice de humedad (P/Et_0) es ampliamente utilizado en agricultura para la identificación de la sequía agrícola (Bautista *et al.* 2013, Bautista *et al.* 2016), debido a que expresa el balance entre el agua que llega por precipitación pluvial y el agua que se pierde por evapotranspiración, por lo que los resultados de este estudio son los primeros reportes de la sequía agrícola utilizando el índice de humedad. Se recomienda utilizar el índice de humedad para estudiar la sequía agrícola en la península de Yucatán, utilizando las ecuaciones de Bautista *et al.* (2009) y Kelso *et al.* (2014), lo que permitiría un cálculo más preciso de la evapotranspiración, con lo que es posible calcular y utilizar de forma eficiente el índice de humedad para conocer la variabilidad e intensidad de la sequía agrícola. Por lo que es necesario realizar protocolos de alerta ante la sequía agrícola utilizando el índice de humedad como lo propone Estada *et al.* (2016) para la sequía meteorológica.

A diferencia del modelo FAO (1996) que para el cálculo de la LPC utiliza la relación $P/(0.5Et_0)$, en este estudio se utilizó la relación $P/Et_0 = 0.65$ para calcular la DPLL, con lo que se da mayor margen de humedad a los cultivos de temporal. En próximos estudios se recomienda utilizar modelos de probabilidad de lluvia mensual con un valor umbral del 80 % con la distribución gamma incompleta (Bautista *et al.* 2016) en lugar de utilizar el valor de la precipitación pluvial mensual para así mejorar la precisión de la DPLL (WMO 2012).

En general, los parámetros geoestadísticos para todos los métodos se ajustaron de forma acep-

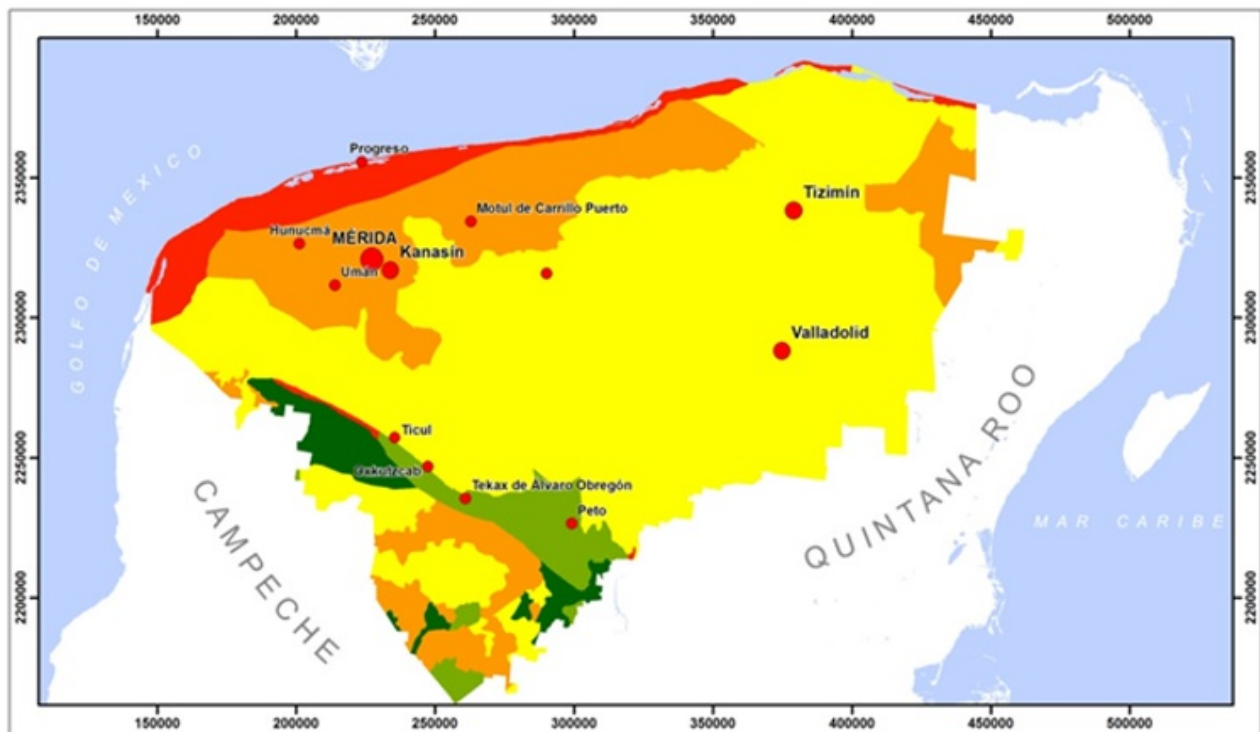
Tabla 4. Duración del periodo de lluvias (DPLL) a partir del método del IH 0.65-MT.

Estaciones meteorológicas	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	DPLL (meses)
Progreso	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.6	0.4	0.4	0.6	0.5	0.2	0.2	0
Sisal	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.6	0.5	0.4	0.7	0.5	0.2	0.3	1
Telchac Puerto	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.6	0.4	0.4	0.8	0.5	0.2	0.3	1
Chicxulub Puerto	0.5	0.3	0.2	0.1	0.2	0.7	0.4	0.4	0.9	0.6	0.4	0.4	2
Río Lagartos	0.6	0.4	0.3	0.2	0.4	0.6	0.5	0.5	0.8	0.7	0.5	0.4	2
Celestún	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.8	0.9	0.9	0.9	0.6	0.3	0.3	4
Bolonchén, Cam.	0.4	0.2	0.2	0.2	0.5	1.0	1.2	0.8	1.4	0.6	0.5	0.5	4
Cuzama	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	1.1	1.0	0.9	1.9	0.5	0.4	0.2	4
Dzilam de Bravo	0.6	0.5	0.2	0.1	0.4	0.8	0.7	0.6	1.0	0.7	0.4	0.4	5
Acanceh	0.3	0.4	0.2	0.2	0.4	1.1	1.0	1.0	1.2	0.8	0.6	0.4	5
Buctzotz	0.6	0.4	0.2	0.2	0.6	1.0	1.3	1.3	1.6	0.9	0.5	0.5	5
Catmis	0.6	0.5	0.2	0.3	0.6	1.0	1.0	1.1	1.3	0.9	0.6	0.5	5
Chancenote	0.4	0.43	0.3	0.4	0.5	1.1	1.3	1.2	1.3	1.0	0.5	0.5	5
Chemax	0.5	0.5	0.3	0.3	0.5	1.0	1.0	1.0	1.2	1.0	0.4	0.5	5
Chocholá	0.3	0.3	0.3	0.3	0.6	1.2	1.0	12.0	1.4	1.1	0.3	0.4	5
Chunchucmil	0.2	0.1	0.1	0.1	0.4	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.1	0.1	5
Conkal	0.3	0.4	0.2	0.2	0.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.2	0.4	0.4	5
Dzidzantun	0.3	0.2	0.2	0.1	0.5	0.8	0.7	0.7	1.0	0.6	0.3	0.3	5
Dzonot Aké	0.5	0.5	0.3	0.3	0.5	0.9	1.2	0.7	0.8	0.8	0.4	0.4	5
Emiliano Zapata	0.2	0.2	0.1	0.2	0.4	0.9	0.9	1.1	1.3	1.0	0.4	0.3	5
Halachó	0.2	0.1	0.1	0.2	0.4	0.9	0.9	1.1	1.3	1.0	0.4	0.3	5
Holca, Kantunil	0.4	0.4	0.2	0.3	0.4	1.1	1.0	1.2	1.4	0.9	0.6	0.7	5
Izamal	0.4	0.3	0.2	0.2	0.5	1.0	0.9	1.0	1.3	0.7	0.3	0.3	5
Kinchil	0.4	0.3	0.2	0.2	0.5	0.9	1.0	1.1	1.4	0.9	0.3	0.4	5
Loche	0.6	0.5	0.3	0.2	0.6	1.2	1.1	1.2	1.6	1.2	0.5	0.6	5
Mayapán	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	1.0	1.0	1.2	1.2	1.3	0.5	0.4	5
Mérida	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	1.1	1.1	1.2	1.3	0.8	0.4	0.4	5
Mocochá	0.4	0.4	0.3	0.2	0.3	1.2	1.1	1.0	1.4	0.8	0.6	0.6	5
Motul	0.5	0.5	0.2	0.2	0.4	1.2	1.2	1.1	1.5	0.9	0.6	0.5	5
Muna	0.3	0.3	0.2	0.2	0.6	1.0	1.0	1.0	1.3	1.0	0.5	0.4	5
Opichén	0.3	0.3	0.2	0.3	0.5	1.4	1.3	1.4	1.4	1.0	0.5	0.4	5
Oxkutzcab	0.4	0.3	0.4	0.3	0.6	1.2	1.1	1.4	1.7	0.9	0.5	0.5	5
Telchaquillo	0.3	0.2	0.1	0.3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	0.8	0.4	0.4	5
Temax	0.8	0.4	0.2	0.2	0.6	1.3	1.3	1.4	1.6	1.1	0.5	0.8	5
Ticul	0.3	0.3	0.3	0.4	0.6	1.0	1.0	1.2	1.4	0.8	0.5	0.4	5
Tixmeuc	0.4	0.3	0.3	0.3	0.5	1.1	1.0	1.2	1.5	1.0	0.6	0.5	5
Tekax	0.4	0.4	0.3	0.3	0.6	1.1	1.0	1.0	1.5	0.9	0.6	0.5	5
Yalsihón	0.8	0.3	0.2	0.2	0.4	1.1	1.0	1.0	1.3	1.0	0.3	0.5	5
Dzibalché, Cam.	0.3	0.1	0.2	0.2	0.5	1.2	1.0	1.2	1.5	1.2	0.5	0.4	5
Isla Arenas	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	1.2	1.0	1.0	1.2	0.8	0.3	0.2	5
Becanchén	0.4	0.4	0.2	0.3	0.6	1.0	0.9	1.0	1.4	1.0	0.7	0.4	6
Nohalal, Cam.	0.5	0.4	0.2	0.2	0.6	0.8	0.7	1.0	1.1	0.9	0.8	0.3	6
Calkini, Cam.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	1.0	1.1	1.2	1.6	0.8	0.8	0.4	6
Abalá	0.4	0.3	0.2	0.2	0.7	1.0	1.2	1.3	1.5	0.9	0.4	0.5	6
Akil	0.4	0.3	0.3	0.4	0.7	1.1	1.1	1.2	1.4	1.0	0.6	0.4	6
Cantamayec	0.5	0.4	0.3	0.3	0.7	1.0	1.2	1.2	1.6	1.2	0.6	0.6	6
Chanchichmilá	0.5	0.4	0.3	0.4	0.8	1.1	1.2	1.2	1.6	1.2	0.6	0.6	6
Dzan	0.4	0.3	0.3	0.3	0.8	1.2	1.2	1.4	1.8	1.3	0.5	0.5	6
Dzitas	0.5	0.5	0.2	0.4	0.7	1.2	1.2	1.0	1.5	1.0	0.5	0.5	6
Kuxeb	0.4	0.4	0.3	0.3	0.6	0.9	0.9	1.0	1.0	0.8	0.6	0.5	6
Peto	0.4	0.4	0.2	0.3	0.7	1.0	1.0	1.1	1.4	0.8	0.5	0.4	6
Sotuta	0.4	0.4	0.3	0.4	0.7	1.2	1.2	1.2	1.7	1.1	0.5	0.6	6
Tizimin	0.6	0.5	0.4	0.4	0.7	1.2	1.4	1.2	1.6	1.1	0.5	0.6	6
Tzucacab	0.5	0.4	0.2	0.4	0.8	1.1	1.2	1.2	1.46	1.0	0.6	0.5	6
Valladolid	0.6	0.5	0.4	0.3	0.7	1.1	1.0	1.3	1.5	1.0	0.5	0.5	6
Tihosuco, Q. Roo	0.5	0.4	0.3	0.4	0.7	1.1	1.0	1.2	1.5	1.0	0.6	0.7	6
Pisté	0.5	0.8	0.4	0.4	0.7	1.3	1.2	1.2	1.4	1.0	0.7	0.5	7
Teabo	0.5	0.4	0.4	0.5	0.7	1.5	1.1	1.4	1.9	0.9	0.7	0.4	7

Tabla 4. Continuación.

Estaciones meteorológicas	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	DPLL (meses)
Iturbide	0.4	0.3	0.2	0.3	0.7	1.1	1.0	1.2	1.6	1.0	0.6	0.4	7
Kantunilkin, Q. Roo.	0.7	0.5	0.5	0.4	0.8	1.2	1.3	1.2	1.5	1.2	0.7	0.6	7
Xhualtez	0.6	0.4	0.4	0.5	0.9	1.6	1.6	1.7	1.8	1.2	0.9	0.8	8
La presumida, Q. Roo	0.6	0.4	0.3	0.3	0.9	1.3	1.2	1.3	1.7	1.2	0.9	0.8	8
Calotmul	0.7	0.5	0.3	0.6	0.8	1.5	1.6	1.4	1.7	1.4	0.7	0.9	9
Catzim	0.7	0.5	0.3	0.4	0.8	1.0	1.1	1.3	1.5	1.6	0.8	0.8	9
Solferino, Q. Roo	0.7	0.6	0.4	0.5	0.8	1.2	1.2	1.2	1.6	1.1	1.0	0.9	9

DPLL = Duración del periodo de lluvias (en color azul), P = Precipitación pluvial; ET = Evapotranspiración potencial.




Zonificación agroecológica del Estado de Yucatán: Agricultura de temporal

Aptitud para la agricultura temporal

- A1 (muy apta)
- A2 (apta)
- A3 (medianamente apta)
- A4 (marginamente apta)
- NA (no apta)

Localidades con nombres

- 15,000 - 40,000 hab.
- 40,001 - 80,000 hab.
- > 80,001 hab.

Escala 1:1,700,000


Proyección: UTM Zona 16 Norte; WGS 84
 Proyecto: "Elaboración, Publicación y Difusión del Programa Estatal de Acción ante el cambio climático (PEACC) en el Estado de Yucatán"
 Autor: Francisco Bautista, Thomas Ihl

CIGA

Figura 5. Mapa de la aptitud para la agricultura de temporal.

table a los modelos teóricos. Sin embargo, los métodos para el cálculo de la DPLL con la evapotranspiración calculada con el MT tuvieron los valores mayores de la varianza estructural y

la validación cruzada (r), por lo que son los que mejor explican la varianza con mejor ajuste entre los valores estimados y los valores medidos (Hernández-Stefanoni y Ponce-Hernández 2006, Delgado *et al.*

2010). A pesar de la aceptabilidad de todos los modelos geoestadísticos, al comparar con otros indicadores, como el mapa de la vegetación potencial (Olmsted *et al.* 1999) y los tipos climáticos (García 2004, Orellana *et al.* 1999), es posible evaluar y seleccionar el mejor método.

En el estado de Yucatán se tiene la ventaja de tener un amplio intervalo en la DPLL de cero a nueve meses, lo que permite el cultivo de variedades de ciclo corto, mediano y largo de diferentes cultivos. Situación que es de gran relevancia para enfrentar los efectos del cambio climático (Stigter *et al.* 2005). Los agricultores mayas de la península de Yucatán han logrado producir variedades de maíz, chiles, calabazas y frijol con diferentes tiempos de desarrollo, que se pueden utilizar de acuerdo con el clima y las necesidades de producción (Latournerie *et al.* 2006, Dzib-Aguilar *et al.* 2011). Lo que indica que es posible adaptar los procesos agrícolas a tierras con diferentes DPLL para obtener el mejor potencial de producción.

Las estrategias agronómicas que realizan los campesinos son la siembra en diversos lugares y al mismo tiempo (Bautista *et al.* 2005); siembras tempranas y tardías (Terán y Rasmussen 1994); selección y siembra de variedades de ciclo corto, mediano y largo (Mariaca *et al.* 1995, Bautista *et al.* 2015); captación y almacenamiento de agua de

lluvia (Terán y Rasmussen 1994); riego localizado o riego suplementario y uso del agua residual en suelos de alta retención de humedad (Aguilar y Bautista 2011).

CONCLUSIONES

El valor de 0.65 del índice de humedad con el método de Thornthwaite para la estimación de la evapotranspiración fue el más adecuado desde el punto de vista geoestadístico para definir los meses húmedos y la duración del periodo de lluvias. Se encontraron cinco intervalos de DPLL que van desde tres hasta ocho meses. Los intervalos que comprenden mayor superficie de interés agrícola son los de cuatro a cinco meses, de cinco a seis meses, y de seis a siete meses de DPLL. La mayor superficie del estado de Yucatán se encuentra, en las clases de aptitud medianamente apta y marginalmente apta para la agricultura de temporal.

AGRADECIMIENTOS

Al fondo Mixto Yucatán proyecto YUC-2003-C02-054 y al CONACyT por la beca de doctorado de CDC. Francisco Bautista agradece el apoyo económico de la DGAPA-UNAM para su estancia sabática en el CEBAS, CSIC, España.

LITERATURA CITADA

- Aguilar Y, and Bautista F (2011) Extrapolating the suitability of soils as natural reactors using an existing soil map: application of pedotransfer functions, spatial integration and validation procedures. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 13: 221-232.
- Allen R, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage*. Rome, Italy. 300p.
- Bautista F, Garcia J, Mizrahi A (2005) Diagnóstico campesino de la situación agrícola en Hocabá, Yucatán. *Terra Latinoamericana* 23: 571-580.
- Bautista F, Bautista D, Delgado-Carranza C (2009) Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmósfera* 22: 331-348.
- Bautista F, Bautista-Hernández DA, Álvarez-Arriaga O, De la Rosa D (2013) Software to identified climate change trends at the local level: a study case in Yucatán, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19: 81-90.

- Bautista F, Frausto O, Ihl T, Aguilar Y (2015) Actualización del mapa de suelos del estado de Yucatán México: Un enfoque geomorfopedológico y WRB. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 2: 303-315.
- Bautista F, Pacheco A, Bautista-Hernández DA (2016) Análisis del cambio climático con datos mensuales (Clic-MD). Skiu, México. 60p.
- Delgado CC, Pacheco AJ, Cabrera SA, Batllori SE, Orellana R, Bautista F (2010) Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: The case of Yucatán, Mexico. *Agricultural Water Management* 97: 1423-1433.
- Delgado CC, Bautista F, Orellana-Lanza R, Reyes-Hernández H (2011) Classification and agroclimatic zoning using the relationship between precipitation and evapotranspiration in the state of Yucatan, Mexico. *Investigaciones Geográficas* 75: 51-60.
- Dzib-Aguilar L, Segura-Correa J, Ortega-Paczka R, Latournerie-Moreno L (2011) Cruzas dialélicas ente poblaciones nativas de maíz de Yucatán y poblaciones mejoradas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14: 119-127.
- Estrada-Medina H, Cobos-Gasca V, Acosta-Rodríguez JL, Peña S, Castilla-Martínez M, Castillo-Carrillo C, et al. (2016) La sequía de la península de Yucatán. *Tecnología y Ciencias del Agua* 7: 151-165
- FAO (1996) Agro-ecological zoning: Guidelines. FAO Soil Resources, Management and Conservation Service, Land and Water Development Division. Rome, Italy. 78p.
- García E (2004) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5ª Edición. Serie Libros, No. 6. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 90p.
- Hargreaves GH, Samani ZA (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1: 96-99.
- Hargreaves DA, Hargreaves GH, Riley JP (1985) Irrigation water requirements for Senegal river basin. *Journal of Irrigation and Drainage Division* 3: 265-275.
- Hernández-Stefanoni JL, Ponce-Hernández R (2006) Mapping the spatial variability of plant diversity in a tropical forest: comparison of spatial interpolation methods. *Environmental Monitoring and Assessment* 117: 307-334.
- Holden NM, Brereton AJ (2004) Definition of agroclimatic regions in Ireland using hydro-thermal and crop yield data. *Agricultural and Forest Meteorology* 122: 175-191.
- INEGI (2013) Población del Estado de Yucatán del censo 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/poblacion/default.aspx?tema=me&e=31>. Consultado: 19 de abril de 2015.
- Kelso HA, Mamadou K, Magaña F, Sánchez Morález S, López D (2014) Recalibración regional de Hargreaves (HE y KRS) en México. *Revista Ingeniería Agrícola* 4: 14-18
- Latournerie L, Tuxill J, Yupit E, Arias L, Cristobal J, Jarvis DI (2006) Traditional maize storage methods of Mayan farmers in Yucatan, Mexico: implications for seed selection and crop diversity. *Biodiversity and Conservation* 15: 1771-1795
- Márdero S, Nickl E, Schmook B, Schneider L, Rogan J, Christman Z, Lawrence D (2012) Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones Geográficas* 78: 19-33

- Mariaca R, Hernández E, Castillo A, Moguel E (1995) Análisis estadístico de una milpa experimental de ocho años de cultivo continuo bajo roza, tumba y quema en Yucatán, México. En: Hernández E, Bello E, Levy S (eds) La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola tradicional. Tomo 2. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México. pp: 339-368.
- Olmsted I, González-Iturbe JA, Granados J, Durán R, Tun F (1999) Vegetación. En: García FA, Córdoba J, Ordoñez Y, Chico PLPA (eds). Atlas de Procesos territoriales en Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán. pp: 282-293.
- Orellana R, Balam M, Bañuelos I, García E, González-Iturbe J, Herrera F, Vidal J (1999) Evaluación climática. En: García de Fuentes A, Córdoba J, Ordoñez Y, Chico Ponce de León PA (eds) Atlas de Procesos territoriales en Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán. pp: 163-177.
- Robertson GP (2008) GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences. Gamma Design Software, Plainwell. Michigan, USA. 172p.
- SAGARPA (2011) Indicadores estatales agroeconómicos. Subsecretaría de fomento a los negocios. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Estudios/Paginas/monitoreoestatal.aspx> Consulta en junio 16 del 2017.
- Stigter CJ, Dawei Z, Onyewotu LOZ, Xurong M (2005) Using traditional methods and indigenous technologies for cropping with climate variability. *Climate Change* 70: 255-271.
- Terán SCh, Rasmussen H (1994) La milpa de los Mayas. La agricultura de los Mayas prehispánicos y actuales en el Noreste de Yucatán. DANIDA. Mérida, Yucatán 322p.
- Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geography Review*. 38: 55-94.
- WMO (2012). Guide to Agricultural Meteorological Practices. WMO-No. 134. Switzerland. 799p.