

PREDICCIÓN DE LA DEMANDA NUTRIMENTAL DE POTASIO PARA LA PRODUCCION DE *Capsicum chinense* Jacq. EN EL SURESTE DE MEXICO

[PREDICTION OF POTASIMUM REQUIREMENTS FOR *Capsicum chinense* Jacq. PRODUCTION IN SOUTHEAST MEXICO]

Lizette Borges-Gómez^{1,2*}, Tomas González-Estrada¹ and Manuel Soria-Fregoso²

¹Unidad de Bioquímica y Biología Molecular de Plantas. Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. Calle 43 No. 130 Col. Chuburná de Hidalgo. CP 97200, Mérida Yucatán, México.

²Dirección actual: Instituto Tecnológico de Conkal. Km 16.3 antigua carretera Mérida-Motul, Conkal, Yucatán. Tel: 52(999) 912 41 30. Correo electrónico

lizette_borges@hotmail.com.

**Corresponding author*

RESUMEN

Se utilizó el modelo Suministro del Suelo y Demanda Nutricional (Soil Supply and Nutrient Demand "SSAND"), para predecir los requerimientos de K del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en quince suelos de Yucatán, de acuerdo al potencial del suelo para suministrar K, y a la capacidad de las raíces para absorber el mismo. SSAND es un modelo mecanístico que simula el desarrollo del cultivo para diagnosticar limitaciones de nutrición y determinar los regímenes de fertilización necesarios para alcanzar las metas de producción. Su ejecución se basa en las teorías de difusión y de flujo de masas del nutrimento en el suelo, en las características de la raíz y en la cinética de absorción de los nutrimentos. De acuerdo a las metas de producción propuestas (28 t ha⁻¹ de fruto fresco), los resultados mostraron que los suelos requieren una aplicación de 108 a 150 kg ha⁻¹ de K. El momento oportuno de aplicación resultó ser fundamental para que el nutrimento sea absorbido por la planta. En algunos suelos se requirió que la mayor cantidad de K sea aplicada durante la etapa de crecimiento de la planta, para otros, el modelo sugirió que la incorporación de K debe ser dosificada durante todo el ciclo de cultivo. Las diferencias se atribuyen a las características de los suelos de retener el K agregado y su posterior liberación a la solución del suelo para que éste sea absorbido por la planta.

Palabras clave: Demanda nutrimental, fertilización, simulación.

INTRODUCCIÓN

El concepto de la fertilidad del suelo ha sido mal interpretado, y en el contexto de nutrición de un cultivo se usa el término de "suelo fértil" como aquel

SUMMARY

In order to predict the requirements of K in habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq) in fifteen soils of Yucatán, according to their potential to supply this nutrient, and the ability of the root to absorb it, a simulation model, Soil Supply and Nutrient Demand (SSAND) was used. SSAND is a mechanistic approach that simulates crop development to diagnose limitations of nutrition and to determine the nutrient requirements in order to reach the production goals. The model is based on the theories of diffusion and mass flow of nutrients in the soil, on root characteristics, and on the kinetics of nutrient absorption. According to the proposed production of 28 t ha⁻¹ of fresh fruit, the model results showed that the soils required an application of 108 to 150 kg ha⁻¹ of K, depending on the soil type. The opportune time of application was fundamental for the plant to absorb the nutrient and take advantage of the application. Some soils required that most of the K be applied during the first 40 days of plant development; in contrast, for the other soils, the model suggested that the incorporation of K be carried out during the whole cycle of cultivation (160 days). The differences in time of application are attributed to the soil characteristics of incorporated K retention, to their capacity for releasing it to the soil solution, and making it available to the plant for absorption.

Key words: Nutrient demand, fertilization, simulation.

que puede proporcionar los nutrimentos esenciales para obtener la mejor producción. Esto ha dado como resultado un uso excesivo de los fertilizantes químicos y tal pareciera que basta con la incorporación de éstos para que un suelo sea fértil. En realidad la nutrición de

los cultivos está determinada por varios factores, entre los que se encuentran no solo la disponibilidad de nutrimentos en el medio donde se desarrollan las plantas, sino también por los mecanismos que tienen las plantas para absorber los mismos (Tinker y Nye 2000). Comerford (1999), describe la fertilidad del suelo como el “estatus del sistema suelo planta”, definido por la capacidad para proporcionar los nutrimentos esenciales para el crecimiento de las plantas, a través de mecanismos de: i) liberación de nutrimentos de la fase sólida a la fase soluble del suelo, ii) movimiento de los nutrimentos a través de la solución del suelo hacia las raíces de las plantas y iii) la absorción por las raíces. La relación entre los estudios de la fisiología de la planta y los estudios del suelo ha sido considerada por diferentes autores (Willigen *et al.*, 2000), quienes señalan la importancia tanto de la distribución de un nutrimento y su movilidad en el suelo, como de la capacidad de toma, distribución y arquitectura de la raíz, ambos necesarios en los modelos de nutrición.

El uso de los modelos matemáticos en la absorción de nutrimentos y desarrollo de raíces ha sido posible debido a las aplicaciones de la cinética enzimática para describir la dependencia de la concentración de nutrimentos para su absorción por las raíces y el estudio de la movilidad de estos en el suelo para describir su transporte hacia la raíz (Tinker y Nye 2000). De acuerdo a Van Rees *et al.* (1990), aún cuando las condiciones varían según el sitio y la especie vegetal, teóricamente los procesos que gobiernan la absorción de nutrimentos son aplicables a todos los suelos y especies vegetales. En este contexto, la predicción de la absorción de nutrimentos requiere de la evaluación de parámetros del suelo y de la planta relacionados con la absorción y desarrollo radicular. Tanto la absorción de nutrimentos como la del agua están influenciadas por las condiciones presentes en la interfase suelo-raíz (Peterson y Cholewa, 1998), por ello es necesario cuantificar los parámetros de suelo y plantas que afectan dicha absorción.

México es el país del mundo con la mayor variedad genética del género *Capsicum*, (Latournerie *et al.*, 2002). El *C. chinense* es una de las cinco especies domesticadas originarias de Sudamérica pero en México se cultiva principalmente en las regiones de Yucatán, Quintana Roo, Campeche y Tabasco. Existen evidencias de que también se cultiva en países como Honduras, Belice Guatemala y Perú. No obstante, se considera que las características del *C. chinense* producido en Yucatán son únicas, refiriéndose principalmente al picor o pungencia del fruto; es por ello, que en Yucatán, el cultivo del chile habanero ocupa el segundo lugar en importancia después del tomate. La nutrición mineral para *C. annum* se conoce ampliamente, no así para *C. chinense*. Algunas

recomendaciones generadas sobre los requerimientos nutricionales de *C. chinense* en Yucatán señalan el uso de dosis de fertilización para obtener los mejores rendimientos de fruto. Así, para K, cuya importancia se debe a que influye directamente con la calidad y rendimiento de fruto se han propuesto aplicaciones al suelo que van desde 50 kg ha⁻¹ hasta 300 kg ha⁻¹ (Soria *et al.*, 1995; Tun 2001, Soria *et al.*, 2002). No obstante, se conoce por demás, que los resultados en campo no son del todo satisfactorios. Es probable que ello se deba a que la mayor parte del K del suelo está casi siempre en formas no asimilables encontrándose únicamente del 1 al 2 % del K total en forma abrovechable en la disolución del suelo o como intercambiable en los coloides (Sparks y Huang, 1985). De acuerdo a Borges-Gómez *et al.* (2005), aún cuando el contenido de K en los suelos de Yucatán es alto, la difusión efectiva varía entre 9.9×10^{-8} y 1.8×10^{-6} cm² s⁻¹, lo que puede dificultar el desplazamiento del K hacia las inmediaciones de la raíz.

Con lo anteriormente expuesto, el objetivo del presente estudio fue utilizar el modelo mecanístico SSAND (Suministro del Suelo y Demanda Nutricional) para simular el desarrollo del cultivo y diagnosticar limitaciones de K y con ello predecir los regímenes de fertilización de K necesarios para alcanzar las metas de producción de chile habanero en 15 suelos de Yucatán.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó el modelo SSAND V.1 liberación 1.06 (Li y Comerford, 2000), el cual es un modelo de simulación basado en los procesos que controlan la absorción de nutrimentos por las raíces de la planta y en los factores involucrados en el suministro de nutrimentos por el suelo. Sus aplicaciones permitieron simular la absorción de nutrimentos bajo condiciones cambiantes del suelo. Permitted además, diseñar regímenes óptimos de fertilización, ya que el modelo compara la demanda nutricional con los resultados de la simulación de absorción de nutrimentos; cuando la fertilización propuesta en la simulación no satisfizo la demanda por el cultivo, nuevos eventos de fertilización fueron definidos hasta obtener que la fertilización propuesta sea la demandada por la planta de *C. Chinense*. Para predecir el suministro de K por el suelo y su absorción por la planta es necesario introducir al modelo SSAND valores de variables evaluadas del suelo y de la planta. Las del suelo son: volumen de suelo, concentración de K en la solución del suelo, densidad aparente, contenido de agua, difusión del nutrimento en el agua, factor de impedancia y características de la isoterma de adsorción y desorción de K. Las de la planta son: velocidad del influjo de agua hacia la raíz, promedio del radio de la raíz, densidad de longitud de

la raíz y los parámetros de la cinética de absorción de K (velocidad máxima de absorción “ I_{max} ” y la constante de Michaelis Menten “ K_m ”).

Evaluación de los parámetros del suelo

De acuerdo con los límites naturales y políticos reconocidos, el estado de Yucatán se localiza entre los $19^{\circ} 40'$ y $21^{\circ} 37'$ latitud norte y los $87^{\circ} 30'$ y $90^{\circ} 26'$ longitud oeste. Dentro de estos límites se eligieron 15 suelos con potencial productivo con base en la zonificación edáfica y fisiográfica del estado (Duch, 1988; Duch, 1991) (Figura 1). Algunas características de estos suelos se presentan en la Tabla 1. La profundidad de muestreo fue de 0 a 15 para los suelos someros y de 0 a 30 cm, para los suelos profundos. En cada sitio se colectaron 80 submuestras en una superficie aproximada de 0.5 hectárea; las submuestras se mezclaron para formar una sola muestra compuesta por sitio y se procedió al análisis con tres repeticiones.

Los métodos utilizados para analizar los parámetros del suelo fueron:

- densidad aparente determinado por el método de la parafina (Blake y Hartge, 1986);
- contenido volumétrico de agua determinado en el suelo llevado a capacidad de campo por el método gravimétrico;
- concentración inicial de K, obtenido de la solución del suelo a capacidad de campo por el método de centrifugación (Elkhatib *et al.*, 1987);

d) volumen del suelo, obtenido para los suelos superficiales de acuerdo a la profundidad que estos alcanzaban, y para los suelos profundos se obtuvo considerando 40 cm la profundidad;

e) factor de impedancia determinado utilizando la ecuación de Van Rees *et al.* (1990):

$$f = 3.1\theta^{1.9}$$

donde:

f , es el factor de impedancia que describe el camino tortuoso que siguen los iones en la solución del suelo a través de los poros y

θ , es el contenido volumétrico de agua en el suelo a capacidad de campo;

g) isothermas de adsorción y desorción K determinado por la pendiente ($\delta K_s/\delta K_i$) de la isoterma de desorción lineal, usando el método de membranas de intercambio catiónico.

Para ello, 1 g de suelo más una membrana de intercambio catiónico Type CR 61 CZR-442 de 3 cm x 7.5 previamente saturada con NH_4OAc 1M pH de 7 se agitaron por diferentes tiempos (1, 5, 10, 20, 40, 60, 120, 180, 240 minutos) y posteriormente se cuantificó el K en la fase sólida removido por la membrana (K_s) y el K en equilibrio en la solución del suelo (K_i). Los resultados se analizaron estadísticamente mediante un análisis de varianza, utilizando el programa STATGRAPHIC (1999). La comparación de medias por Tukey se realizó con un nivel de confianza de 95%.

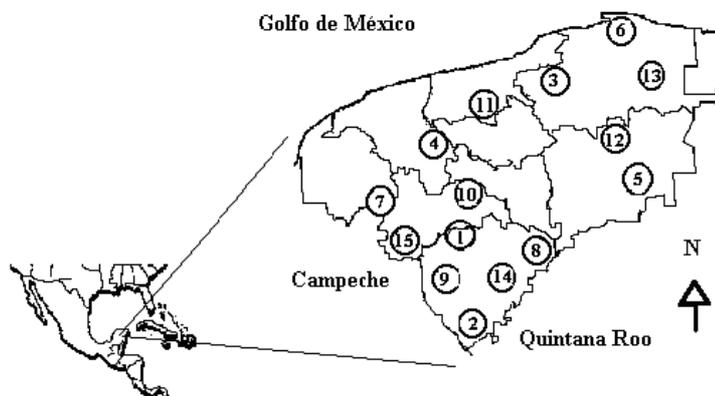


Figura 1. Localización de los suelos en estudio en el estado de Yucatán, México. 1, Akil; 2, Becanchen; 3, Buctzotz; 4, Cacalchen; 5, Chemax; 6, El Cuyo; 7, Maxcanu; 8, Peto; 9, San Isidro; 10, Tekit; 11, Telchac Pueblo; 12, Temozon; 13, Tizimin; 14, Tzucacab; 15, Xul.

Tabla 1. Características de los sitios de muestreo.

Sitio	Pedregosidad (%)	Vegetación	Posición fisiográfica
Akil	15-35	<i>Persa americana</i> , <i>Citrus sinensis</i> y <i>Casimiroa edulis</i>	Llanuras onduladas en declive
Becanchén	5-10	<i>Casimiroa edulis</i> y <i>Mangifera indica</i>	Lomerío alto con llanuras
Buctzotz	35-50	<i>Enretica latifolia</i>	Llanura rocosa ondulada con hondonadas someras
Cacalchén	50-70	<i>Agave sisalana</i>	Planicie
Chemax	70-90	<i>Zea mays</i> , <i>Pisum sativum</i> y <i>Cucurbita moschata</i>	Llanura ondulada con hondonadas incipientes
El Cuyo	5-10	Pastizal	Litoral arenoso
Maxcanú	3-5	<i>Enretica latifolia</i>	Llanura rocosa con montículos
Peto	3-5	<i>Viguiera dentata</i> , <i>Zea mays</i> y <i>Musa sapientum</i>	Llanura ondulada con montículos y hondonadas someras
San Isidro	5-10	Pastizal	Llanuras inundables con lomerios
Tekit	35-50	<i>Musa sapientum</i> y <i>Carica papaya</i>	Llano ondulado con lomerío bajo y hondonadas someras
Telchac Pueblo	70-90	<i>Gymnopodium floribundum</i> y <i>Agave sisalana</i>	Llanura rocosa costera
Temozón	15-35	Pastizal	Llanura ondulada con lomeríos bajos y hondonadas profundas
Tizimín	35-50	En descanso	Llanura ondulada con lomerío bajo y tendido y hondonadas someras
Tzucacab	0	<i>Citrillus vulgaris</i>	Llanura ondulada con montículos y hondonadas someras
Xul	3-5	<i>Zea mays</i>	Sierra baja y alargada

Parámetros de la planta

Los datos de la planta utilizados para alimentar el modelo SSAND fueron los reportados en un estudio realizado con anterioridad. Así, los datos sobre la cinética de absorción de K fueron tomados de los resultados obtenidos por Borges-Gómez *et al.* (2006), en un estudio realizado en plántulas de la variedad criolla naranja de 45 días de edad y cuyos valores se muestran en la Tabla 2. En cuanto a los datos sobre las características de crecimiento de la planta como son la producción de biomasa, contenido de K en la biomasa producida y tasa de crecimiento de la raíz, los valores fueron tomados de los resultados obtenidos por Ayala (1998) y por Borges y Noh (2001) los cuales se muestran en la Tabla 3.

Aplicaciones del modelo de simulación SSAND

Los cuatro pasos principales para la aplicación de SSAND son:

a) Perfil deseado del crecimiento de la planta. En este paso, se introducen al modelo las metas por alcanzar en la producción del cultivo (Tabla 3). Los datos introducidos fueron: i) producción de biomasa

durante el tiempo de desarrollo de 160 días el cual incluye follaje y raíz y ii) uso eficiente de K el cual se refiere a la cantidad del nutrimento por unidad de peso en la producción de biomasa, los cuales fueron estimados a partir de una densidad de siembra de 25000 plantas por hectárea y un rendimiento de fruto fresco de 28 t ha⁻¹, propuesto como una meta a alcanzar dado que algunos productores obtienen este rendimiento de fruto.

b) Simulación de la toma de nutrimento. En este paso se simula la absorción de K por la raíz con base a las teorías de difusión y de flujo de masas que son utilizadas para estimar la capacidad de suministro del suelo y la habilidad de las raíces para tomar K. Para ello se utilizaron los parámetros evaluados al suelo y los de raíz. Los parámetros del suelo son: densidad aparente (Da), contenido volumétrico de agua (θ), concentración inicial de K en la solución del suelo (C_i), volumen del suelo, factor de impedancia (f) y la isoterma de adsorción y desorción de K. Los parámetros de la cinética de absorción de K por la planta introducidos al modelo son: tasa de absorción de agua, promedio de radio de la raíz, densidad radicular, velocidad máxima de absorción (I_{max}) y la constante de Michaelis Menten (K_m).

Tabla 2. Características de la raíz y cinética de absorción de K del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) introducidos al modelo SSAND[†].

Parámetro	Valor
Tasa de absorción de agua (cm ³ cm ⁻² s ⁻¹)	1.41E-06
Promedio de radio de raíz (cm)	0.02
Densidad radicular (cm cm ⁻³) [†]	0.4
I _{max} (μmol cm ⁻² s ⁻¹)	4.7E-04
K _m (μmol cm ⁻³)	1.15

[†]Borges-Gómez *et al.* (2006)

c) Comparación entre la simulación y la toma de nutrimento. En este paso, se compara la demanda nutrimental con los resultados simulados de absorción del nutriente. Si la absorción predicha está por encima o dentro del límite definido, la interpretación es que la disponibilidad del nutriente no es una limitante para la productividad deseada. Si la absorción es menor al límite definido, entonces la demanda del nutriente puede ser una limitante de la productividad y la fertilización debe ser útil. En estos casos se proponen diferentes regímenes de fertilización hasta que el suministro y demanda del suelo estén dentro de límites aceptables.

d) Régimen de fertilización. En este paso, se prueban diferentes regímenes de fertilización hasta que la demanda nutrimental sea cubierta con la fertilización propuesta. Siempre que la fertilización propuesta no satisfaga la demanda por el cultivo, nuevos eventos de fertilización pueden ser definidos.

Tabla 3. Producción de biomasa acumulada de chile habanero (kg ha⁻¹) en peso seco, extracción acumulada de K (K₂O kg ha⁻¹) y tasa de crecimiento de raíz por unidad de volumen de suelo introducidos al modelo SSAND.

Base de datos del cultivo de chile habanero [†]			
Día	Biomasa	K	Crecimiento de raíz
1	6	1.0	0.48
20	100	12.5	43.80
40	200	25.5	87.60
50	1110	83.8	216.00
75	3916	103.3	270.72
100	7480	111.2	363.84
120	8921	119.2	407.04
140	9621	122.4	459.36
150	9563	123.2	546.16
160	9436	122.4	554.50

[†]Ayala *et al.* (1998); Borges y Noh (2001)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros del suelo introducidos al modelo SSAND se presentan en la Tabla 4. La concentración inicial de K en la solución del suelo (C_i) se encontró en un intervalo entre 0.8 y 91.7 μg mL⁻¹. Las variaciones en el contenido se deben a la diversidad de suelos presentes en Yucatán. A pesar de que estos suelos se originan de un mismo material parental conocido como roca caliza (Wilson, 1980) la evolución de los suelos es más desarrollada conforme aumenta la distancia de la costa (Duch, 1988). La cantidad de K en los suelos depende del material parental y del grado de intemperismo de estos materiales. En suelos agrícolas este se encuentra entre 0.04 y 3% de K (Jackson, 1964). Sin embargo, el contenido de K en solución disponible para las plantas es siempre muy bajo y depende del K adsorbido a las cargas negativas de las arcillas del suelo y la facilidad con que este puede ser liberado a la solución, así como de los tipos de arcilla predominantes y de los porcentajes de arena, limo y arcilla que conforman la clase textural del suelo. Suelos con altos contenidos de vermiculita, illita y/o esmectita tienden a retener el K⁺ y mantener niveles bajo en solución. Por otra parte suelos de textura gruesa tienden a perder gran parte de K⁺ por lixiviación. De acuerdo a Munson y Nelson (1963), existe una amplia variación de las pérdidas de K por lixiviación; mientras que en suelos con altos porcentajes de arcilla (suelos arcillosos) se han reportado pérdidas de 1.5 kg ha⁻¹ año⁻¹, las pérdidas de K en suelos arenosos con bajos porcentajes de arcilla pueden ser hasta de 12.8 kg ha⁻¹ año⁻¹, y se ha reportado que en regiones con precipitación abundante las pérdidas puede ser hasta de 52 kg ha⁻¹ año⁻¹ (McColl 1970).

Las concentraciones más bajas de K en solución de los suelos estudiados (> 3 μg mL) fueron ubicadas de la zona del centro del estado hacia la costa siendo estos los suelos de Akil, Tekit, Cacalchen, Telchac Pueblo y Buctzotz (Figura 1). Peniche, (1994) menciona que la alta pedregosidad observada en la superficie de estos suelos y la presencia de rocas en el subsuelo situada a escasos centímetros de profundidad, facilita el rápido drenaje del agua y de iones disueltos. De acuerdo a los resultados de Borges-Gómez *et al.* (2005), estos suelos mostraron bajos porcentaje de arcilla por lo que es probable que a ello se deba los resultados obtenidos de C_i. Sin embargo, existe la posibilidad de que también se deba a la presencia de arcillas como la illita que han sido identificadas en algunos suelos de Yucatán (Bautista-Zúñiga *et al.*, 2003).

Tabla 4. Parámetros de los suelos de Yucatán introducidos al modelo SSAND.

Suelo	Clase FAO	C _i [†] μg mL ⁻¹	θ [‡] cm ³ cm ⁻³	Da [‡] g cm ⁻³	Volumen [§] dm ³	δK _s /δK _i [‡]
Akil	Cambisol crómico	2.7 ^{fg}	0.34 ^a	0.86 ^{cde}	16	91 ^b
Becanchen	Rendzina	14.0 ^e	0.69 ^f	0.88 ^e	64	37 ^{cde}
Buctzotz	Cambisol calcárico	2.8 ^{fg}	0.53 ^d	0.71 ^a	343	38 ^{cde}
Cacalchen	Rendzina	0.8 ^h	0.30 ^a	0.81 ^{abc}	16	72 ^b
Chemax	Rendzina	7.6 ^f	0.43 ^c	0.76 ^{abcd}	16	43 ^{cd}
El cuyo	Rendzina	6.0 ^{fg}	0.54 ^{dc}	0.73 ^{ab}	64	39 ^{cd}
Maxcanu	Luvisol vértico	30.5 ^c	0.40 ^{bc}	0.84 ^{bcde}	729	20 ^{ef}
Peto	Luvisol vértico	35.7 ^b	0.54 ^{de}	0.82 ^{abcde}	343	148 ^a
San Isidro	Vertisol Pélico	28.6 ^c	0.37 ^{ab}	0.87 ^{de}	216	16 ^f
Tekit	Rendzina	2.5 ^{gh}	0.29 ^a	0.74 ^{ab}	16	48 ^{cd}
Telchac Pueblo	Leptosol	0.9 ^h	0.26 ^a	0.76 ^{abcd}	16	83 ^b
Temozon	Rendzina	23.0 ^d	0.54 ^{de}	0.81 ^{abcde}	16	39 ^{cde}
Tizimin	Rendzina	3.9 ^{gh}	0.56 ^d	0.83 ^{bcde}	24	51 ^c
Tzucacab	Luvisol vértico	91.7 ^a	0.49 ^d	0.87 ^{de}	216	32 ^{def}
Xul	Cambisol calcárico	12.8 ^e	0.54 ^{de}	0.90 ^e	64	51 ^c

[†]Concentración inicial de K en la solución de suelo.

[‡]θ es el contenido volumétrico de agua del suelo a capacidad de campo; Da, es la densidad aparente; δK_s/δK_i, es la pendiente de la isoterma de desorción de K.

[§]Volumen del suelo obtenido con base a la profundidad de cada sitio de muestreo

El contenido volumétrico de agua (θ) en los suelos llevados a capacidad de campo fue entre 0.26 y 0.69 cm³ cm⁻³ señalando en ambos casos la cantidad máxima de agua que el suelo puede retener. Volúmenes de agua superior a estos implicaría pérdidas de nutrientes por lixiviación. Los bajos valores de densidad aparente (ρ) entre 0.71 y 0.9 g cm⁻³ se deben a los altos contenidos de materia orgánica (MO) reportados de estos suelos (Borges-Gómez *et al.*, 2005). De acuerdo a Heuscher *et al.* (2005), existe una relación negativa entre ρ y MO del suelo, una relación de este tipo fue reportada por Borges-Gómez *et al.* (2005) en estos suelos $\rho = -0.0192(MO) + 0.914$ ($R^2 = 0.66$).

Demanda de potasio por el cultivo de chile habanero

De acuerdo al contenido de K y a la producción de biomasa introducidos al modelo, la demanda de K por la planta de chile habanero, a los 35 días de desarrollo de su establecimiento en el campo, fue aproximadamente 8 kg ha⁻¹ (Figura 2) y aumenta, a medida que el cultivo crece hasta alcanzar la demanda máxima de 78 kg ha⁻¹ a los 140 días. Posteriormente, la demanda disminuyó ligeramente al finalizar el ciclo del cultivo a los 160 días.

Simulación de los requerimientos de potasio de acuerdo a las características de los suelos

Las dosis de fertilización propuestas para cubrir la demanda de K por el cultivo de chile habanero, mostraron que la cantidad de K por aplicar a los suelos está en un rango de 108 a 150 kg ha⁻¹ (Tablas 5 y 6). La simulación de la absorción de K para cada propuesta de fertilización, fueron similares a la demanda del nutriente durante el ciclo de cultivo en la mayoría de los suelos. Los suelos en donde no fue posible obtener una absorción de K igual a la demanda nutricional fueron: Akil, Cacalchen, Chemax, Tekit, Telchac Pueblo, y Temozon. Es probable que estos suelos presenten agotamiento de potasio. Esta apreciación se basa en el hecho de que aún cuando la fertilización potásica se incorporó al inicio del ciclo del cultivo, no se llegó a cubrir la demanda nutricional de la planta. No obstante, estos suelos son los que requirieron la mayor fertilización potásica (entre 140 y 150 kg ha⁻¹). Por el contrario, aquellos suelos en donde la absorción de K por las raíces cubrió la demanda del cultivo, los requerimientos de K estuvieron entre 108 y 126 kg ha⁻¹, siendo estos los suelos de Becanchen, Buctzotz, El Cuyo, Maxcanu, Peto, San Isidro, Tizimin, Tzucacab y Xul (Figura 3).

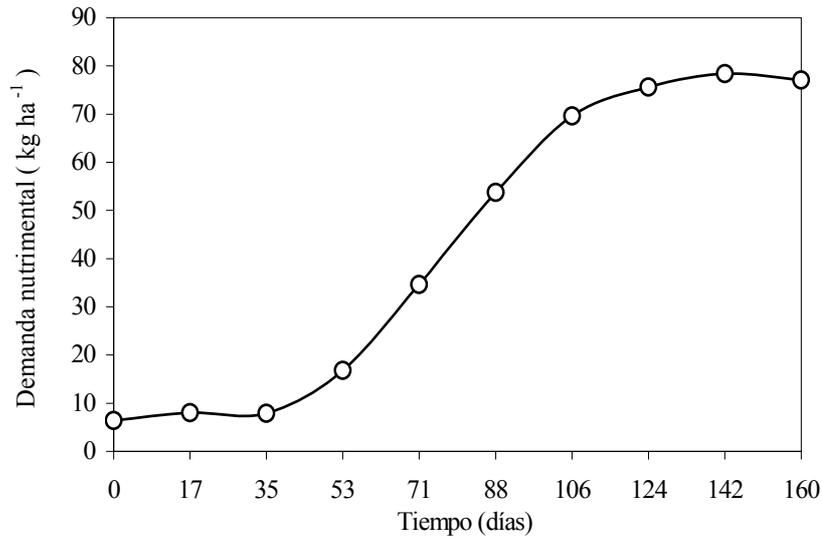


Figura 2. Demanda estimada de K por el cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) mediante el modelo de simulación SSAND, para una producción de 28 t ha⁻¹ de fruto fresco

Tabla 5. Frecuencia y dosis sugeridas en kg ha⁻¹ de incorporación de K en suelos superficiales (< 25 cm) de Yucatán para la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.).

DDT [†]	EC [‡]	Akil	Cacalchen	Chemax	Tekit	Telchac Pueblo	Temozon
1		10	12	0	10	5	10
5		0	12	5	10	10	2
10	I	0	10	5	10	5	12
15		0	10	5	10	10	2
20		0	10	10	10	5	12
30		0	10	10	10	20	10
40	II	25	10	10	30	5	0
50		35	10	10	35	25	10
55		0	0	0	0	10	0
60		0	20	20	0	0	20
70	III	0	0	0	0	0	0
75		30	25	30	15	20	25
80		0	0	0	0	0	0
85		0	0	0	0	0	0
90		0	0	0	0	0	0
95		0	0	0	0	0	0
100		25	10	20	0	15	20
110		0	0	0	0	0	0
120	IV	10	0	10	0	5	10
130		0	0	0	0	0	0
140		5	2	5	0	5	8
150		5	0	5	0	0	0
160		5	0	5	0	0	0
Total		150	141	150	140	140	141

[†]Días después del trasplante

[‡]Etapas del cultivo: I Adaptación después del trasplante, II Crecimiento, III Desarrollo de fruto y maduración, IV Cosecha.

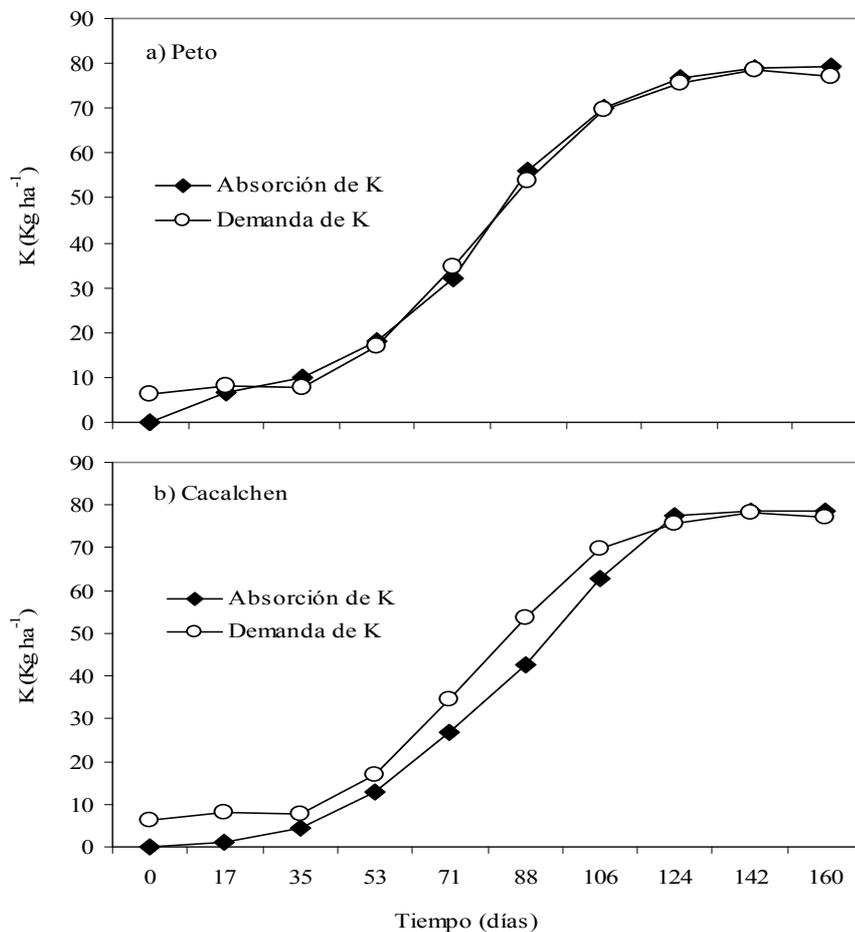


Figura 3. Simulación de la demanda nutrimental (DN) y absorción de K en dos suelos con diferentes regímenes de fertilización potásica.

Momento oportuno de incorporación de potasio

No obstante la importancia de la incorporación oportuna de los nutrientes, pocos trabajos mencionan el momento ideal para la incorporación de K. Tun (2001), recomienda para chile habanero, una dosis de fertilización potásica de 120 kg ha^{-1} y para su aplicación, señala, que ésta debe ser 60 kg antes del trasplante y 60 kg al inicio de la floración, esto quiere decir que el 50% de la fertilización potásica debe incorporarse antes del establecimiento del cultivo en el campo. Por su parte, Soria *et al.* (2002), para este mismo cultivo, recomienda aplicar 150 kg ha^{-1} de K, de los cuales 100 kg (el 75%) deben incorporarse en

las etapas de fructificación y cosecha. Los resultados en este estudio mostraron que cuatro de los quince suelos evaluados, requieren entre el 60 y 89% de la fertilización total durante las etapas de adaptación y crecimiento, siendo estos suelos: Cacalchen, Tekit, Telchac Pueblo y Tizimin. Además de éstos, los suelos de Akil, Chemax y Temozon, requieren que más de la tercera parte de K se incorpore antes de la fructificación. Esto indica que no en todos los suelos se recomienda la mayor aplicación de K en las etapas de mayor consumo (fructificación y cosecha) como se ha sugerido para diferentes cultivos (Rincón *et al.*, 1995; Johnson y Decoteu, 1996; Bugarin *et al.*, 2002a; Bugarin *et al.*, 2002b).

Tabla 6. Frecuencia y dosis sugeridas en kg ha⁻¹ de incorporación de K en suelos profundos (> 35 cm) de Yucatán para la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.).

DDT [†]	EC [‡]	Becanchen	Buctzotz	El Cuyo	Maxcanu	Peto	San Isidro	Tizimin	Tzucacab	Xul
1		5	10	5	5	5	5	10	5	5
5		0	0	3	0	0	2	8	0	0
10	I	5	0	3	4	0	2	8	5	0
15		0	0	5	0	3	2	8	0	8
20		0	0	0	4	0	2	8	0	0
30		5	0	0	0	3	2	8	2	2
40	II	2	8	3	6	5	2	16	0	2
50		6	8	5	8	5	5	18	10	5
55		0	0	3	0	0	0	0	0	0
60		22	8	18	20	18	10	0	11	13
70	III	0	15	18	0	0	15	0	13	16
75		30	10	6	20	18	0	6	0	0
80		0	10	0	0	0	20	0	20	18
85		0	10	6	12	20	0	0	0	0
90		0	12	0	0	0	18	12	18	13
95		0	0	9	0	0	0	0	0	0
100		21	12	8	23	25	12	10	12	11
110		0	0	6	0	10	8	6	7	7
120	IV	10	12	5	13	3	5	4	5	6
130		0	0	0	0	3	0	4	3	4
140		7	8	5	9	2	3	0	2	2
150		0	0	0	0	2	0	0	0	0
160		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		113	123	108	124	122	113	126	113	112

[†]Días después del trasplante

[‡]Etapas del cultivo: I Adaptación después del trasplante, II Crecimiento, III Desarrollo de fruto y maduración, IV Cosecha.

Es probable que en los suelos de Cacalchen, Tekit, Telchac Pueblo, Tizimin, Akil, Chemax y Temozon, una fertilización previa al establecimiento del cultivo sea adecuada como señala Tun (2001). Suelos como los de Akil, Chemax, Temozon y Tizimin la fertilización debe continuar a lo largo de todo el ciclo del cultivo ya que, el 33, 30, 27 y 29 % de la fertilización respectivamente, se requiere durante la cosecha.

Por otra parte, durante la maduración y cosecha de fruto, los suelos de Becanchen, Peto, San Isidro, Tzucacab, y Xul requirieron el 80% de la fertilización de K y los suelos de El Cuyo, Buctzotz, y Maxcanu el 78, 79 y 78% respectivamente, similar a lo señalado por Soria *et al.* (2002) al proponer que el 75% de la fertilización debe ser aplicado durante estas mismas etapas del cultivo. Sin embargo, de acuerdo al modelo de simulación, en los suelos de Buctzotz, Maxcanu, Peto, San Isidro y Tzucacab un porcentaje entre el 41 y 53% de K, debe ser incorporado específicamente durante la cosecha de fruto el cual inicia alrededor de

los 85 días después del trasplante. La Figura 4 muestra los resultados de la simulación de los requerimientos de K durante el desarrollo del cultivo. Puede observarse que únicamente en el suelo de Tekit la aplicación de K debe realizarse hasta los 75 días de desarrollo de la planta, edad en que el cultivo se encuentra en la formación y maduración de fruto y como se muestra en las Tabla 4, la mayor aplicación de K se realiza en las etapas de adaptación después del trasplante (etapa I) y de crecimiento (etapa II). Por el contrario, en los suelos de Akil y Chemax la aplicación de K debe realizarse durante todo el desarrollo del cultivo hasta los 160 días cuando finaliza la cosecha de fruto (etapa IV). En suelos como los de El Cuyo, Tzucacab, Maxcanu, San Isidro, Buctzotz, Telchac Pueblo, Temozon, Xul, Becanchen, Tizimin y Peto, el modelo de simulación muestra que la aplicación de K debe realizarse 20 días antes de finalizar la cosecha, excepto Tizimin y Peto donde se sugiere que la última aplicación de K se realice 30 y 10 días respectivamente antes de finalizar la cosecha de fruto (Tablas 4 y 5).

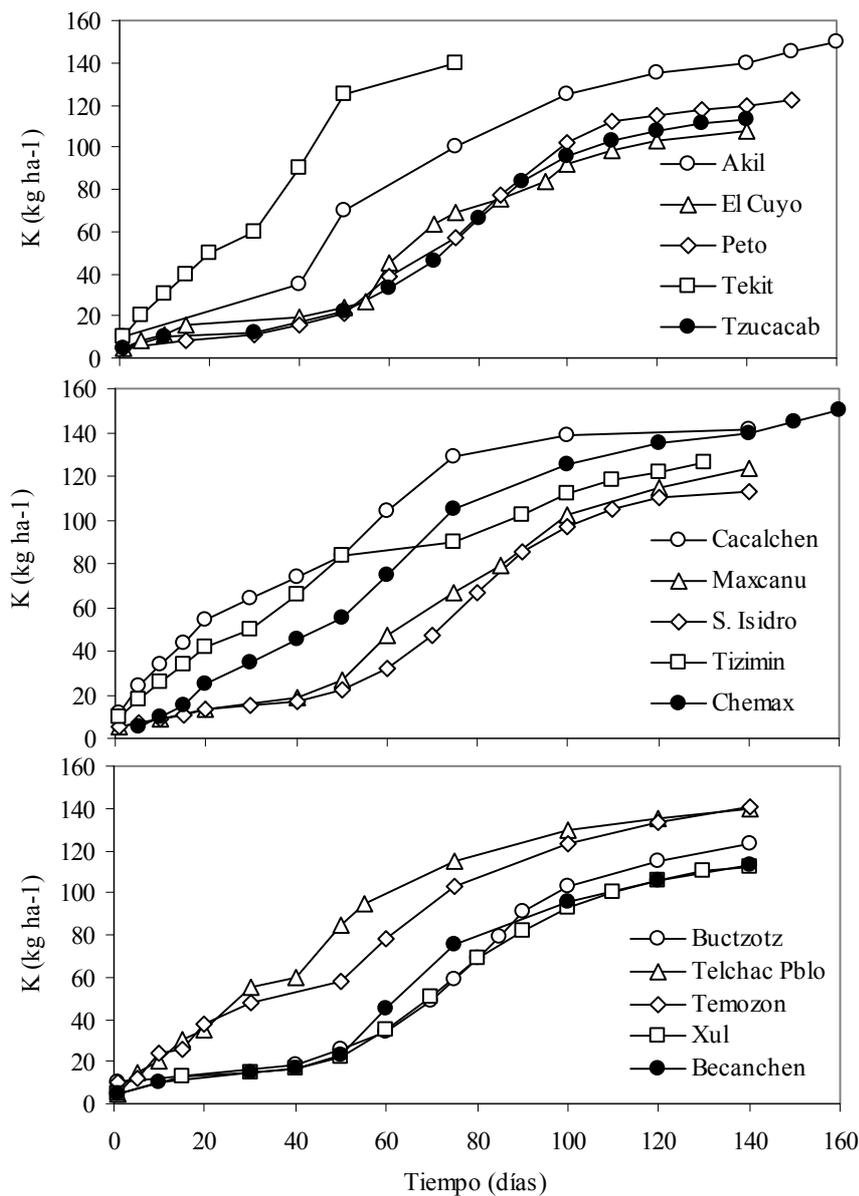


Figura 4. Fertilización acumulada de K requerida para cubrir la demanda nutrimental del cultivo de chile habanero.

CONCLUSION

La simulación de la toma de K para cubrir la demanda por el cultivo de chile habanero en el sureste de México muestra que los requerimientos son entre 108 y 150 kg ha⁻¹ y que la dosificación varía para cada tipo de suelo. Así mismo, los suelos estudiados muestran una baja capacidad de suministro de K y sin un régimen de fertilización apropiado el potencial de producción de biomasa sería limitado. De acuerdo a la simulación, el mejor aprovechamiento de K se obtuvo cuando en los suelos de Akil, Cacalchen, Chemax, Tekit, Telchac Pueblo, Tizimin, y Temozon, se

incorporaron más del 30% de la fertilización en las etapas de adaptación y desarrollo de la planta, y cuando en los suelos de Becanchen, Buctzotz, El Cuyo, Maxcanu, Peto, San Isidro, Tzacacab y Xul más del 75 % de la fertilización se incorporó en las etapas de fructificación y cosecha. Un régimen de fertilización entre 140 – 150 kg ha⁻¹ de K es requerido en los suelos superficiales (menores de 25 cm) y de 108 – 126 kg ha⁻¹ de K en los suelos profundos para que la absorción de K por las raíces cubra la demanda nutrimental de la planta de chile habanero.

REFERENCIAS

- Ayala, S., Soria, M., Borges, L. 1998. Respuesta del chile habanero (*Capsicum chinense*) a la aplicación de diferentes niveles de NPK en fertirrigación. Resumen En: IX Congreso de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agropecuario. Yucatán, México. p. 141.
- Bautista-Zúñiga, F., Jiménez-Osornio, J., Navarro-Alberto, A., Manu, J., y Lozano, R. 2003. Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en leptosoles cárstico. *Terra*. 21: 1-11
- Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Bulk density. In: Klute, A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. p. 363 - 375.
- Borges-Gómez, L., Chuc-Puc, J., Escamilla-Bencomo, A., Medina-Lara, F. 2006. Cinética de la absorción de potasio por las raíces de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Agrociencia*. 40:431-440.
- Borges-Gomez, L., Escamilla-Bencomo, A., Soria-Fregoso, M., Casanova-Villarreal, V. 2005. Potasio en suelos de Yucatán. *Terra Latinoamericana*. 23:437-445.
- Borges, G.L., Noh, J.A. 2001. Nutrición mineral y fertilización. En: *Memorias del Seminario de chile habanero*. Fundación Yucatán Produce A.C., SAGARPA, INIFAP. Yucatán, México. pp. 43-51.
- Bugarin, M.R., Galvis-Spinola, A., Sánchez-García, P., García-Paredes, D. 2002a. Acumulación de materia seca y de potasio en la biomasa aérea total de tomate. *Terra* 20: 401-409.
- Bugarin, M.R., Galvis-Spinola, A., Sánchez-García, P., García-Paredes, D. 2002b. Demanda de potasio del tomate tipo saladette. *Terra* 20: 391-399.
- Comerford, N. 1999. Mecanismos de captación de nutrientes en ecosistemas forestales: de cómo interpretar la fertilidad en el contexto de la conservación de recursos genéticos. En: Orellana, R., Escamilla, A., Larqué, A. (eds). *Ecofisiología vegetal y conservación de recursos genéticos*. Centro de Investigación Científica de Yucatán. Mérida, Yucatán. México. pp. 127-135.
- Duch, G.J. 1988. La conformación territorial del estado de Yucatán. Universidad Autónoma de Chapingo. Centro regional de la Península de Yucatán. Texcoco, México. 427 p.
- Duch, G.J. 1991. Fisiografía del estado de Yucatán. Su relación con la agricultura. Universidad Autónoma de Chapingo. Centro Regional de la Península de Yucatán. Texcoco, México. 228 p.
- Elkhatib, E.A., Hern, J.L., Staley, T.E. 1987. A rapid centrifugation method for obtaining soil solution. *Soil Science Society of America Journal*. 51: 578-583.
- Heuscher, S.A., Brandt, C.C., Jardine, P.M. 2005. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. *Soil Science Society of America Journal*. 69:51-56.
- Jackson, M.L. 1964. Chemical composition of soils. En: Bear, E.D. (ed.) *Chemistry of the soil*. 2ª ed. Van Nostrand Reinhold Co. New York. pp. 71-141.
- Johnson, C., Decoteau, D.R. 1996. Nitrogen and potassium fertility affects jalapeño pepper plant growth, pod yield, and pungency. *HortScience* 31: 1119 - 1123.
- Latournerie, M.L., Chávez, J.L., Pérez, M., Castañon, G., Rodríguez, S.A., Arias, L.M., Ramírez, P. 2002. Valoración *in situ* de la diversidad morfológica de chiles (*Capsicum annum* L. y *Capsicum chinense* Jacq.) en Yaxcaba, Yucatán. *Fitotecnia Mexicana*. 25: 25-33.
- Li, H., Comerford, N. 2000. SSAND Version 1.0, Release 1.06 (10-8-2001) User's guide. University of Florida IFAS. 23 p.
- McCull, J.G. 1970. Properties of some natural waters in tropical wet forest of Costa Rica. *BioScience*. 20:1096-1100.
- Munson, R.D., Nelson, W.L. 1963. Movements of potassium in soils. *Journal of Agricultural Food Chemistry*. 11:193-201.
- Peniche, N. 1994. Riesgos y oportunidades para el campo yucateco. Gobierno del estado de Yucatán. Mérida, Yucatán. México.
- Peterson, C.A., Cholewa, E. 1998. Structural modifications of the apoplast and their potential impact on ion uptake. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 161: 521-531.

- Rincón, L., Saez, J., Balsalobre, E., Pellicer, C. 1995. Crecimiento y absorción de nutrientes del pimiento grueso en cultivo bajo invernadero. *Investigación Agraria (España). Producción y Protección Vegetales.* 10(1): 47-59.
- Soria, F.M., Mazún D., Borges G.L., y Dzib R. 1995. Evaluación de sustratos para la producción de plántulas de chile habanero. Resumen. *En: VI Congreso de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agropecuario.* Gto. México.
- Soria, F.M., Tun, S.J., Trejo, R.A., Terán, S.R. 2002. Paquete tecnológico para la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). SEP. DGTA. ITA-2 Conkal, Yuc, México. 75 p.
- Sparks, D.L., Huang, P.M. 1985. Physical Chemistry of Soil Potassium. *In: Potassium in Agriculture.* R.D. Mundson (ed). American Society of Agronomy. Crop Science Society of America. Soil Science Society of America. Madison, USA. pp 201-276.
- Statgraphic. 1999. Statgraphic Plus. Versión 4.1. Statistics software for Microsoft Excel. Madison. WI
- Tinker, P.B., Nye, P. 2000 Solute movement in the rhizosphere. Oxford University Press. USA. 444 p.
- Tun, D.C. 2001. Características y Tecnología de Producción del chile habanero. SAGARPA. INIFAP-PRODUCE. Mérida Yuc. México. 74 p.
- Van Rees, K.C.J., Comerford, N., Rao, P.S.C. 1990. Defining soil buffer power: implications for ion diffusion and nutrient uptake modeling. *Soil Science Society of America Journal.* 54: 1505-1507.
- Willigen, N.E., Nielsen, N., Claassen, N., Castrignano, A. M. 2000. Modeling water and nutrient uptake. *In: Roots methods. A handbook.* A.L Smit, C. Bengough, M. Engels van Noordwijk, S. Pellerin, S.C. van de Geijn (eds.) Springer. pp 509-544.
- Wilson, E.M. 1980. Physical geography of the Yucatan peninsula. *In: Yucatan a world apart.* E.H. Moseley, and E.D. Terry (ed.). University of Alabama. Tuscaloosa, Alabama, USA. pp. 5-40.

*Submitted October 19, 2007 – Accepted December 17, 2007
Revised received December 30, 2007*