

DESCOMPOSICIÓN Y LIBERACIÓN DE CARBONO Y NUTRIMENTOS DE LOS RESIDUOS DE COSECHA EN PLANTACIONES DE PEJIBAYE PARA PALMITO EN COSTA RICA

Jimmy Boniche*, Alfredo Alvarado^{1/}**, Eloy Molina**, Thomas. J. Smyth***

Palabras clave: *Bactris gasipaes*, palmito, descomposición, residuos, carbono, relación C:N

Keywords: *Bactris gasipaes*, heart-of-palm, residue, decomposition, carbon, C:N ratio

Recibido: 26/11/07

Aceptado: 20/03/08

RESUMEN

Con el objetivo de ampliar el conocimiento en la descomposición de los residuos de cosecha de pejibaye para palmito y la consecuente liberación de nutrientes y carbono al medio, se efectuó un experimento en el que porciones de los diferentes órganos fueron introducidas sistemáticamente en bolsas de malla de nylon de 90x45 cm. Las bolsas fueron depositadas sobre el suelo y en la entrecalle de la plantación, y recolectadas en las semanas 1, 2, 4, 8, 16, 24, 32, 40 y 48 para determinarles los contenidos de materia seca, C, N, P, K, Ca y Mg. Los residuos de cosecha presentaron una relación C:N poco favorable para la descomposición efectiva a corto plazo. A la semana 16, se descompuso y liberó cerca del 50% de la materia seca y C; mientras que en la semana 48, la proporción descompuesta y liberada fue cercana al 80%. Los nutrientes fueron liberados en 3 fases: rápida; decreciente; y lenta. El K fue el que más rápidamente alcanzó la 3ª fase, seguido del Mg, P, N y Ca. La liberación de N fue severamente afectada por la relación C:N presente en el residuo inicial. Según los modelos de regresión escogidos, a la semana 16 se liberó cerca del 97, 80, 70, 60 y 50% del K, P, Mg, N y Ca, respectivamente. Con base en las estimaciones, se podrían descomponer cerca de 9 t.ha⁻¹.año⁻¹ de MS, a partir de los residuos de cosecha, los que podrían liberar 4610, 87, 46,

ABSTRACT

Release of carbon and nutrients after decomposition of harvest residues in heart-of-palm plantations (*Bactris gasipaes*) in Costa Rica. The experiment was carried out to determine the rate of decomposition and the release of C and nutrients of heart-of-palm plantation residues. Portions of all parts of the residues were systematically introduced in nylon decomposition bags, 90x45 cm. The bags were laid on the ground of the intercrop areas of the plantation to be collected after 1, 2, 4, 8, 16, 24, 32, 40, and 48 weeks, when dry matter and nutrient contents of C, N, P, K, Ca, and Mg were measured on the remaining residues. The original plant residues showed an unfavorable C:N ratio to ensure effective short term decomposition rates. After week 16, approximately 50% of the residues in the bags were decomposed; while at week 48, 80% of the dry matter and nutrients in the litter bags had disappeared. Nutrients were released in 3 different phases: fast, decreasing, and slow. K was the element that more quickly attained the third phase, followed by Mg, P, N, and Ca. N release was strongly dependent on the C:N ratio of the fresh residues. Following the best fitting regression models, after week 16, close to 97, 80, 70, 60, and 50% of K, P, Mg, N, and Ca were already released from the decomposition material. Based on estimations,

1 Autor para correspondencia. Correo electrónico: alfredoaa@cariari.ucr.ac.cr

* Abonos del Pacífico (Abopac);

** Centro de Investigaciones Agronómicas—Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

*** Universidad Estatal de Carolina del Norte—EE.UU.

254, 34 y 21 kg.ha⁻¹.año⁻¹ de C, N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.

it was estimated that close to 9 t.ha⁻¹.year⁻¹ of dry matter, from harvesting residues, could be decomposed, releasing 4610, 87, 46, 254, 34, and 21 kg.ha⁻¹.year⁻¹ of C, N, P, K, Ca, and Mg, respectively.

INTRODUCCIÓN

En plantaciones establecidas de palmito, la biomasa que se cosecha y que no se exporta del agroecosistema, se recicla dentro del mismo y es importante en la conservación de suelos, fijación y enriquecimiento de carbono (C) en el suelo y manejo agronómico del cultivo. En este último tema, destacan aspectos como el control de malezas y plagas y la fertilización. En la mayoría de los cultivos es común que se desestime la cuantificación de los nutrimentos que provienen de dicha biomasa residual, con la consecuente sobre aplicación de insumos que repercute en la sostenibilidad ambiental y económica del sistema. En cultivos como la palma de aceite, el aporte de nutrimentos a partir de los residuos es bien conocido y es un componente importante en el manejo racional de la fertilización (Khalid y Anderson 2000, Khalid *et al.* 2000, Lim y Zaharah 2000).

En condiciones tropicales, es común que la descomposición de los residuos de la biomasa de la mayoría de las especies sea rápida y con ello la liberación de nutrimentos (Bohn *et al.* 1985, Coleman *et al.* 1989, Hartemink 2003), como lo demuestran los estudios realizados en Costa Rica por Sauerbeck y González (1977) con residuos de trigo, Vargas y Flores (1992) en banano, Segura (2000) en palma aceitera, Di Stefano y Fournier (2005) en *Vochysia guatemalensis* y Soto *et al.* (2002) en pejíbaya para palmito.

El proceso de reciclaje de los residuos de cosecha sigue 2 caminos paralelos, su acumulación y su descomposición. La liberación de nutrimentos al suelo a partir de los residuos orgánicos, ocurre principalmente por su descomposición a través de la mineralización y humificación. La descomposición está determinada por los factores

climáticos (principalmente humedad y temperatura), propiedades del suelo (mineralogía, textura, química), calidad de los materiales (relación C/N, contenido de polifenoles, polisacáridos y lignina) y actividad de organismos vivos (Lavelle *et al.* 1993, Lim y Zaharah 2000, Khalid y Anderson 2000). Además, la tasa de descomposición de los residuos varía en forma importante en función de su posición sobre o dentro del suelo (Alvarado 2006), y aún en su posición en la hojarasca (Khalid y Anderson 2000, Lim y Zaharah 2000) o por el tamaño de los residuos (Khalid y Zakaria 2000). Aunque la relación C/N no es el único parámetro para determinar el potencial de descomposición de residuos orgánicos, constituye una herramienta útil y de buena correlación, económica y fácil de medir, particularmente en estudios de descomposición de residuos de gramíneas.

Según Molina *et al.* (2002), una plantación madura de pejíbaya para palmito (promedio de 4 y 8 años de edad) con 5000 plantas.ha⁻¹, acumula cerca de 13,1 t.ha⁻¹.año⁻¹ de materia seca (MS), de las cuales 11,3 t quedan en el campo como residuos de cosecha, los que corresponden a foliolos, raquis, pecíolos, secciones apicales y basales y cáscaras externas del tallo. Utilizando la relación carbono: biomasa seca de 0,45, definida por Barbour *et al.* (1987), y utilizada por Ares *et al.* (2002) en palmito, quedan en el campo, a partir de los residuos anteriores, cerca de 5,1 t.ha⁻¹.año⁻¹ de C.

Dado que el cultivo de palmito es perenne (hasta 20-25 años), en donde se aporta continuamente biomasa al suelo proveniente de la sección aérea y radical (López y Sancho 1990, Ares *et al.* 2002), en el tiempo se podría incrementar la cantidad de C y materia orgánica (MO) en el suelo, como lo demostró Haron *et al.* (1998) en

palma aceitera durante 20 años en Malasia (10 t.ha⁻¹.año⁻¹ de MS) y Montenegro y Abarca (2002) en Costa Rica al determinar mayor cantidad de C fijado en el suelo en sistemas silbopastoriles que la secuestrada por el suelo del bosque natural. Sin embargo, Hartemink (2003) y Alvarado (2006) mencionan que a largo plazo se alcanza un nuevo equilibrio y los aumentos en cualquier componente, causados por la adición de residuos, son mínimos.

En el cultivo de pejobaye para palmito en Costa Rica, se ha determinado que por cada tonelada de MS cosechada, se extraen por hectárea al año, entre 13 y 37 kg de N y entre 2 y 3 kg de P, de los cuales son exportados en el palmito bruto (2 cáscaras) entre el 5 y 15% del N y entre el 12 y 16% del P (Herrera 1989, Molina 2000, Ares *et al.* 2002 y Molina *et al.* 2002). Así, una plantación de 5000 plantas.ha⁻¹ dispone en los residuos de cosecha cerca de 155 y 30 kg brutos de N y P, respectivamente, que pueden volver al sistema (Molina *et al.* 2002).

Soto *et al.* (2002), estudiaron en Costa Rica la descomposición de los residuos de cosecha de pejobaye para palmito, utilizando para ello únicamente la hoja 3. Observaron que: A) el orden de la velocidad de liberación fue K>N>P>Mg>Ca; B) la relación C/N del material fue de 16 y la relación de lignina/N fue de 2,7-4,5, lo que facilita la descomposición de los residuos, siempre y cuando los factores edafoclimáticos no sean limitantes; C) 1 kg de MS de hojas aportó en promedio 12,9 g de K, 25,5 g de N, 2 g de P, 2 g de Mg y 3,9 g de Ca; D) más del 50% del N, K y P se libera durante las primeras 6 semanas de descomposición, presentándose a la semana 10 en el material el 23 y 30% de la cantidad inicial de N y P, respectivamente; E) la liberación de los nutrientes no varió según los sitios estudiados (Guápiles y Sarapiquí), excepto para el Ca y Mg; y F) los modelos de predicción de descomposición fueron: $Y=19,11+(100-19,11)*e^{(-0,1472*t)}$ para la MS, $Y=16,89+(100-16,89)*e^{(-0,2819*t)}$ para la liberación de N, y $Y=23,77+(105,1-23,77)*e^{(-0,2282*t)}$

para la liberación de P, donde t equivale al tiempo.

Según los resultados de Molina *et al.* (2002), Soto *et al.* (2002), calcularon que la cantidad de N y P liberada a partir de los residuos de cosecha después de la semana 24 fue de 66 kg.ha⁻¹ de N de 9 kg.ha⁻¹ de P. A las 48 semanas, la cantidad acumulada liberada fue de 93-107 kg.ha⁻¹ de N y de 14-15 kg.ha⁻¹ de P. Tomando como punto de partida la investigación de Soto *et al.* (2002), nace la interrogante de determinar si la velocidad de descomposición de la MS, así como la cantidad de nutrientes liberados, varía al considerar todos los tipos de órganos involucrados en la cosecha. En este sentido, el objetivo de este estudio fue aumentar el conocimiento sobre la descomposición de todos los residuos de cosecha del palmito, de tal manera que se cuantificará y modelará la MS descompuesta y sus adiciones de C y nutrientes en el tiempo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó en una plantación de palmito ubicada en la Estación Experimental los Diamantes, Pococí, Limón. Dicho sitio se encuentra a 140 msnm y se presenta en la hoja cartográfica Guápiles (escala 1:50000) entre las coordenadas planas 249000-250000 N y 561000-562000 E.

Según el Instituto Meteorológico Nacional (1992), la estación experimental recibe un promedio anual de 4561 mm de lluvia, distribuyéndose el 70% de esta en los meses de junio a diciembre. La temperatura ambiental media anual es de 24,5°C y presenta una oscilación menor de 5,0°C durante el año (régimen de temperatura en el suelo iso-hipertérmico). La humedad relativa durante los meses menos lluviosos (febrero y marzo) alcanza un valor medio diario de 84%, y se incrementa hasta un 90% durante los meses más lluviosos (junio a diciembre). El promedio anual de brillo solar es de 4,0 h.día⁻¹, oscilando de 3,0 a 4,6 h.día⁻¹ entre los meses más (junio-julio) y menos (enero-abril) nublados, respectivamente. La evaporación diaria anual (tanque tipo A) oscila

entre 3,1 mm (noviembre) y 4,0 mm (marzo y abril) con 3,6 mm como promedio diario anual. El viento predominante es de Este a Oeste, con una velocidad media anual de 4,1 km.h⁻¹ oscilando entre 3 km.h⁻¹ (octubre) y 5 km.h⁻¹ (marzo). La zona de vida es de bosque muy húmedo tropical (bmh-T) y el régimen de humedad es perúdicico (Bolaños y Watson 1993).

El suelo de la plantación fue clasificado como Andic Dystrudepts, según la metodología de USDA (1999), y la capacidad de uso de las tierras, según la metodología del MAG y MIRENEM (1995), como clase III, siendo la unidad de manejo III s₁₄ d₁₂ c₁ con restricciones dadas por la profundidad efectiva moderada, el drenaje moderadamente lento, riesgo de inundación leve y zona de vida bmh-T. Además, la fertilidad química natural es media (primeros 20 cm) y se presentan niveles medios a altos de acidez, bajos de Zn, altos de Fe y óptimos de P y Cu. Los niveles de las bases (Ca, Mg y K), MO, pH, %SA y Mn se presentan en ámbitos medios.

La plantación fue de 6 años, de los cuales durante los 2 últimos estuvo sujeta a libre crecimiento después de una poda total y a un plan de fertilización anual en donde se aplicó 155 kg.ha⁻¹ de N como urea y fosfato diamónico, 19 kg.ha⁻¹ de P como fosfato diamónico, 108 kg.ha⁻¹ de K como cloruro de potasio y sulfato de potasio y magnesio, 31 kg.ha⁻¹ de Mg como sulfato de potasio y magnesio, 5 kg.ha⁻¹ de B como bórax y 63 kg.ha⁻¹ de S como sulfato de potasio y magnesio. Este fertilizante fue aplicado al voleo, fraccionado en 6 aplicaciones bimensuales al año, en la banda de fertilización y en una mezcla física cuya proporción fue de 18% N, 5% P₂O₅, 15% K₂O, 6% MgO, 0,6% B y 7% S.

La plantación consistió de plantas de la raza "Tucurrique" (con espinas) dispuesta en una densidad de siembra de 2 m entre hileras y 1 m entre plantas, para una densidad de 5000 plantas.ha⁻¹. El área total que abarcó el ensayo fue de 1792 m² (896 plantas) y tuvo una duración de 12 meses (mayo de 2000 a abril de 2001).

Con el fin de medir la descomposición de los residuos, se tomó porciones de todos los

residuos provenientes de plantas recién cortadas, excepto del palmito a 2 cáscaras (palmito de 800-900 g con 55-60 cm de largo). Se tomaron cerca de 750 g de residuos frescos constituidos por folíolos, raquis, pecíolos y tallo, los cuales fueron introducidos en cada bolsa de nylon "tipo malla" de 90x45 cm. Todas las bolsas con residuos fueron identificadas y depositadas sobre la superficie del suelo y en el centro de la entrecalle de la plantación comercial, para posteriormente ser recolectadas y analizadas según las fechas establecidas. La plantación estuvo sujeta al manejo convencional y cada mes se cosechó, sin importar si los residuos de cosecha, deshoja y deshija caían o no encima de las bolsas.

La fertilización se efectuó con el cuidado de no contaminar las bolsas. En total se colocó en el campo 120 bolsas correspondientes a 10 fechas de recolección y 12 repeticiones, las cuales fueron recolectadas a la semana 0, 1, 2, 4, 8, 16, 24, 32, 40 y 48, para los respectivos análisis. Al momento de realizar la cosecha para tomar los residuos, la plantación se encontraba en buen estado nutricional, exceptuando el N, el cual se encontraba en niveles bajos. Esta aseveración se deduce del análisis efectuado en la hoja 3, cuya concentración de nutrimentos fue la siguiente: 2% N, 0,3% P, 0,5% Ca, 0,25% Mg, 1,3% K, 117 mg.kg⁻¹ Fe, 10 mg.kg⁻¹ Cu, 22 mg.kg⁻¹ Zn y 62 mg.kg⁻¹ Mn.

Al inicio del experimento se anotó el peso fresco de los residuos de cada bolsa; luego de su recolección, estos fueron llevados al laboratorio y secados a 65°C en un horno de aire forzado determinándose su peso seco. Posteriormente, las muestras fueron molidas y digeridas por combustión húmeda con HNO₃ y HClO₄ para la determinación de los diferentes elementos.

El P se determinó en un espectrofotómetro después de reducirlo con cloruro de estaño y acomplejarlo como fosfomolibdato (Briceño y Pacheco 1984, Henríquez *et al.* 1995); mientras que el K, Ca y Mg se determinaron por absorción atómica. Se digirió muestras por aparte para determinar el N por el método modificado de Kjeldhal y el NH₄ se analizó en un autoanalizador

de flujo continuo marca Lachat. Se determinó, además, el contenido de C orgánico por el método de combustión a 550°C. La cantidad de contaminación por suelo en las muestras se dedujo de la conversión en cenizas de una submuestra de 1 g a 550°C, los valores encontrados fueron restados a los estimados en las muestras de órganos. Todos los análisis fueron efectuados en el Laboratorio de Suelos y Foliarios del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.

Las variables analizadas correspondieron a la descomposición de los residuos de cosecha, así, como a la liberación de C y nutrientes en el tiempo. Estas fueron sujetas a análisis de regresión curvilíneas de tipo exponencial y asintótico, empleando para ello el programa estadístico Sigma-Plot 5,0 (1999). De aquellos modelos de regresión en que el análisis presentó probabilidad significativa en sí mismos y en sus parámetros, se procedió a escoger el de mejor ajuste de acuerdo al menor valor del cuadrado medio del error o residuo (Ratkowsky 1983).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cantidad inicial de biomasa, nutrientes y carbono en los residuos de cosecha de plantaciones de palmito

La cantidad inicial de biomasa expresada como MS, nutrientes y C, se presenta en el cuadro 1. La cantidad inicial de nutrientes presente en los residuos de cosecha, en orden descendente, fue: K>N>P>Ca>Mg. La relación C/N en el materia inicial fue de 49, lo que supone que este no presenta condiciones ideales para la efectiva descomposición a corto plazo (Soto

2003). Estos resultados son similares a los de Lancelle (2005), el cual determinó relaciones de C/N relativamente altas en hojas de palma blanca (*Copernicia alba*) y Khalid y Anderson (2000), los que determinaron relaciones de C/N altas en varios órganos de la biomasa vegetal de palma de aceite (excepto en los foliolos).

La cantidad inicial de nutrientes (excepto Ca y Mg) en los residuos cosechados fue diferente a la reportada para hojas y raquis de palmito por Soto *et al.* (2002), órganos que sí presentan características químicas ideales para la descomposición efectiva a corto plazo, siempre y cuando otros factores edafoclimáticos no sean limitantes. Esto implica que la biomasa asociada a los pecíolos y a las cáscaras externas del tallo junto con su sección basal y apical, contribuyen a la cantidad y proporción total de nutrientes y C disponibles, y que existen variaciones importantes en la relación C/N entre especies de palmáceas y entre sus órganos, tal y como lo demostraron Khalid y Anderson (2000) en palma de aceite. Molina *et al.* (2002), estimaron que la biomasa asociada a los órganos citados anteriormente, representa cerca del 40% de los residuos cosechados.

Descomposición de los residuos de cosecha y liberación de carbono en plantaciones de palmito

Los resultados de la descomposición de los residuos de cosecha de palmito y su consecuente liberación de C se presentan en los cuadros 2 y 3, y en la figura 1. De manera similar, a los resultados de Sauerbeck y González (1977) y Lim y Zaharah (2000), el mejor modelo encontrado para la predicción significativa de la descomposición

Cuadro 1. Cantidad inicial de biomasa, nutrientes y carbono en los residuos de cosecha de pejobaye para palmito.

	N	P	Ca	Mg	K	C	MS
	g.kg ⁻¹ de MS						g.t ⁻¹ de materia fresca
Promedio	9,6	4,7	3,7	2,5	22,7	467	261
C. V. (%)	3	12	14	7	9	0,5	5

C.V. (%): Coeficiente de variación en porcentaje.

Cuadro 2. Remanente de MS, nutrimentos y carbono en la descomposición de los residuos de cosecha de pejibaye para palmito.

Semana	Elemento (% remanente)						MS remanente (%)
	N	P	K	Ca	Mg	C	
0	100	100	100	100	100	100	100
	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
1	79	67	64	78	65	90	93
	(24)	(17)	(7)	(26)	(11)	(4)	(3)
2	68	61	35	86	50	84	86
	(33)	(19)	(7)	(18)	(9)	(8)	(6)
4	65	44	20	82	43	74	72
	(11)	(21)	(8)	(24)	(41)	(6)	(5)
8	59	38	9	53	34	66	67
	(11)	(50)	(17)	(7)	(16)	(7)	(6)
16	44	21	4	42	33	47	54
	(11)	(15)	(10)	(38)	(10)	(11)	(6)
24	40	22	2	48	26	37	43
	(3)	(18)	(8)	(22)	(6)	(7)	(3)
32	29	15	1	37	28	23	30
	(8)	(13)	(8)	(28)	(9)	(12)	(4)
40	17	9	1	17	27	10	19
	(9)	(26)	(12)	(26)	(17)	(8)	(10)
48	20	13	1	17	25	13	21
	(15)	(24)	(19)	(29)	(17)	(21)	(11)

Valores entre paréntesis: Coeficiente de variación en porcentaje.

de la MS y C fue el exponencial simple degradativo con 2 parámetros (tipo asintótico). En este modelo, se asume que la tasa de descomposición (k o b) es constante en el tiempo y que la cantidad remanente del material (Y) depende de la cantidad inicial disponible (a) en cada lapso de tiempo (t).

La descomposición de los residuos fue más lenta que la reportada por Soto *et al.* (2002), lo que era de esperar al considerar que el conjunto de los órganos cosechados (tallos sin palmitos,

pecíolos, raquis y hojas) presentó características químicas menos ideales para la efectiva descomposición a corto plazo que los residuos correspondientes a solamente las hojas y raquis. De esta manera, se puede presentar variaciones en las tasas de descomposición y liberación de MS, nutrimentos y C entre los diferentes órganos vegetales de la planta. Resultados similares fueron observados en diferentes órganos de los residuos de cosecha de banano (Vargas y Flores 1995), residuos de órganos de palma de aceite

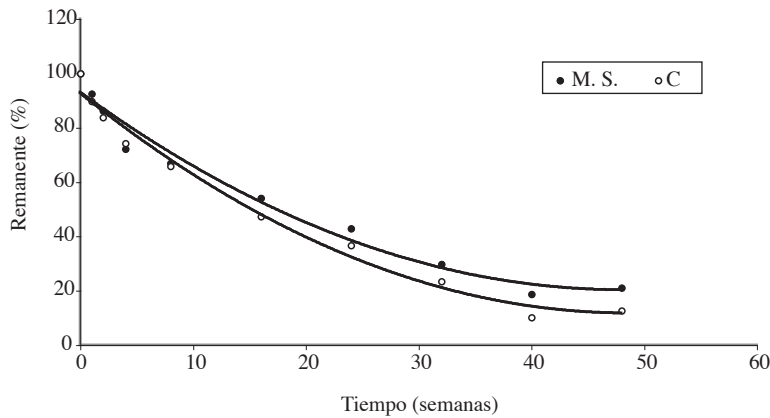


Fig. 1. Cantidad remanente (%) de MS y carbono (C) en el proceso de descomposición de los residuos de cosecha de pejibaye para palmito durante 48 semanas.

Cuadro 3. Coeficientes de los parámetros en los modelos de descomposición de MS, nutrientes y carbono a partir de los residuos de cosecha de pejibaye para palmito.

Residuo (Y)	Modelo (P<0,0001)	Coeficientes (p<0,05)				(C.M.E.) ^{1/2}
		a	b	c	y0	
MS	$Y = a \cdot e^{-bx}$	93,50	0,036	-	-	4,8
C	$Y = a \cdot e^{-bx}$	94,56	0,045	-	-	3,9
N	$Y = y_0 + a \cdot e^{-bx}$	68,47	0,064	-	17,69	7,9
P	$Y = y_0 + (a \cdot b / (b + x))$	88,38	2,72	-	8,88	4,6
K	$Y = y_0 + a \cdot e^{-bx}$	96,99	0,48	-	2,72	3,0
Ca	$Y = a \cdot e^{-bx}$	89,23	0,036	-	-	9,2
Mg	$Y = a \cdot e^{(b/x+c)}$	25,20	3,03	2,20	-	1,9

p: Probabilidad de error al declarar que existen diferencias significativas (ANDEVA)
 (C.M.E.)^{1/2}: Raíz cuadrada del cuadrado medio del error. x: Tiempo (semanas)

(Khalid y Anderson 2000), y residuos vegetales en bosques de la llanura venezolana (Fassbender y Grimm 1981). Sin embargo, se observa que conforme transcurre el tiempo, la cantidad remanente de MS inicial es muy semejante a la reportada por Soto *et al.* (2002), aproximadamente a partir de la semana 32.

Al establecer percentiles correspondientes en los valores predichos por los modelos de ambas variables promediadas, se observa que la cantidad remanente de MS y C en los residuos originales fue aproximadamente de 70% en la semana 8, 50% en la 16 y 20% en la 48. Esto corresponde a una liberación cercana al 30, 50 y 80% de la

cantidad de C contenida en los residuos iniciales a las semanas 8, 16, y 48, respectivamente.

Esta proporción de MS descompuesta al año (cerca del 80%) es ligeramente mayor al 70% modelado por Fassbender y Bornemisza (1994), en el ecosistema forestal montano de Venezuela; y semejante a la materia que se descompone a partir de los residuos de palma de aceite en Malasia, sean estos de la biomasa vegetal (Khalid y Anderson 2000) o del racimo (Lim y Zaharah 2000). Sauerbeck y González (1977), reportaron tasas de descomposición del 70-75% al año en la MS correspondiente a residuos de trigo marcados con ^{14}C en Costa Rica, en condiciones de suelos muy semejantes a los del presente experimento.

Liberación de nutrientes a partir de los residuos de cosecha de plantaciones de palmito

Los resultados de la liberación de nutrientes a partir de los residuos de cosecha de palmito se presentan en los cuadros 2 y 3 y la figura 2.

El mejor modelo encontrado para la predicción significativa del patrón de descomposición de P fue el hiperbólico degradativo con 3 parámetros, para el N y K fue el exponencial simple degradativo con 3 parámetros (tipo

asintótico), para el Ca fue el exponencial simple degradativo con 2 parámetros (tipo asintótico) y para el Mg fue el exponencial simple degradativo modificado con 3 parámetros (tipo asintótico).

Se puede observar que en todos los modelos, excepto para el de Ca, la cantidad de nutrientes liberada se puede agrupar en 3 grandes períodos o fases; en la primera estos se liberan en forma muy rápida, en la segunda lo hacen en forma rápida pero disminuyendo considerablemente conforme avanza el tiempo (inflexión de la curva), y en la tercera lo hacen en forma lenta o casi constante. Las primeras 4 semanas constituyen la primera fase para los elementos P, K y Mg y las primeras 16 semanas para el N. La segunda fase, a las 8 semanas para el K y Mg, de las 8 a las 16 semanas para el P y de la semana 16 a 32 para el N; la tercera fase incluye desde que finaliza el período anterior hasta las 48 semanas para el K, N, P, y Mg. La liberación de Ca fue constante a través del tiempo.

Según los valores predichos por cada modelo, a la semana 8 se ha liberado a partir de los residuos iniciales, cerca del 95, 70, 65, 40 y 30% del K, P, Mg, N y Ca, respectivamente; mientras que a la semana 16 se ha liberado cerca del 97, 80, 70, 60 y 50% del K, P, Mg, N y Ca, respectivamente. Esta velocidad de liberación

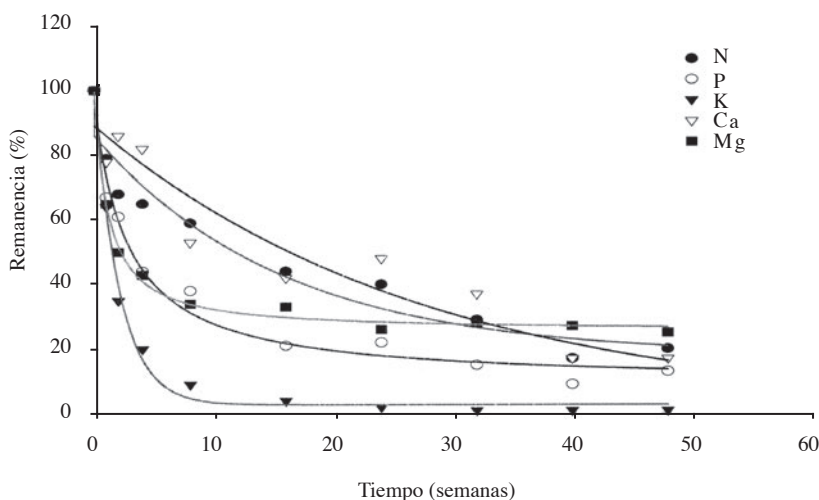


Fig. 2. Nutrientes remanentes (%) en el proceso de descomposición de los residuos de cosecha de pejibaye para palmito durante 48 semanas.

de nutrientes fue superior a la reportada por Khalid y Anderson (2000) en palma de aceite. Además, el orden descendente de la velocidad de liberación de nutrientes, deducido del ΔY de cada modelo establecido en los percentiles de tiempo correspondientes fue: $K > P$ y $Mg > N > Ca$ a la semana 8; N y $Ca > P > Mg > K$ de la semana 8 a 16; y $Ca > N > P > Mg$ y K de la semana 16 a la 48. A partir de varios órganos de palma de aceite, Khalid y Anderson (2000) y Lim y Zaharah (2000) reportaron también una tasa de liberación de K alta y de N lenta

Los patrones de liberación de nutrientes encontrados fueron muy similares a los reportados para residuos de hojas de palmito por Soto *et al.* (2002), salvo que la liberación de N fue más lenta en el presente experimento. De esta manera, al considerar todos los tipos de órganos de los residuos de cosecha, la liberación de nutrientes se ve poco afectada por la mayor relación C/N presente en estos que en los residuos correspondientes a solamente hojas y raquis, salvo para el caso del N . En palma de aceite, Khalid y Anderson (2000) también reportaron una liberación mucho más rápida del N a partir de residuos de hojas que de otros órganos como raquis, pecíolos y tallos. Esto demuestra la importancia de la relación C/N como indicador de la aptitud del material orgánico para descomponerse y liberar principalmente N (Larsen y McCartney 2000, Lim y Zaharah, 2000, Soto 2003).

El K se liberó rápidamente debido a que se encuentra en forma iónica y móvil dentro del citoplasma, por lo que al ocurrir el rompimiento de membranas y paredes celulares este se libera fácilmente al ambiente (Bertsch 1995).

De manera similar, el Mg se liberó inicialmente en forma rápida debido a que se encuentra principalmente en la clorofila y en formas libres dentro del citosol, participando en el balance electrolítico y como activador enzimático (Salisbury y Roos 1992, Bertsch 1995). El Mg estructural, al igual que el Ca , son de lenta liberación en virtud del rol que juegan en las láminas medias y paredes celulares, las cuales se degradan más lentamente con relaciones C/N mayores (Hashimoto y Okamoto 1953, Attiwill 1968).

El P se liberó moderadamente rápido en virtud de que este no es reducido (a diferencia del N y S) dentro de las plantas y permanece como fosfato libre o unido a compuestos orgánicos como ésteres de fácil liberación con la lisis celular (Salisbury y Roos 1992). En condiciones de lenta liberación de la MS , el P estructural puede ser retenido por glucofosfatos, nucleótidos y principalmente por los fosfolípidos de la membrana celular (Salisbury y Roos 1992); sin embargo, dado que la relación inicial de C/P fue de 99,4, el material presenta condiciones óptimas para la liberación efectiva de este elemento a corto plazo (Bertsch 1995).

Estimación de la cantidad de nutrientes y carbono liberados en plantaciones comerciales de palmito

Empleando como cantidad de MS de residuos de cosecha de folíolos, raquis, pecíolos y cáscaras externas del tallo, determinadas por Molina *et al.* (2002), se realizaron estimaciones de la cantidad inicial de nutrientes y C disponibles y su consecuente liberación a partir de dichos residuos para una plantación de 5000 plantas. ha^{-1} en edad promedio de 4 a 8 años. Estos resultados se presentan en el cuadro 4 y la figura 3.

Se determinó que en los residuos frescos de cosecha acumulados durante 1 año, se pueden liberar ($kg.ha^{-1}$) 11303 de MS , 5279 de C , 108 de N , 53 de P , 257 de K , 42 de Ca y 28 de Mg . En términos acumulativos después de 48 semanas de descomposición se han liberado ($kg.ha^{-1}$) 8919 de MS , 4610 de C , 87 de N , 46 de P , 254 de K , 34 de Ca y 21 de Mg (Figura 3).

La cantidad de MS y C presente en el acumulo anual de los residuos de cosecha frescos de palmito, se encuentra en el ámbito normal de la cantidad reportada en los residuos vegetales provenientes de sistemas de bosques tropicales, y superiores a los depositados por sistemas de monocultivo tales como maíz, arroz, trigo, sorgo, algodón y algunos forestales como pino (Sánchez 1981, Coleman *et al.* 1989, Fassbender y Bornemisza 1994).

Cuadro 4. Balance general entre las entradas y salidas de nutrientes en la biomasa de una plantación de pejibaye para palmito.

Variable	Nutrimento				
	N	P	K	Ca	Mg
Entradas (kg.ha⁻¹.año⁻¹)					
A. Nutrimento en el fertilizante aplicado	155	19	108	0	31
B. Nutrimento liberado del residuo de cosecha	87	46	254	34	21
C. Entrada total	242	65	362	34	52
Salidas (kg.ha⁻¹.año⁻¹)					
D. Exportado por cosecha (palmito a 2 cásc.) *	16	11	52	5	5
E. Absorbido por la biomasa cosechada *	109	53	257	41	28
F. Absorbido por la biomasa total	125	64	309	46	33
Balance general (kg.ha⁻¹.año⁻¹) o porcentaje (%)					
G. Diferencia total (valor de la fila C – valor de la fila F)	117	1	53	-12	19
H. Contribución (%) potencial del nutrimento liberado en los residuos a lo absorbido por la biomasa total (valor de fila B/valor de fila F*100)	70	72	85	74	64
I. Eficiencia (%) en el uso del total de entradas (valor de fila F/valor de fila C*100)	52	95	85	-35	64

* Estimado a partir de la MS total cosechada y de la cantidad porcentual correspondiente al palmito a 2 cáscaras según los resultados de Molina *et al.* (2002).

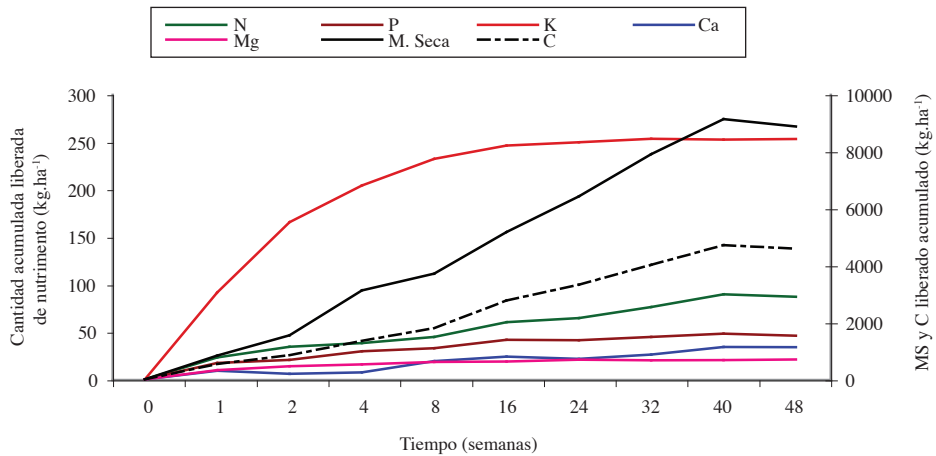


Fig. 3. MS, nutrientes y carbono (C) liberados a partir de la descomposición de los residuos de cosecha de pejibaye para palmito 48 semanas.

Si bien es cierto que esta cantidad de C no se almacena acumulativamente por períodos largos (Hartemink 2003, Alvarado 2006), y que mucho de las 4,6 t.ha⁻¹.año⁻¹ de C liberadas se pierde por volatilización del CO₂, lixiviación, erosión e inmovilización por microorganismos (Coleman *et al.* 1989), la condición perenne del cultivo y sus cosechas periódicas permiten nuevas adquisiciones de C y por tanto alcanzar un nuevo nivel de C constantemente en el suelo, según las condiciones edáficas y climáticas de la región (Alvarado 2006).

Se debe recordar además la cantidad de C suministrada directamente al suelo por la importante biomasa radical (Ares *et al.* 2002), la cual también se encuentra en continuo rejuvenecimiento (López y Sancho 1990), así como el C en solución que podría incorporarse al sistema.

Se puede inferir que los residuos de cosecha de una plantación de palmito podrían abastecer entre el 64 y 85% de los nutrientes requeridos por la biomasa total (punto 8 del Cuadro 4). No obstante, no toda la cantidad de estos nutrientes entrantes al sistema son absorbidos por las raíces, tal y como lo demostraron Khalid y Zakaria (2000), pues dichos elementos están expuestos a todos los procesos de la relación suelo-clima-planta como: lixiviación; fijación; volatilización; desnitrificación; inmovilización; y absorción por otros componentes del agroecosistema como las malezas (Fassbender y Bornemisza 1994).

Además, la condición de equilibrio entre la cantidad de nutrientes provenientes de la descomposición de residuos y aquellos absorbidos por la biomasa total es muy difícil que se alcance debido a factores como: A) la exportación de nutrientes en la cosecha; B) la exposición de los nutrientes liberados a procesos de pérdidas irreversibles e inaccesibilidad como los expuestos anteriormente; C) el tiempo normal del cultivo no es tan amplio; y D) el entorno socioeconómico del cultivo demanda óptimos de rendimiento.

CONCLUSIONES

- 1) El mejor modelo para predecir la descomposición de los residuos de cosecha y liberación de C fue el exponencial simple degradativo de tipo asintótico. Se determinó que a las 8, 16 y 48 semanas se han descompuesto respectivamente cerca del 30, 50 y 80% de la biomasa original con la consecuente liberación de C.
- 2) A pesar de la relación C/N poco apta para la descomposición rápida del conjunto de residuos de cosecha, la liberación de nutrientes se vio poco afectada, salvo para el caso de N. En general, a partir de la semana 16 la liberación de P, K y Mg permanece prácticamente constante; mientras que con el N lo es a partir de la semana 40.
- 3) La velocidad de liberación de nutrientes a través de todo el período de estudio, en orden descendente, fue: K>Mg>P>N>Ca. A las 16 semanas se ha liberado cerca del 97, 70, 80, 60 y 50% del K, Mg, P, N y Ca, respectivamente. En una plantación comercial de 4 a 8 años de edad y de 5000 plantas.ha⁻¹, a las 16 semanas se estimó (ha.año⁻¹) que se han descompuesto 5192 kg de MS y liberado 2780 kg de C, 60 kg de N, 42 kg de P, 247 kg de K, 24 kg de Ca, y 19 kg de Mg.
- 4) La cantidad de nutrientes liberados a partir de los residuos de cosecha abastecen entre el 64 y 85% de los nutrientes requeridos por la biomasa total, lo que repercute en un alto reciclaje de elementos en el agroecosistema. Sin embargo, se debe tener muy en cuenta que no toda la cantidad de estos nutrientes queda a plena disposición de las raíces, debido, a los diferentes procesos de pérdida, inmovilización y extracción.
- 5) La cantidad anual de C en los residuos de cosecha de pejibaye para palmito es similar a la reportada en los residuos vegetales de bosques tropicales, y superior a la reportada en muchos sistemas de monocultivos. Esto quiere decir que el cultivo no sólo capta continuamente cantidades importantes de C sino que también cierta parte de este es incorporado al suelo. Esto, aunado al alto

reciclaje de nutrimentos en el agroecosistema, permite afirmar en cuanto a nutrición y fertilización se refiere, que el cultivo de pejobaye para palmito es “amigable con el ambiente”, siempre y cuando los niveles de fertilizantes no sean altos.

- 6) Debido a que la adición de residuos de cosecha de palmito ocurre durante todo el año, la cantidad de nutrimentos que se pueden liberar a partir de esta, no es la misma que la calculada en el presente trabajo. Por el contrario, en cualquier momento en la plantación se pueden liberar cantidades de nutrimentos proporcionales a su grado de mineralización en órganos frescos, parcialmente descompuestos o casi descompuestos en su totalidad.

AGRADECIMIENTOS

Este experimento se enmarcó en el Proyecto Palmito, realizado conjuntamente por el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica, la Universidad de Carolina del Norte y la Universidad de Hawai. Los recursos financieros fueron provistos por el AID. En la realización de este ensayo destacó la colaboración de los ingenieros Danilo Alpizar y José Pablo Quesada. Se agradece además al personal de la Estación Experimental Los Diamantes, MAG/Guápiles y del Laboratorio de Suelos y Foliareos del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.

LITERATURA CITADA

- ALVARADO A. 2006. Potential of soil carbon sequestration in Costa Rica. Capítulo 8. In. R. La.1, C.C. Cerni, M. Bernoux, J. Etchevers y C.E. Ceri (eds.). Carbon sequestration in soils of Latin America. The Haworth Press Inc. USA. 554 p.
- ARES A., BONICHE J., MOLINA E., YOST R. 2002. *Bactris gasipaes* agroecosystems for heart-of-palm production in Costa Rica: changes in biomass, nutrient and carbon pools with stand age and plant density. Field Crops Research 74 (2002):13-22.
- ATTIWILL P. 1968. The loss of elements from decomposing litter. Ecology 49:142-145.
- BARBOUR M., BURK J., PITTS W. 1987. Terrestrial plant ecology. The Benjamin Cummings Publishing Company Inc. California, USA.
- BERTSCH F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica.
- BOHN H., MCNEAL B., O'CONNOR G. 1985. Soil Chemistry. Wiley Interscience Publication. New York, USA.
- BOLAÑOS M.R., WATSON C.V. 1993. Mapa Ecológico de Costa Rica 1:200.000, según el sistema de clasificación de zonas de vida de L.R. Holdridge. Centro Científico Tropical. San José, Costa Rica.
- BRICEÑO J., PACHECO R. 1984. Métodos analíticos para el estudio de suelos y plantas. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 137 p.
- COLEMAN D., MALCOLM J., UEHARA G. 1989. Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. NITRAL Project-University of Hawaii at Manoa, USA.
- DI STEFANO J., FOURNIER L. 2005. Caída de hojarasca y tasas de descomposición de las hojas de *Vochysia guatemalensis* en una plantación de 10 años, Tabarcia de Mora, Costa Rica. Agronomía Costarricense 29(1):9-16.
- FASSBENDER H., BORNEMISZA E. 1994. Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. IICA. San José, Costa Rica.
- FASSBENDER H., GRIMM U. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. II. Producción y descomposición de residuos vegetales. Turrialba 31 (1):39-47.
- HARON K., BROOKES P., ANDERSON J., ZAKARIA Z. 1998. Microbial biomass and soil organic matter dynamics in oil palm (*Elaeis guineensis*) plantations, West Malaysia. Soil Biological Biochemistry 30:547-552.
- HARTEMINK A. 2003. Soil fertility decline in the tropics with case studies on plantations. CABI Publishing, England. 360 p.
- HASHIMOTO T., OKAMOTO M. 1953. Studies on the magnesium nutrition of crops. II. J. Sci. Soil Manure (Japan) 24:231-234.

- HENRÍQUEZ C., BERTSCH F., SALAS R. 1995. Fertilidad de suelos, manual de laboratorio. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 64 p.
- HERRERA W. 1989. Fertilización del pejobaye para palmito. Serie técnica Pejobaye. Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Boletín Informativo 1 (2):5-10.
- INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL. 1992. Descripción preliminar del clima de Los Diamantes. Departamento de Agrometeorología. San José, Costa Rica. 23 p.
- KHALID H., ANDERSON J. 2000. Decomposition processes and nutrient release patterns of oil palm residues. *Journal of Oil Palm Research* 12 (1):46-63.
- KHALID H., ZAKARIA Z., ANDERSON J. 2000. Nutrient cycling in an oil palm plantation: the effects of residue management practices during replanting on dry matter and nutrient uptake of young palms. *Journal of Oil Palm Research* 12 (2):29-37.
- LANCELLE H. 2005. Aspectos de la descomposición de hojas de *Copernicia alba* Morong (palma blanca) en agua, en relación a la concentración de carbono y nitrógeno (en línea). Corrientes, Argentina. Consultado el 2 de julio del 2006. Disponible en <http://www.unne.edu.ar/cyt/2001/8-Exactas/E-033.pdf#search=Lancelle%20and%20carbono>.
- LARSEN K., MCCARTNEY D. 2000. Effect of C:N ratio on microbial activity and N retention: Bench-scale study using pulp and paper biosolids. *Compost Science and Utilization* 8 (2):147-159.
- LAVELLE P., BLANCHART E., MARTIN A., MARTIN S., SPAIN A., TOUTAIN F., BAROIS I., SCHAEFER R. 1993. Hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems; Application to soils of the humid tropics. *Biotrópica* 25 (2):130-150.
- LIM K., ZAHARAH A. 2000. Decomposition and N-K release by oil palm empty fruit bunches applied under mature palms. *Journal of Oil Palm Research* 12 (2):55-62.
- LÓPEZ A., SANCHO H. 1990. Observaciones sobre la distribución radical del pejobaye (*Bactris gasipaes* HBK) para palmito en un Andisol. *ASBANA* 14 (34):9-15.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA Y MINISTERIO DE RECURSOS NATURALES ENERGÍA Y MINAS. 1995. Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- MOLINA E. 2000. Manual de suelos y nutrición de pejobaye para palmito. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 42 p.
- MOLINA E., ALVARADO A., BONICHE J., SMYTH J. 2002. Acumulación de biomasa y nutrientes en plantaciones de palmito en Guápiles, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 26(2):53-62.
- MONTENEGRO J., ABARCA S. 2002. Los sistemas silvo-pastoriles y el calentamiento global: un balance de emisiones. *Agronomía Costarricense* 26(1):17-24.
- RATKOWSKY D. 1983. Nonlinear regression modeling: a unified practical approach. M. Dekker, N. Y., USA. 276 p.
- SALISBURY F., ROSS C. 1992. Plant physiology. Wadsworth Publishing Company. Belmont, California, USA.
- SÁNCHEZ P. 1981. Suelos del trópico, características y manejo. IICA. San José, Costa Rica.
- SAUERBECK D., GONZÁLEZ M. 1977. Field decomposition of carbon 14 labelled plant residues in various soils of the federal republic of Germany and Costa Rica. *In*. Proceedings of a symposium Braunschweig, jointly organized by the IAEA and FAO in cooperation with agrochimica. Vol I. p. 159-170.
- SEGURA M. 2000. Uso de dos bioensayos para determinar el efecto residual y el valor nutricional de un composte hecho de fibra de racimos vacíos de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*). Tesis de Licenciatura en Ingeniería Agronómica con énfasis en Fitotecnia, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- SIGMA-PLOT. 1999. Sigma Plot for Windows Versión 5.0. SPSS Inc. USA.
- SOTO G. 2003. Liberación de nutrientes de los abonos orgánicos: en busca de la sincronía. *In* Abonos orgánicos: principios, aplicaciones e impacto en la agricultura. CIA-UCR, CATIE, ACCS. San José, Costa Rica. p.:151-161.

- SOTO G., LUNA P., WAGGER M., SMYTH J., ALVARADO A. 2002. Descomposición de residuos de cosecha y liberación de nutrimentos en plantaciones de palmito en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 26(2):43-51.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (USDA). 1999. Keys to Soil Taxonomy. 2^a Ed. Washington, D. C., USA.
- VARGAS R., FLORES C. 1992. Liberación de nutrimentos por los residuos vegetales en suelos bajo cultivo de banano en la zona Atlántica de Costa Rica. *CORBANA* 16 (37):18-21.
- VARGAS R., FLORES C. 1995. Retribución nutricional de los residuos de hojas, venas de hojas, pseudotallo y pinzote de banano (*Musa* AAA) en fincas de diferentes edades de cultivo. *CORBANA* 20 (44):33-47.