

CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO Y VARIACIÓN DEL NITRÓGENO EN FINCAS GANADERAS DE CRÍA

Sergio Abarca-Monge¹, Francisco Arguedas-Acuña¹, Roberto Soto-Blanco¹

RESUMEN

Carbono orgánico del suelo y variación del nitrógeno en fincas ganaderas de cría. Las pasturas tropicales son de reciente data. A diferencia del bosque natural, predominan las plantas tipo C4. Los métodos para medir adicionalidad de carbono orgánico del suelo (COS), se basan en la profundidad a la que el suelo está siendo afectado en su almacén de carbono (C) por la gestión de la cobertura actual. La sostenibilidad de las pasturas está relacionada a la disponibilidad de nitrógeno (N) y su relación con el C, donde el orden de suelo también interacciona con el potencial de retención de C y N. Durante el 2017, se estudiaron las diferencias entre bosque y pastura de 11 fincas ganaderas de carne en dos órdenes de suelo (Inceptisoles y Ultisoles) a cinco profundidades en capas de 20 cm. Las variables fueron: Densidad Aparente (DA), concentración de C y N, masa del COS y nitrógeno total (N_t), niveles de discriminación de isótopos 13 y 15 de C y N respectivamente ($d^{13}C$) y ($d^{15}N$) en raíces y suelo y proporción de carbono orgánico aportado por la pastura después de la deforestación al carbono orgánico total del suelo (COT). Se observó que el aporte de COS de las plantas C4 de las pasturas fue en los primeros 20 cm, así como también se observaron diferencias entre Inceptisoles y Ultisoles en relación al almacenamiento de COS. Los valores de $d^{15}N$ fueron más altos en la pastura que en el bosque evidenciando un elevado reciclaje. En conclusión, el aporte del COS a la COT de la pastura se realiza en los primeros 20 cm de profundidad. Por lo tanto, se infiere que la génesis del suelo influyó sobre la capacidad del suelo para almacenar carbono.

Palabras clave: carbono, suelo, pasturas tropicales, adicionalidad.

INTRODUCCIÓN

Es conocida la importancia de los suelos bajo pasturas tropicales en relación con las remociones de Carbono atmosférico (Guo y Gifford 2002), cuando se manejan en forma adecuada y se utilizan especies de plantas mejoradas con metabolismos fotosintético tipo C4 (Fisher *et al.* 1994). No obstante, existe incertidumbre del grado de aporte de C por parte de las pasturas, en relación

al contenido preexistente en el suelo (McSherry y Ritchie 2013). En Costa Rica, las áreas de pastura son de reciente data, donde la mayor parte de los suelos bajo pastoreo pasó de bosque a pastura en los últimos dos tercios del siglo XX (Velkamp 1993). La composición florística del bosque tropical húmedo y muy húmedo de acuerdo con las zonas de vida de Holdridge (1978), en las áreas de pastura actuales

1 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. sabarca@inta.go.cr, farguedas@inta.go.cr, rsoto@inta.go.cr

fue de plantas dicotiledóneas de hoja ancha donde predominó el metabolismo fotosintético C3 (Meinzer 1978). Por lo tanto, mediante la técnica de discriminación $d^{13}C$, es posible conocer la dinámica del C en los suelos con coberturas de gramíneas bajo pastoreo, las cuales son C4 con anatomía Kranz y se caracterizan por un alta eficiencia en fijación de C (Ehleringer 1991); dada esta condición, su sistema fotosintético discrimina menos que las plantas C3 el isótopo de carbono 13 (Farquhar 1983).

Por otra parte, el N es el principal elemento limitante de las pasturas (Ghannoum y Conroy 1998), el ^{15}N se considera un isótopo pesado que se incorpora en las cadenas tróficas, concentrándose conforme se asciende en las pirámides de las cadenas alimenticias (Rodríguez-Graña y Szteren 2013). Mediante el rastreo en el suelo y las plantas que crecen en forma natural es posible conocer su

abundancia e interpretación y conocer mejor la dinámica del N, ya que en la medida que en un ecosistema se reduce la disponibilidad de isótopo ^{14}N , se produce un incremento del isótopo ^{15}N (Craine et al 2015). La abundancia natural de la relación isotópica $^{14}N/^{15}N$ ha sido utilizada satisfactoriamente en pasturas tropicales para la evaluación de los ciclos de nitrógeno en estos sistemas (Valle de la Mora *et al.* 2003).

El objetivo de este estudio fue observar la deposición de carbono y nitrógeno al suelo de pasturas en relación con la vegetación original, con el fin de obtener una aproximación de la profundidad de muestreo en pasturas para los inventarios de remociones de carbono en los balances de Gases de Efecto Invernadero (GEI), además de comprender mejor la dinámica del N en las pasturas cuando presenta un adecuado manejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron 11 fincas en igual número de cantones de seis provincias de Costa Rica, de las cuales 10 eran del programa piloto de monitoreo de la Corporación de Fomento Ganadero (CORFOGA) y una correspondió a la pastura del modelo de

ceba de machos en la Estación Experimental Los Diamantes (EELD) del INTA. En el Cuadro 1 se presenta la ubicación, el orden de suelo y la especie predominante de pasto para las fincas bajo estudio.

Cuadro 1. Localidad, ubicación de las fincas, sitios de muestreo y especie de pasto. Costa Rica. 2017.

| Localidad | Finca | Orden | Muestra en bosque | | Muestra en pasto | | Especie de pasto |
|-----------|-------|------------|-------------------|-------------|------------------|-------------|------------------------------|
| La Cruz | 1 | Inceptisol | N11.1225 | W085.5689 | N11.1214 | W085.5694 | <i>B. decumbens</i> |
| Hojancha | 2 | Inceptisol | N09.9683 | W085.4039 | N09.9681 | W085.4003 | <i>B. brizantha</i> |
| Garabito | 3 | Ultisol | N09.56553 | W084.54254 | N09.57098 | W084.54099 | <i>B. erecta x B. mutica</i> |
| S. Mateo | 4 | Ultisol | N09.95806 | W084.50304 | N09.95895 | W084.50296 | <i>B. brizantha</i> |
| Golfito | 5 | Inceptisol | N08.64687 | W082.95738 | N08.61032 | W083.03407 | <i>C. nlemfuensis</i> |
| B. Aires | 6 | Ultisol | N09.06977 | W083.27712 | N09.07061 | W083.28102 | <i>B. brizantha</i> |
| Upala | 7 | Ultisol | N10.90389 | W085.05546 | N10.90514 | W085.05507 | <i>P. maximun</i> (Mombaza) |
| S. Carlos | 8 | Ultisol | N10.68194 | W084.43134 | N10.68222 | W084.43085 | <i>B. brizantha</i> |
| Turrialba | 9 | Ultisol | N09,89972 | W083,571667 | N09,91389 | N083,575833 | <i>B. erecta</i> (Tanner) |
| Sarapiquí | 10 | Inceptisol | N10.33819 | W083.97085 | N10.33516 | W083.96745 | <i>B. brizantha</i> |
| Pococí | 11 | Inceptisol | N10.22245 | W083.77363 | N10.24741 | W083.76902 | Hbd Brachiarias (Cayman) |

Todas las fincas se consideraron con un buen manejo de pasturas de acuerdo con las prácticas recomendadas en el plan piloto de ganadería de carne de la Estrategia para la Ganadería Baja en Carbono en Costa Rica (MAG 2015), y se clasificaron en dos grupos de acuerdo al orden de suelo, donde las fincas ubicadas en Ultisoles presentaban terrenos con pendiente (ondulada o quebrada) (Abarca 2018) y suelo color rojizos o amarillentos en la primera capa de 20 cm de (Velkamp 1993). Las fincas en Inceptisoles fueron con suelos planos y oscuros.

Entre febrero y abril de 2017 se realizaron 22 calicatas a 1,40 m de profundidad, a las cuales se les tomó muestras en tractos de 20 cm para determinación de la concentración (%) de C y N así como la masa almacenada de carbono orgánico de suelo (COS) y nitrógeno total (N_t) en términos de Mg ha⁻¹ (t/ha) (Velkamp 1993), Densidad aparente (DA) en valores de Mg/m³ (Alvarado y Forsythe 2005), raíces y suelo para determinación del isótopos de ¹³C y ¹⁵N, en unidades de discriminación de 0/00 $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (Arias, 2015; Craine *et al.* 2015).

Los análisis de concentración de C y N del suelo se realizaron en el Laboratorio de Suelos del INTA, y la determinación de DA en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), en suelo con partículas $\leq 2,0$ mm.

Para la estimación de la COS y N_t del suelo por hectárea en una lámina de 20 cm suelo se sigue utilizó a la siguiente ecuación:

$$\text{COS} / \text{Nt} = \text{Cs} / \text{Ns} * \text{Ls} * \text{DA} * 10^4$$

Donde:

COS = Carbono Orgánico Suelo (Mg ha⁻¹)

Nt = Nitrógeno Total (Mg ha⁻¹)

Cs = Concentración de carbono en el suelo (g/g)

Ns = Concentración de Nitrógeno en el suelos (g/g)

Ls = Lámina de suelo (cm)

DA = Densidad Aparente (Mg/ m³)

Las preparación de muestras para determinación de isótopos, que incluyó: separación de raíces, secado, molienda encapsulado en estaño y envasado, se realizó en los laboratorios del INTA y el CATIE, todo de acuerdo con los requisitos para la terminación de isotópicos $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ del Laboratorio de Isotopos Estables (SIF por sus siglas en inglés) del Departamento de Ciencia de las Plantas de la Universidad de California, donde se analizaron los análisis por espectrometría de masas de radio isótopos (IRMS por sus siglas en inglés). La abundancia natural en suelo y raíces de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ fueron calculados por el mismo laboratorio de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\delta^{13}\text{C} / \delta^{15}\text{N} (0/00) = [(R_{\text{muestra}} / R_{\text{estándar}}) - 1] \times 1000,$$

Donde:

R = proporción de ¹⁵N / ¹⁴N o ¹³C / ¹²C de la muestra y estándar

Estándar: Nitrógeno atmosférico y VPDB para carbono.

La estimación del aporte COS de la pastura (COS^P) al COT del suelo bajo pastura (COT^P) se realizó solamente por finca, profundidad y orden del suelo. Para el cálculo del remanente COS del bosque (COS^B) y el COS^P se utilizó el procedimiento sugerido por Velkamp (1993), mediante la siguiente fórmula:

$$\text{COT}^{\text{P}} * \delta^{13}\text{C}_{\text{P}} = \text{COS}^{\text{B}} * \delta^{13}\text{C}^{\text{B}} + \text{COS}^{\text{P}} * \delta^{13}\text{C}^{\text{RP}}$$

Donde:

COT^P = COS total de la pastura,

COS^B = COS del bosque,

COS^P = COS del pasto,

$\delta^{13}\text{C}^{\text{P}}$ = Valor de $\delta^{13}\text{C}$ del pasto,

$\delta^{13}\text{C}^{\text{B}}$ = Valor de $\delta^{13}\text{C}$ del bosque,

$\delta^{13}\text{C}^{\text{RP}}$ = Valor de $\delta^{13}\text{C}$ de raíces del pasto.

Las pasturas estudiadas, no tenían registro de aplicaciones de enmiendas orgánicas al suelo, ni están en suelos calcáreos; por lo tanto, se asumió que COT^P estaba constituido por dos facciones principales de COS: remanente del bosque; y el

aportado por los pastos y otras plantas de la pastura constituyendo el COS^B y COS^P respectivamente.

Las variables analizadas fueron, cobertura de suelo, orden de la finca y profundidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad Aparente

Se presentaron diferencias únicamente para efectos simples ($p < 0,0079$) en las variables cobertura vegetal y orden de suelo. La diferencia en la profundidad 0-20 cm con respecto a las demás fue altamente significativa ($p < 0,0001$).

Cuadro 2. Efecto de la cobertura, orden y profundidad del suelo sobre la densidad aparente (g/cm^3). Costa Rica. 2017.

| Cobertura DA (g/cm^3) | | Error Estándar |
|----------------------------------|-------|----------------|
| Pastura | 1,19a | 0,02 |
| Bosque | 1,11b | |
| Orden | | |
| Inceptisoles | 1,10a | 0,02 |
| Ultisoles | 1,20b | |
| Profundidad (cm) | | |
| 0-20 | 0,99a | 0,03 |
| 20-40 | 1,17b | |
| 40-60 | 1,19b | |
| 60-80 | 1,19b | |
| 80-100 | 1,21b | |

No obstante, a esta profundidad (0-20 cm) se presentó una interacción ($p < 0,05$) con la cobertura (Cuadro 3) donde el bosque presentó el valor más bajo de DA, mientras la pastura no fue diferente entre el bosque y el resto de las profundidades de ambas coberturas, aunque con una tendencia a una menor compactación.

Cuadro 3. Efecto de la interacción cobertura por profundidad del suelo sobre la densidad aparente (g/cm^3). Costa Rica. 2017.

| Cobertura | Profundidad (cm) | DA (g/cm^3) |
|----------------|------------------|------------------------|
| Pastura | 0-20 | 1,10ab |
| Pastura | 20-40 | 1,23a |
| Pastura | 40-60 | 1,20a |
| Pastura | 60-80 | 1,21a |
| Pastura | 80-100 | 1,22a |
| Bosque | 0-20 | 0,89b |
| Bosque | 20-40 | 1,11a |
| Bosque | 40-60 | 1,18a |
| Bosque | 60-80 | 1,18a |
| Bosque | 80-100 | 1,20a |
| Error Estándar | | 0,05 |

Los valores de DA son concordantes con los reportados por Alvarado y Forsythe (2005) para los órdenes de suelo de Costa Rica.

Carbono Orgánico

Según el cuadro No. 4, no se observaron diferencias entre coberturas y orden de suelos para la concentración de C, esta variable solamente presentó diferencias a la profundidad 0-20 cm con respecto a las otras profundidades.

Cuadro 4. Efecto de la profundidad del suelo sobre la concentración de Carbono (%). Costa Rica. 2017.

| Profundidad (cm) % | Error Estándar |
|--------------------|----------------|
| 0-20 | 7,30a |
| 20-40 | 5,83b |
| 40-60 | 5,70b |
| 60-80 | 5,57b |
| 80-100 | 5,42b |
| 0,33 | |

En relación con la masa de COS sin y con corrección por DA, no se observó diferencias para las variables en estudio, los promedios fueron: $39,20 \pm 11,57$; $36,30 \pm 10,67$; $36,77 \pm 9,58$ Mg/ha para las pasturas sin corregir y corregidas por la densidad aparente del bosque y el bosque respectivamente. Los valores para pasturas fueron menores que los reportados a las mismas profundidades por Fisher *et al.* (1994) en la sabana pero similares a los observados por Carvajal *et al.* (2009) en los paisajes andinos, ambos en Colombia; y proporcionalmente concordantes con los reportados en pasturas del trópico muy húmedo de Costa Rica por INTA-COROFGA (2013) y Hernández *et al.* (2014) a 10 cm y a 5 cm de profundidad respectivamente.

Contenido de Nitrógeno

No se observaron diferencias entre coberturas, aunque si entre órdenes ($P < 0,039$), con promedios de $0,16 \pm 12$ y $0,13 \pm 10\%$ de N para Inceptisoles y Ultisoles respectivamente. La profundidad mostró diferencias ($P < 0,0001$) entre el estrato 0-20 cm y el resto de estratos, así como la interacción cobertura*profundidad ($P < 0,0489$) entre bosque, pasto y las demás profundidades de ambas coberturas.

Cuadro 5. Efecto de la cobertura y profundidad del suelo sobre la concentración de Nitrógeno (%). Costa Rica. 2017.

| Cobertura | Profundidad (cm) | N (%) |
|----------------|------------------|-------|
| Pastura | 0-20 | 0,26a |
| Pastura | 20-40 | 0,12c |
| Pastura | 40-60 | 0,12c |
| Pastura | 60-80 | 0,10c |
| Pastura | 80-100 | 0,08c |
| Bosque | 0-20 | 0,36b |
| Bosque | 20-40 | 0,16c |
| Bosque | 40-60 | 0,12c |
| Bosque | 60-80 | 0,09c |
| Bosque | 80-100 | 0,08c |
| Error Estándar | | 0,02 |

Estos valores son menores a los observados en la región andina de Colombia a la misma profundidad (Carvajal *et al.* 2009) pero similares a los reportados por Weintraub *et al.* (2016) en los bosques de Costa Rica. El N_t corregido por DA no presentó diferencias con respecto a cobertura y orden, no obstante, mostró diferencias ($p < 0,0001$) con respecto a la profundidad (Cuadro 5).

Cuadro 6. Masa de Nitrógeno total (Mg/ha/20 cm) a diferentes profundidades. Costa Rica. 2017.

| Profundidad (cm) Mg/ha | Error Estándar |
|------------------------|----------------|
| 0-20 | 5,29a |
| 20-40 | 3,04b |
| 40-60 | 2,78bc |
| 60-80 | 2,14bc |
| 80-100 | 1,90c |
| 0,25 | |

La interacción cobertura profundidad también presentó diferencias ($p < 0,0167$), Cuadro 6. La tendencia a la reducción de N_t con respecto a la profundidad fue mayor en el bosque que en la pastura, lo que sumado a que este ecosistema presenta mayor nivel de nitrógeno en la primera capa con respecto a la pastura, indica una alta posibilidad de que el suelo de bosque en las primeras capas posea mejores mecanismos de retención de N que la pastura.

Cuadro 7. Masa de Nitrógeno total (Mg/ha/20cm): interacción cobertura por cada 20 cm de profundidad. Costa Rica. 2017.

| Cobertura | Profundidad (cm) | Nt (Mg/ha) |
|-----------------------|------------------|-------------|
| Pastura | 0-20 | 4,46 b |
| Pastura | 20-40 | 2,61cd |
| Pastura | 40-60 | 2,86cd |
| Pastura | 60-80 | 2,32cd |
| Pastura | 80-100 | 2,02cd |
| Bosque | 0-20 | 6,11 a |
| Bosque | 20-40 | 3,47bc |
| Bosque | 40-60 | 2,70cd |
| Bosque | 60-80 | 1,97cd |
| Bosque | 80-100 | 1,78 d |
| Error Estándar | | 0,35 |

Relación Carbono Nitrógeno

En forma general no se obtuvieron diferencias para las coberturas y el orden de suelo, aunque se observó una tendencia a una menor (30 %) relación C:N en los suelos con cobertura de bosque y Ultisoles (15 %) (Cuadro 8). Los valores están en el rango observado para bosques húmedos en Puerto Rico por Von Fischer y Tieszen (1995).

Cuadro 8. Relación C:N valores promedio por cobertura y orden. Costa Rica. 2017.

| Cobertura Relación C:N | Error Estándar |
|------------------------|----------------|
| Pastura 16,03 | 3,97 |
| Bosque 23,16 | |
| Orden | |
| Inceptisoles 21,20 | 3,97 |
| Ultisoles 18,03 | |

Se observaron diferencias ($p < 0,0181$) según la profundidad, donde la lámina 0-20 cm presenta una baja relación C:N y luego un incremento moderado en las dos capas intermedias y más fuertemente en las de mayor profundidad.

Cuadro 9. Relación C:N variación con la profundidad. Costa Rica. 2017.

| Profundidad (cm) | Relación C:N | Error Estándar |
|------------------|--------------|----------------|
| 0-20 | 6,78 a | 2,28 |
| 20-40 | 14,36ab | |
| 40-60 | 14,82ab | |
| 60-80 | 34,24b | |
| 80-100 | 27,77ab | |

Variación de la discriminación de isótopo ^{13}C

Se observaron diferencias ($p < 0,0002$) para $d^{13}\text{C}$ del suelo entre coberturas, las interacciones cobertura por orden ($p < 0,0048$) y cobertura por profundidad ($p < 0,0225$) (Cuadro 10).

Partiendo del hecho de que entre menos negativo sea el valor $d^{13}\text{C}$ hay una menor discriminación sobre este isótopo, lo cual implica una mayor deposición de carbono de plantas C4 al suelo, se puede inferir que la diferencia observada en los primeros 20 cm de suelo entre la pastura y el bosque de las fincas estudiadas se debe mayormente a la contribución de las plantas que constituyeron las pasturas.

Cuadro 10. Discriminación de ^{13}C del suelo. Costa Rica. 2017.

| Cobertura | $d^{13}\text{C}$ | Error Estándar | |
|----------------------------|------------------|----------------|------|
| Pastura | -21,77a | 0,44 | |
| Bosque | -24,71b | | |
| Cobertura Orden | | | |
| Pastura Inceptisoles | -22,09a | 0,65 | |
| Pastura Ultisoles | -21,45a | | |
| Bosque Inceptisoles | -25,65b | | |
| Bosque Ultisoles | -22,69a | | |
| Cobertura Profundidad (cm) | | | |
| Pastura 0-20 | -19,13 | | 1,03 |
| Pastura 20-40 | -21,93 | | |
| Pastura 40-60 | -22,20 | | |
| Pastura 60-80 | -22,78 | | |
| Pastura 80-100 | -22,80 | | |
| Bosque 0-20 | -25,67 | | |
| Bosque 20-40 | -23,98 | | |
| Bosque 40-60 | -23,77 | | |
| Bosque 60-80 | -23,62 | | |
| Bosque 80-100 | -23,82 | | |

En cuanto a $\delta^{13}\text{C}$ de raíces entre coberturas se observaron diferencias ($p < 0,0001$) para $\delta^{13}\text{C}$ con promedios de $-17,38 \pm 5,40$ y $-29,46 \pm 1,79$ para pastura y bosque respectivamente, confirmando la contribución al carbono del suelo de las plantas tipo C4 que constituyen las pasturas en las fincas del estudio. También se obtuvieron diferencias ($p < 0,05$) para la interacción cobertura por orden (Cuadro 11) donde las pasturas presentan diferencias entre órdenes mientras el bosque no. El valor más negativo de pasturas en Ultisoles puede estar asociado a una mayor presencia de raíces provenientes de arvenses arbustivas observadas durante el estudio en estas pasturas.

Cuadro 11. Discriminación de ^{13}C de las raíces. Costa Rica. 2017.

| Cobertura | Orden | $\delta^{13}\text{C}$ | Error Estándar |
|-----------|--------------|-----------------------|----------------|
| Pastura | Inceptisoles | -16,15a | 1,00 |
| Pastura | Ultisoles | -20,30b | 1,84 |
| Bosque | Inceptisoles | -30,18c | 1,19 |
| Bosque | Ultisoles | -29,59c | 1,30 |

Se observó una tendencia no significativa menos negativa de $\delta^{13}\text{C}$ en las raíces en las cinco profundidades en los suelos con pastura, indicando la posibilidad de deposición de carbono, producto de las raíces de pastos a mayor profundidad.

Variación de la discriminación de isótopo ^{15}N

Con respecto a $\delta^{15}\text{N}$ del suelo no se observaron diferencias para las variables en estudio, el promedio general fue $5,77 \pm 1,60 \delta^{15}\text{N}$, concordando con los valores reportados por Weintraub *et al.* (2016) para los suelos de zonas bajas de los bosques de Costa Rica. Partiendo del hecho de que este promedio es relativamente alto (Craine *et al.* 2015), es posible inferir que tanto los ecosistemas pastura y bosque en las zonas de vida tropicales están expuestos a un bajo ingreso de N al suelo, que de acuerdo Weintraub *et al.* (2016), se hace mayor en el bosque a medida que la precipitación y la temperatura se incrementa. Donde es posible que suceda en la misma medida con la pastura. No obstante lo anterior, se observaron diferencias ($p < 0,0001$) en cuanto a los contenidos de $\delta^{15}\text{N}$ de las raíces; para la pastura el valor promedio se situó en $4,10 \pm 1,25$

mientras en el bosque fue de $1,25 \pm 1,20$, indicando claramente una mayor utilización de ^{15}N por parte de las pasturas en relación al bosque, lo que sugiere que la necesidad de N en la pastura es mayor, posiblemente debido a que su ciclo corto (días) de utilización requiere de una extracción constante, mientras con el bosque los requerimientos son a un mayor plazo.

Considerando, que las pasturas de las fincas bajo estudio no recibieron aportes externos de nitrógeno que pudiera enriquecer los niveles de $\delta^{15}\text{N}$ en la forma que se observa, el reciclaje de N fue mayor en el ecosistema pastura donde posiblemente las excretas tuvieron un rol importante.

Aporte de la pastura al COS^{P} .

No se observaron diferencias para profundidad en relación con la COT^{P} ni del aporte de COS^{P} al COT^{P} . El orden de suelo mostró diferencias en COT^{P} ($p < 0,0001$) pero no en COS^{P} , para ambas variables se observaron diferencias entre fincas ($p < 0,0025$) con una alta variabilidad (Cuadro 12).

Cuadro 12. Cantidad de COT^{P} en una capa de 20 cm y el aporte porcentual del COS^{P} a esta. Costa Rica. 2017.

| Variable | Orden de suelo | COT^{P} (mg/ha) | COS^{P} (% de COT^{P}) |
|------------------------|----------------|---------------------------------|---|
| Sitio | | | |
| La Cruz | Inceptisol | 31,61 cd | 42,24 abcd |
| Hojancha | Inceptisol | 42,31 abc | 35,43 cd |
| Garabito | Ultisol | 33,60 bcd | 57,55 ab |
| San Mateo | Ultisol | 34,44 bcd | 52,83 abc |
| Golfito | Inceptisol | 22,76 c | 31,95 c |
| B. Aires | Ultisol | 54,06 a | 48,63 abcd |
| Upala | Ultisol | 40,52 abc | 47,44 abacd |
| San Carlos | Ultisol | 44,22 abc | 48,16 abcd |
| Turrialba | Ultisol | 30,66 cd | 59,64 a |
| Sarapiquí | Inceptisol | 50,33 ab | 36,29 cd |
| Pococí | Inceptisol | 46,71 abc | 39,88 bcd |
| Error Estándar | | 3,54 | 3,71 |
| Orden de suelos | | | |
| | Inceptisol | 45,35 a | 47,76 a |
| | Ultisol | 31,83 b | 43,54 a |
| Error Estándar | | 1,42 | 1,59 |

La densidad aparente fue la variable dependiente que se asoció más con los parámetros estudiados como: cobertura, orden de suelo y profundidad. Además correlacionó significativamente ($p < 0,0001$) el N, N_i e influyó en la relación C:N ($p < 0,0025$), tanto en el bosque como en la pastura. La correlación ($p < 0,0015$) entre el ¹⁵Ns y ¹⁵Nr en la cobertura de pastura sugiere una alta dependencia del nitrógeno de reciclaje en las pasturas en comparación con el bosque. El COS en ambas coberturas está influenciado ($p < 0,0015$) por la DA y este a su vez tiende a tener influencia en la relación C:N.

Los niveles de d¹³C semejantes del bosque en Ultisoles y la pastura sugieren la posibilidad de que fueron bosques secundarios por regeneración natural y que posiblemente décadas atrás tuvieron plantas tipo C4 durante el proceso de la expansión de la frontera agrícola. Así mismo, un d¹³C mayor en pasturas en Ultisoles pero no menos negativo que el bosque de ese mismo orden indica la posibilidad de una mayor cantidad de plantas pioneras propias de los procesos sucesionales a bosque, que en términos prácticos tradicionales sugieren un mayor costo de mantenimiento en términos de control de arvenses en pasturas en suelos de este orden,

donde podrían tener un alto potencial el establecimiento de sistemas silvopastoriles con arbustos y árboles autóctonos, propios de los procesos de sucesión de estas zonas de vida y este tipo de suelos.

En conclusión, para estudios de determinación de adicionalidad de COS en cobertura de pasturas, se recomienda realizar la corrección por DA del particulado $\leq 2,0$ mm con respecto a la condición de cobertura natural en este caso de bosque. Así mismo, la profundidad de muestreo de acuerdo con d¹³C para el suelo gestionado por la actividad de cría bovina estuvo mayormente en un rango de 0-20 cm de profundidad. El aporte de COS^p se considera bajo para realizar incrementos de productividad en fincas ubicadas en Ultisoles aunque se observó una tendencia a una mayor parte del COS^p al COT en estos suelos. El reciclaje de N es importante en las pasturas, no obstante, las cantidades podrían no ser lo suficientes para incrementos de productividad. Las pasturas tradicionales con una composición florística tipo herbácea y botánica tendiente a mantener una sola especie de pastura podría no ser tan productiva en suelos tipo Ultisol.

LITERATURA CITADA

Abarca, S. 2018. Capacidad de carga de la finca ganadera bovina. Revista Universidad Técnica Nacional. 20 (81). En prensa.

Alvarado, A; Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica (en línea). Consultado 22 ene. 2018. Agronomía Costarricense 29(1):85-94. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/436/43629109.pdf>

Arias, C. 2015. Gramíneas perennes C3 y C4 para la producción de bioenergía en ambiente Mediterráneo (en línea). Tesis Ph. D. Barcelona, España, Universidad de Barcelona. Consultado 22 ene. 2108. Disponible en http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/68632/1/CVA_TESIS.pdf

Carvajal, A.; Feijoo, A.; Quintero, H.; Rondon, M. 2009. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno en paisajes andinos colombianos. Revista de la Ciencia del Suelo Nutrición Vegetal 9(3):222-235.

Craine, J; Brookshire, E; Cramer, M; Hasselquist, J; Kaba, K; Marin-Spiotta, E; Wang, L. 2015. Ecological interpretations of nitrogen isotope ratios of terrestrial plants and soils. Plant and Soil 396(1-2):1-26.

Ehleringer, J; Sage, R; Flanagan, L; Pearcy, R. 1991. Climate change and the evolution of C4 photosynthesis. Trends in Ecology & Evolution 6(3):95-99.

- Farquhar, G. 1983. On the Nature of carbon isotope discrimination in C4 species. *Functional Plant Biology* 10(2):205–226.
- Fisher M; Rao, I; Ayarza, C; Lascano, C; Sanz, J; Thomas, R; Vera, R. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas (en línea). *Nature* 371:236-238. Consultado 22 ene. 2018. Disponible en <https://www.nature.com/articles/371236a0>
- Guo, L; Gifford, R. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. *Global Change Biology* 8(4):345-360.
- Hernández, M; Abarca, S; Soto, R. 2014. Evaluación de pasto *Brachiaria* híbrido cv Cayman, en pastoreo en el trópico muy húmedo de Costa Rica. *Revista Universidad Técnica Nacional* 16 (70):48-54.
- Holdridge, L. 1978. *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica, 216p.
- INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria; CORFOGA (Corporación de Fomento Ganadero). 2013. Informe 2013. Valoración servicios ecosistémicos en fincas ganaderas de cría. San José, Costa Rica. 21p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2015. Estrategia de ganadería baja en carbono en Costa Rica (en línea). San José, Costa Rica. 109 p. Consultado 22 ene 2018. Disponible en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00366.pdf>
- McSherry, E; Ritchie, M. 2013. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Global Change Biology* 19(5):1347-1357.
- Meinzer, FC. 1978. Observaciones sobre la distribución taxonómica y ecología de la fotosíntesis C4 en la vegetación del noreste de Centroamérica. *Revista de Biología Tropical* 26(2): 359-368.
- Ghannoum, O; Conroy J. 1998. Nitrogen deficiency precludes a growth response to CO2 enrichment in C3 and C4 *Panicum* grasses. *Australian Journal of Plant Physiology* 25(5):627- 636.
- Rodríguez Graña, L.; Szteren, D. 2013. Los isótopos y las cadenas alimentarias. *Ecología trófica en ambientes acuáticos*. *Uruguay Ciencia* 16:29-31.
- Valles de la Mora, B; Cadisch, G; Aluja Schunemann, A. 2003. Comparación de metodologías de isótopos para evaluar fijación de N atmosférico y su destino en suelos y plantas. *Agrociencia* 37(2):117-128.
- Veldkamp, E. 1994. Organic carbon turnover in three tropical soil under pasture after deforestation. *In: soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropic of Costa Rica*. Tesis Ph.D. Wageningen, Holanda, Wageningen University. 117 p.
- Von Fischer, J; Tieszen, L. 1995. Carbon isotope characterization of vegetation and soil organic matter in subtropical forest in Luquillo, Puerto Rico. *Biotrópica* 27(2):130-148.
- Weintraub, S; Cole, R; Schmitt, C; All, J. 2016. Climatic controls on the isotopic composition and availability of soil nitrogen across mountainous tropical forest. *Ecosphere* 7(8):1-13.