



Especialista en Área de Suelos (Fertilidad de suelos, Nutrición de plantas, Gases de Efecto Invernadero, Carbono del suelo), INTA (farguedasa@inta.go.cr)



Subdirector Ejecutivo, INTA (sabarcam@inta.go.cr)

Evaluación de las concentraciones de nutrientes determinadas en muestras de suelo de áreas boscosas, cultivos anuales, perennes y pasturas

Francisco José Arguedas-Acuña
Sergio Abarca Monge

De acuerdo con [FAO \(2021\)](#), el suelo constituye el más grande almacén de carbono (C) de los ecosistemas terrestres; almacena cerca de 277 millones de toneladas en los primeros 30 cm de profundidad. El estimado en carbono orgánico (COS) e inorgánico en el primer metro puede llegar a más de 2.2 billones de toneladas. El potencial de pasar C (ocioso y que aumenta la temperatura del planeta) de la atmósfera al suelo (secuestro), en las áreas agropecuarias con especies y composiciones botánicas semejantes a las del trópico americano, podría estar entre 0.48 a 1.93 millones de toneladas por año, de acuerdo con [Lal \(2018\)](#). Se ha reconocido el potencial de captura de este elemento del medio edáfico con cubiertas vegetales de cultivos y pasturas, así como su aporte a la mitigación del cambio climático ([FAO 2017](#)).

Las coberturas vegetales y el manejo del suelo son parte importante en el COS y sus cambios; controlan la cantidad y calidad de los compuestos orgánicos que aportan a los suelos y determinan la sensibilidad de la temperatura para la descomposición de la materia orgánica ([Dawson &](#)

Smith, 2007). Casi todas las coberturas naturales aportan ganancias de COS al suelo; mientras que las variaciones en el manejo de la agricultura, generan pérdidas de COS (Xiong et al., 2014).

El suelo, como sistema dinámico, es un medio donde se producen interacciones variadas entre la microbiota y los nutrientes. Por lo anterior, el carbono orgánico (COS) y el nitrógeno total (N total) son factores clave dentro del suelo, para el desarrollo y productividad de las plantas (Xue & An, 2018; Arguedas et al., 2021). La interacción con otros nutrientes, forma un entorno propicio para su crecimiento cuando sus concentraciones se encuentran con valores óptimos. Asimismo, al estar presentes influyen sobre la salud del suelo, mejorando las propiedades químicas, físicas y biológicas del mismo (Purwanto & Alam, 2020).

La relación C/N representa la calidad del sustrato orgánico del suelo y la tasa de N disponible para las plantas. Altos valores indican una descomposición lenta de la MO, ya que los microorganismos inmovilizan el N, mientras que valores entre 10 y 14 indican una rápida descomposición y aprovechamiento de la MO (Gamarra et al. 2018).

El conocimiento sobre la distribución y gestión de los nutrientes, permite conservar y recuperar su contenido en el suelo, lo que constituye un paso importante para mitigar el cambio climático (Purwanto & Alam, 2020). En el crecimiento de las plantas, es importante que las relaciones entre los nutrientes estén

en equilibrio. Este proceso se ve afectado cuando algunos nutrientes están en exceso o cuando se forman precipitados o complejos entre varios nutrientes, que impiden su absorción por parte de la planta (Fageria, 2006).

Por otro lado, la distribución espacial de los nutrientes puede reflejar el estado actual de los suelos de cultivos y pasturas, los cuales se caracterizan por extraer grandes cantidades de nutrientes para satisfacer sus requerimientos nutricionales. El conocimiento de la distribución del COS y el N total, es un instrumento muy útil para la toma de decisiones en el manejo del pastoreo en producciones ganaderas (gestión de la carga animal, aporte de excretas, etc) y de las formas de fertilización de los cultivos (Vendramini et al. 2014).

Por lo tanto, el objetivo de esta publicación es interpretar las concentraciones de los nutrientes y otras variables evaluadas en el proyecto de investigación sobre el contenido de carbono orgánico (COS) en sitios con cultivos anuales, perennes, pasturas y áreas boscosas de referencia; en Costa Rica.

A nivel metodológico, primero se establecieron 47 puntos de muestreo en cultivos de café, aguacate, cacao, palma aceitera, caña de azúcar, pasturas, pitahaya, hortalizas y cobertura boscosa alejadas o cercanas, en sitios agropecuarios de Costa Rica. La búsqueda se realizó en zonas con productores de cultivos previamente seleccionados. Para las pasturas y

sus coberturas boscosas adyacentes, los puntos fueron establecidos en fincas representativas de la producción de leche y carne (Abarca et al., 2018). En los terrenos con cultivos, se ubicaron puntos fisiográficamente representativos, tanto de cultivo como de cobertura boscosa. Para establecer la representatividad de cada punto, se consideraron dos características físicas: el relieve y el tipo de suelo. Se asumió que, al interactuar con el clima local, estos factores generan nichos ambientales distintivos que determinan la distribución, composición, estructura y fisonomía de la vegetación observada en el paisaje.



Proceso de preparación y muestreo del suelo en una plantación de abacá.

En cada punto seleccionado, se estableció una mini-calicata de aproximadamente $60 \times 60 \times 70$ cm para la toma de muestras de suelo a dos profundidades (0-30 y 30-60 cm). Se determinaron las siguientes variables: carbono orgánico del suelo (COS %), nitrógeno total (Nt %), densidad aparente (D_a , g.cm^{-3}),

relación C/N, pH, acidez intercambiable ($\text{cmol}^+ \cdot \text{L}^{-1}$), porcentaje de saturación de la acidez (S.A. %), capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE; en $\text{cmol}^+ \cdot \text{L}^{-1}$), cationes intercambiables (Ca, Mg, K; en $\text{cmol}^+ \cdot \text{L}^{-1}$), fósforo (P; en mg.L^{-1}) y micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn; en mg.L^{-1}).



Tomando muestra para estimar carbono orgánico en el suelo con barreno a 0-30 cm de profundidad.

Las determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Suelos del INTA. Para el caso del COS y el N total, se utilizó el método de combustión seca a alta temperatura, con un equipo LECO. Para la densidad aparente se usó el método del cilindro metálico (cilindro de 5 cm de largo y 5 cm de diámetro), el cual se insertó

cada 10 cm de profundidad y se promediaron las tres lecturas de cada profundidad (0-30 y 30-60 cm). En el caso de la concentración de nutrientes, se utilizó la extracción con la solución Olsen Modificada (a pH=7) y KCL; la determinación fue por espectrometría de emisión.



Proceso de secado de muestras en horno con sistema de aire caliente.

Como segundo paso, para el análisis estadístico, se realizó un agrupamiento las coberturas individuales en conjuntos funcionales según su tipo de vegetación y manejo (**Cuadro 1**). Esta agrupación permitió comparar el comportamiento de sistemas productivos frente al bosque de referencia.

Luego, los datos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias significativas entre coberturas y profundidades. Cuando se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$), se realizaron comparaciones entre medias con la prueba de Tukey. Adicionalmente, se realizó un análisis bayesiano (ANCOVA) para el COS % utilizando el paquete JASP, considerando la cobertura y la altitud como covariables, con el bosque como categoría de referencia. Se calcularon factores de Bayes (BF_{10}) para evaluar la evidencia a favor de diferencias entre coberturas. Finalmente, se realizaron correlaciones de Pearson (r) entre el COS y las demás variables edáficas, a nivel global y por cada conjunto de cobertura.

Entre los resultados, en el **Cuadro 2** se muestran los promedios del % COS, % Nt, Dap y de la relación C/N; para las agrupaciones indicadas anteriormente (**Cuadro 1**). Los cultivos lignocelulósicos superaron al bosque en % COS y Nt, mientras que las palmáceas mostraron los valores más bajos, indicando pérdida de carbono y nitrógeno. La densidad aparente tuvo los valores mayores en caña de azúcar y palma, sugiriendo que dichos suelos sufren algún nivel de compactación. La relación C/N tuvo valores adecuados (10-13) en todas las coberturas, excepto en palma aceitera; que presentó los valores más bajos (10.5), aunque aún dentro del rango aceptable, posiblemente por existir un menor nivel de reposición de la materia orgánica, en ese sistema agrícola.

Cuadro 1. Conjuntos de cobertura y cultivos asociados utilizados en el análisis, de los suelos de los sitios muestreados.

Conjunto de coberturas	Cultivos / sistemas incluidos	n	Descripción funcional
		196	
Bosque	Regeneración natural	96	Cobertura de referencia sin intervención antrópica reciente
Lignoceluloso	Aguacate, Café, Cacao, Café con Aguacate	26	Cultivos perennes leñosos, con alta biomasa aérea y radicular, aporte continuo de residuos leñosos y hojarasca
Pasturas	Pasto (Urocloas, Kikuyo, Estrella, Panicum, Nativizado)	54	Sistemas ganaderos con pastos perennes, pastoreo y reciclaje de nutrientes vía excretas
Herbácea perenne	Mora, Pitahaya	8	Cultivos frutales no leñosos, con manejo semi-intensivo y ciclos de poda
Caña de Azúcar	Caña de Azúcar	4	Cultivo semi-perenne, con ciclos de corte y quema ocasional o renovación de plantilla
Palmácea	Palma Aceitera	8	Cultivo perenne de gran escala, con extracción intensiva de nutrientes y remoción de biomasa

Cuadro 2. Medias y desviaciones típicas del % COS, % de Nt, de la densidad aparente (Da) y de la relación C/N encontrados en los suelos muestreados, por conjunto de cobertura presente (a 0-30 cm de profundidad).

Conjunto de cobertura	COS	Nt	Dap	C/N
		%	(g.cm ⁻³)	
Bosque	3.25 (2.00)	0.31 (0.20)	0.84 (0.20)	12.8 (4.5)
Lignoceluloso	5.06 (2.77)	0.51 (0.28)	0.79 (0.15)	11.9 (2.9)
Pasturas	2.78 (1.56)	0.28 (0.16)	0.90 (0.16)	11.6 (3.8)
Herbácea perenne	3.42 (1.41)	0.34 (0.14)	0.89 (0.16)	11.4 (3.2)
Caña de Azúcar	3.65 (1.54)	0.32 (0.15)	0.99 (0.11)	11.9 (2.1)
Palmácea	1.40 (0.77)	0.16 (0.09)	0.99 (0.14)	10.5 (3.5)

Al analizar las tres variables que influyen en el comportamiento de la acidez de los suelos (Cuadro 3), se observó que los valores del pH estuvieron similares entre coberturas analizadas (entre 5.4 y 5.9) y la mayoría dentro del rango óptimo (excepto los valores menores a 5.5). El porcentaje de saturación de la acidez mostró valores altos (mayores al 20 %) en el

bosque (27.4 %), lignocelulósico (24.2 %) y palmácea (27.6 %), lo que indica una alta presencia de aluminio intercambiable y condiciones de acidez que podrían limitar el crecimiento de cultivos sensibles. En contraste, las pasturas (17.5 %), herbáceas perennes (19.6 %) y caña de azúcar (13.0 %) presentaron valores dentro del rango adecuado para Costa Rica (10-20

%), lo que sugiere mejores condiciones de fertilidad o un efecto positivo del manejo (encalado, fertilización, reciclaje de nutrientes) en estas coberturas. La alta desviación estándar en el bosque (27.0) indica una gran variabilidad espacial, con sitios de bosque que pueden tener tanto valores bajos como muy altos de saturación de acidez. Esto es esperable, ya que esta cobertura no recibe manejo y por lo tanto, no está expuesta a variaciones por efecto de la aplicación de fertilizantes, lixiviación fuerte en suelos laboreados o la absorción intensiva de nutrientes. La presencia de algunos valores altos (mayores a 20 %) principalmente en cultivos perennes y anuales, indica la falta de aplicación de enmiendas correctivas de la acidez del suelo. Considerando todas las muestras analizadas, aproximadamente el 64 % de las coberturas (pasturas, caña de azúcar y palmáceas) presentaron valores de capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) por debajo del

nivel adecuado ($< 8 \text{ cmol}^+ \cdot \text{L}^{-1}$), mientras que el 36 % restante (bosque, lignocelulósicos y herbáceas perennes) mostraron valores adecuados. En concreto, el bosque (8.2), los cultivos lignocelulósicos (9.5) y las herbáceas perennes (8.1) registraron una CICE adecuada ($\geq 8 \text{ cmol}^+ \cdot \text{L}^{-1}$). En contraste, las pasturas (7.8), la caña de azúcar (7.2) y las palmáceas (6.5) presentaron valores bajos ($< 8 \text{ cmol}^+ \cdot \text{L}^{-1}$). Una CICE baja indica una menor capacidad del suelo para retener e intercambiar cationes esenciales (Ca, Mg, K), lo que puede limitar la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Por lo tanto, en estas coberturas se recomienda implementar estrategias de manejo orientadas a mejorar la fertilidad del suelo, tales como el encalado para reducir la acidez y aumentar la disponibilidad de bases, y el incremento de la materia orgánica mediante la incorporación de residuos, abonos verdes o compost, lo que contribuye a elevar la CICE a mediano plazo.

Cuadro 3. Medias y desviaciones típicas del pH, el % de saturación de la acidez y la CICE encontrados en los suelos muestreados; por conjunto de cobertura analizado (a 0-30 cm de profundidad).

Conjunto de coberturas	pH	Sat. Acidez	CICE
		%	$\text{cmol}^+ \cdot \text{L}^{-1}$
Bosque	5.7 (0.8)	27.4 (27.0)	8.2 (5.1)
Lignoceluloso	5.4 (0.5)	24.2 (22.2)	9.5 (4.8)
Pasturas	5.9 (0.6)	17.5 (21.0)	7.8 (4.2)
Herbácea perenne	5.9 (0.6)	19.6 (18.5)	8.1 (3.9)
Caña de Azúcar	5.7 (0.4)	13.0 (7.4)	7.2 (2.8)
Palmácea	5.4 (0.7)	27.6 (24.9)	6.5 (3.1)

Los contenidos encontrados de las bases intercambiables (Ca, Mg y K) y fósforo (P), se presentan en el cuadro 4. El calcio y el magnesio, considerados muy importantes para mantener un nivel de fertilidad adecuado en los suelos, presentaron una altísima variabilidad dentro de cada cobertura (coeficientes de variación > 100 % en muchos casos); lo que impidió detectar diferencias claras. Sin embargo, se observó una tendencia general a presentar valores bajos y/o adecuados; pero esto fue más acentuado en caña de azúcar y palmáceas, posiblemente por la fuerte extracción de esos nutrientes por los cultivos y un menor reciclaje de los residuos que se dejan en el suelo (sistemas lignocelulósicos y las pasturas mantienen valores similares o ligeramente superiores al bosque). La altísima variabilidad del Ca y del Mg, impidió detectar diferencias estadísticamente claras entre los usos del suelo y el bosque de referencia. Sin embargo, se observó una tendencia a menores valores de Ca y Mg en caña de azúcar (0.56 y 0.39 $\text{cmol}^+ \cdot \text{L}^{-1}$, respectivamente) y en palmáceas (0.39 y 0.44 $\text{cmol}^+ \cdot \text{L}^{-1}$).

Caso contrario se presenta para el potasio (K), el cual mostró una alta variabilidad dentro de cada cobertura ($\text{CV} > 80\%$); sin diferencias significativas entre los conjuntos de cobertura y el bosque (0.42 $\text{cmol}^+ \cdot \text{L}^{-1}$). Los valores medios oscilaron entre 0.28 y 0.52 $\text{cmol}^+ \cdot \text{L}^{-1}$, con una tendencia no significativa a valores más altos en lignocelulósicos (0,52) y pasturas (0,48); y más bajos para caña de azúcar (0.28) y palmáceas (0.31). A pesar de presentar una altísima variabilidad dentro de cada cobertura, los niveles del elemento estuvieron en rango adecuado o normal para los cultivos perennes y anuales; no así para las coberturas boscosas (referencia). Esto se explica por el manejo de la fertilización que se lleva a cabo en esas coberturas y que no sucede en la cobertura boscosa (no hay manejo). Es normal el uso de fórmulas altas en K y la baja aplicación de enmiendas calcáreas (Ca y Mg). La correlación con el COS fue débil y no significativa ($r = 0.15$; $p > 0.05$), lo que indica que, a diferencia del nitrógeno, el K no está acoplado directamente al contenido de materia orgánica del suelo en los sistemas evaluados.

Cuadro 4. Medias y desviaciones típicas de las bases intercambiables Ca, Mg, K y del fósforo (P) encontrados en los suelos muestreados; por conjunto de cobertura (a 0-30 cm de profundidad).

Conjunto de coberturas	Ca	Mg	K	P
		$\text{cmol}^+ \cdot \text{L}^{-1}$		$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
Bosque	1.54 (2.61)	1.02 (1.52)	0.42 (0.38)	16.2 (24.2)
Lignoceluloso	1.86 (2.54)	1.26 (1.88)	0.52 (0.41)	20.5 (24.4)
Pastura	1.97 (3.48)	1.20 (1.94)	0.48 (0.35)	12.9 (24.0)
Herbácea perenne	0.98 (0.71)	0.84 (0.95)	0.38 (0.29)	12.8 (15.5)
Caña de Azúcar	0.56 (0.49)	0.39 (0.30)	0.28 (0.21)	7.6 (6.0)
Palmáceas	0.39 (0.32)	0.44 (0.35)	0.31 (0.25)	7.6 (6.1)

El fósforo (P), también tuvo valores muy variables ($CV > 100\%$ en varias coberturas), con valores medios entre 7.3 mg.L^{-1} (caña de azúcar) y 20.5 mg.L^{-1} (lignocelulósico), sin diferencias estadísticamente significativas. Se presentaron mayormente valores bajos y/o adecuados; la cobertura lignocelulósica tendió a valores ligeramente más altos y valores más bajos para caña y palma aceitera (cuadro

4). Asimismo, el bosque presentó un valor intermedio de 16.2 mg.L^{-1} . La heterogeneidad de los valores, impide atribuir las diferencias observadas al efecto de la cobertura, sugiriendo que factores como la fertilización fosfatada previa, la fijación de P en suelos ácidos o la historia de manejo; son más determinantes que el tipo de vegetación.

Cuadro 5. Medias y desviaciones típicas de micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn), encontrados en los suelos muestreados; por conjunto de cobertura (a 0-30 cm de profundidad).

Conjunto de cobertura	Fe	Cu	Zn	Mn
	mg.L ⁻¹			
Bosque	98.4 (112.5)	5.2 (6.1)	8.1 (9.4)	68.3 (95.2)
Lignoceluloso	112.5 (98.3)	7.8 (8.2)	14.5 (12.1)	85.4 (112.3)
Pastura	87.3 (105.4)	4.9 (5.3)	7.2 (8.5)	72.1 (98.4)
Herbácea perenne	95.2 (87.6)	6.1 (4.9)	9.8 (7.2)	79.3 (85.6)
Caña de Azúcar	76.5 (68.3)	3.8 (2.1)	5.2 (3.8)	45.6 (38.9)
Palmácea	68.2 (52.4)	4.2 (3.5)	4.8 (3.2)	52.3 (47.8)

Los micronutrientes (**Cuadro 5**) presentaron una alta variabilidad (coeficientes de variación $> 80\%$ en la mayoría de los casos), lo que refleja la heterogeneidad espacial de estos elementos en los suelos estudiados. El Zn mostró una tendencia a ser más alto en lignocelulósicos (14.5 mg.L^{-1}) y más bajo en palmáceas (4.8 mg.L^{-1}) y caña de azúcar (5.2 mg.L^{-1}), lo que coincide con la correlación positiva con el COS en estos sistemas. El Fe y Mn presentaron valores muy variables, sin patrones claros asociados a la cobertura, aunque tienden a ser más altos en lignocelulósicos y más bajos en

caña y palma. El Cu se mantuvo en rangos adecuados en todas las coberturas ($3.8\text{-}7.8 \text{ mg.L}^{-1}$), con valores ligeramente superiores en lignocelulósicos.

De acuerdo con los resultados de este estudio, se confirma que el tipo de cobertura vegetal influye de manera significativa sobre la salud del suelo, medida a través del carbono orgánico (COS), nitrógeno total (Nt), densidad aparente (Dap) y la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE). El bosque, como ecosistema de referencia, mostró valores adecuados en

la mayoría de las variables, lo que valida su rol como modelo de equilibrio edáfico.

Los cultivos lignocelulósicos (café, aguacate, cacao) superaron al bosque en COS y Nt, y mantuvieron una CICE adecuada, lo que demuestra que un manejo con alta incorporación de biomasa y mínima perturbación del suelo puede incluso mejorar la fertilidad con respecto al bosque. En contraste, las palmáceas (palma aceitera) presentaron los peores indicadores: menor COS y Nt, mayor Dap y CICE baja. Esto sugiere que la extracción intensiva de nutrientes y la remoción de biomasa, sin una reposición adecuada, degradan la calidad del suelo.

Las pasturas, caña de azúcar y herbáceas perennes mostraron un comportamiento intermedio. Aunque sus valores de COS y Nt fueron similares al bosque, la CICE baja en pasturas y caña de azúcar indica necesidad de manejo (encalado, aporte de materia orgánica) para mejorar la retención de cationes. Las herbáceas perennes lograron igualar al bosque en CICE, posiblemente por el reciclaje de nutrientes vía podas y residuos.

En conjunto, estos hallazgos demuestran que no todo uso agrícola degrada el suelo. Sistemas bien manejados, con aporte continuo de materia orgánica y mínima perturbación, pueden mantener o incluso mejorar propiedades clave como el COS y la CICE. Sin embargo, la alta variabilidad dentro de cada cobertura y el tamaño desigual de las muestras advierten que estos resultados son preliminares. Se requieren estudios con mayor

número de repeticiones y diseños pareados para separar el efecto del manejo de la variabilidad natural del suelo.

Del estudio podemos concluir que los cultivos lignocelulósicos (café, aguacate, cacao) fueron los sistemas productivos que más carbono y nitrógeno almacenan en el suelo, superando incluso al bosque de referencia. Con un promedio de 5.06 % de COS y 0.51 % de Nt, estos sistemas demostraron que una cobertura perenne leñosa, con aporte continuo de biomasa y mínima perturbación del suelo, puede actuar como un sumidero neto de carbono orgánico y mejorar el aporte de nitrógeno al suelo. Este hallazgo desafía el mito de que todo uso agrícola en los trópicos reduce el COS frente al bosque.

Adicionalmente, la palma aceitera (palmácea) fue la cobertura con el peor desempeño en salud del suelo: menor COS (1.40 %), menor Nt (0.16 %) y mayor densidad aparente (0.99 g.cm^{-3}). Estos indicadores reflejan pérdida de materia orgánica, degradación de la estructura del suelo y posible compactación por el manejo intensivo y la extracción de biomasa. La evidencia bayesiana muestra que sus diferencias con el bosque son estadísticamente muy sólidas ($\text{BF} > 30$), lo que sugiere que este sistema productivo, bajo las condiciones evaluadas, compromete la calidad del suelo a mediano plazo.

Finalmente, el nitrógeno total es un predictor excelente del carbono orgánico del suelo ($r = 0.92$), independientemente de la cobertura, pero la fuerza de esta

relación varía con el manejo. Mientras que los lignocelulósicos y pasturas, el acoplamiento C/N es muy fuerte ($r > 0.85$), en palmáceas y caña de azúcar la correlación se debilita ($r < 0.42$); lo que sugiere que prácticas como la fertilización nitrogenada desbalanceada o la quema/remoción de residuos orgánicos pueden romper el equilibrio natural entre ambos elementos. Esta relación C/N debe ser monitoreada como un indicador temprano de degradación o recuperación del suelo.

Nótese que estos resultados son de carácter preliminar y deben interpretarse como una guía para generar hipótesis, no como verdades definitivas. El número de muestras por cobertura es desigual (desde $n = 4$ en caña de azúcar hasta $n = 96$ en bosque), y la alta variabilidad dentro de cada categoría (coeficientes de variación a menudo $> 50\%$) indica que factores locales no controlados (tipo de suelo, clima, historia de manejo, fertilización) pueden estar influyendo fuertemente. Se recomienda por tanto, ampliar el muestreo, especialmente en caña de azúcar, herbáceas perennes y palmáceas, para alcanzar un tamaño muestral que permita conclusiones más robustas y generalizables a nivel nacional.

También se recomienda establecer una red de monitoreo a largo plazo (5 años) en cada conjunto de cobertura, con parcelas pareadas cultivo-bosque, para separar el efecto del uso del suelo, con respecto al efecto de la variabilidad edáfica natural. Solo con un experimento que controle la

heterogeneidad espacial y temporal será posible determinar si las diferencias observadas en COS, Nt, densidad aparente, relación C/N y nutrientes; son atribuibles al manejo agrícola o a condiciones preexistentes del sitio. Hasta entonces, estos datos deben usarse como referencia exploratoria para priorizar sistemas productivos con potencial de captura de carbono y guiar futuras investigaciones.

Referencias

- Abarca-Monge, S; Arguedas-Acuña, F; Soto-Blanco R. (2018). Carbono Orgánico del Suelo y Variación del Nitrógeno en Fincas Ganaderas de Cría. *Avances Tecnológicos* 12(2):05-13. http://revista.inta.go.cr/index.php/alcances_tecnologicos/article/view/86/70
- Arguedas Acuña, F., Hernández Chaves, M., Abarca Monge, S. & Soto Blanco, R. (2021). Adicionalidad de carbono orgánico de suelo en pasto Cayman® bajo pastoreo racional Voisin. *Alcances Tecnológicos*, 14(1), 5-12. http://revista.inta.go.cr/index.php/alcances_tecnologicos/article/view/196/209
- Dawson, J. & Smith, P. (2007). Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. *Science of The Total Environment*, 382 (2-3), 165-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.03.023>
- Fageria, V.D. (2006). Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 24, 1269-1290. <http://dx.doi.org/10.1081/PLN-100106981>.
- FAO [Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura]. (2017). Carbono orgánico del suelo - el potencial oculto. Rome, Italia. 90 p. <https://openknowledge.fao.org/items/a9a2084a-394a-4aa3-b9b1-bc22295bf788>

- FAO [Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura]. (2021). Soil organic carbon and nitrogen: Reviewing the challenges for climate change mitigation and adaptation in agri-food systems. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb3965en>
- Gamarra, C.; Díaz, M.; Vera de Ortíz, M.; Galeano, M. & Cabrera, A. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9, 4-26. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/134>
- Lal, Rattan. (2018). Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology* (24) 3285-3301. https://www.researchgate.net/publication/322562367_Digging_Deeper_A_Holistic_Perspective_of_Factors_Affecting_Soil_Organic_Carbon_Sequestration_in_Agroecosystems
- Ortega-Monsalve, M.; Medina-Sierra, M. & Cerón-Muñoz, M. (2025). Relación del carbono orgánico y el nitrógeno total con otras variables del suelo en ganaderías del departamento de Antioquia, Colombia. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, 28 (2). <http://dx.doi.org/10.31910/rudca.v28.n2.2025.2553>
- Purwanto, B & Alam, S. (2020). Impact of intensive agricultural management on carbon and nitrogen dynamics in the humid tropics. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66, 50-59. <http://dx.doi.org/10.1080/00380768.2019.1705182>.
- Vendramini, J.M.; Dubeux, J.R. & Silveira, M.L. (2014). Nutrient Cycling in tropical pasture ecosystems. *Revista Brasileira de Ciencias Agrárias*, 9, 308-315. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v9i2a3730>
- Xiong, X.; Grunwald, S.; Myers, D.; Ross, C.; Harris, W. & Comerford, N. (2014). Interaction effects of climate and land use / land cover change on soil organic carbon sequestration. *Science of The Total Environment*, 493, 974-982. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.088>
- Xue, X & An, S. (2018). Changes in soil organic carbon and total nitrogen at a small watershed scale as the result of land use conversion on the loess plateau. *Sustainability*, 10, 4757-4757. <http://dx.doi.org/10.3390/su10124757>