

METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL SECUESTRO DE CARBONO EN EL SUELO Y EN ESPECIES ARBÓREAS FRUTÍCOLAS

Dra. Erika Nava Reyna

M.C. Vicenta Constante García

Dr. Jesús Arcadio Muñoz Villalobos

Dr. José Luis González Barrios



SADER

SECRETARÍA DE AGRICULTURA
Y DESARROLLO RURAL

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

CENID-RASPA

Gómez Palacio, Durango, Julio 2019

Publicación Especial Núm. 4

ISBN: 978-607-37-1142-5

DIRECTORIO INSTITUCIONAL

SECRETARIA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL

Dr. Víctor Manuel Villalobos Arámbula
Secretario

Dr. Miguel García Winder
Subsecretario de Agricultura

Ing. Víctor Suárez Carrera
Subsecretario de Autosuficiencia Alimentaria

Dr. Salvador Fernández Rivera
Coordinador General de Desarrollo Rural

**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
FORESTALES, AGRÍCOLAS Y
PECUARIAS**

Dr. José Fernando De La Torre Sánchez
Director General

Dr. José Antonio Cueto Wong
Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

M.C. Jorge Fajardo Guel
Coordinador de Planeación y Desarrollo

Lic. Humberto Corona Mercado
Coordinador de Administración y Sistemas

**CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA EN
RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA**

Dr. Juan Estrada Ávalos
Director del CENID RASPA

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y
Pecuarias

Progreso No. 5, Barrio de Santa Catarina
Delegación Coyoacán
C.P. 04010 México, D. F.
Teléfono (55) 3871 - 8700

ISBN:

Primera edición 2019

No está permitida la reproducción total o parcial de esta publicación, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de la institución.

CONTENIDO

1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1 Clasificación de los reservorios de carbono	3
2.- DETERMINACIÓN DE LA BIOMASA VIVA Y CARBONO EN EL ESTRATO ARBÓREO	4
2.2 Tipo de muestreo y tamaño de muestra	6
2.3 Intensidad de muestreo.....	8
2.4 Medición de las variables dasométricas	10
2.4.1 Diámetro del árbol y área basal.....	10
2.4.2 Altura total del árbol.....	11
2.5 Modelos alométricos para la biomasa arbórea	12
2.5.1 Determinación de biomasa aérea.....	12
2.5.2 Determinación de la biomasa subterránea.....	13
2.6 Cuantificación del carbono de la biomasa arbórea.....	14
2.6.1 Análisis de contenido de carbono en planta.....	14
2.6.2 Secuestro de carbono por hectárea	15
3.- DETERMINACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA	17
3.1 Medición de la hojarasca	17
3.2 Madera muerta	19
3.2.1 Árboles muertos en pie y tocones	19
3.2.2 Material leñoso caído.....	20
3.3 Determinación del carbono en la materia orgánica	21
4. DETERMINACIÓN DEL CARBONO EN EL SUELO	21
4.1 Muestreo del suelo	21
4.2. Medición de la densidad aparente del suelo	24
4.3 Carbono inorgánico del suelo	24
4.4 Medición del carbono orgánico del suelo	26
4.5 Análisis de carbono en el analizador elemental	27
4.6 Análisis de carbono por el método de Walkley y Black ...	28
4.7 Otros métodos para el análisis de carbono	30
4.8 Cálculo de la cantidad de COS.....	32
5.- RECOMENDACIONES.....	33
6.- AGRADECIMIENTOS	34
7.- LITERATURA CITADA	35

METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL SECUESTRO DE CARBONO EN EL SUELO Y EN ESPECIES ARBÓREAS FRUTÍCOLAS

Dra. Erika Nava Reyna
M.C. Vicenta Constante García
Dr. Jesús Arcadio Muñoz Villalobos
Dr. José Luis González Barrios

1.- INTRODUCCIÓN

El consumo de energía se ha incrementado notablemente a partir de mediados del siglo XX, con la revolución industrial, basándose principalmente en el uso de combustibles fósiles, provocado un incremento en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI, por sus siglas en inglés). Así, el índice anual de gases de efecto invernadero (AGGI, por sus abreviaturas en inglés) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus abreviaturas en inglés) muestra que en el periodo comprendido entre 1990 y 2018 se ha aumentado la influencia del calentamiento en un 43%, en donde el dióxido de carbono (CO₂) es el mayor contribuyente en términos de cantidad y tasa de aumento (Butler y Montzka, 2019).

Este fenómeno ha causado cambios climáticos que incluyen tormentas, sequías e inundaciones cada vez más intensas, derretimiento de los polos con el subsecuente incremento del nivel del mar, deterioro de la salud humana, extinción de especies entre otros (Doney *et al.*, 2009).

Ante esto, el protocolo de Kyoto surge con el objetivo de reducir 5.2 % las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo (Rodríguez, 2007). Posteriormente surge el acuerdo de París en el año 2015, impulsado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU, por sus abreviaturas en inglés) con el mismo fin de reducir las emisiones (Cantú, 2016).

Bajo esta visualización se trabaja en gran medida sobre el CO₂, considerado un gas de larga duración en la atmósfera (WMO, 2016) cuyo principal reservorio de carbono orgánico

resulta estar entre 1 y 2 metros de profundidad del suelo, con una cifra que oscila entre 1500 a 2000 gigatoneladas (Gt), en tanto que el carbono inorgánico representa aproximadamente 1700 Gt. La vegetación por su parte presenta una reserva de 600 Gt y la atmósfera 830 Gt (Loveland y Belward, 1997; Feller *et al.*, 2016) dejando en claro que tanto la vegetación como los suelos constituyen las áreas de acción a trabajar, sin dejar de mencionar la potencialidad de suelo, al ostentar el mayor reservorio de carbono.

La transferencia del carbono (C) al suelo se lleva a cabo principalmente por la deposición en lechos y por vía de la rizodeposición, es decir, el movimiento de la materia orgánica o moléculas desde las raíces hacia el suelo que incluye el desprendimiento de la cubierta de la raíz y las células corticales, el reemplazo periódico de raíces finas y la exudación de azúcares simples, ácidos orgánicos, aminoácidos, polisacáridos y proteínas (Venturi y Keel, 2016; Sasse *et al.*, 2018), en donde los endosimbiontes de plantas, como los rizobios, los hongos micorrízicos arbusculares y bacterias de la rizósfera son los consumidores más importantes de los compuestos de carbono derivados de los sistemas suelo-planta (Blankinship *et al.*, 2011).

En cuanto a la captura del CO₂ secuestrado por las plantas, éste resulta de la diferencia entre el CO₂ atmosférico absorbido durante el proceso de la fotosíntesis y el emitido por la atmósfera durante la respiración, se expresa en términos de biomasa que oscila entre un 45 y 50 % del peso seco de la planta (Cielsa, 1996). Por lo tanto, mientras el crecimiento de cultivos o especies arbóreas sea alto, representa un sumidero de carbono efectivo, cuyo potencial de fijación puede aumentar dependiendo del sistema de manejo a implementar, convirtiendo al sector agrícola en un medio eficaz de captura de CO₂ (Lal *et al.*, 1997).

La mayoría de las investigaciones respecto al secuestro de carbono se han realizado en áreas naturales forestales, sin embargo, el futuro de este reservorio es incierto, a consecuencia justamente del aumento en la frontera agrícola, incendios y deforestación, entre otros (Magaña, 2004). Por otra parte, existen trabajos al respecto que demuestran el gran potencial para la captura de carbono en sistemas agrícolas-

frutícolas (Carvajal *et al.*, 2009; Segura *et al.*, 2006; Betancourt *et al.*, 2014).

Tomando en consideración lo anterior, y partir de los acuerdos internacionales (Protocolo de Kyoto y de París) se inicia con el mercado del carbono, el cual exige metodologías y procedimientos para comprobar la captura y almacenamiento del mismo, incluyendo acciones en proyectos a pequeña escala que involucraran las áreas agrícolas-frutícolas (Seeberg, 2010).

Ante esto, el presente documento tiene la finalidad de recopilar los principales métodos para evaluar los contenidos de carbono en el suelo y en especies arbóreas frutícolas, en apoyo a los acuerdos internacionales que buscan implementar metodologías que comprueben la potencialidad de captura de carbono en áreas de diferente uso, como el sector agrícola.

1.1 Clasificación de los reservorios de carbono

De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) a nivel internacional se reconocen y admiten seis categorías generales de uso de la tierra, que forman la base de la estimación en la emisión y absorción de los GEI, dentro de éstas se encuentran las tierras de cultivo, que se refiere a la superficie que es cultivada como los arrozales y los sistemas de agrosilvicultura. La estimación de los cambios en los almacenamientos de C y los valores de emisión/absorción en estas seis categorías toman en cuenta a tres principales depósitos de carbono (IPCC, 2006): a) la biomasa viva, b) la materia orgánica y c) el suelo (Figura 1). Esta clasificación es importante definirla al inicio de cualquier proyecto que se pretenda realizar.

- a) Biomasa viva: Es toda la biomasa que se encuentra sobre el suelo, incluyendo los tallos, tocones, ramas, corteza, semillas y follaje. También incluye la biomasa viva subterránea de raíces finas.
- b) Materia orgánica: Comprende la madera y raíces muertas, incluyendo tocones de 10 cm o más grandes, así como la hojarasca que se compone de las hojas desprendidas del estrato arbóreo. También incluye al

mantillo, el cual representa toda la biomasa no viva, en diferentes estados de descomposición, sobre o dentro del suelo con diámetro mínimo de un cm.

- c) El suelo: Involucra la materia orgánica en suelos que pueden ser de origen orgánico o mineral, incluida la turba. También las raíces finas vivas cuyo tamaño, dependerá del criterio para cada país, en donde se pretenda realizar la cuantificación de carbono.



Figura 1. Reservorios de carbono en los ecosistemas terrestres

El presente documento se basa en esta clasificación para arrojar las metodologías básicas de determinación de carbono en suelo y planta, con la finalidad de dar un orden a la información.

2.- DETERMINACIÓN DE LA BIOMASA VIVA Y CARBONO EN EL ESTRATO ARBÓREO

Para la determinación de biomasa en plantas superiores o árboles, existen dos métodos principales para medirla: el método directo y el indirecto. El método directo o destructivo consiste en cortar individuos para generar ecuaciones o modelos alométricos utilizando la biomasa por medio del peso directo de cada uno de los componentes (fuste, ramas y hojas). Por otra parte, el método indirecto consiste en utilizar ecuaciones que permitan relacionar algunas variables dasométricas obtenidas en campo (de fácil medición de altura y diámetro). Estas ecuaciones son generadas por medio de

una técnica estadística llamada análisis de regresión (Avendaño *et al.*, 2009).

Utilizando estas ecuaciones, se permite realizar tablas de volumen específicas para algunas especies, basándose en el diámetro y/o altura. Con el uso de estas tablas de rendimiento estándar para estimar el volumen del fuste, y con ayuda de la gravedad específica o densidad de la madera, el volumen se transforma a términos de biomasa del fuste, la cual, al ser multiplicado por un factor de expansión, se obtiene la biomasa total del árbol (MacDicken, 1997; Snowdon *et al.*, 2001).

Las ecuaciones alométricas para estimar la biomasa arbórea sobre el suelo están en función del tipo de vegetación, especie y tipo de componente. Específicamente para los estudios de carbono, la determinación de la biomasa se utiliza como estimativo en la cantidad de carbono almacenado, dado que la relación de la biomasa seca total con el carbono es de aproximadamente 2:1 (Cielsa, 1996).

2.1 Consideraciones de toma de datos en campo

Es importante mencionar que medir toda la biomasa vegetal presente para la determinación del stock de carbono en ocasiones se torna prácticamente imposible, las causas más comunes se deben a limitaciones de tiempo, recursos económicos o restricciones en el traslado de las muestras, siendo en estos casos en donde se recurre a las técnicas de muestreo.

El muestreo es el proceso por el cual se obtiene información sobre un todo denominado población, examinando sólo una parte del mismo definida como muestra. A la vez, la muestra se define como un subconjunto de individuos llamados unidades de muestreo, los cuales presentan características similares (Mata y Macassi, 1997) (Figura 2).

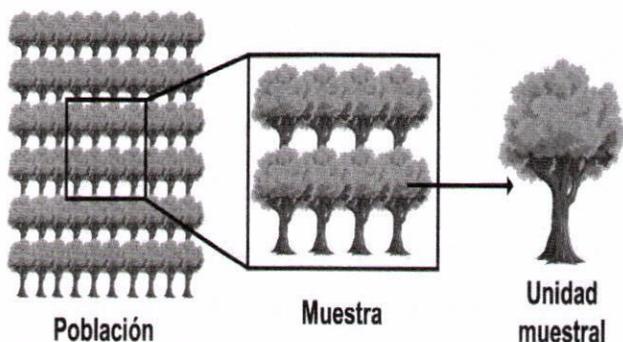


Figura 2. Definición de población, muestra y unidad muestral (Rügnitz *et al.*, 2009).

2.2 Tipo de muestreo y tamaño de muestra

Existen dos métodos para la obtención de la muestra, el muestro probabilístico y el no probabilístico. Dentro del muestreo probabilístico el tamaño de la muestra suele calcularse en función de la heterogeneidad de la variable de interés dentro de una población, el nivel de confianza, y la precisión deseados (Raj, 1980; Kish, 1995). Una de las particularidades de este método consiste en asegurar que todos los elementos del universo puedan formar parte de la muestra a través de mecanismos de sorteo. Los tipos de muestreo probabilístico más empleados son: a) el muestreo aleatorio simple, b) muestreo aleatorio sistemático c) muestreo aleatorio estratificado y d) el muestreo por conglomerados.

- a) El muestreo aleatorio simple se aplica en investigaciones sobre poblaciones pequeñas, en donde se tiene el conocimiento del total de los elementos de un universo.
- b) El muestreo aleatorio sistemático consiste en escoger al azar un elemento y a partir de este incrementar un intervalo fijo, por lo que la selección ocurre de forma sistemática y secuencial, éste muestreo se recomienda emplearlo cuando los elementos de la población se presentan de forma ordenada y teniendo el conocimiento del número total de elementos de la

población (Rügnitz *et al.*, 2009; Otzen y Manterola, 2017).

- c) El muestreo aleatorio estratificado divide los elementos del universo en grupos, cada grupo o estrato tiene la particularidad de ser homogéneo, por lo que al trabajar específicamente sobre éstos grupos, las estimaciones serán más precisas, la aplicación del mismo se recomienda en unidades productivas con diferentes tipos de uso del suelo, bosques o plantaciones forestales en donde es recomendable escoger la población más homogénea de acuerdo a las características de interés (Rügnitz *et al.*, 2009; Otzen y Manterola, 2017).
- d) El muestreo por conglomerados se implementa cuando es imposible realizar el muestreo simple aleatorio, se recomienda usar en muestreos de gran escala, un ejemplo de su implementación para el caso que nos ocupa, es la utilización de su diseño en los inventarios forestales nacionales de México, cuyo sistema permite la evaluación de las parcelas permanentes de muestreo en todo el país para la estimación del carbono almacenado en los ecosistemas forestales (Otzen y Manterola, 2017; CONAFOR, 2011).

La utilización de cada muestreo de acuerdo a sus requerimientos tiene el objetivo de generar una muestra representativa parecida a la población, para su respectiva inferencia.

En este sentido es bueno dejar en claro que un sistema preestablecido de muestras es considerado idóneo para representar el universo a investigar (población), con un margen de error de muestreo aceptable (normalmente de +/- 10%), sin embargo, los proyectos a pequeña escala pueden utilizar un nivel de precisión de hasta +/- 20 % (Emmer, 2007). La obtención de este valor se define a través de un muestreo piloto, en donde se obtienen estadísticos tales como la media, desviación estándar y la varianza, necesarios para determinar el tamaño de muestra utilizando formulas específicas.

El cálculo del tamaño de muestra (Ecuación 1) se obtiene utilizando en un estrato determinado, o bien un área sin estratificar.

$$n = \frac{(N*S)^2}{\frac{N^2*E^2}{t^2} + N*S^2} \quad (1)$$

Donde:

n: número de parcelas

E: error permitido (promedio por el nivel de precisión seleccionado, el nivel de precisión recomendado en áreas pequeñas y de alta variación $\pm 20\%$ (0.2).

t: muestra estadística de la distribución *t* para un nivel de un 95% de confianza (comúnmente se utiliza 2 como número de muestra).

N: número de parcelas en área del estrato (área del estrato dividido entre el tamaño de parcela en hectáreas).

S: desviación estándar del área o el estrato en el que se trabaja.

2.3 Intensidad de muestreo

Las áreas de plantaciones, lotes pequeños dentro de fincas y los sistemas agroforestales generan un problema de muestreo debido a la reducida población muestreada, la cual ocasiona una baja representatividad de la población (Murillo *et al.*, 2012), para ello, se sugiere visualizar el árbol de forma individual como la unidad muestral o parcela. En base en este principio, se utiliza el conocimiento existente de intensidad de muestreo, que sugiere la medición del 2 a 3% del área efectiva en la que se realiza el estudio (Spittle, 1995; Murillo *et al.*, 2003; Sánchez y Murillo, 2004).

La Intensidad de Muestreo (IM) también puede ser una ayuda para estimar el número y tamaño adecuado de las muestras a obtener en campo, tomando en cuenta que este tipo de proyectos generalmente se ubica en fincas o áreas pequeñas (1 a 3 ha). Al respecto Spittle (1995), indica que entre más pequeña sea la plantación, mas aumenta la intensidad de muestreo y disminuye la distancia entre lianas y transectos,

razón por la cual aumenta el número de sitios por hectárea a muestrear (Tabla 1).

Tabla 1. IM acorde a tamaño del estrato, número de sitios, distancia entre sitios y fajas

Tamaño del estrato o plantación (ha)	Intensidad de muestreo (IM) (% del área)	Número de sitios por hectárea	Distanciamiento entre sitios y fajas (m)
1 - 3	2.5	2.5	63
3- 6	2.0	2.0	71
6 - 10	1.5	1.5	82
10 -20	1.0	1.0	100
20- 50	0.75	0.75	115
>50	0.5	0.5	140

Fuente: Spitler (1995)

El ejemplo siguiente, con ayuda de la Tabla 1, se determina el número de sitios a muestrear y la distancia entre líneas y fajas, de acuerdo a una intensidad de muestreo (Ecuación 2), para una superficie de 3 ha dentro de una plantación arbórea.

$$D: \sqrt{\frac{A}{P}} = \quad (2)$$

Donde:

D: distancia entre sitios y fajas en m

A: área de la plantación en m²

P= número de sitios a muestrear de acuerdo a la intensidad de muestro (*Área de la plantación/Tamaño de sitio*) *(*intensidad de muestreo en decimales*) = (30000m²/100m²) *(0.025) =7.5

$$D = \sqrt{\frac{A=30,000 \text{ m}^2}{P=7.5}} = 63 \text{ m}$$

Obtenido así, la distancia entre sitios y fajas dentro de una plantación de 1 a 3 hectáreas con sitios de 100 m² de superficie.

Sin embargo, teniendo en consideración el costo y tiempo para la realización de un muestreo, se recomienda tener un mínimo de 20 árboles en cada parcela muestreada. El tamaño de la parcela deberá establecerse de acuerdo al espaciamiento y el tamaño del DAP (Diámetro a la altura 1.30 m) a ser medido. Así, por ejemplo, se recomienda establecer 100 m² (10 x 10 m) para árboles de 5 a 9.9 cm de diámetro (DAP) y de 25 m² (5X5) para diámetros inferiores a 4.9 cm con una altura menor o aproximados a 1.5 m de altura (Rügnitz *et al.*, 2009).

2.4 Medición de las variables dasométricas

La utilización de las variables dasométricas se define de acuerdo a la ecuación empleada, no obstante, las variables más usadas son el diámetro del tallo y la altura total (Segura *et al.*, 2006; Segura y Andrad, 2008). A continuación, se explica cómo se obtienen estas variables.

2.4.1 Diámetro del árbol y área basal

El diámetro del tallo de un árbol es uno de los parámetros de mayor uso para estimar la biomasa o volumen en estrato arbóreo. El diámetro consiste en determinar la longitud de la recta que pasa por el centro del círculo (tallo) y termina en los puntos en donde toca la circunferencia (Figura 3).

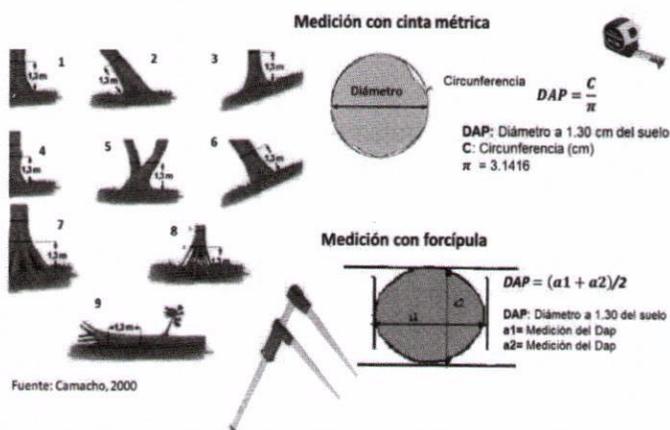


Figura 3. Determinación del diámetro 1: Toma de diámetro a 1.30, 2: Toma de diámetro al tallo inclinado sin pendiente, 3: Toma de diámetro a favor de la pendiente del árbol, 4: Toma de diámetro evitando muñones 5: Toma de medición de los dos tallos

bifurcados o en su caso trifurcado a una altura de 1.30, 6: Toma de medición a favor de la pendiente con un árbol inclinado, 7: Toma de medición arriba de los contrafuertes 8: Toma de medición del diámetro arriba de las raíces, 9: Toma de medición del tallo sobre un árbol derribado (Camacho, 2000).

El diámetro sirve a su vez para medir el área basal (Ecuación 3) (Mostacedo y Fredericksen, 2000) otra variable ampliamente utilizada en las ecuaciones alométricas.

$$AB_{ha} = \pi \left(\frac{D^2}{4} \right) * Dh \quad (3)$$

Donde:

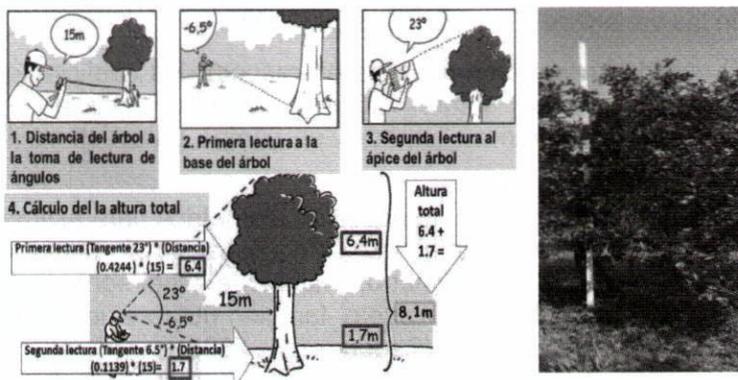
AB_{ha} : área basal por $m^2 ha^{-1}$

D: diámetro a 1.30 m del suelo

Dh = densidad de árboles hectárea⁻¹

2.4.2 Altura total del árbol

La altura es la variable más difícil de medir, sobre todo en arbolado mayor, por lo que se recomienda utilizar instrumentos de medición como el clinómetro, clisímetro, o bien, cualquier otro instrumento que utilice un ángulo (Figura 4a). Para el arbolado de menor porte (árboles frutícolas) se recomienda medir directamente a través de una vara graduada o una cinta de longitud considerable (Figura 4b).



a) Método indirecto

b) Método directo

Figura 4. Medición directa e indirecta de la altura (Fuente: Rünitz *et al.*, 2009).

2.5 Modelos alométricos para la biomasa arbórea

2.5.1 Determinación de biomasa aérea

La aplicación de un modelo alométrico consiste no sólo en seleccionar la ecuación para una especie en particular o sección de la planta (parte aérea o subterránea), también se debe de asegurar que la generación de las mismas haya sido desarrolladas en una región con condiciones climáticas similares a la zona de interés, por ende, los factores tales como la temperatura promedio anual, la precipitación anual, la altura sobre el nivel del mar, las zonas ecológicas y el tipo de suelo, son los principales factores a tomar en cuenta para escoger la función indicada (Rügnitz *et al.*, 2009).

Los criterios que se tomarán en cuenta al momento de seleccionar un modelo serán, un valor alto de R^2 , el cual se define como la porción que explica la variable independiente diámetro o altura, respecto a la variable dependiente o predictora, en nuestro caso la biomasa. Por otra parte, un buen ajuste del modelo implicaría bajo valores de la suma de cuadrados del error de predicción (PRESS por sus siglas en inglés: Prediction Sum of Squares) o bien, es una medida de la desviación entre los datos generados por el modelo y los observados (Clutter *et al.*, 1983). Por otra parte, de ser posible, es necesario identificar si el autor tomó en cuenta los supuestos de normalidad de los residuos y la homogeneidad de las varianzas (Segura y Andrad, 2008).

El uso de la ecuación consiste en respetar los coeficientes arrojados por los autores que la generan y utilizar las variables dasométricas tomadas en campo para estimar la biomasa.

En el ejemplo siguiente, la ecuación alométrica para estimar la biomasa en kg planta^{-1} de café (Ecuación 4) utiliza el logaritmo base 10 del diámetro, mismo que deber ser tomado a una altura de 15 cm del suelo, también utiliza el logaritmo base 10 de la altura total (Segura *et al.*, 2006).

$$\text{Log Bt} = a + b * \text{Log}(d1) + c * \text{Log}(h) \quad (4)$$

Donde:

Log: logaritmo con base 10

Log B: log de la biomasa total

d_{15} : diámetro a la altura de 15 cm del suelo

h: altura total de la planta o árbol

a, b y c: parámetros o coeficientes del modelo

2.5.2 Determinación de la biomasa subterránea

El uso de ecuaciones alométricas para determinar raíces arbóreas debe de tomar en consideración los mismos criterios anteriormente descritos, respetando la especie o las características morfométricas de las mismas, así como el clima y generalidades del área a trabajar. Por lo que la búsqueda bibliográfica dependerá de un conocimiento claro de las condiciones generales de la región.

Una ecuación reportada por Cairns *et al.* (1997) para determinar biomasa de raíces en ambientes tropicales, fue generada a partir de una extensa información de características ambientales y ecológicas que predicen de la mejor manera la biomasa de las raíces en ambientes húmedos y templados. Para la generación de la misma se tomaron en cuenta los efectos de la latitud, el tipo de árbol, la temperatura, la precipitación, la edad, la textura del suelo y la densidad de la biomasa sobre el terreno, en donde finalmente se obtiene una ecuación de gran aplicabilidad, que utiliza la biomasa área de las especies arbóreas (Ecuación 5) para determinar la biomasa de raíces.

Biomasa de raíces

$$Y = \exp [(a + b) * (\ln (BA))] \quad (5)$$

Donde:

Y: biomasa de raíces en Mg ha^{-1} de materia seca (MS).

BA: biomasa aérea en Mg ha^{-1} de (MS).

2.5.3 Biomasa ha^{-1} utilizando el área muestreada

Una vez obtenida la biomasa en términos de kg árbol^{-1} , se procede a estimar las toneladas por hectárea de biomasa seca (Ecuación 6). La sumatoria de la biomasa de todas las plantas muestreadas en cada área serán utilizadas para

estimar la biomasa arbórea sobre el suelo en toneladas por hectárea, de acuerdo a la superficie muestreada (Rügnitz *et al.*, 2009).

$$BA = \frac{\Sigma_{AU}}{1000} * \frac{10000}{Am} \quad (6)$$

Donde:

BA: biomasa arbórea sobre el suelo en Mg MS ha⁻¹.

Σ_{au} : sumatoria de la biomasa arbórea de todos los individuos de la parcela en kg MS área parcelaria¹.

Am: área muestreada en total (ha).

La cuantificación de la biomasa total por superficie muestreada puede ser utilizada cuando no se tiene el dato de la densidad poblacional, situación que resulta poco común en áreas frutícolas o agrícolas, una vez obtenida se estima la cantidad de carbono de la misma.

Es importante mencionar que la estimación del carbono almacenado o secuestrado en la parte aérea arbórea (hoja, tallo, ramas) y subterránea (raíz) del árbol, inicia con la determinación de biomasa a través de las ecuaciones alométricas, el siguiente paso radica en determinar el contenido de carbono a través de análisis químicos en ambas partes, si así se requiere (Carvajal *et al.*, 2009; Betancourt *et al.*, 20014). En el apartado subsecuente se explica la realización del análisis para la determinación del contenido de carbono en la planta o secciones de la misma.

2.6 Cuantificación del carbono de la biomasa arbórea

2.6.1 Análisis de contenido de carbono en planta

Estudios indican que el contenido de C varía en función de los distintos sistemas de uso de suelo, la profundidad del mismo y la densidad aparente (Woomer y Palm, 1998). Asimismo, otros autores también indican que la cantidad de C varía entre especies y entre diferentes fracciones de una misma especie (Lin *et al.*, 2002; Peri *et al.*, 2004; Avendaño *et al.*, 2009), razón por la cual es conveniente realizar análisis químico en cada sección de la planta.

En cuanto al análisis en plantas utilizando un analizador elemental (equipo de alta tecnología que analiza los contenidos de Carbono y Nitrógeno) este consiste en obtener el peso estable de las diferentes secciones de interés (la temperatura dependerá de la sección que se quiera analizar, en general se utilizan temperaturas de 62 a 72°C), la preparación de muestras para el análisis consiste en utiliza sub-muestras de 2 a 3 mg de peso seco perteneciente al tallo, hoja o raíz (Figura 5) dependiendo al interés de estudio (Carvajal *et al.*, 2009; Thennarasu *et al.*, 2014). Más adelante se menciona el funcionamiento exacto del Analizador Elemental (apartado 4.5).

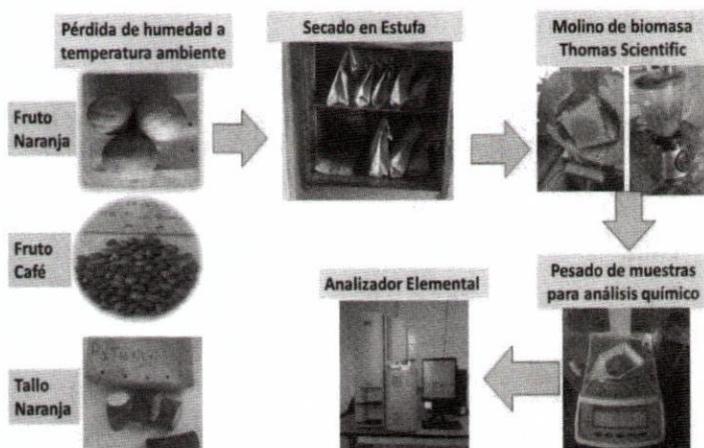


Figura 5. Determinación de contenido de carbono orgánico en las diferentes secciones de la planta (Fuente: Elaboración propia).

2.6.2 Secuestro de carbono por hectárea

En promedio la materia vegetal contiene aproximadamente un 50% de carbono, una vez que se ha removido completamente el agua (MacDicken, 1997; Cielsa, 1996), por lo que, algunas investigaciones determinan el carbono simplemente multiplicando el valor 0.5 (promedio de contenido carbono) por la biomasa encontrada en la planta; no obstante, lo más adecuado es realizar la determinación de carbono a través de un análisis químico y posteriormente tomar en cuenta la biomasa seca obtenida por planta y/o sección (Ecuación 7) (Thennarasu *et al.*, 2014).

$$C_{\text{total}} = \text{Bat} * \text{CC} \quad (7)$$

Donde:

C_{Total}: carbono Total (Mg ha⁻¹)

Bat: biomasa total (Mg ha⁻¹)

CC: contenido de carbono (%)

El almacenamiento de carbono en las plantas se puede obtener por sección, al multiplicar la biomasa de éste por el valor absoluto del contenido de carbono (Tabla 2) resultado del análisis químico (MacDicken, 1997; Cielsa, 1996), obteniendo el total de almacenamiento de C planta⁻¹ al realizar la suma de las secciones.

Tabla 2. Valores de carbono en la biomasa (g) de sandía

Sandía	Peso seco o biomasa (g planta ⁻¹)	% C	g C planta ⁻¹
Raíz	8.5	37.83	3.2
Tallo	285	39.29	112
Hoja	322	37.54	121
Fruto	398	42.71	170
Total	1.013		406

Fuente: Carvajal *et al.*, 2009

Una de las formas más empleadas en los sistemas agrícolas en definitiva es el uso de la densidad de las plantas para estimar la cantidad de biomasa seca por hectárea. Por lo tanto, la determinación de las cantidades de biomasa tomando en cuenta la densidad de arbolado es una opción acertada en la determinación de carbono. Así, por ejemplo, Betancourt *et al.*, (2014) determinan el almacenamiento de carbono en cítricos utilizando la densidad poblacional, la cual resulta relativamente fácil una vez obtenido un promedio de carbono expresado en kg árbol⁻¹, mismo que al ser multiplicado por la densidad poblacional las cifras son arrojadas en Mg C ha⁻¹. Así, el autor Betancourt *et al.*, (2014), reporta un promedio entre 81 kg y 106 kg de carbono por

árbol⁻¹, cuya densidad poblacional fue de 200 árboles por hectárea, obteniendo 16.2 y 21.37 Mg C ha⁻¹.

3.- DETERMINACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

3.1 Medición de la hojarasca

La producción de hojarasca es la suma del detrito vegetal integrada por hojas, flores, ramas, frutos acumulados sobre el suelo, durante un periodo de tiempo determinado y se expresa en unidades de Mg ha⁻¹ año⁻¹ o g m⁻² año⁻¹ (Del Valle-Arango, 2003). Este proceso constituye una de las principales vías mediante la cual, el carbono atmosférico asimilado a través de la fotosíntesis, finalmente pasa a formar parte del suelo (Sala *et al.*, 1988). Así, por ejemplo, se calcula que alrededor del 80% del total de los bioelementos que ingresan al suelo en los bosques, se deriva de la hojarasca (León-Rico, 2003). Por lo tanto, la cuantificación de la producción de la misma es importante para comprender la cantidad de carbono que pasa de la parte aérea a los componentes subterráneos, y que finalmente se incorporan al carbono orgánico del suelo (Couteaux *et al.*, 1995).

La estimación de la producción de hojarasca se realiza a través de cestas o trampas distribuidas en el sitio a trabajar, en donde se muestrea la biomasa que cae durante al menos un año (Salas e Infante, 2006) (Figura 6). El número, la distribución espacial, la forma, la superficie de las trampas y la frecuencia de muestreo son factores importantes que inciden en la precisión y la representatividad de la producción de hojarasca (Renolfi *et al.*, 1986). De forma general, se recomendando en sitio heterogéneas colocar 4 trampas por parcela y muestrear el mayor número posible de sitios.

Se debe dejar en claro que las frecuencias de las colectas dependerán del objetivo del trabajo, aunque lo ideal es tener datos a lo largo de un año, pero en caso de que se requiera conocer la variabilidad interanual la colecta puede continuar por varios años.

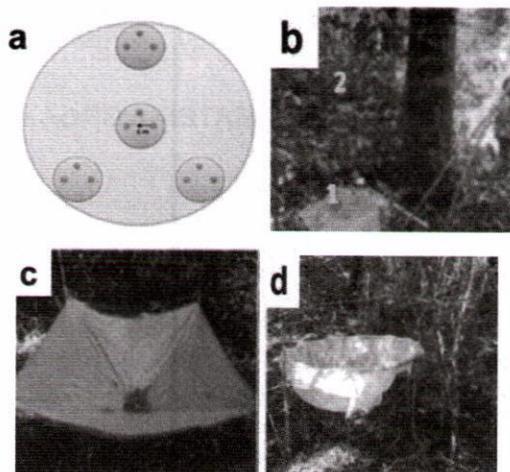


Figura 6. Distribución de trampas para hojarasca a) distribución de las trampas en las parcelas; b) Distribución de las trampas alrededor del árbol; c y d) Tipo de trampas establecida en campo (Fuente: Quiceno *et al.*, 2016).

Una vez colectada la hojarasca se coloca en bolsas de plástico o de la totalidad del material depositado por trampa, y se identifican sus características en una etiqueta (sitio, número de trampa y fecha). Posteriormente se traslada al laboratorio para su procesamiento y posterior análisis. El cálculo de la producción de la hojarasca (P) (Ecuación 8) se obtiene a partir de los datos del peso seco del material obtenido en cada bolsa colectada, determinado la tasa de producción mensual de hojarasca, mediante la siguiente ecuación (Honorio *et al.*, 2010).

$$P = \frac{Pst / Comt}{Atra * Itc} \quad (8)$$

Donde:

P: producción de la hojarasca $g\ cm^2\ día^{-1}$

Pst: peso seco total g

Comt: componente de cada trampa g

Atra: área de la trampa cm^2

Itc: Intervalo de tiempo de colecta (día)

3.2 Madera muerta

3.2.1 Árboles muertos en pie y tocones

El arbolado muerto en pie y tocones generalmente no se encuentra en sistemas agrícolas, dado que la mayoría de éstas son plantaciones de frutales, huertas o fincas bajo un constante manejo, no obstante, se quiso exponer en caso de encontrar algún arbolado muerto dentro de las fincas o huertas típicas de los sistemas agrícolas, o bien, pensando en sistemas agroforestales.

De acuerdo con Walker *et al.*, (2009) el arbolado muerto en pie, se registra clasificándolos en dos clases: 1) Árboles con ramas y ramillas con apariencia de árbol vivo excepto por la ausencia de hojas. 2) Árboles que presentan ramas grandes y llegan a tener el fuste principal con apariencia de muerto.

Un tocón es un trozo de tallo con altura menor a 1.30 metros del suelo, la presencia de estos es debido a perturbaciones naturales o aprovechamiento forestales (CONAFOR, 2011). Los tocones se miden en las parcelas y registrando la parte media del tocón y la altura total del mismo.

En cuanto a la estimación de biomasa en árboles muertos en pie se puede utilizar con ecuaciones de volumen para fuste limpio reportadas para la región. Para conversión de volumen a biomasa, es necesario multiplicar el volumen por la densidad específica determinada en laboratorio (Peso seco/volumen verde o saturada de agua), en el siguiente apartado se explica a grandes rasgos como obtener la densidad (CONAFOR, 2011).

3.2.1.1 Densidad de la madera

La densidad de la madera (Ecuación 9) es otra variable necesaria para estimar la biomasa. La obtención de la misma se realiza a través de una sección de madera pequeña conseguida en campo, la cual es introducida en una probeta registrando el peso y el volumen en estado saturado de agua, posteriormente, al equilibrarse con el ambiente de 14°C las muestras se colocan en un horno de secado a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta lograr el peso anhidro. Para ello se debe usar una balanza analítica (Serna *et al.*, 2011).

$$D_b = \frac{1}{\frac{P_h}{P_o} - 0.346} \quad (9)$$

Donde:

D_b : densidad básica $g\ cm^{-2}$

P_o : peso anhidro g

P_h : peso húmedo g

3.2.2 Material leñoso caído

La obtención de los datos se realiza con la técnica de intersecciones planares, con el fin de caracterizar material leñoso en la zona de interés (Brown, 1974; Van Wagner, 1982). En cada sitio de muestreo se ubica una línea de 20 m de longitud cuya dirección es definida aleatoriamente. Las partículas leñosas intersectadas por la línea cuya clase diamétrica van de 0.1 a 2.5 cm de diámetro se registran durante el primer metro de la línea, las partículas con clase diamétrica de 2.5 a 7.5 cm se miden a través de los primeros cuatro metros de longitud de la línea, y finalmente, las partículas con diámetros mayores a 7.5 cm se miden en la totalidad de la longitud de la línea.

La biomasa estimada en el material leñoso caído (MLC) por sitio se obtiene mediante la fórmula de Van Wagner (1982) (Ecuación 10):

$$C = K * GE * \sum Dc * c/L \quad (10)$$

Donde:

C : biomasa de MLC ($Mg\ ha^{-1}$)

K : constante equivalente a 1.234 derivada de la densidad del agua y de factores de conversión para obtener la biomasa de MLC en $Mg\ ha^{-1}$

Dc : diámetro cuadrático, que es el diámetro interceptado elevado al cuadrado.

GE : gravedad específica de la madera ($g\ cm^{-3}$)

c : factor de corrección de la pendiente del terreno en una base horizontal (Ecuación 11), se calcula con la siguiente expresión:

$$c = 1 + \left(\sqrt{\% \text{ pendiente} / 100} \right)^2 \quad (11)$$

L: longitud del transecto (m)

3.3 Determinación del carbono en la materia orgánica

La determinación del carbono almacenado en esta categoría es similar a las anteriores (Ecuación 7), al multiplicar la concentración de carbono por la biomasa de la hojarasca, y madera muerta encontrada en el área de estudio (MacDicken, 1997; Cielsa, 1996; Thennarasu *et al.*, 2014).

4. DETERMINACIÓN DEL CARBONO EN EL SUELO

El suelo es el reservorio de carbono orgánico más grande en los ecosistemas terrestres, e interactúa fuertemente con la composición atmosférica, el clima y los cambios en la cobertura del suelo (Tarnocai *et al.*, 2009). Por lo tanto, el gran almacén de carbono en el suelo resulta del equilibrio dinámico entre los materiales orgánicos e inorgánicos que entran y salen del suelo (Smith *et al.*, 2008).

El tamaño actual de los almacenes de carbono orgánico del suelo (COS) dependen principalmente de la tasa de ganancia o pérdida de C durante un periodo específico de tiempo y de la máxima cantidad de C que puede ser almacenada por esos suelos (Smith, 2014). Cabe mencionar, que regularmente la cantidad de COS disminuye por el cambio de ecosistemas naturales o semi-naturales a agro-ecosistemas con manejo antropogénico (Schlesinger y Bernhardt, 2013). Así, el estudio de la distribución y cambios en el carbono orgánico del suelo y sus factores podrían ayudar a predecir las consecuencias del cambio climático (Albaladejo *et al.*, 2013).

4.1 Muestreo del suelo

El muestreo necesita incluir la variabilidad del COS causado por diferentes tipos de suelo en el área de estudio, así como variantes en la edad o tipo de cultivo, rendimientos y manejo agronómico.

Por lo tanto, se deben tomar un mínimo de 5 a 10 muestras de suelo de cada estrato estudiado para hacer una muestra compuesta que represente el área total de la unidad/estrato

colectadas el mismo día (FAO, 2018). Se recomienda, tomar muestras compuestas en un muestreo previo para determinar antes la variabilidad del área de estudio y así elegir el tamaño de muestra adecuado.

Es primordial coleccionar las muestras representativas de las condiciones promedio del suelo, evitando áreas atípicas de muy bajo o alto rendimiento, senderos de cabecera, hileras, bordes de la parcela, etc.

La mayor cantidad de COS se encuentra en la capa de 0 a 10 cm. No obstante, el muestreo a 30 cm proporciona información sobre los cambios en la ubicación del COS y ayuda a explicar variaciones bajo diferente manejo agronómico. Por lo tanto, el muestreo mínimo a 30 cm refleja mejor los cambios en los almacenes de carbono (FAO, 2018). Además, estas muestras pueden proporcionar información sobre el estado de los nutrientes del suelo y sub-suelo. Si se toman muestras por debajo de 30 cm, el IPCC recomienda coleccionar el suelo del mismo núcleo que de 0-30 cm, ya que si se emplean muestras de otros agujeros puede incrementarse el error debido a la variabilidad espacial, y con ello la capacidad de detectar cambios temporales. Todas las muestras deben ser georreferenciadas.

Existen diferentes enfoques para el monitoreo y muestreo de suelos, destacando dos principales:

- Un enfoque estadístico basado en el diseño (clásico), donde es un muestreo aleatorio.
- Un enfoque basado en modelos (geo-estadístico) para el cual la aleatorización no es un requisito previo (Brus y de Gruijter, 1997; Brus, 2014).

Se puede también una combinación entre ambos (Viscarra Rossel *et al.*, 2016). La estrategia dependerá del objetivo primario del estudio y de la escala (costo) (Conant *et al.*, 2011).

Por otro lado, el muestreo puede ser o no estratificado. En general, en los muestreos no estratificados se considera que toda el área de estudio es una unidad, y se muestrea de una manera aleatoria o sistemática, mientras que el muestreo estratificado se subdivide el área en unidades relativamente

homogéneas, basado en factores como la topografía, y cada unidad se muestrea por separado.

Cabe mencionar, que debido a que el C en el suelo varía a lo largo del año, es importante tomar las muestras de suelo al mismo tiempo cada año. El tomar las muestras durante la fase donde hay menor crecimiento disminuye la influencia del tipo de planta y la fase fenológica en el COS, particularmente en las fracciones de C en el suelo lábil.

El cálculo del número de muestras (Ecuación 12) se puede obtener de la siguiente manera.

$$n_{\text{req}} = \frac{t^2 s^2}{(d \times \text{media})^2} \quad (12)$$

Donde:

n_{req} : número de muestras requeridas

t: es el valor de la *t-Student* al nivel de confianza deseado (típicamente $1-\alpha=0.90$ o 0.95).

s^2 : es la varianza de la muestra

d: exactitud requerida o la desviación máxima aceptable de la media (p. ejemplo $d=0.10$).

media: media aritmética de la muestra

El número de muestras puede incrementar con la variabilidad del suelo (Wilding *et al.*, 2001).

Las muestras deben ser procesadas adecuadamente, ya que, durante la recolección y almacenamiento de las muestras, el contenido de COS puede disminuir debido a la degradación microbiana, el secado de la muestra, oxidación, volatilización y la remoción selectiva de componentes que contienen carbono (Schumacher, 2002). Por lo tanto, las muestras no deben ser almacenadas a temperaturas superiores a 4°C o por más de 28 días después de la recolección. Las muestras secas deben ser almacenadas en oscuridad, en una habitación seca y fría para futuras determinaciones y verificaciones.

4.2. Medición de la densidad aparente del suelo

Se requiere determinar la densidad aparente del suelo para calcular los almacenes de COS en toneladas de C por hectárea. Este parámetro se define como la cantidad de suelo seco en un volumen conocido, y puede obtenerse siguiendo la metodología descrita en la NOM-021-RECNAT 2000 (SEMARNAT, 2002) por el método AS-03 utilizando parafina. También obtenerse utilizando una barrena de densidad puede de volumen conocido, secando el núcleo de suelo a 105°C hasta peso constante. El resultado se expresa comúnmente como g de suelo por cm³ o Mg m³ (Cresswell y Hamilton, 2002).

Esta característica del suelo refleja su estructura y depende de la proporción y calidad de los componentes minerales y orgánicos del suelo, por lo que es influenciado por la textura, mineralogía, composición química y el contenido y calidad de materia orgánica.

La densidad aparente varía altamente en el espacio y es particularmente sensible a la presencia de factores como fragmentos de roca, raíces, agregados grandes, entre otros, por lo que, de ser posible, debe realizarse el análisis por triplicado (Blake y Harte, 1986).

4.3 Carbono inorgánico del suelo

El C en el suelo está compuesto por dos compartimientos, el COS y carbono inorgánico del suelo (CIS). Este último está formado principalmente por carbonatos derivados de fuentes geológicas o material parental. Las dos formas minerales más comunes de carbonato en suelos y sedimentos son la calcita ligeramente soluble (CaCO₃) y la dolomita (CaMg(CO₃)₂), aunque pueden estar presentes otras formas, por ejemplo, la siderita y FeCO₃, dependiendo donde se formaron los suelos o de donde provenga el sedimento. Los carbonatos disueltos pueden estar en mayor concentración en los suelos sódicos o en microambientes de alta actividad microbiana (Loeppert y Suarez, 1996). Por su parte, los suelos calcáreos (ricos en CaCO₃) cubren el 40% de la superficie terrestre, sobre todo en zonas áridas y semiáridas, mientras que en regiones tropicales húmedas también pudieran contener CIS

temporalmente, por ejemplo, cuando ocurre un encalado (FAO, 2018).

Dado que las actividades biológicas y el cambio climático pueden influir sobre factores que controlan la disolución y precipitación del CaCO_3 , y con ello alterar el equilibrio entre las especies de C inorgánico en distintos estados de la materia, conduciendo a la emisión de CO_2 o la precipitación de calcita (Chevallier *et al.*, 2017), el CIS ha dejado de ser visto como C estático, por lo que debe cuantificarse en suelos donde es predominante.

Para determinar si existen carbonatos en la muestra, se deben añadir unas cuantas gotas de ácido clorhídrico sobre la muestra para observar efervescencia. Si existen carbonato, éstos deben ser eliminados como CO_2 por acidificación antes del análisis de COS. Si se emplea el método de oxidación húmeda, no es necesario acidificar los suelos para eliminar carbonatos. Por su parte, las técnicas de pérdida de peso por ignición no son confiables en suelos que contienen carbonatos.

En el caso de la eliminación de carbonatos, se emplea ácido sulfuroso al 6% que se añade en alícuotas de 1 ml a una muestra de 1-2 g de suelo seco y se calienta a 70°C hasta que deje de reaccionar. Este pretratamiento modifica la muestra, pues aumentar la temperatura, cambia el contenido de humedad, además, el SO_3^{2-} tiene más masa que el CO_3^{2-} , por lo que la masa de la muestra se incrementará. Por lo anterior, se deben considerar ambos cambios cuando se calcula el COS de la muestra mediante las siguientes fórmulas (Ecuación 13):

$$\text{COS}_{105^\circ\text{C}} = \frac{\text{COS}_{\text{mt}} \times \text{P}_{\text{mpt}}}{\text{P}_{\text{pt}}/\text{ODF}} \quad (13)$$

Donde:

$\text{COS}_{105^\circ\text{C}}$: Contenido de COS del suelo (105°C) g kg^{-1}

COS_{mt} : COS de la muestra tratada g kg^{-1}

P_{mpt} : Peso de la muestra post tratamiento a 105°C

P_{pt} : Peso de la muestra tomada para el tratamiento g

ODF: Factor de secado en horno (ODF por sus siglas en inglés) (Ecuación 14).

$$\text{ODF} = \frac{P_{\text{ssa}}}{P_{\text{SS}_{105^{\circ}\text{C}}}} \quad (14)$$

Pssa: Peso del suelo secado al aire g

PSS_{105°C}: Peso del suelo seco a 105°C

4.4 Medición del carbono orgánico del suelo

El carbono orgánico del suelo es el C presente en la fracción del suelo que pasa a través de un tamiz de 2 mm (Whitehead *et al.*, 2012), por lo que, para los inventarios de C, la medición del COS se hace en la fracción fina de suelo (<2 mm). Para inventarios de carbono no se deben retirar los residuos vegetales visibles, o pueden analizarse por separado, pero deben incluirse en los cálculos.

Las muestras de suelo deben seguir un proceso de preparación para los análisis de laboratorio (Figura 7).

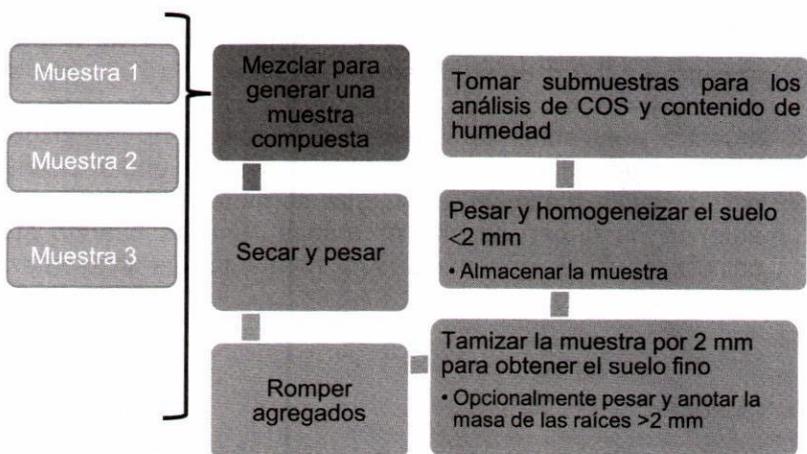


Figura 7. Pasos generales de preparación de las muestras para los análisis de COS en laboratorio (FAO, 2018).

Existen diversos métodos empleados para medir el COS y su elección depende del presupuesto, tiempo y precisión. La determinación del COS vía la oxidación húmeda y titulación

(Walkley y Black, 1934) es el método más utilizado dado su bajo costo, aunque demanda mucho tiempo, produce residuos tóxicos de dicromato y la oxidación incompleta puede generar una subestimación de la cantidad de C almacenado. Por otro lado, el análisis elemental es el método más adecuado y preciso, pero requiere un equipo especial y su procesamiento es costoso, además que la representatividad es cuestionable debido a la mínima cantidad de muestra utilizada para el análisis y al tratamiento previo que debe realizarse para eliminar el C inorgánico.

Si no está disponible la combustión seca, el método de pérdida de peso por ignición es un método confiable de bajo costo.

4.5 Análisis de carbono en el analizador elemental

El método de combustión seca es un método químico directo de COS basado en la combustión del suelo que contiene C. Utiliza muestras finas que son quemadas a alta temperatura (cerca de 1000 °C) (Nelson y Sommers, 1996). La combustión de la muestra se logra en presencia de oxígeno puro, el cual actúa también como catalizador o acelerador. Otros catalizadores utilizados son el pentóxido de vanadio, Cu, CuO y óxido de aluminio. El producto final de la combustión del C es el CO₂, el cual es cuantificado por cromatografía de gases utilizando un detector de conductividad térmica o de ionización de llama.

Este método tiene grandes ventajas con respecto a otros, ya que se lleva a cabo la combustión completa de todo el COS presente en la muestra, permite procesar un gran número de muestras por unidad de tiempo y se puede cuantificar también el N total al mismo tiempo en la mayoría de los instrumentos de medición, por lo que pueden proveer información adicional importante. No obstante, su principal desventaja es que la muestra analizada es muy pequeña (de 8 a 10 mg dependiendo del equipo) y el costo del equipo requerido.

Materiales

- Suelo fino. La fineza depende de la cantidad de suelo a analizar. Normalmente el suelo es pasado por el

tamiz No. 60 (250 μm). Si se van a analizar menos de 0.1 g, se recomienda tamizar la muestra por el No. 100 de 150 μm .

- Analizador elemental que utilice combustión seca y el subsecuente análisis de CO_2 .
- Balanza analítica

Procedimiento

1. Obtener una submuestra representativa de las muestras de suelo secado al aire.
2. Las muestras y los estándares deben secarse de 60 a 70°C por 18 h antes de determinar el contenido de CO. Es importante eliminar el CIS antes de análisis con la adición de ácido, o analizar el C inorgánico por separado para luego restárselo al C total (CT).

4.6 Análisis de carbono por el método de Walkley y Black

Este método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo (COS) por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarse con ácido sulfúrico concentrado. Después de treinta minutos la mezcla se diluye y se adiciona ácido fosfórico para evitar interferencias de Fe^{3+} y el dicromato de potasio residual es valorado con sulfato ferroso.

El método requiere un mínimo de equipo, es simple y rápido, por lo que es el más utilizado a nivel mundial. Sin embargo, la oxidación del COS está incompleta, con una tasa de recuperación del 60 al 86%, con un promedio del 75%, por lo tanto, es necesario introducir un factor de corrección, el cual puede variar entre suelo y suelo. En los suelos de México se recomienda utilizar el factor 1.298 (1/0.77). Otra desventaja de este método es que, además del material recalcitrante como el biocarbono, la presencia de óxidos de hierro y magnesio en suelos erosionados pueden producir interferencias.

Materiales y equipo

- Matraces Erlenmeyer de 500 ml

- Bureta para $K_2Cr_2O_7$ (50 ml)
- Bureta para $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (50 ml)
- Pipeta volumétrica (10 ml)
- Probeta de vidrio (250 ml)

Reactivos y soluciones

- Dicromato de potasio 0.166 M o 1 N. Disolver 48.82 g de $K_2Cr_2O_7$ en agua destilada aforar a 1000 ml en un matraz volumétrico.
- Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4)
- Ácido fosfórico concentrado (H_3PO_4)
- Difenilamina como indicador. Disolver 0.5 g de difenilamina en 20 ml de agua y añadir 100 ml de ácido sulfúrico concentrado.
- Sulfato ferroso amoniacal 0.5 N. Disolver 196.1 g de $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ en 800 ml de agua destilada con 20 ml de H_2SO_4 concentrado y aforar a 1 l.

Procedimiento

- 1 Colocar en un matraz Erlenmeyer de 500 ml 0.5 g de suelo, previamente tamizado en una malla No. 60.
- 2 Añadir 10 ml de solución de dicromato de potasio 1 N y 20 ml de H_2SO_4 concentrado, homogenizar durante un minuto y se reposar durante treinta minutos.
- 3 Agregar 200 ml de agua destilada y 10 ml de ácido fosfórico al 85%.
- 4 Adicionar 1 ml de solución indicadora de difenilamina.
- 5 Titular con solución de sulfato ferroso amoniacal hasta el viraje de color azul petróleo a un verde brillante.
- 6 Simultáneamente se realiza el mismo procedimiento descrito, pero sin adición de muestra, como blanco del ensayo.

Interpretación de los resultados

Los cálculos para obtener el porcentaje de CO (Ecuación 15) se realizan con la siguiente ecuación:

$$\%C \text{ orgánico} = \left(\frac{B-T}{g}\right) (N)(mcf = 0.39) \quad (15)$$

Donde:

B: volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (ml).

T: volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (ml).

N: normalidad exacta del sulfato ferroso (valorar por separado al momento de analizar las muestras).

g: peso de la muestra empleada (g).

mcf: factor de corrección de humedad = 0.39

En donde el factor de corrección de humedad (mcf) es un valor porcentual que resulta de multiplicar el peso en miliequivalente de carbono por el factor de corrección de la oxidabilidad.

$$\text{El peso en miliequivalente del C} = \frac{12}{4000} = 0.003$$

Factor de corrección $\frac{1}{0.77} = 1.298$, dado que el método sólo oxida el 77% del C

100 = la conversión a porcentaje

$$mcf = 0.003 * 1.298 * 100 = 0.39$$

4.7 Otros métodos para el análisis de carbono

Existen otras metodologías para determinar carbono orgánico. La técnica de pérdida de peso por ignición genera un estimado del MOS, pero no provee información directa del contenido de COS, que es proporcional al mismo en un rango entre 43 y 58%. Está basado en la oxidación del suelo a una temperatura cercana a los 550°C por al menos 3 h. El contenido de MOS (Ecuación 16) es la diferencia entre la masa del suelo antes y después de la ignición:

$$\text{MOS (\%)} = \frac{Ms_{105^{\circ}\text{C}} - Ms_{550^{\circ}\text{C}}}{Ms_{105\text{p}} \times 100} \quad (16)$$

Donde:

MOS: Materia orgánica del suelo en %

Ms_{105°C}: Masa del suelo a 105°C g

Ms_{550°C}: Masa del suelo a 550°C g

Ms_{105p}: Masa del suelo a 105°C g

La principal limitante de este método es que sobreestima la cantidad de MOS por la pérdida de agua estructural, principalmente de los aluminosilicatos hidratados, porque las temperaturas sobre 150°C eliminan el agua higroscópica e intercrystalina de arcillas cristalinas y alofano. Otros errores que generan la sobrestimación son debidos a la liberación de CO₂ de la descomposición de carbonatos minerales y algunas sales hidratadas, así como de la pérdida de agua de grupos hidroxilo en sesquióxidos (Goldin, 1987). Se debe emplear siempre un factor de corrección de arcilla para compensar la pérdida de agua estructural. No obstante, una gran ventaja de este método es que requiere equipamiento básico (mufla, balanza analítica y desecador) y no necesita reactivos, por lo que tiene un bajo impacto ambiental, a la par que se pueden analizar una gran masa de muestras, de 40 a 2000 veces más que en la combustión seca u oxidación húmeda, que disminuyen el error analítico.

Dado que otros métodos pueden ser laboriosos y costosos, la espectroscopia puede ser utilizada para analizar C. Este método alternativo es rápido, de bajo costo y no destructivo (Viscarra-Rossel *et al.*, 2016). Esta técnica utiliza la interacción de la radiación electromagnética con la materia para caracterizar la composición física y bioquímica de las muestras de suelo. El principio es que la luz es dirigida a una muestra de suelo y las propiedades de la luz reflejada (visible-infrarrojo cercano, infrarrojo cercano o infrarrojo medio) representan las vibraciones moleculares que responden a la composición mineral y orgánica del suelo. La luz reflejada o absorbida es colectada a diferentes longitudes de onda por un detector, creando un patrón referido como espectro. Las firmas espectrales proveen tanto una señal integrada de las propiedades funcionales como la capacidad de predecir una serie de propiedades del suelo medidas de manera convencional (Nocita *et al.*, 2015).

Por otro lado, se han desarrollado varios métodos matemáticos y sus combinaciones para desarrollar modelos que estimen el COS y otras propiedades del suelo. Estos modelos quimiométricos pueden generarse a diferentes escalas, desde regionales a locales, para la estimación de COS (Clairotte *et al.*, 2016).

Otras técnicas emergentes son la espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS, del inglés Laser-induced breakdown spectroscopy) (Senesi y Senesi, 2016; Knadel *et al.*, 2017) y la espectroscopía inducida de rayos gamma (Wielopolski *et al.*, 2010). La LIBS es una técnica costo efectiva con potencial para analizar rápidamente los elementos presentes en el suelo. Se ha utilizado satisfactoriamente para medir CT en combinación con calibración multivariable (Da Silva *et al.*, 2008; Belkov *et al.*, 2009), así como para diferenciar C orgánico e inorgánico.

4.8 Cálculo de la cantidad de COS

El COS almacenado es la cantidad de C orgánico en una capa fija del suelo por unidad de área (Ecuación 17). Este parámetro varía con la densidad aparente de la zona donde se toman las muestras, por lo cual es más conveniente expresar la cantidad de COS en Mg C ha⁻¹ a una profundidad específica, para lo cual se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{COS} \left(\frac{\text{ton}}{\text{ha}} \right) = \text{COS} \times (\text{D.A.} \times \text{P} \times 10,000) * 1000 \quad (17)$$

Donde:

COS: COS g C. kg suelo⁻¹

D.A: densidad aparente del suelo (g.cm³)

P: profundidad del muestreo (m)

Si existe grava en la muestra de suelo, los resultados deben ser ajustados antes del análisis de carbono, ya que la densidad aparente es diferente.

5.- RECOMENDACIONES

Los métodos aquí explicados para la estimación de los almacenes de carbono orgánico son aplicables a sitios donde los cambios temporales son atribuibles a los procesos biológicos (principalmente el balance entre las entradas y salidas de C), más que a procesos físicos (como erosión del suelo y deposición).

Las técnicas descritas en el presente documento son las más utilizadas para determinar carbono sobre el suelo y estrato arbóreo. La utilización del mismo dependerá del presupuesto del proyecto. Así, por ejemplo, podemos elegir un método rápido, preciso y de alto costo, sin embargo, es claro que no siempre es posible, por lo que se propone utilizar un método manual, en donde es recomendable la debida repetición de análisis en laboratorio, en caso de variables sensibles como lo es la densidad aparente.

También se recomienda en la etapa de muestreo de suelos, tomar muestras compuestas anterior al muestreo final, con el objetivo de determinar la variabilidad del área de estudio y de esta manera obtener un tamaño de muestra que nos permita la debida veracidad en los resultados.

Por otra parte, la aplicación de modelos alométricos resulta ser una técnica rápida, fácil y económica para cuantificar el carbono arbóreo, no obstante, para el caso particular de árboles frutícolas, resulta difícil encontrar ecuaciones, por ello, se recomienda la generación de las mismas, sobre todo en aquellas especies que se considera de mayor potencial debido a la superficie que ocupen a nivel nacional, o bien, aquellas de rápido crecimiento o mayor producción de biomasa, esto pensando en ganar terreno en términos de almacenamiento o secuestro de carbono. Asimismo, no se puede dejar de mencionar la generación de ecuaciones para la estimación de la biomasa subterránea, en donde generalmente la raíz tiende a presentar un valor sobre estimado o subestimado.

6.- AGRADECIMIENTOS

Para la generación de la información contenida en el presente documento y su publicación, se agradece el apoyo otorgado a través del proyecto titulado “Impacto de la Aplicación de Biofertilizantes en el Secuestro de Carbono y el Estado de la Materia Orgánica del Suelo” financiado por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.

7.- LITERATURA CITADA

Albaladejo, J., Ortiz, R., García-Franco, N., Navarro, A. R., Almagro, M., Pintado, J. G., and Martínez M., M. (2013). Land use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain. *Journal of Soils and Sediments*, 13(2), 265-277.

Avendaño H.D., M. Acosta M., F. Carrillo A. y Etchevers B. J. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Fitotecnia Mexicana*. 32 (3): 233-238.

Belkov, M.V., Burakov, V.S., De Giacomo, A., Kiris, V.V., Raikov, S.N. and Tarasenko N.V. (2009). Comparison of two laser-induced breakdown spectroscopy techniques for total carbon measurement in soils, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 64, 899-904.

Betancourt, M., Reyes, N., Vázquez, D., Dufo, M. D., García, M. E., and Álvarez, A. (2014). First Quantitative Estimates of Carbon Retention by Citrus Groves under Cuba's Conditions. *American Journal of Climate Change*, 3(02):130.

Blake, G.R. and Hartge, K.H. (1986). Bulk density. In Klute, A., Gaylon, S., Campbell, R. D. and Jackson, R.D. (Eds) *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and mineralogical methods*. Second edition. SSSA/ASA Madison, Wisconsin, USA. pp. 363-382.

Blankinship, J.C., Niklaus, P.A. and Hungate, B. A. (2011). A meta-analysis of responses of soil biota to global change. *Oecologia*. 165(3): 553-565.

Brown, J. K. (1974). Handbook for inventorying downed woody material. Gen. Tech. Rep. INT-16. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 16.

Brus, D.J. (2014). Statistical sampling approaches for soil monitoring. *European Journal of Soil Science* 65, 779-791.

Brus, D.J. and J. De Gruijter J. (1997). Random sampling or geostatistical modelling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with discussion). *Geoderma* 80, 1-44.

- Butler, J.H. and Montzka S.A (2019). The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI). www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html. Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera, 2019: NOAA's annual greenhouse gas index, <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>.
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H. y Baumgardner G. A (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111(1), 1-11.
- Camacho, M. (2000). Parcelas permanentes de muestreo en bosque natural tropical; guía para el establecimiento y medición. Ed. Por E. Mora. *Turrialba*, Costa Rica. CATIE. 52 p.
- Cantú M.P.C. (2016). Ecos de la conferencia sobre el cambio climático de París-COP 21. *Ciencia UANL*, 19(77), 30-34.
- Carvajal, M., Mota, C., Alcaraz-López, C., Iglesias, M. y Martínez-B. M. C. (2009). Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas: Murcia*, Spain.
- Chevallier, T., Cournac, L., Bernoux, M., Cardinael, R., Cozzi, T., Girardin, C. and Chenu C (2017). Soil inorganic carbon and climate change in drylands. An emerging issue? In: *Proceedings of the Global Symposium on Soil Organic Carbon*. FAO, Rome, Italy. pp. 482-485.
- Cielsa, W. (1996). Cambios climáticos, bosques y ordenación forestal: una visión de conjunto. Roma, Italia, FAO. 146 p.
- Clairotte, M., Grinand, C., Kouakoua, E., Thébault, A., Saby, N.P.A., Bernoux, M. and Barthès, B. B. (2016). National calibration of soil organic carbon concentration using diffuse infrared reflectance spectroscopy. *Geoderma*. 276, 41-52.
- Clutter, J.L., Fortson, J.C., Pienaar, L.V., Brister, G.H. and Bailey R. L (1983). *Timber management: A quantitative approach*. New York, US. 333 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2011). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Procedimientos de muestreo*. Zapopan Jalisco. 140 p.

- Conant, R. T., Ogle, S. M., Paul, E. A. and Paustian K (2011). Measuring and monitoring soil organic carbon stocks in agricultural lands for climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9, 169-173.
- Couteaux, M.M., P. Bottner and Berg B. (1995). Litter decomposition, climate and litter quality. *Trends in Ecology and Evolution* 10: 63–66.
- Cresswell, H.P. and J. Hamilton, G. 2002. Bulk density and pore space relations. In: McKenzie, N., Coughlan, K. and Cresswell, H. (Eds.) *Soil physical measurement and interpretation for land evaluation*. CSIRO Publishing: Melbourne. pp. 35-58.
- Da Silva R., Milori M.B.P.D., Ferreira C.E., Ferreira J.E, Krug, J.F. and Martin N.L 2008. Total carbon measurement in whole tropical soil sample, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 63, 1221-1224.
- Del Valle-Arango, J.I. (2003). Descomposición de la hojarasca fina en bosques pantanosos del Pacífico Colombiano. *Interciencia* 28: 148-153.
- Doney, S.C., Fabry, V.J., Feely, R.A. and Kleypas, J.A (2009). Ocean acidification: the other CO² problem. *The Annual Review of Marine Science*. 1: 169-192.
- Emmer, I. (2007). Manual de contabilidad de carbono y diseño de proyectos. Proyecto Encofor. Quito, Ecuador. 22 p.
- FAO. (2018). Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems – Guidelines for assessment (Draft for public review). Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. FAO, Rome, Italy.
- Feller, C., Marsily, G. D., Mougin, C., Peres, G., Poss, R. y Winiarski, T. (2016). Le sol: une merveille sous nos pieds. Paris: Belin, 213-231. (Bibliothèque Scientifique). ISBN 978-2-7011-8349-7.
- Goldin, A. (1987). Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in noncalcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 18, 1111-1116.

Honorio, E., Coronado N y Baker T.R (2010). Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana / Universidad de Leeds. Lima.

IPCC. Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC. Hayama, Japan.

Kish L. (1995). Survey sampling. Nueva York: Wiley Classics Library.

Knadel, M., Gislum, R., Hermansen, C., Peng, Y., Moldrup, P., de Jonge, L. W. and Greve, M. H. (2017). Comparing predictive ability of laser-induced breakdown spectroscopy to visible near-infrared spectroscopy for soil property determination. *Bio systems engineering*, 156, 157-172.

Lal, R. (1997). Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. *Soil and Tillage Research*, 43:81–107

León-Rico, R. (2003). Efectos de la descomposición, la frugivoría y la remoción de frutos y semillas de especies arbóreas sobre los patrones de descomposición in situ en el suelo de la selva húmeda. En: *Ecología Del Suelo en la Selva Tropical Húmeda de México*. Álvarez-Sánchez, J. y E. Naranjo-García (eds.). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. Facultad de Ciencias. Instituto de Ecología, A.C. México. 89-107.

Lin, Y.P., Liu, C.P and Lin J.C (2002). Measurement of specific gravity and carbon content of important timber species in Taiwan. *Journal of Forest Science*, 17(3): 291- 299.

Loeppert, R.H. and Suarez, D.L. (1996). Carbonate and gypsum. In: Sparks, D.L. et al. (Eds) *Methods of soil analysis, Part 3, Chemical methods*. SSSA Book Series, SSSA/ASA, Madison, Wisconsin, USA. pp. 437-474.

Loveland T.R. and Belward, A. S. (1997). The international geosphere biosphere programed data and information system global land cover data set (DISCover). *Acta Astronautica*, 41(4-10), 681-689.

MacDicken, K. (1997). A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Arlington, US, Winrock International. 87 p.

Magaña, R.V.O. (2004). El cambio climático global: comprender el problema. Cambio Climático: una Visión desde México. INE-SEMARNAT. 17-27p

Mata, M. C. y Macassi S. (1997) Cómo elaborar muestras para los sondeos de audiencias. Cuadernos de investigación No 5. ALER, Quito.

Mostacedo, B. y Fredericksen T. (2000). Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal. Santa Cruz de la Sierra Bolivia. 87 p.

Murillo, O., Badilla, V y Morales S. (2012). Método de inventario para plantaciones pequeñas. *Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica, 4-5.

Murillo, O., Badilla, Y. y Gallegos A. (2003). Calidad en el Establecimiento de Plantaciones Forestales. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 36 p.

Nelson, D.W. and Sommers L.E (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks, D.L., et al. (Eds.) Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods, SSSA Book Series No. 5, SSSA and ASA, Madison, WI. pp. 961-1010.

Nocita, M., Stevens, A., van Wesemael, B., Aitkenhead, M., Bachmann, M., Barthès, B., Ben Dor, E., Brown, D.J., Clairotte, M., Csorba, A., Dardenne, P., Demattê, J.A.M., Genot, V., Guerrero, C., Knadel, M., Montanarella, L., Noon, C., Ramirez-Lopez, L., Robertson, J., Sakai, H., Soriano-Disla, J.M., Shepherd, K.D., Stenberg, B., Towett, E.K., Vargas, R. and J. Wetterlind. (2015). Soil spectroscopy: An alternative to wet chemistry for soil monitoring. In: Sparks, D.L. (Ed) *Advances in Agronomy*. Academic Press. pp. 139-159.

Otzen, T. y Manterola C. (2017). Técnicas de Muestreo sobre una Población. Estudio. *International Journal of Morphology*, 35(1), 227-232.

Peri, P., Viola, M y Martínez G. (2004). Estimación de biomasa y secuestro de carbon en bisques nativos de Ñire (*Nothofagus antarctica*) en Patagonia Sur. *Publicación técnica forestal* 24. Convenio IRTA-UMPA-CAP. Argentina.

Quiceno U.N.J., Tangarife M.G.M., y Álvarez L. R. (2016). Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chigüiro-Chátare de barrancominas, departamento del Guainía (Colombia). *Luna Azul*, (43):171-202.

Raj, D. (1980): Teoría del muestreo (Sampling Theory, 1968), traducción de Roberto R. Reyes-Mazzoni, Fondo de Cultura Económica, México.

Renolfi, R. Dallatea, F. Perez, H. y Kunst, C. 1986. Métodos de estimación de la biomasa aérea (hojas) de especies leñosas arbóreas y arbustivas. Boletín Técnico N° 1, Sección Recursos Naturales y Producción Animal. INTA. FAO, UNESCO, MAB. Santiago del Estero, Argentina. 16 p.

Rodríguez, L. (2007). Protocolo de Kyoto: Debate sobre ambiente y desarrollo en las discusiones sobre Cambio Climático. *Gestión y Ambiente*, 10(2): 119-128.

Rügnitz, M. T., Chacón, M. L. y Porro R (2009) Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). 1. ed. Lima, Perú. 79 p.

Sala, E., L. Parton, A. Joyce and K. Lauenroth. (1988). Primary production of the central grassland region of the United States: spatial pattern and major controls. *Ecology* 69: 40-45.

Salas, J.S. y Infante A. (2006). Producción primaria neta aérea en algunos ecosistemas y estimaciones de biomasa en plantaciones forestales. *Revista Forestal Latinoamericana* 40: 47-70.

Sánchez, S. y Murillo O. (2004). Desarrollo de un método para controlar la calidad de producción de plántulas en viveros forestales: estudio de caso con ciprés (*Cupressus lusitanica*). *Agronomía Costarricense*, 28(2): 95-106.

Sasse, J., Martinoia, E. and Northen, T. (2018). Feed your friends: do plant exudates shape the root microbiome? Trends in plant science, 23(1): 25-41.

Schlesinger, W.H. and Bernhardt, E.S. (2013). Biogeochemistry: an analysis of global change. Third Edition. Academic Press, New York.

Schumacher, B.A. (2002). Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments. Ecological Risk Assessment Support Center, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas. 23 pp.

Seeberg, E.C. (2010). Las posibilidades de financiación del carbono para la agricultura, la actividad forestal y otros proyectos de uso de la tierra en el contexto del pequeño agricultor. Departamento de Gestión de Recursos Naturales y Medio Ambiente, *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)* Roma. 29 p.

Segura, M., Kanninen, M., and Suárez D (2006). Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems*, 68(2), 143-150.

Segura, M. y Andrad H. J. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería en las Américas* N° 46 2008. CATIE. Costa Rica.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Diario Oficial de la Federación. 31 de diciembre de 2002. Segunda edición. México, D F., México. 85 p.

Senesi G.S. and Senesi N. (2016). Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) to measure quantitatively soil carbon with emphasis on soil organic carbon. *A review. Analytica Chimica Acta* 938, 7-17.

Serna M., Y. B., Borja de la Rosa, A., Fuentes S., M., y A. Corona A. (2011). Propiedades tecnológicas de la madera de algarrobo (*Hymenaea oblongifolia* Huber), de Bagadó-Chocó,

Colombia. *Revista Chapingo*. Serie ciencias forestales y del ambiente, 17(3), 411-422.

Smith, P. (2014). Do grasslands act as a perpetual sink for carbon? *Global Change Biology* 20, 2708-2711.

Smith, P., Fang, C., Dawson, J. J., and Moncrieff, J. B. (2008). Impact of global warming on soil organic carbon. *Advances in agronomy*, 97, 1-43.

Snowdon P, Raison J, Keith H, Montagu K., Bi H., P Ritson P, Grieson P., Adams M, Burrows W. and Eamus D. (2001). Protocol for sampling tree and stand biomass, National Carbon Accounting System technical report. *Australian Greenhouse Office*. 3:114 p.

Spitler, P. (1995). Guía Técnica para el Inventario Rápido de Bosques Secundarios en la Zona Norte de Costa Rica. *Coseforma*. Alajuela, Costa Rica. 20 p.

Tarnocai, C., Canadell, J. G., Schuur, E. A., Kuhry, P., Mazhitova, G., and Zimov, S. (2009). Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global biogeochemical cycles*, 23(2).

Thennarasu, A., Sivakumar, T., Meenakshisundaram, S., Sankaran, V. M., and Vanan, T. T. (2014). Carbon Sequestration Potential of Fodder Maize (*Zea Mays L.*) Influenced by Manure Treatment Techniques. In *International Conference on Food, Agriculture and Biology (FAB-2014)* Kuala Lumpur, Malaysia. (Vol. 10).

Van Wagner, C. E. (1982). Practical aspects of the line intersect method (Vol. 12). Chalk River, Canada: Petawawa National Forestry Institute.

Venturi, V. and Keel, C. (2016). Signaling in the rhizosphere. *Trends in plant science*, 21(3), 187-198.

Viscarra-Rossel R.A., Brus D.J., Lobsey C., Shi Z. and McLachlan G. G. (2016). Baseline estimates of 4881 soil organic carbon by proximal sensing: Comparing design-based, model-assisted and model4882-based inference. *Geoderma* 265, 152-163.

Walker, S.M., Pearson, T.R.H., Harris, N., MacDicken, K., y Brown, S. (2009). Procedimientos operativos estándar para la medición de carbón terrestre. Winrock International.

Walkley, A. and Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining 4887 organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil 4888 constituents. *Soil Science* 63, 251-263.

Whitehead, D., Baisden, T., Beare, M., Campbell, D., Curtin, D., Davis, M., Hedley, C., Hedley, M., Jones, H., Kelliher, F., Saggart, S. and Shipper L (2012). Review of soil carbon measurement methodologies and technologies, including nature and intensity of sampling, their uncertainties and costs. Ministry for Primary Industries. Technical Paper by Landcare Research No. 2012/36. ISBN No: 978-0-478-40450-0 (online).

Wielopolski, L., Yanai, R.D., Levine, C.R., Mitra, S. and Vadeboncoeur M.A (2010). Rapid. Destructive carbon analysis of forest soils using neutron-induced gamma-ray spectroscopy. *Forest Ecology and Management* 260, 1132-1137

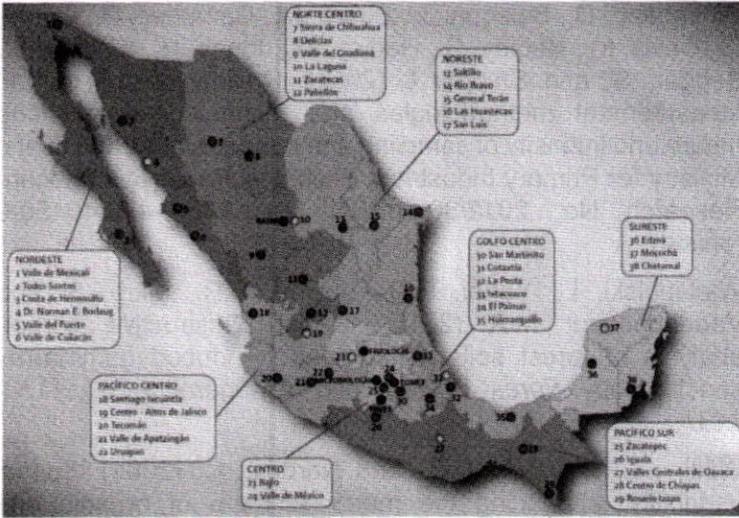
Wilding L.P., Drees, L.R., and Nordt L. C. (2001). Spatial variability: enhancing the mean estimate of organic and inorganic carbon in a sampling unit. In R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett, and B.A. Stewart, Eds. *Assessment Methods for Soil Carbon*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.69–86.

Woomer, P.L. and Palm C.A. (1998). An approach to estimating system carbon stocks in tropical forests and associated land uses. *Commonw. For. Rev.* 77: 181-190

World Meteorological Organization (WMO). (2016). The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2015. *Greenhouse Gas Bulletin*. No. 12.

https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3084. Consultado el 22 Mayo 2019.

Centros Nacionales de Investigación Disciplinaria, Centros de Investigación Regional y Campos experimentales



- Sede de Centro de Investigación Regional
- Centro Nacional de Investigación Disciplinaria
- Campo experimental

Comité editorial del CENID-RASPA

Presidente: Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Secretario: Dr. Juan Estrada Ávalos

Vocales: MC. Miguel Rivera González
MC. Gerardo Esquivel Arriaga

Revisor técnico

Dra. María Inés Yáñez Díaz
Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ciencias Forestales

Edición y diseño

Dra. Erika Nava Reyna y
M.C Vicenta Constante García

La presente publicación se terminó de imprimir en
Noviembre del 2019 en **Carmona Impresores, S.A. de C.V.**
Blvd. Paseo del Sol # 115 Col. Jardines del Sol
C.P. 27014 Torreón, Coahuila, México.

Su tiraje consta de 500 ejemplares.

**CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA
EN RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA**

DR. JUAN ESTRADA ÁVALOS
Director

ING. ARMANDO ESTRADA GONZALEZ
Jefe de operación

LIC. FLOR CARINA ESPINOZA DELGADILLO
Jefatura administrativa

PERSONAL INVESTIGADOR

Bueno Hurtado Palmira
Catalán Valencia Ernesto Alonso
Cerano Paredes Julián
Constante García Vicenta
Delgado Ramírez Gerardo
Esquivel Arriaga Gerardo
González Barrios José Luis
González Cervantes Guillermo
Inzunza Ibarra Marco Antonio
Jacobó Salcedo María del rosario
Macías Rodríguez Hilario
Muñoz Villalobos Jesús Arcadio
Nava Reyna Erika
Rivera González Miguel
Sánchez Cohen Ignacio
Trucíos Cacio Ramón
Villa Castorena María Magdalena
Villanueva Díaz José

www.inifap.gob.mx

Los niveles de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera han incrementado en los últimos años, provocando cambios en el patrón climático del planeta, generando eventos climáticos extremos que han evidenciado la vulnerabilidad tanto de los ecosistemas terrestres como del ser humano. Ante esto, surgen acuerdos internacionales que buscan reducir el nivel de CO₂ en la atmósfera, con la encomienda de depositarlo en los reservorios naturales respectivos. Esto, exige metodologías y procedimientos para corroborar la captura y almacenamiento del mismo en diferentes usos de la tierra, y en donde es importante seguir metodologías establecidas para poder comparar entre regiones y ecosistemas. Por ello, el presente documento tiene la finalidad de abordar los principales métodos para evaluar los contenidos de carbono en el suelo y estrato arbóreo, dentro de una de las áreas que se cree, aporta poco a la problemática ambiental como el sector agrícola-frutícola.



SADER

SECRETARÍA DE AGRICULTURA
Y DESARROLLO RURAL

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias