

# PROTOCOLO DE MEDICIÓN/MONITOREO SEMICUANTITATIVO DE LOS PRINCIPALES ALMACENES DE CARBONO EN USOS DEL SUELO

## SEMI-QUANTITATIVE MEASUREMENT/MONITORING PROTOCOL OF THE MAIN CARBON STOCKS IN LAND USES

Fernando Paz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Programa Mexicano del Carbono y Colegio de Postgraduados, Estado de México, México  
Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

### RESUMEN

El monitoreo comunitario forestal de los almacenes de carbono ha sido promovido como una forma económica y precisa comparable a los inventarios profesionales, que además promueve la gobernanza, empoderamiento y construcción de capacidades de comunidades. En este trabajo se presentan protocolos de muestreos cualitativos y semicuantitativos de los principales almacenes del sistema suelo-vegetación en ecosistemas terrestres: biomasa aérea y subterránea, y suelo. Los protocolos pueden ser extendidos para su uso en dispositivos móviles para aplicaciones más precisas y rápidas.

**Palabras clave:** *biomasa aérea y subterránea, suelo, técnica de Bitterlich, densidad aparente del suelo, color del suelo, carbono orgánico del suelo, dispositivos móviles*

### ABSTRACT

Forest community monitoring of carbon stocks has been promoted as an economical and accurate way comparable to professional inventories, which also promotes community governance, empowerment and capacity building. In this work, qualitative and semiquantitative sampling protocols are presented for the main stocks of the soil-vegetation system in terrestrial ecosystems: above and below ground biomass, and soil. Protocols can be extended for use on mobile devices for more accurate and faster applications.

**Key Words:** *above and below ground biomass, soil, Bitterlich technique, soil bulk density, soil color, soil organic carbon, mobile devices*

### INTRODUCCIÓN

La evaluación de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) requiere de la estimación de los contenidos de carbono en los almacenes del sistema suelo-vegetación: biomasa aérea y subterránea, material leñoso caído, mantillo y suelo. Aunque se han propuesto diferentes mecanismos de acciones de mitigación, el mecanismo REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación forestal evitada más conservación e incremento de almacenes de carbono y manejo forestal sustentable) (Angelsen *et al.*, 2021) está orientado a la mitigación de gases efecto invernadero del sector forestal bajo los auspicios de la Convención Marco de las Naciones Unidas ante el Cambio Climático, por lo que se ha promovido su implementación. El sistema de medición/monitoreo, reporte y verificación (MRV) de REDD+ (Hewson *et al.*, 2014; IPCC, 2003, 2006; GOFC-GOLD, 2016; FAO, 2020; Climate Action Reserve, 2020; VCS, 2020) es una tarea crítica para su implementación.

El termino monitoreo comunitario es utilizado en este trabajo para denotar monitoreos precisos, rápidos y de bajo costo, además de su uso convencional.

Las estimaciones de carbono en los almacenes del sistema suelo-vegetación se han propuesto a través de profesionales y por las comunidades. La participación de las comunidades forestales en el sistema MRV ha sido promovida en su rol potencial para colecta de datos de calidad y menor costo (Skutsch, 2011; Hawthorne *et al.*, 2016). El monitoreo de la biomasa aérea y monitoreo social y ambiental por las comunidades es comparable al monitoreo por profesionales y de costos menores (Larrazábal., 2012; Pratihast *et al.*, (2013).

Las mediciones realizadas por las comunidades requieren de su validación (auditoria) por profesionales para analizar su calidad e incertidumbre (Palmer Fry, 2011; Pratihast *et al.*, 2013). En las revisiones de la precisión y exactitud de las mediciones comunitarias ha sido verificado que éstas son comparables a las realizadas por profesionales (Hawthorne *et al.*, 2016), con resultados mejorados sociales y ambientales, incrementándose éstas con muestreos frecuentes (Brofeldt *et al.*, 2014)

La implementación del monitoreo comunitario forestal convencional está basada en la adopción de metodologías estándares de monitoreo profesional, con protocolos y guías asociadas (Skutsch, 2011; Brofeldt *et al.*, 2013). Independientemente del involucramiento de las comunidades en las mediciones/monitoreos, el uso de técnicas rápidas y de bajo costo es un objetivo interesante de alcanzar, sobre todo por su costos y tiempos bajos.

El Programa Mexicano del Carbono ha estado experimentando con sistemas de monitoreo comunitarios desde el 2011 (PMC, 2011a, b, c; PMC, 2015), con resultados mixtos (Paz *et al.*, 2012; Rojas-García *et al.*, 2014), por lo que en este trabajo se define un protocolo de implementación semicuantitativo para su uso en forma rápida, precisa y confiable.

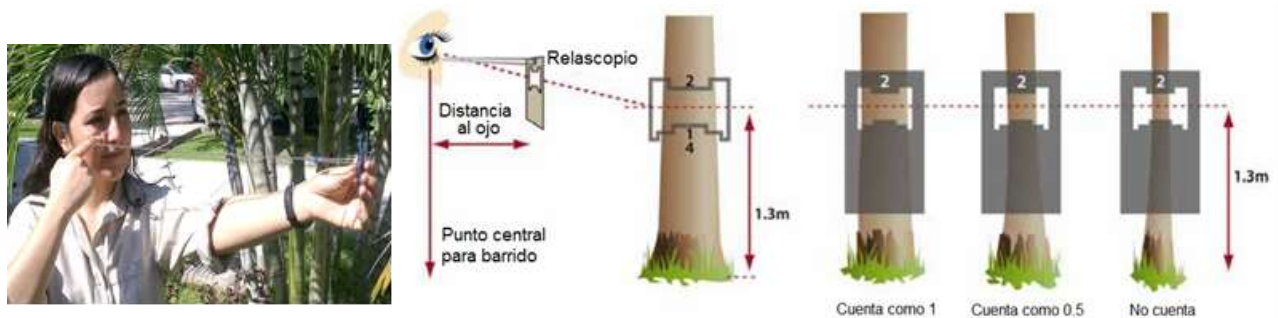
## PROTOCOLO DE MEDICIÓN Y MONITOREO

En esta sección se presentan las metodologías para la medición/monitoreo de los principales almacenes de carbono: biomasa aérea y subterránea, y suelo.

### Biomasa aérea

Las estimaciones de la biomasa aérea generalmente son realizadas con el uso de relaciones alométricas generales relacionadas con el diámetro normal  $D_n$  (de Jong *et al.*, 2010) o específicas relacionadas con el diámetro normal y la altura total (Rojas-García *et al.*, 2015).

Para estimar el área basal de los árboles en la parcela se utiliza el relascopio de Bitterlich (Romanh de la Vega, 1999), tal como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1. Uso del relascopio de Bitterlich y conteo de árboles para un factor de área basal (K) de 2.**

Los factores de área basal ( $K$ ) utilizados son 0.5, 1 y 2, donde el más indicado está relacionado con el número de árboles contados (Kershaw *et al.*, 2016).

Con el uso de la técnica de Bitterlich, el área basal se estima de:

$$AB = (F_{AB})NA \quad (1)$$

donde el área basal  $AB$  está en  $m^2 ha^{-1}$ ,  $F_{AB}$  es el factor de área basal ( $K$ ) y  $NA$  se refiere al número de árboles contados asociados a  $K$ , Figura 3.

Con las estimaciones de área basal, las estimaciones de biomasa aérea pueden ser realizadas con las relaciones área basal – biomasa aérea de los distintos tipos de vegetación, tal como se muestra en la Figura 2. Las relaciones de la Figura 2 fueron desarrolladas de los datos del inventario nacional forestal y de suelos (INFyS) de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), usando las ecuaciones alométricas de Rojas-García *et al.* (2015). Las ecuaciones presentadas, estado de Chiapas, en la Figura 2 pueden ser usadas para estimar la biomasa aérea a partir del área basal.

Las estimaciones de la biomasa, aérea y subterránea pueden ser convertidas a carbono (IPCC, 2003):

$$Carbono = Materia\ seca * 0.5 \quad (2)$$

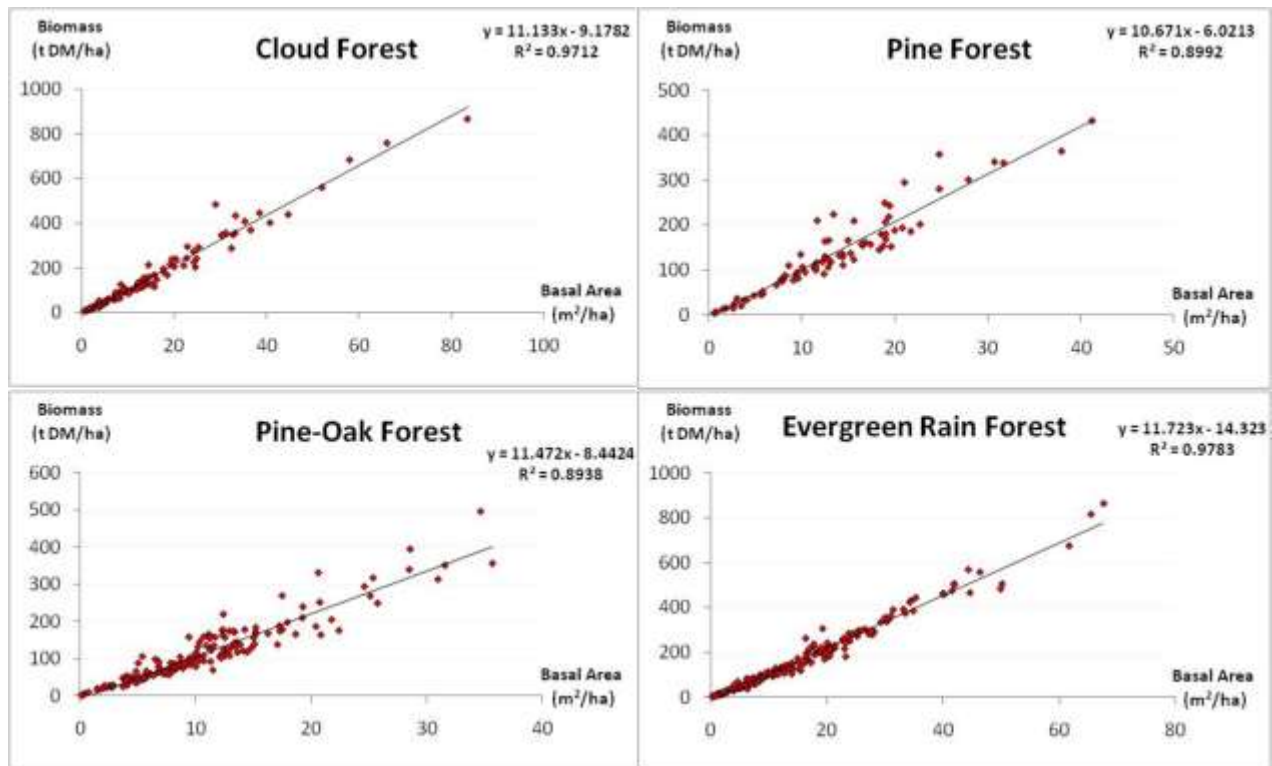
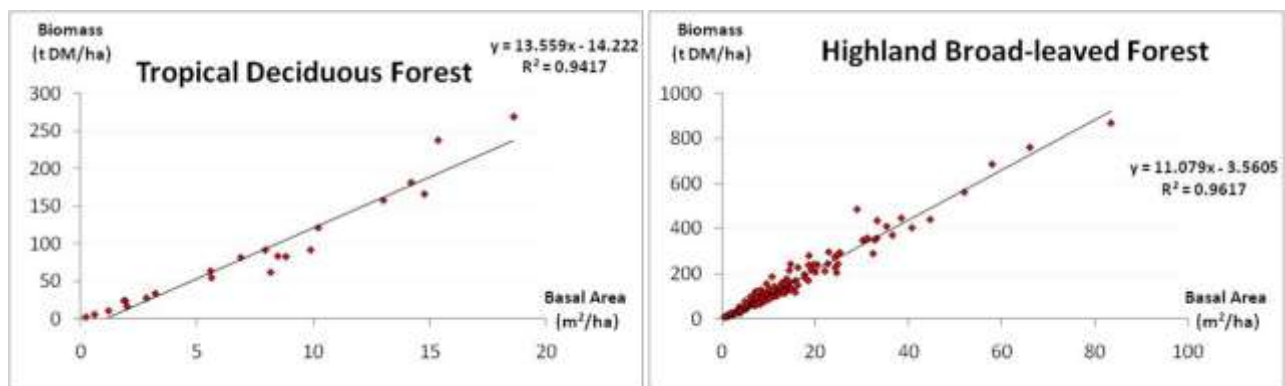


Figura 2. Relaciones área basal – biomasa para diferentes tipos de bosques en Chiapas.



## Figura 2. Relaciones área basal – biomasa para algunos tipos de bosques en Chiapas.

Las relaciones de la Figura 2 pueden ser utilizadas para los diferentes tipos de vegetación de sombra arbórea de los cafetales bajo sombra.

### Biomasa subterránea

Para estimar la biomasa subterránea se puede utilizar la ecuación alométrica de Cairn *et al.* (1997) que se encuentra en función de la biomasa aérea (BA) y por ecosistema. Las ecuaciones 3 y 4 se pueden usar para determinar la biomasa subterránea (BS).

$$BS = e^{((-1.0587)+(0.8836*\ln(BA))+0.2840)} \quad (3)$$

$$BS = e^{((-1.0587)+(0.8836*\ln(BA)))} \quad (4)$$

donde BS representa la biomasa subterránea (raíces) (Mg ha<sup>-1</sup>), BA es la biomasa aérea (Mg ha<sup>-1</sup>). La ecuación 3 se aplica a bosques templados y la ecuación 4 es para selvas.

### Suelo

La estimación del carbono orgánico del suelo (COS) puede ser realizada por (Poeplau *et al.*, 2017):

$$COS = CO_{ff}DA(1 - Fg)P \quad (5)$$

donde COS está en t C ha<sup>-1</sup>,  $CO_{ff}$  es la concentración (%) de carbono orgánico en la fracción fina del suelo ( $\leq 2$  mm),  $DA$  es la densidad aparente del suelo (g cm<sup>-3</sup>),  $P$  es la profundidad del suelo (cm) y  $Fg$  es la fracción (0-1) de fragmentos gruesos ( $> 2$  mm) en el suelo (en masa). Para la estimación del almacén del carbono orgánico del suelo (COS) se requiere conocer la fracción de fragmentos gruesos o  $Fg$  del suelo, ya que se introducen errores en las estimaciones al no considerarlo (Rytter, 2012; Mehler *et al.*, 2014; Poeplau *et al.*, 2017). Los datos de  $Fg$  son escasos en las bases de datos del COS disponibles (Kern, 1995), por lo que se requiere de su evaluación en campo o laboratorio para realizar las correcciones en el COS.

En muchas aplicaciones (Bautista *et al.*, 2016; Poeplau *et al.*, 2017) se utiliza  $Fg$  como fracción en volumen, lo cual conduce a errores de estimación; aunque puede realizarse conversiones de estimaciones volumétricas a las de masa usando la densidad de las partículas minerales (2.7 g cm<sup>-3</sup>). Mehler *et al.* (2014) han señalado que el uso de una densidad constante de las partículas minerales conduce a errores de estimación, ya que la densidad varía en función del intemperismo y porosidad interna de los suelos (Poesen y Lavee, 1994).

Para evitar errores de estimación  $Fg$  se considera como 1.0, aclarándose esto en los resultados.

Un punto crítico en las estimaciones relacionadas con la ecuación (5) es el uso de la textura del suelo. El Cuadro 1 muestra una guía (FAO, 2009) para determinar la clase textural del suelo.

### Cuadro 1. Clases texturales del suelo (FAO, 2009)

Características	Nombre	Código	Arcilla (~ %)
1. No es posible enrollar y formar un cordón cilíndrico de un diámetro cercano a 7 mm (como el diámetro de un lápiz)			
1.1 No ensucia, no es harinoso, no deja material fino en los dedos:	arena	A	< 5
+ Si el tamaño de granos es mixto:	arena no clasificada	AN	< 5
+ Si la mayoría de granos son muy gruesos (> 0.6 mm):	arena muy gruesa	AG	< 5
+ Si la mayoría de granos es de tamaño medio (0.2-0.6 mm):	arena media	AM	< 5
+ Si la mayoría de granos es de tamaño fino (< 0.2 mm), pero aún granuloso:	arena fina	Afi	< 5
+ Si la mayoría de granos son de tamaño muy fino (< 0.12 mm), tendiendo a ser harinoso:	arena muy fina	AMf	< 5
1.2 No es harinoso, granuloso, material escasamente fino entre los dedos, débilmente moldeable, ligeramente adhesivo a los dedos:	Areno francoso	AF	< 12
1.3 Similar a 1.2, pero moderadamente harinoso:	franco arenoso	FA (pobre en arcilla)	< 10
2. Es posible enrollar y formar un cordón cilíndrico de un diámetro de 3-7 mm (cerca de la mitad del diámetro de un lápiz), pero se rompe cuando se trata de formar el cordón cilíndrico de 2-3 mm de diámetro, moderadamente cohesivo, se adhiere a los dedos			
2.1 Muy harinoso y no cohesivo			
+ Se sienten algunos granos:	franco limoso	FL (pobre en arcilla)	< 10
+ No se sienten granos:	limoso	L	< 12
2.2 Moderadamente cohesivo, se adhiere a los dedos, tiene una superficie áspera y desmenuzada luego de apretarlo entre los dedos y			
+ Muy granuloso y no pegajoso:	franco arenoso	FA (rico en arcilla)	10-25
+ Granos moderadamente arenosos:	franco	F	8-27
+ No granuloso, pero distintivamente harinoso, algo pegajoso:	franco limoso	FL (rico en arcilla)	10-27
2.3 De superficie áspera y moderadamente brillante luego de apretarlo entre los dedos, es pegajoso y granuloso a muy granuloso:	franco arcillo arenoso	FYA	20-35
3. Es posible enrollar y formar un cordón cilíndrico de más o menos 3 mm de diámetro (menos de la mitad del diámetro de un lápiz) y formar un aro de 2-3 cm en diámetro, cohesivo, pegajoso, rechinarlo entre los dientes, tiene una superficie moderadamente brillante luego de apretarlo entre los dedos			
3.1 Muy granuloso:	arcillo arenoso	YA	35-55
3.2 Se ven y se sienten algunos granos, rechinarlo entre los dientes.			
+ Moderadamente plástico, superficie moderadamente brillante:	franco arcilloso	FY	25-40
+ Alta plasticidad, superficie brillante:	arcilloso	Y	40-60

### 3.3 No hay granos visibles, ni se sienten, no hay rechinamiento entre los dientes

+ Plasticidad baja:	franco arcillo limoso	FYL	25-40
+ Plasticidad alta, superficie moderadamente brillante:	arcillo limoso	YL	40-60
+ Plasticidad alta, superficie brillante:	arcilla pesada	YP	> 60

Nota: La determinación de la textura en campo puede depender de la composición mineralógica de las arcillas. La clave anterior funciona especialmente para suelos que tienen en su composición illita, clorita y/o vermiculita. Las arcillas esméctitas son más plásticas y las arcillas caolinitas son más pegajosas. Así, el contenido de arcilla puede ser sobreestimado para la primera y subestimada para la segunda.

Para el color del suelo, se requiere la caracterización del tono (también llamado Hue o Matiz) e intensidad del color del suelo. La Figura 3 muestra ejemplos de diferentes colores de los suelos en México. Se consideran únicamente los tonos más frecuentes de suelos en México, sin embargo, algunos tonos que pueden existir en territorio nacional tales como: verde-azulados, amarillos y rosas pueden ser descritos adicionalmente

Para poder realizar estimaciones de  $CO_{ff}$ , podemos usar el color de Munsell (valor y matiz), dado que se han establecido relaciones empíricas (Steinhardt y Franzmeier, 1979; Fernandez *et al.*, 1988; Franzmeier, 1988; Schulze *et al.*, 1993; Konen *et al.*, 2003; Wills *et al.*, 2007), las cuales son dependientes de la humedad del suelo (Fernandez *et al.*, 1988; Konen *et al.*, 2003) y su textura (Steinhardt y Franzmeier, 1979; Franzmeier, 1988; Schulze *et al.*, 1993).

Tono pardo o café		
	Pardo o café oscuro	Pardo o café claro
Tono rojo		
	Rojo oscuro	Rojo claro
Tono gris		
	Gris oscuro	Gris claro
Tono blanco y negro		
	Blanco	Negro
Se especifica el color del suelo en estado húmedo cuando es diferente a los anteriormente ilustrados.		
Otro color		

**Figura 3. Ejemplos de colores típicos de los suelos de México.**

Para poder realizar estimaciones de  $CO_{ff}$ , podemos usar el color de Munsell (valor y matiz) 2003. Las guías elaboradas por la FAO (2009), Cuadro 2, pueden usarse como base para establecer relaciones entre el estado de humedad, la textura y el sistema de color de Munsell de acuerdo a las clases definidas de textura y colores del suelo.

Los valores de materia orgánica del suelo (MOS) pueden ser convertidos a carbono orgánico del suelo (COS) de:

$$COS = \frac{MOS}{1.724} \quad (6)$$

El factor de conversión 1.724 ha sido validado para el caso de los suelos de México (Padilla *et al.*, 2012).

**Cuadro 3. Estimación del contenido de materia orgánica basado en el color del suelo de Munsell (FAO, 2009).**

Color	Valor Munsell	Suelo húmedo			Suelo seco		
		A	AF, FA, F	FL, L, FYL, FY, FYA, YA, YL, Y	A	AF, FA, F	FL, L, FYL, FY, FYA, YA, YL, Y
		(%)					
Gris claro	7				< 0,3	< 0,5	< 0,6
Gris claro	6,5				0,3-0,6	0,5-0,8	0,6-1,2
Gris	6				0,6-1	0,8-1,2	1,2-2
Gris	5,5			< 0,3	1-1,5	1,2-2	2-3
Gris	5	< 0,3	< 0,4	0,3-0,6	1,5-2	2-4	3-4
Gris oscuro	4,5	0,3-0,6	0,4-0,6	0,6-0,9	2-3	4-6	4-6
Gris oscuro	4	0,6-0,9	0,6-1	0,9-1,5	3-5	6-9	6-9
Gris negro	3,5	0,9-1,5	1-2	1,5-3	5-8	9-15	9-15
Gris negro	3	1,5-3	2-4	3-5	8-12	> 15	> 15
Negro	2,5	3-6	> 4	> 5	> 12		
Negro	2	> 6					

*Nota:* Si el croma está entre 3.5-6, adicionar 0.5 al valor; si el croma es > 6, adicionar 1.0 al valor.

Con el uso del modelo  $Y = a \cdot \exp(-bX)$ , los parámetros de las relaciones Valor de Munsell versus Materia Orgánica para el estado de la humedad del suelo y clase textural están mostrados en el Cuadro 4.

**Cuadro 4. Parámetros del modelo exponencial para determinar materia orgánica (%)**

Humedad suelo	Clase textural	Mínimo		Medio		Máximo	
		a	b	a	b	a	b
Húmedo	A	44.782	1.104	71.871	1.141	99.716	1.162
	AF, FA, F	45.644	1.068	104.570	1.201	177.780	1.277
	FL, L, FYL, FY, FYA, YA, YL, Y	77.785	1.104	102.850	1.094	128.390	1.089
	A	112.73	0.885	128.31	0.858	146.11	0.842
Seco	AF, FA, F	307.38	0.993	405.62	0.994	502.75	0.994
	FL, L, FYL, FY, FYA, YA, YL, Y	195.50	0.860	212.95	0.825	236.23	0.806
	Y						

## COMENTARIOS FINALES

Para extender el uso y precisión del uso de datos cuali y semicuantitativos es posible la utilización de dispositivos móviles (celulares o SmartPhones) en los monitoreos comunitarios (Pratihast *et al.*, 2013). Para el caso del área basal de los árboles, el uso de la técnica de Bitterlich ha

sido implementada en dispositivos móviles con resultados aceptables (Molinier *et al.*, 2016; Vastaranta *et al.*, 2015; Rybakov *et al.*, 2018; Ficko, 2020; Pitkänen *et al.*, 2022).

Aunque el uso de dispositivos móviles para estimar los componentes del almacén de carbono orgánico del suelo usando estimaciones indirectas y visuales ha sido propuesto usando las relaciones de FAO (2009) para la densidad aparente y la materia orgánica del suelo (Bautista *et al.*, 2016), el proceso automático de las componentes ha sido implementado en diferentes aplicaciones.

La estimación del color del suelo para la estimación de la concentración de carbono orgánico (CO) usando el sistema de color Munsell-HVC (Hue, Value, Chroma) en aplicaciones de dispositivos móviles ha sido considerada (Gómez-Robledo *et al.*, 2013; Fan *et al.*, 2017) con resultados mixtos. El uso de otros sistemas de color puede ser usados (Viscarra Rosell *et al.*, 2006). El sistema de la Comisión Internationale l'Eclairage denominado CIE-L\*a\*b\* ha sido propuesto como un sustituto mejor que el sistema de Munsell (Melville y Atkinson, 1985). El sistema CIE-L\*a\*b\* ha sido utilizados para caracterizar los óxidos de Fe del suelo (Viscarra Rosell *et al.* 2008; Moritsuka *et al.*, 2014; Kirillova *et al.*, 2015; Vodyanitskii y Kirillova, 2016; Vodyanitskii y Savichev, 2017). El carbono orgánico ha sido relacionado con L\* (Moritsuka *et al.*, 2014; Baumann *et al.*, 2016; Vodyanitskii y Kirillova, 2016) y con los parámetros L\*, a\* y b\* usando relaciones lineales (Liles *et al.*, 2013; Vodyanitskii y Savichev, 2017; Jorge *et al.*, 2021) que mejoran las correlaciones obtenidas. La humedad del suelo interfiere con las relaciones de carbono orgánico para valores mayores del 10 %, por lo que debe considerarse en el establecimiento de relaciones con CIE-L\*a\*b\* (Fu *et al.*, 2019)

Los dispositivos móviles con estimaciones del color del suelo han sido propuestos para la ciencia ciudadana (Jorge *et al.*, 2021) de estimaciones masivas. Las relaciones establecidas por FAO (2009) para el caso del color, y textura, del suelo usando el sistema de Munsell pueden convertirse al sistema CIE-L\*a\*b\* (Kirillova *et al.*, 2015) para ser usadas en estimaciones de ciencia ciudadana.

El uso de dispositivos móviles también ha sido utilizado en estimaciones de fragmentos gruesos, en términos volumétricos y gravimétricos, con resultados alentadores (Zhang *et al.*, 2019; Rahmani *et al.*, 2019; Jiang *et al.*, 2020; Gallegos *et al.*, 2021), pero todavía no pueden considerarse como operacionales.

La evaluación de la incertidumbre con la utilización conjunta de datos cuantitativos y semicuantitativos ha sido discutida por Paz (2022), lo cual permite la integración de ambos tipos de datos.

## LITERATURA CITADA

- Angelsen, A., C. Martius, V. De Sy, A.E. Duchelle, A.M. Larson and P.T. Thuy (eds.). 2021. REDD+: La Transformación. Lecciones y Nuevas Direcciones. CIFOR. Bogor, Indonesia
- Baumann, K., I. Schöning, M. Schrupf, R.H. Ellerbrock and P. Fourier. 2016. Rapid assessment of soil organic matter: soil color analysis and Fourier transform infrared spectroscopy. *Geoderma* 278:49-57
- Bautista, F., E. García and A. Gallegos. 2016. The App SOC plus a tool to estimate and calculate organic carbon in the soil profile. *Journal of Applied Research and Technology* 14:135-139
- Brofeldt, S., I. Theilade, N.D. Burgess, F. Danielsen, M.K. Poulsen, T. Adrian, T.N. Bang, A. Budiman, J. Jensen, A.E. Jensen, Y. Kurniawan, S.B.L. Laegaard, Z. Mingxu, M. van Noordwijk, S. Rahayu, E. Rutishauser, D. Schmidt-Vogt, Z. Warta and A. Widayati. 2014. Community monitoring of carbon stocks for REDD+: does accuracy and cost change over time? *Forests* 5:1834-1854
- Cairns, M., S. Brown, E. H. Helmer, and G. A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111: 1-11.
- Climate Action Reserve. 2020. Protocolo Forestal para México. Versión 2.0
- Danielsen, F., N.D. Burgess, A. Balmford, P.F. Donald, M. Funder, J.P.G. Jones, P. alviola, D.S. Balet, T. Blomley, J. Brashares, B. Child, M. enghoff, J. Fjeldsa, S. Holt, H. Hubertz, A.E. Jensen, P.M. Jensen, J. Massao, M.M. Mendoza, Y. Ngaga, M.K. Poulsen, R. Rueda, M. Sam, T. Skielboe, C. Stuart-Hill, E. Topp-Jorgensen and D. Yonten. 2009. Local participation in natural resource monitoring: a characterization of approaches. *Conservation Biology* 23:31-42
- de Jong, B., C. Anaya, O. Masera, M. Olgún, F. Paz, J. Etchevers, R.D. Martínez, G. Guerrero and C. Balbontín. 2010. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecology and Management* 260:1689-1701



- Fan, Z., J.E. Herrick, R. Saltzman, C. Matteis, A. Yudina, N. Nocella, E. Crawford, R. Parker and J. Van Zee. 2017. Measurement of soil color: a comparison between smartphone camera and the Munsell color charts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 81:1139-1146
- FAO. 2009. Guía para la Descripción de Suelos. Roma, Italia
- FAO. 2020. A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes. – GSOC-MRV Protocol. Rome, Italy doi:10.4060/cbo5gen 140 p.
- Fernandez, R.N., D.G. Schulze, D.L. Coffin and G.E. Van Scoyoc. 1988. Color, organic matter, and pesticide adsorption relationships in a soil landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1023-1026
- Ficko, A. 2020. Bayesian evaluation of smartphone applications for forest inventories in small forest holdings. *Forests* 11:1148 doi:10.3390/f11111148
- Franzmeier, D.P. 1988. Relation of organic matter content to texture and color of Indiana soils. *Proceedings of the Indiana Academy of Sciences* 98:463-471
- Fu, Y., P. Taneja, S. Lin, W. Ji, V. Adamchuk, P. Daggupati and A. Biswas. 2019. Predicting soil organic matter from cellular phone images under varying soil moisture. *Geoderma* 361:114020 doi:10.1016/j.geoderma.2019.114020
- Gallegos, A., F. García-Olía, A. Pereira-Corona and F. Bautista. 2021. Digital soil morphometrics of coarse fragments and horizon delineation in soil profiles from Central Mexico. *Geoderma Regional* 26, e00403 doi:10.1016/j.geodrs.2021.e00403
- GOFC-GOLD. 2016. A Sourcebook of Methods and Procedures for Monitoring and Reporting Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions and Removals Associated with Deforestation, Gains and Losses of Carbon Stocks in Forests Remaining Forests, and Forestation. GOFC-GOLD Report version COP22-1 (GOFC-GOLD Land Cover Project Office, Wageningen University, The Netherlands)
- Gómez Robledo, L., N. López Ruiz, M. Melgosa, A.J. Palma, L.F. Capitán Vallvey and M. Sánchez Marañón. 2013. Using the mobile phone Munsell soil-colour sensor: an experiment under controlled illumination conditions. *Computers and Electronics in Agriculture* 99:200-208
- Hawthorne, S. and M. Boissiere. 2014. Literature Review of Participatory Measurement, Reporting and Verification (PMRV). Working Paper 152. CIFOR. Bogor, Indonesia
- Hawthorne, S., M. Boissiere, M.E. Felker and S. Atmadja. 2016. Assessing the claims of participatory measuring, reporting and verification (PMRV) in achieving REDD+ outcomes: a systematic review. *Plos One* doi:10.1371/journal.pone.0157826
- Hewson, M.K. Steininger y S. Pesmajoglou (eds.). 2014. Manual de Medición, Reporte y Verificación (MRV) de REDD+ Versión 2.0. Programa de Carbono Forestal, Mercados y Comunidades financiado por USAID, Washington, D.C.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Edited by Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC.
- IPCC. 2006. Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan.
- Jiang, Z.D., Q.B. Wang, K. Adhikari, K.R. Brye, Z.X. Sun, F.J. Sun and P.R. Owens. 2020. A vertical profile imaging method for quantifying rock fragments in gravelly soil. *Catena* 193. 1045 90 doi:10.1016/j.catena.2020.104590
- Jorge, N.F., J. Clark, M.L. Cárdenas, H. Geoghegan and V. Shannon. 2021. Measuring soil colour to estimate soil organic carbon using large-scale citizen science-based approach. *Sustainability* 3. 11029 doi:10.3390/du131911029
- Kern, J.S. 1995. Geographic patterns of soil water-holding capacity in the contiguous United States. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:1126-1133
- Kershaw, J. A., M.J. Ducey, T.W. Beers and B. Husch. 2016. Forest Mensuration. 5th ed. John Wiley and Sons. doi:10.1002/9781118902028
- Kirillova, N.P., Y.N. Vodyanitskii and T.M. Sileva. 2015. Conversion of soil color parameters from Munsell system to the CIE-L\*a\*b\* system. *Eurasian Soil Science* 48:468-475
- Konen, M.E., C.L. Burras and J.A. Sandor. 2003. Organic carbon, texture, and quantitative color measurement relationship for cultivated soils in North Central Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1823-1830
- Larrazábal, A., M.K. McCall, T.H. Mwampamba and M. Skutsch. 2012. The role of community carbon monitoring for REDD+: a review of experiences. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4:707-716
- Liles, G.C., D.E. Beaudette, A.T. O'Green and W.R. Horwath. 2013. Developing predictive soil C models for soils using quantitative color measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77:2173-2181
- Mehler, K., I. Schöning and M. Beerli. 2014. The importance of rock fragment density for the calculation of soil bulk density and soil organic carbon stocks. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78:1186-1191
- Melville, M.D. and G. Atkinson. Soil colour: its measurement and its designation in models of uniform colour space. *Journal of Soil Science* 36:495-512
- Molinier, M., C.A. López-Sánchez, T. Toivanen, I. Korpela, J.J. Corral-Rivas, R. Tegujeff and T. Häme. 2016. Relasphone – mobile and participative in situ forest biomass measurements supporting satellite image mapping. *Remote Sensing* 8:869 doi:10.3390/rs8100869
- Moritsuka, N., K. Matsuoka, K. Katsura, S. Sano and J. Yanai. 2014. Soil color analysis for statistically estimating total carbon, total nitrogen and active iron contents in Japanese agricultural soils. *Soil Science and Plant Nutrition* 60:474-485
- Padilla, J., J.D. Etchevers, R.C. Gomora, C.I. Hidalgo, M. Carrasco y V. Saynes. 2012. Relación entre los métodos TOC, LOI, Walkley-Black y NIR para determinar carbono en suelos. pp. 187-194. En: F. Paz y R. Cuevas (eds.), Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México
- Palmer Fry, B. 2011. Community forest monitoring in REDD+: The “M” in MRV? *Environ. Sci. Policy* 14:181-187

- Paz, F. 2022. Monitoreo comunitario semicuantitativo: integración de datos blandos y duros. *Elementos para Políticas Públicas* 6:21-52
- Paz, F., B. de Jong, S. Covalada, M. G. Morales, I. Amezcua, J. C. Gómez, M. M. Torres y A. Vargas. 2012. Monitoreo forestal comunitario en la Sierra Madre de Chiapas. pp. 759-766. En: Paz, F. y R. Cuevas (eds.). *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2011*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.
- Pitkänen, T.P., M. Rätty, P. Korhonen and J. Vauhkonen. 2022. Using auxiliary data to rationalize smartphone pre-harvest forest mensuration. *Forestry* 95:247-260
- PMC. 2011a. Manual de criterios para la selección de las parcelas de muestreo cuantitativas y semicuantitativas (Versión 1.31). Coordinación: F. Paz, Colaboradores: M. Casiano, C.O. Cruz, J. Argumedo, B. de Jong, R. Flores y S. Ochoa. Texcoco, Estado de México, México 60 p. <http://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/manuales.php>
- PMC. 2011b. Manual de campo para el Inventario Forestal Estatal Cuantitativo (Versión 2.11). Coordinación: F. Paz, Colaboradores: M. Casiano, C.O. Cruz, J. Argumedo, B. de Jong, R. Flores y S. Ochoa. Texcoco, Estado de México, México 129 p. <http://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/manuales.php>
- PMC. 2011c. Muestreo semicuantitativo. Inventario Forestal Estatal Cuantitativo, Bosques y Selvas. Manual de Referencia (Versión 2.1). Coordinación: Fernando Paz, Colaboradores: Marcos Casiano, Carlos O. Cruz, Jesús Argumedo, Ben de Jong, R. Flores y S. Ochoa. Texcoco, Estado de México, México 49 p. <http://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/manuales.php>
- PMC. 2015. Manual de procedimientos inventario semi-cuantitativo de carbono+. Estudio de factibilidad Técnica para el pago de bonos de carbono en el Estado de México (RETUS con BASES EDOMEX). Coordinación: Fernando Paz, Colaboradores: Fabiola Rojas-García y Julio Cesar Wong. Texcoco, Estado de México, México 58 p. <http://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/manuales.php>
- Poeplau, C., C. Vos and A. Don. 2017. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. *Soil* 3:61-66
- Poesen, J. and H. Lavee. 1994. Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena* 23:1-28
- Pratihast, A.K., M. Herold, V. Avitable, S. de Bruin, H. Bartholomeus, C.M. Souza Jr. and L. Ribbe. 2013b. Mobile devices for community-based REDD+ monitoring: a case study for Central Vietnam. *Sensors* 13:21-38
- Pratihast, A.K., M. Herold, V. Sy, D. Murdiyarso and M. Skutsch. 2013a. Linking community-based and national REDD+ monitoring: a review of the potential. *Carbon Manag.* 4:91-104
- Rahmani, H., G. Scanlan, M. Bennamoun and R. Bowles. 2019. Automated segmentation of gravel particles from depth images of gravel-soil mixtures. *Computers and Geosciences* 128:1-10
- Rojas-García, F., B.H.J. De Jong, P. Martínez-Zurimendi y F. Paz-Pellat. 2015. Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science* 72:835-864
- Rojas-García, F., M.I. Marín-Sosa y F. Paz Pellat. 2014. Monitoreo de Carbono en Seis Comunidades Ubicadas en la Sierra madre en el Estado de Chiapas. Consultoría: Estudio de Factibilidad para promover el acceso de los usuarios del suelo a mecanismos de mercado de los SE carbono, agua y biodiversidad en la región Sierra-Costa de Chiapas, preparado por Kibeltik Clima y Medio Ambiente para Conservación Internacional México. San Cristobal de las Casas. Chiapas. Disponible en: [http://pmcarbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://pmcarbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php)
- Romahn de la Vega, C. 1999. *Relascopia, Una Técnica de Medición Forestal*. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 116 p.
- Rybakov, G., J. Peuhkurinen, P. Latva-Käyrä, M. Villikka, S. Sirparanta, A. Kolesnikov, V. Juntila and T. Kauranne. 2018. Combining camera relascope-measured field plots and multi-seasonal Landsat 8 imagery for enhancing the forest inventory of boreal forests in Central Russia. *Remote Sensing* 10:1796 doi:10.3390/rs10111796
- Ryter, R.M. 2012. Stone and gravel contents of arable soils influence estimates of C and N stocks. *Catena* 95:153-159
- Schulze, D.G., J.L. Nagel, G.E. Van Scoyoc, T.L. Henderson, M.F. Baugardner and D.E. Stott. 1993. Significance of organic matter in determining soil colors. In: M. Bigham and E.J. Sjolokos (ed.). *Soil Color*. SSSA Special Publication No. 31. Madison, WI, USA
- Skutsch, M. 2011. *Community Forest Monitoring: Opportunities for the Carbon Market*. Earthscan. London, UK 208 p.
- Steinhardt, G.C. and D.P. Franzmeier. 1979. Comparison of organic matter content with soil color for silty loam soils of Indiana. *Commun. In Soil Science and Plant Analysis* 10:1271-1277
- Vastaranta M., E.G. Latorre, V. Luoma, N. Saarinen, M. Holopainen and J. Hyypä. 2015. Evaluation of a smartphone app for forest sample plot measurements. *Forests* 6: 1179–1194.
- VCS. 2020. VCS Methodology VM0042. Methodology for Improved Agricultural Land Management. Version 1.0, Sectoral Scope 14. Document prepared by TerraCarbob LLC.
- Viscarra Rossel, R.A., Y. Fouad and C. Walte. 2008. Using digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. *Biosystems Engineering* 100:149-159
- Viscarra Rossel, B. Minasny, P. Roudier and A.B. McBratney. 2006. Colour space models for soil science. *Geoderma* 133:320-337
- Vodyanitskii, Y.N. and N.P. Kirillova. 2016. Application of the CIE-L\*a\*b\* system to characterize soil color. *Eurasian Soil Science* 49:1259-1268
- Vodyanitskii, Y.N. and A.T. Savichev. 2017. The influence of organic matter on soil color using the regression equations of optical parameters in the system CIE-L\*a\*b\*. *Annals of Agrarian Science* 15:380-385
- Wills, S.A., C. L. Burras and J.A. Sandor. 2007. Prediction of soil organic carbon content using field and laboratory measurements of soil color. *Soil Sci. Soc. Am. K.* 71:380-388
- Zhang, Y., A.E. Hertemink and J. Huang. 2019. Quantifying coarse fragments in soil samples using a digital camera. *Eurasian Soil Science* 52:954-962