



CARBONO ORGÁNICO Y PROPIEDADES DE SUELO EN AMBIENTES FORESTALES CONTRASTANTES DE LA PROVINCIA DE CORRIENTES

Stahringer, N. I.¹, Lupi, A.^{2*}, Alvarez, C. R.³, Rimski Korsakov, H.³, Neves, J.C.L.⁴

¹ Facultad Nacional de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Nordeste

² Instituto de Suelos del Centro de Investigación en Recursos Naturales, CIRN, INTA Castelar

³ Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires;

⁴ Dpto. de Suelos, Univ. Federal de Viçosa. * lupi.ana@inta.gob.ar

RESUMEN: Los suelos forestales representan una importante reserva de carbono de la Tierra, cumpliendo un rol relevante en la captura de carbono orgánico en el suelo (COS). Los objetivos de este trabajo fueron: (1) analizar la distribución en profundidad del pH, la acidez de cambio, la textura y el COS del suelo, y sus relaciones y (2) cuantificar la capacidad de acumular COS en plantaciones forestales establecidas en tres regiones edáficamente contrastantes. Se trabajó en plantaciones de *Pinus taeda* y *Eucalyptus grandis* establecidas en la región: Oeste (O); Noreste (NE) y Sudeste (SE) de la provincia de Corrientes. Se tomaron muestras de suelo de: 0-20, 20-40, 40-60 y 60-100 cm donde se determinó pH, acidez potencial (H+Al), P-remanente, COS y textura. La densidad aparente (Dap) se determinó en 0-20 y 20-40 cm. Se calculó el stock de carbono hasta los 40 cm en masa equivalente. En las tres zonas, la mayor concentración de CO se localizó en los primeros 20 cm, disminuyendo con la profundidad. La concentración de COS fue mayor en todas las profundidades de los suelos del NE, en relación con los suelos del SE y O, que no difieren entre sí. La concentración de arena en todos los estratos fue: O > SE > NE. El pH del suelo indica que en las tres regiones los suelos son fuerte a muy fuertemente ácidos; siendo los suelos del O los que presentan los menores valores de pH. La acidez potencial (H+Al) fue: NE>SE>O. La situación inversa se dio en el P-remanente (O>SE>NE). El stock de carbono (0-40 cm) fue estadísticamente mayor en la región NE, seguido por el SE, y menor en la zona del O (72, 38 y 18 Mg C ha⁻¹, respectivamente). El stock de carbono se relacionó significativamente con el contenido de arena (p<0,0000; R²= 0,79).

PALABRAS CLAVE: Stock de carbono, bosques cultivados, textura

INTRODUCCION

Los suelos forestales representan una proporción importante de la reserva de carbono de la tierra, cumpliendo un rol relevante en la captura de carbono orgánico en el suelo (COS) y también en el sostenimiento de la capacidad productiva de los bosques, incluidos todos los servicios ecosistémicos que ofrecen (James y Harrison, 2016). La capacidad de almacenamiento de COS depende de la composición granulométrica y mineralógica, del clima y de su uso y manejo (Wang *et al.*, 2013). La cantidad y mineralogía de la fracción de arcilla juegan un papel importante en la estabilización del COS (Lupi *et al.*, 2021). Otros factores, como el pH también regulan la retención y acumulación del COS por su impacto sobre la actividad biológica (Zhou *et al.*, 2020).

Conocer la distribución del COS y los factores que regulan su almacenaje en el suelo permite evaluar su potencial impacto sobre el cambio climático y proporcionar una referencia para el desarrollo de estrategias de manejo del suelo. Los objetivos de este trabajo fueron: (1) analizar la distribución en profundidad del pH, la acidez potencial, la textura y el COS del suelo, y sus relaciones y (2) cuantificar la capacidad de acumular COS suelos con



plantaciones forestales de tres regiones edáficamente contrastantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó en tres regiones de Corrientes: Oeste (O); Noreste (NE) y Sudeste (SE) (Figura 1). Estas áreas se diferencian en términos geomorfológicos, edáficos y fitogeográficos. Sin embargo, en las tres regiones se cultivan principalmente *Pinus taeda* y *Eucalyptus grandis*.

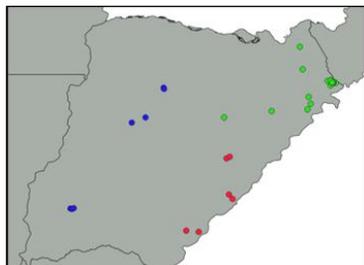


Figura 1. Sitios muestreados en la provincia de Corrientes, en el noreste de la Argentina: Oeste (Puntos azules); Noreste (Puntos verdes) y Sudeste (Puntos rojos).

El clima de la región es mesotérmico, templado cálido, sin estación seca con máxima precipitación en otoño y primavera, temperatura media anual de 18 °C. Las precipitaciones aumentan de SO a NE, oscilando entre valores de 1100 a 1700 mm anuales. Los suelos del O son suelos poco evolucionados, desarrollados sobre sedimentos modernos (Entisoles). En el E las áreas de muestreo se localizan en el N y en el S. El NE se caracteriza por suelos muy evolucionados (Ultisoles) y en el SE se encuentran suelos con horizontes genéticos bien diferenciados (Vertisoles y Molisoles) y otros que se formaron por el depósito de material grueso transportado por cursos de agua y depositado sobre capas de textura fina. En cada región se muestrearon plantaciones del género *Pinus* y *Eucalyptus* de 0,8 a 16 años.

En un trabajo de campo de 35 días ininterrumpidos, se tomaron muestras de suelo de los estratos: 0-20, 20-40, 40-60 y 60-100 cm. En laboratorios del Dpto. de Suelos de la Univ. Federal de Viçosa (Brasil), se determinó pH (en agua; relación 1:2,5); acidez potencial (H+Al) extraída con acetato de calcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7; P-remanente, que se relaciona con la concentraciones de P en la solución de equilibrio luego de agitar, por 5 minutos a 2,5 g de suelo con 25 mL de solución de CaCl₂ 0,01mol L⁻¹ con una concentración de 60 mg P L⁻¹ (Alvarez V. et al., 2000); carbono orgánico del suelo (COS) por Walkley-Black (Nelson y Sommers, 1996) y se realizó el análisis granulométrico por el método de Bouyoucos (Ashworth et al., 2001). Se determinó la densidad aparente (Dap) por el método del cilindro (Burke et al., 1986) en los estratos 0-20 y 20-40 cm.

Con los valores de concentración de COS y Dap se calculó la masa de COS (Mg ha⁻¹) por estrato y el stock de carbono (COeq) hasta los 40 cm de profundidad expresado en masa equivalente de suelo según la ecuación (1) (Sisti et al., 2004).

$$CO_{eq} = \sum_{i=1}^{n-1} COT_i + [MT_n - (\sum_{i=1}^n MT_i - \sum_{i=1}^n MS_i)]COn \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde el COeq es el stock de carbono orgánico (Mg ha⁻¹) a la profundidad donde la masa de suelo es la misma del perfil de referencia; \sum de COT_i (de i hasta n-1) es la suma de la cantidad de CO (Mg ha⁻¹) del primer estrato de suelo hasta el penúltimo estrato n-1 del perfil, MT_n es la masa de suelo total del perfil de un tratamiento, MT_i es la suma de la masa de suelo del estrato 1 (superficial) al "n" (estrato más profundo) en el perfil del suelo de un determinado tratamiento, MS_i es la suma de la masa de suelo desde el estrato superficial al "n" (estrato más profundo) en el perfil de referencia, COn es la concentración de carbono (Mg C Mg suelo⁻¹) del último estrato de suelo del perfil del tratamiento. El mismo criterio utilizado se aplicó para cuantificar los contenidos de las fracciones texturales en masa equivalente de suelo.

Se aplicaron herramientas descriptivas y pruebas estadísticas utilizando el software estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2020), con un intervalo de confianza del 95% (p = 0,05). Se aplicó un análisis de regresión lineal con el objetivo de explicar la variabilidad del stock de C con variables de suelo y cultivo como pH, arcilla%, limo%, arena%.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 2 se observa la distribución de la concentración de CO en los perfiles de suelo de las diferentes zonas. En las tres zonas de muestreo, la mayor concentración de CO se localizó en los primeros 20 cm, disminuyendo con la profundidad del perfil. La concentración de COS fue mayor en todas las profundidades de los suelos del NE, en relación con los suelos del SE y O, que no difieren entre sí. Una excepción se da en los suelos del SE en la profundidad de 60 a 100 cm, donde la concentración de COS no difiere de la de los del NE. Se pudieron ajustar funciones de declive exponencial de la concentración de carbono del suelo en el perfil muestreado (Ecuación 2). Donde COS es la concentración de COS, "a" es la concentración de COS en la superficie del suelo y "b" es la tasa a la que decae por cada centímetro de profundidad (Tabla 1). El análisis de las curvas muestra que la concentración en los primeros centímetros es mayor en el NE en relación con los otros suelos y la tasa de decaimiento es mayor en el suelo del O en relación con los suelos del NE y SE, que no difieren entre sí.

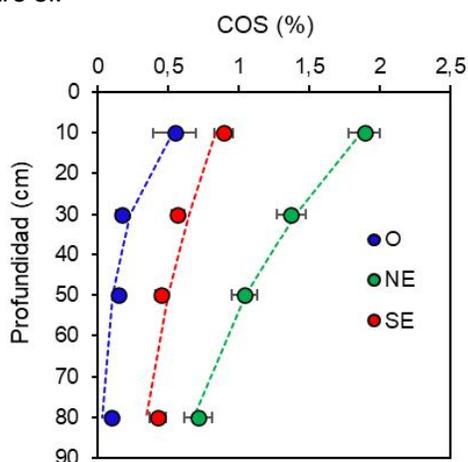


Figura 2. Distribución de carbono orgánico del suelo (COS; %). Puntos representan el promedio de las mediciones para cada suelo y profundidad con su respectivo error estándar. Curvas valores simulados con las funciones exponenciales de caída de carbono en cada suelo (Ecuación 2).

$$\text{COS (\%)} = a * e^{-b * \text{Profundidad}}$$

Ecuación 2

Tabla 1. Valores de "a" y "b" y R² para la ecuación 2 según la zona.

	a	b	R ²
Noreste	2,160	0,01445	0,5445
Oeste	0,7878	0,04154	0,3914
Sudeste	0,9422	0,01267	0,6085

Los suelos del NE presentaron el mayor contenido de arcillas de 0 a 100 cm. En cuanto que los suelos del SE se diferenciaron en contenido de arcillas de los del O solamente en la profundidad 60 a 100 cm (Figura 3). Esto podría estar provocado por la presencia de una capa de material aluvial arenoso depositado sobre sedimentos arcillosos lacustres. Estos mayores contenidos de arcilla podrían explicar las mayores concentraciones de COS encontradas en esta profundidad. Por otro lado, la concentración de arena en todos los estratos fue diferente estadísticamente de mayor a menor, según: O > SE > NE.

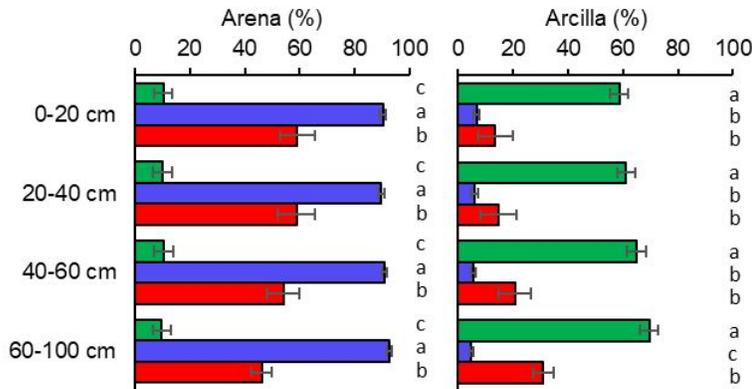


Figura 3. Distribución de arena y arcilla en el perfil de los suelos (0 a 100 cm) de las diferentes zonas: Noreste (verde); Oeste (azul); y Sudeste (rojo). Líneas: error estándar. Letras distintas: diferencias significativas entre zonas dentro de cada profundidad ($p < 0,05$).

Los suelos del NE presentaron las menores Dap tanto de 0 a 20 cm, como de 20 a 40 cm. Las otras dos zonas presentaron mayores valores sin existir diferencias estadísticamente significativas entre ambas (Figura 4). Estas diferencias podrían atribuirse a las texturas contrastantes siendo los suelos Ultisoles del NE fuertemente arcillosos.

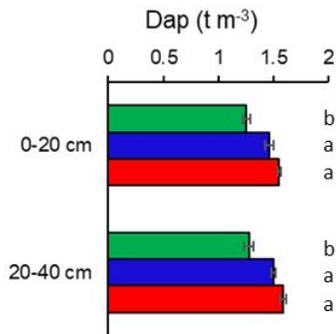


Figura 4. Densidad aparente (Dap) medida de 0 a 20 y 20 a 40 cm en las diferentes zonas: Noreste (verde); Oeste (azul); y Sudeste (rojo). Líneas: error estándar. Letras distintas implican diferencias significativas entre zonas dentro de cada profundidad ($p < 0,05$).

En los primeros 20 cm del perfil el pH no presentó diferencias estadísticamente significativas entre regiones. Entre los 20 y 40 cm el menor pH lo presentó la zona del O, sin haber diferencias entre las otras dos zonas. De 40 a 60 cm el pH fue $SE > NE > O$. Por último, de 60 a 100 cm los menores valores se encontraron en los suelos del O y NE (Figura 5). Los valores de pH del suelo indican que en las tres regiones los suelos son fuerte a muy fuertemente ácidos. Los suelos arenosos del O son los que presentan los menores valores de pH en todas las profundidades. Los suelos de textura gruesa pueden explicar una mayor acidez como consecuencia de la lixiviación de bases desde las capas arenosas superficiales (Lupi *et al.*, 2021), lo cual se refleja con un aumento del pH con la profundidad del suelo. Los valores más bajos de pH en la superficie suelen estar asociados con la producción de ácidos orgánicos, generados por el enriquecimiento de COS a partir de materiales vegetales y la mineralización de la materia orgánica (Zhou *et al.*, 2020). El pH parece no ser un factor determinante del COS, siendo la textura la principal determinante.

La acidez potencial (H+Al) fue estadísticamente mayor en el NE, seguido por el SE, siendo la menor en el O. La situación inversa se dio en el P-remanente donde los mayores valores se encontraron en el O, seguidos por el SE y, por último, con los menores valores en el NE (Figura 5), indicando que estos últimos son los suelos con mayor capacidad de fijar P.

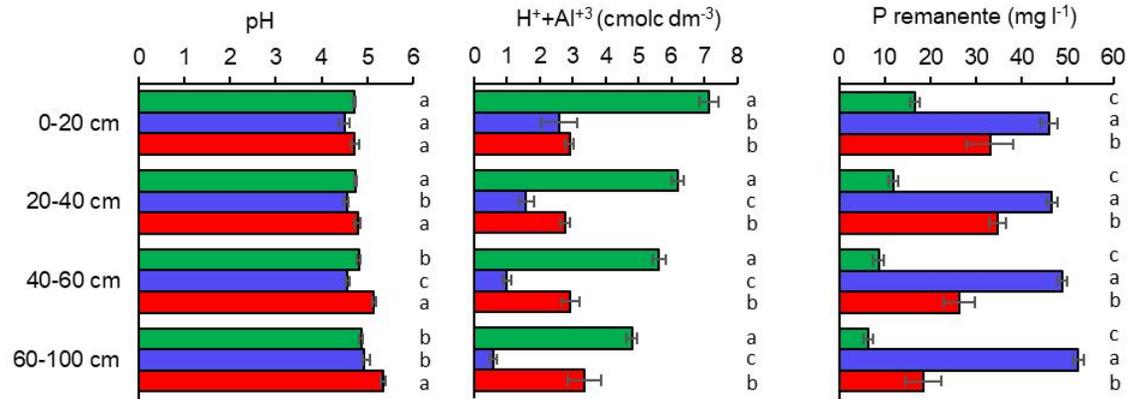


Figura 5. pH; acidez potencial (H+Al) y fósforo remanente (P-remanente) 0 a 100 cm en los diferentes suelos: Noreste (verde); Oeste (azul); y Sudeste (rojo). Líneas: error estándar. Letras distintas: diferencias significativas entre zonas dentro de cada profundidad ($p < 0,05$).

La acidez potencial disminuye con la profundidad, a excepción de los suelos del SE donde los valores no presentan variaciones importantes con la profundidad. La acidez potencial en la capa superficial de los Ultisoles, región NE, es más del doble que la del O y SE. Gruba y Socha (2016) confirmaron que la acidez potencial del suelo es clave para la acumulación de CO en los suelos forestales de pH bajo. Las mayores concentraciones de CO se encontraron en las situaciones de mayor H+Al. Otras investigaciones sugirieron que el contenido de COS en suelos ácidos es un efecto combinado del contenido de arcilla y la acidez del suelo, particularmente el contenido de Al (Gruba *et al.*, 2015).

Los niveles de P-remanente aumentaron a medida que aumentó la proporción de arena desde NE y SE a O ($r = 0,90$; $p = 0,0001$), siendo que son suelos con bajas capacidades de adsorción o retención de P (Fernández López y Mendoza, 2008) y menores niveles de COS. El stock de COS fue estadísticamente diferente en las tres regiones. El mayor contenido se encontró en la zona del NE, seguido por el SE, siendo el menor en la zona del O (Figura 6). El contenido de arena mostró el comportamiento opuesto al del COS, siendo mayor en el O y menor en el NE. Finalmente el stock de COS se pudo relacionar con el contenido de arena según la ecuación 3 ($p < 0,0000$; $R^2 = -0,79$). No se encontró un modelo de regresión múltiple que mejorara la explicación de la variabilidad del stock de C.

$$\text{Stock de carbono (Mg C ha}^{-1}\text{)} = 77,4182 - 0,01518 * \text{arena (Mg arena ha}^{-1}\text{)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde el stock de COS y el contenido de arena están en masa equivalente de 0 a 40 cm.

En el presente estudio, la mayoría de las diferencias en el stock de CO estuvieron asociadas con la textura. La retención de COS en los primeros 40 cm fue de: 72, 38 y 18 Mg C ha⁻¹, para los suelos del NE, SE y O, respectivamente. En un relevamiento realizado por Peri *et al.* (2022) se encontró que en la zona del O el COS promedio (0-30 cm) es de 19,7 Mg C ha⁻¹, para situaciones prístinas y de 16,3 Mg C ha⁻¹, para plantaciones forestales, siendo similar al encontrado en nuestro estudio teniendo en cuenta que en nuestro caso comprende 10 cm más de suelo (0-40 cm). Las forestaciones en este tipo de ambientes se realizan sobre cordones arenosos, siendo esta la posible razón por la que se observan valores de COS bajos. En el estudio de Peri *et al.* (2022) se indica que para la región de suelos rojos (ultisoles) – similar a la región NE de nuestro trabajo- los valores de COS fueron de 72 y 69 Mg C ha⁻¹ para bosques nativos e implantados respectivamente; similares a nuestro estudio. La región E del estudio mencionado no se dividió en N y S encontrando un promedio de 61,5 Mg C ha⁻¹, para la línea de base y de 63,3 Mg C ha⁻¹ en plantaciones forestales. Este es intermedio al hallado en nuestro NE y SE.

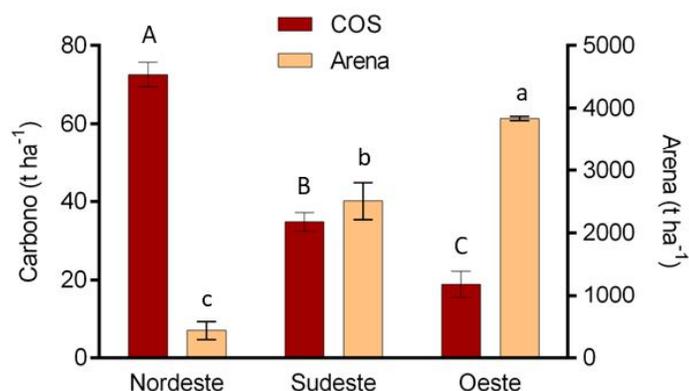


Figura 6. Stock de carbono orgánico y contenido de arena en el estrato 0-40 cm (ambos en masa equivalente). Líneas: error estándar. Letras distintas implican diferencias significativas entre zonas ($p < 0,05$) en mayúscula para el carbono y minúscula para arena. Adicionalmente, el stock de COS de 0-40 cm pudo ser estimado por el de 0-20 cm ($p < 0,0001$; $R^2 = 0,8905$; Ecuación 4).

$$\text{Stock de COS (0-40 cm)} = -2.87168 + 1.54556 * \text{Stock de COS (0-20 cm)} \quad \text{Ecuación 4}$$

CONCLUSIONES

La composición textural es la variable de mayor peso que diferencia las regiones en su capacidad de almacenar COS. Los suelos de textura fina del NE tienen la mayor reserva de COS y mecanismos de preservación que hace que las plantaciones establecidas en estos ambientes se transformen en posibles soluciones de mitigación que se están considerando frente al cambio climático. Los suelos arenosos, requieren ser manejados con cuidado dada su baja capacidad de retención de COS. El stock de COS se asoció con los contenidos de arena. Se presentan ecuaciones para estimar el stock de COS a 0-40 cm.

AGRADECIMIENTOS

Los datos utilizados en este trabajo forman parte de la Tesis de Doctorado del primer autor en el Programa de Posgrado de Suelos y Nutrición de Plantas de la Univ. Federal de Viçosa (UFV). Este trabajo fue financiado con fondos otorgados por: Ministerio de Producción de Corrientes, Dpto. de Suelos de la UFV y las empresas forestales Pomera, Bosques del Plata, Forestal Argentina, EVASA y Zeni.

BIBLIOGRAFIA

- Alvarez V., V.H., Novais, R.F., Dias, L.E., Oliveira, J.A. de. (2000). Determinação e uso do fósforo remanescente. *Bol Inf Soc Bras Ciência do Solo*. 25:27–32.
- Ashworth, J., Keyes, D., Kirk, R., Lessard, R. (2001). Standard procedure in the hydrometer method for particle size analysis. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32: 633–642.
- Burke, W., Gabriels, D., Bouma, J. (1986). *Soil structure assessment*. Balkema, A., Rotterdam, Boston.
- Di Rienzo, J.A., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Casanoves, F., Robledo, C.W. (2020). *InfoStat versión 2020*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Fernández López, C., Mendoza, R. (2008). Evaluación del fósforo disponible mediante tres métodos en distintos suelos y manejos productivos. *Ciencia del suelo*, 26: 13-27.
- Gruba, P., Socha, J. (2016). Effect of parent material on soil acidity and carbon content in soils under silver fir (*Abies alba* Mill.) stands in Poland. *Catena* 140, 90-95.
- Gruba, P., Socha, J., Błońska, E., Lasota, J. (2015). Effect of variable soil texture, metal saturation of soil organic matter (SOM) and tree species composition on spatial distribution of SOM in forest soils in Poland. *Sci. Total Environ.*, 521-522 (2015), pp. 90-100
- James, J., Harrison, R. (2016). The effect of harvest on forest soil carbon: a meta-analysis

Forests, 7: 308

- Lupi, A., Steinbach, H.S., Ciarlo, E., Romaniuk, R., Cosentino, V.R.N., Rimski-Korsakov, H., Álvarez, C.R. (2021). Organic carbon stored in soils under different land uses and soil textures in southeast Argentinean Mesopotamia. *Geoderma Regional* 27: e00435
- Nelson, D.W, Sommers, L.E. (1996). Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. Soil Science Society of America Book Series no.5, pp. 961–1010.
- Peri, P.L., Maradei, D., Lupil, A., Tato Vazquez, C. Gyenge, J. (2022). Estimación de las reservas de carbono orgánico del suelo con plantaciones forestales y otros usos de la tierra, en distintas regiones de Argentina. INTA - Dirección Nacional de Desarrollo Foresto-Industrial de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca del Ministerio de Economía de la Nación. 95 p.
- Sisti, C.P.J., dos Santos, H.P., Kohhann, R., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., Boddey, R.M. (2004). Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Till. Res.* 6: 39-58,
- Wang, F.M., Xu, X., Zou, B., Guo, Z.H., Li, Z.A., Zhu, W.X. (2013). Biomass accumulation and carbon sequestration in four different aged *Casuarina equisetifolia* coastal shelterbelt plantations in South China. *PLoS One* 8, e77449.
- Zhou, W., Han, G., Liu, M., Zeng, J., Liang, B., Liu, J., Qu, R. (2020). Determining the Distribution and Interaction of Soil Organic Carbon, Nitrogen, pH and Texture in Soil Profiles: A Case Study in the Lancangjiang River Basin, Southwest China. *Forests* 11: 532