

Métodos de evaluación visual de la estructura del suelo en sistemas productivos agrícolas (caña panelera)

Paola González Gutiérrez

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería,
Departamento de Ciencias Naturales y Ambientales. Carrera 4 N° 22-61, Bogotá D. C., Colombia.
Paola.gonzalezg@utadeo.edu.co

RESUMEN

La importancia de la agricultura radica en el mantenimiento de la economía del país y sobretodo la seguridad alimentaria. En Colombia uno de los cultivos más importantes es el de caña de azúcar para la producción de panela cuyo nivel de productividad depende de factores como la calidad del suelo. Existen varios tipos de indicadores de la calidad del suelo, dentro de los cuales se destacan los físicos como la densidad aparente, tamaño y distribución de los agregados y porosidad, y algunos biológicos como la presencia de lombrices o número de raíces. Estos indicadores pueden ser valorados por medio de métodos visuales que facilitan la evaluación de los suelos. A pesar de su gran evolución a lo largo de los años, todavía presentan flaquezas como la dificultad del desarrollo del método en suelos finos. Por lo tanto, es importante mejorar el método integrando el tipo de suelo con los indicadores evaluados por el método.

PALABRAS CLAVE

VESS, VSA, calidad del suelo, indicadores de calidad del suelo.

INTRODUCCIÓN

La agricultura contribuye al desarrollo de la economía debido a los ingresos por exportaciones, generación de empleo, mejora de la seguridad alimentaria y por su facultad de favorecer la erradicación de la pobreza en zonas rurales y urbanas (Pérez *et al*, 2015). La importancia de esta actividad radica, no solo en el crecimiento económico y en la estabilidad social del sector, sino también en la alimentación de fácil acceso para las clases urbanas medias y bajas, control de la migración de mano de obra agrícola

a empleos de ciudades y la creación de sistemas confiables para la producción de diferentes productos para mercados (Pretty y Bharucha, 2018).

Una de las principales actividades rurales en la zona andina de Colombia es la producción de panela (Buenaventura, 2018). En la actualidad, alrededor de 70.000 cultivadores de caña de pequeña a mediana escala quienes se benefician de la elaboración de panela en cerca de 18.000 trapiches, desde es el punto de vista económico y social la producción de panela representa una importante actividad que genera empleo e ingresos a cerca de 350.000 personas que se vinculan en las etapas de cultivo y molienda (Rodríguez, 2004).

Es importante destacar que el 50% de la producción nacional de panela se concentra en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Santander (Guerrero y Escobar, 2015). Este cultivo se caracteriza por presentarse en pequeñas unidades de producción, las cuales presentan un bajo nivel de mecanización y tecnificación (Guerrero y Escobar, 2015). Un total de 200.000 ha fueron destinadas para la producción de caña para panela, con un rendimiento de aproximadamente 6 Mg ha^{-1} en el año 2016 (Agronet, 2018).

El nivel de productividad de un cultivo está condicionado por las prácticas agrícolas (Pulido et al., 2017). El desarrollo ineficiente de estas prácticas, encamina a problemas como la disminución de la retención de agua y la infiltración, aumentan la erodabilidad y el riesgo de compactación del suelo, provocando resistencia a la penetración, disminución del espacio poroso, lo que conduce a un bajo flujo de gases y de agua que a su vez impide el crecimiento y desarrollo de las raíces (Johnson, 2016; Anjos et al., 2017; Satiro *et al.*, 2019). En adición, incrementa la pérdida de partículas finas, materia orgánica y nutrientes, lo cual conlleva a la degradación de la calidad del suelo (Cotler, et al., 2007).

Por el contrario, existen prácticas que mejoran la productividad del cultivo de caña de azúcar para la producción de panela que consiste en instaurar un cultivo de caña de azúcar partiendo del rastrojo del cultivo de caña anterior sin una plantación previa; esta práctica es conocida como “ratooning” y se desarrolla en países como Estados Unidos, Australia, India, Brasil, Nigeria, China, entre otros (Surendran *et al.*, 2016; Rogé, *et al.*, 2016). Se caracteriza por tener de 8 a 10 cosechas de un cultivo plantado, con poca alteración del suelo, además conduce al enriquecimiento del suelo como un proceso natural proporcionado por la caña verde (Srivastava *et al.*, 2018).

Dado lo anterior, es evidente que la calidad de los suelos y las prácticas de manejo juegan un papel importante en este proceso. Para definir la calidad del suelo se puede expresar mediante un grupo de indicadores que representan la interacción entre varias propiedades y procesos involucrados, así como factores externos (Guimarães *et al.*, 2013) Uno de los factores clave para evaluar la calidad del suelo es

su estructura. Tomando como punto de partida, que un suelo con estructura pobre es la causa común de problemas físicos y biológicos del mismo y que existen diferentes métodos para su evaluación.

La calidad del suelo ha sido evaluada de manera informal por milenios (Batey, 2000). La evaluación visual del suelo es un componente importante para la valoración de la calidad del suelo agrícola (Ball *et al.*, 2017). Este método puede especificar indicadores del suelo “centrales” tales como la estructura del suelo, profundidad de las raíces, humedad e inclinación, o en su lugar indicadores de peligro como alto riesgo de inundación, sequía o contaminación, los cuales conjugados con información climática otorgan una calificación global de la calidad del suelo aplicable a nivel mundial (Mueller *et al.*, 2013). El objetivo de este trabajo es examinar las metodologías de evaluación visual de la calidad de los suelos que se han realizado en sistemas productivos de caña de azúcar para panela.

Indicadores de la calidad del suelo

Comúnmente, se considera que el concepto de calidad del suelo trasciende a la productividad del mismo (Larson y Pierce, 1991; Parr *et al.*, 1992). Con el fin de incluir explícitamente las interacciones entre los humanos y el suelo y acobijar la sostenibilidad del sistemas como un beneficio (Carter *et al.*, 1997).

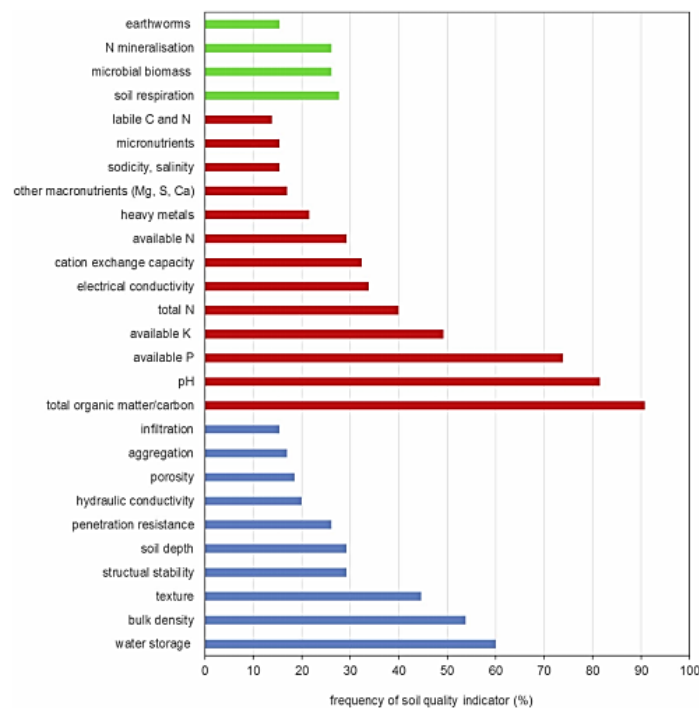


Figura 1. Frecuencia de los diferentes indicadores en todos los artículos de calidad del suelo: indicadores del suelo biológicos, químicos y físicos de color verde rojo y azul respectivamente. (Bünemann et al., 2018).

Para indicar la calidad del suelo se han propuesto varios indicadores físicos, químicos y biológicos que juntos otorgan una descripción más acertada del estado del suelo (Bünemann, *et al.*, 2018). Como se observa en la Figura 1, aunque los indicadores químicos son los que más se manejan en los estudios de calidad del suelo, existe un gran número de estudios que recurren a los indicadores físicos. Dentro de este grupo de indicadores sobresalen la textura, densidad aparente y el almacenamiento del agua; estas propiedades están relacionadas con muchas otras propiedades físicas.

En diferentes estudios en sistemas agrícolas, se ha demostrado un aumento de la densidad aparente del suelo y la resistencia a la penetración del mismo (Baquero *et al.*, 2012; Bangita y Rao, 2012;), con disminuciones en la porosidad, aireación, agregación, infiltración de agua y disponibilidad de agua (Braunack y McGarry, 2006; Castro *et al.*, 2013; Franco, 2015; Hunke *et al.*, 2015). Esto se apoya en la Figura 2, la cual muestra una relación inversa entre el tamaño de los agregados y la densidad aparente.

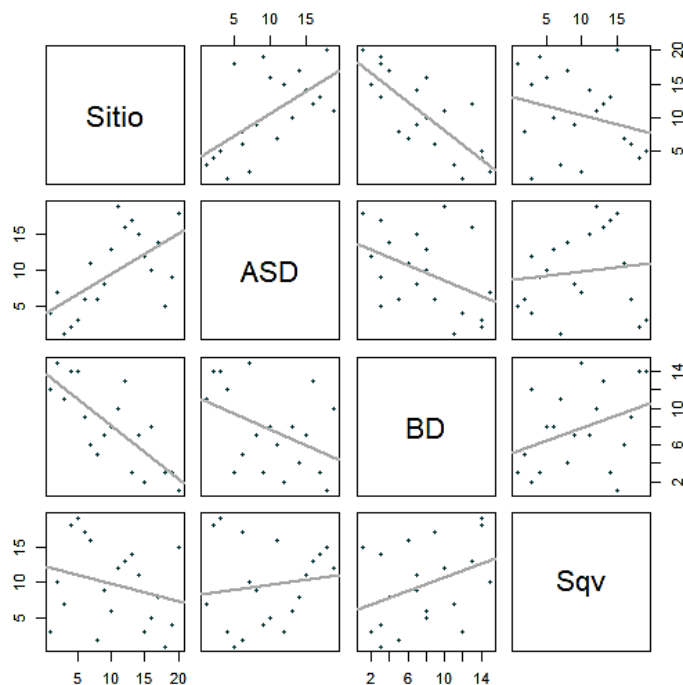


Figura 2. Matriz de correlación de dos propiedades físicas y el puntaje de un método visual: ASD, tamaño de agregados; BD, densidad aparente; Sqv, puntaje VESS. Datos tomados de Mohammad y Nicholas (2014) *Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management*.

Evolución de la evaluación visual del suelo

En 1946, Ferwerda caracterizó la estructura del suelo mediante un método de evaluación visual en una serie de campos de cultivo en los que los agricultores daban diferentes apósitos de excremento estable. Estimó el tamaño medio de los agregados, la cohesión de las partículas del suelo y la porosidad de los

agregados. Estos y otros aspectos se resumieron en una evaluación de la estructura general, el número St. En casi todas las ocasiones, el método se aplicó a la capa de arado de las tierras cultivables.

Posteriormente, en 1959 Peerlkamp afirma que existen dos métodos para aplicaciones científicas que requieran una caracterización cuantitativa de las propiedades físicas del suelo: a) por mediciones y promediando los resultados de estas mediciones para obtener un único valor, b) observando una serie de propiedades que muestran un estado general que basado en la experiencia resulta una calificación cuantitativa. En casos en los que se estudia la relación de la estructura del suelo y el crecimiento de las plantas, la primera forma puede aplicarse en cierta medida dado que no siempre es posible cambiar en un campo el factor único de la estructura del suelo; en consecuencia, es necesario utilizar la segunda opción, la cual requiere el uso de varias determinaciones de la estructura (Peerlkamp, 1959). Por lo tanto, el investigador buscará una forma sencilla de obtener información cuantitativa sobre la estructura del suelo.

Durante esta década Peerlkamp et al. (1959), desarrollaron una escala para evaluar la calidad de la estructura del suelo (De Boodt et al., 1967). El puntaje que ellos estimaban el indicador de la evaluación general de la estructura (determinado como St), el cual consideraba la cantidad de materia orgánica del suelo, el contenido de arcilla y el rendimiento del cultivo. Este método, no se usó mucho fuera de los Países Bajos y el Reino Unido (Ball, et al., 2007). En el mismo período, se desarrollaron muchos índices de estructura, basados en pruebas de laboratorio para la estabilidad de los agregados individuales, su dispersión en el agua o la distribución del tamaño de los poros o en las evaluaciones de permeabilidad de campo (Ball, et al., 2007).

Son estos autores quienes determinan que, los aspectos de la estructura del suelo se describen y cuantifican comúnmente a partir de la retención de agua, la permeabilidad al agua y los gases, la difusividad del gas y la estabilidad del agregado (De Boodt et al., 1967; Kay y Angers, 2001). Los métodos más recientes incluyen la micromorfología (Ringrose y Voase, 1991), la visualización en 3D y el modelado avanzado (Young y Crawford, 2004).

En su estudio, Ball et al. (2007) sugieren que se deben incluir elementos de las propiedades del suelo, como la forma, la estabilidad y la resiliencia al momento de evaluar la calidad de la estructura del suelo. Por otro lado, los métodos de examen visual basados en la calidad del suelo, que es un concepto más amplio que la estructura del suelo, (Pulido et al., 2017).

Métodos de evaluación de la calidad del suelo

Existe una variedad de métodos de evaluación visual del suelo para valorar la fertilidad y estructura del suelo (Ball *et al.*, 2017). Estos métodos se pueden clasificar en cuatro tipos: i) Evaluación de la superficie del suelo como Evaluación Visual de la Estructura del Suelo (VESS) y Valoración Visual del Suelo (VAS) ii) únicamente subsuelo e. g. (SubVESS), iii) superficie y subsuelo juntos como SOILpak y iv) valoraciones que describen y miden más que la estructura del suelo como el análisis VSA (Guimaraes *et al.*, 2011; Shepherd, 2009; Ball *et al.*, 2017; Mckenzie, 2013 y Peigné *et al.*, 2013).

Por otro lado, otra forma de categorizar estos métodos puede ser en métodos de pala y perfil (Boizard *et al.*, 2005; Mueller *et al.*, 2012). Para los métodos de pala es necesario examinar la muestra de suelo después de la extracción con la pala, valorando muestras de hasta 50 cm de profundidad; para la segunda categoría se requiere el examen del perfil del suelo de hasta 1.5 m de profundidad en pozos de suelo (Emmet *et al.*, 2016). Los métodos de pala a su vez están divididos según el procedimiento de exposición de agregados en dos; separándolos manualmente o por pruebas de caída. Estos Métodos fueron descritos y comparados por (Emmet *et al.*, 2016) en una tabla (revisar Anexo 1.) en donde se resume el origen, objetivo, la tierra y características evaluadas, y el desarrollo de cada método.

Evaluación visual de la estructura del suelo (VESS)

Este método consiste en recolectar con una pala, una tajada de suelo inalterado cuyas dimensiones deben ser de 25 cm de profundidad, 10 cm de largo y 20 cm de ancho, posteriormente debe ser dividido de forma manual a lo largo de planos de fractura entre agregados. Esto con el fin de exponer y crear unidades estructurales. Dado que la división de forma manual de los agregados aumenta la subjetividad del método, Guimaraes y colaboradores (2011) proponen exponer las unidades estructurales soltando un fragmento del suelo extraído desde una altura conocida; no obstante él informa que usualmente, el suelo con Sq 4-5 no se fragmenta después de dejarlo caer y que por lo tanto es difícil evaluar estos suelos de esta manera, lo que conlleva a realizar la división manualmente. Uno de los factores que influye en esta técnica es la humedad del suelo, puesto que un suelo húmedo está más cohesionado y evita la disgregación de los agregados (Guimaraes *et al.*, 2011).






Oades y Waters (1991) identificaron diferentes mecanismos de estabilidad en diferentes tipos de suelos, en su trabajo, notaron que los alfisoles y molisoles se dividían secuencialmente en el agua, lo que sugiere una jerarquía de agregados, mientras que los oxisoles eran muy estables en el agua, no obstante, la división se produjo en partículas del tamaño de arcilla. Esta amplia gama de unidades estructurales de los diferentes tipos de suelo defiende la utilidad para las técnicas de clasificación visual, dado que

determina la calidad del suelo partiendo de un carácter estructural bien diferenciado para cada tipo de suelo (Ball *et al.*, 2016).

Figura 3. Descripción de los agregados con su respectivo puntaje.

(Guimaraes *et al.*, 2011)

En este método los criterios que se tienen en cuenta para la calificación de la calidad estructural (Sq) son: el tamaño, la resistencia, porosidad, raíces y color. El rango del Sq va desde 1 hasta 5, en donde 1 es

Structure quality	Size and appearance of aggregates	Visible porosity and Roots	Appearance after break-up: various soils	Appearance after break-up: same soil different tillage	Distinguishing feature	Appearance and description of natural or reduced fragment of ~ 1.5 cm diameter
Sq1 Friable Aggregates readily crumble with fingers	Mostly < 6 mm after crumbling	Highly porous Roots throughout the soil			 Fine aggregates	 1 cm The action of breaking the block is enough to reveal them. Large aggregates are composed of smaller ones, held by roots.
Sq2 Intact Aggregates easy to break with one hand	A mixture of porous, rounded aggregates from 2 mm –7 cm. No clods present	Most aggregates are porous Roots throughout the soil			 High aggregate porosity	 1 cm Aggregates when obtained are rounded, very fragile, crumble very easily and are highly porous.
Sq3 Firm Most aggregates break with one hand	A mixture of porous aggregates from 2 mm –10 cm; less than 30% are <1 cm. Some angular, non-porous aggregates (clods) may be present	Macropores and cracks present. Porosity and roots both within aggregates.			 Low aggregate porosity	 1 cm Aggregate fragments are fairly easy to obtain. They have few visible pores and are rounded. Roots usually grow through the aggregates.
Sq4 Compact Requires considerable effort to break aggregates with one hand	Mostly large > 10 cm and sub-angular non-porous; horizontal/platy also possible; less than 30% are <7 cm	Few macropores and cracks All roots are clustered in macropores and around aggregates			 Distinct macropores	 1 cm Aggregate fragments are easy to obtain when soil is wet, in cube shapes which are very sharp-edged and show cracks internally.
Sq5 Very compact Difficult to break up	Mostly large > 10 cm, very few < 7 cm, angular and non-porous	Very low porosity. Macropores may be present. May contain anaerobic zones. Few roots, if any, and restricted to cracks			 Grey-blue colour	 1 cm Aggregate fragments are easy to obtain when soil is wet, although considerable force may be needed. No pores or cracks are visible usually.

bueno y 5 se refiere a una estructura pobre del suelo; los factores que pueden incrementar el puntaje son la dificultad en la extracción del corte de suelo, la presencia de agregados más grandes y angulares porosos, agujeros de gusanos grandes y continuos, raíces agrupadas y desviadas y áreas de tierra gris (Guimaraes *et al.*, 2011). La descripción de las caras de los agregados de 1.5 a 2 cm de diámetro de cada puntaje se encuentra en la Figura 3.

Es de destacar que en este método es indispensable identificar las capas con estructura diferente antes de dividir el corte, dado que el puntaje final es producto de la multiplicación del puntaje de cada capa por su grosor y dividiéndolo en la profundidad total (Giarola *et al.*, 2010). Las capas extraídas del suelo son comparadas con fotografías para determinar el puntaje de cada una.

Valoración visual del suelo (VSA)

Este método tiene en cuenta factores cualitativos intrínsecos e impactos antropogénicos que alteran la estructura del suelo (Shepherd, 2009). Para la valoración del suelo se incluyen indicadores del suelo y plantas que se tratan por separado. En este caso se hace una prueba de caída a un bloque de suelo de 20 cm que generalmente es extraído de la superficie. Para la estimación visual se ordenan agregados expuestos por tamaño en una superficie plana, comparándolos con fotografías de referencia que se encuentran incluidas en un manual de campo (Burce *et al.*, 2015).

Para valorar la calidad del suelo el puntaje “VS” es el resultado de la suma de los puntajes individuales de la textura, estructura y color del suelo, macro-porosidad, presencia de lombrices de tierra, profundidad potencial de enraizamiento, encharcamiento superficial, formación de costras y cubierta superficial, y erosión. A diferencia de VESS, este método no tiene en cuenta las diferentes capas, sino que evalúa cada característica de toda la muestra (Mueller *et al.*, 2008).

VSA está basado en indicadores visuales clave, los cuales son un diagnóstico de la calidad del suelo, incluyendo la estructura del suelo (Shepherd *et al.*, 2001). El puntaje de la estructura, está basado en un test de caída; el cubo de 20 cm extraído se suelta un máximo de tres veces a una altura de 1 m en una base firme de plástico. El número de veces que se realiza el test y la altura dependen del tipo de suelo. Después de haber clasificado los agregados, se le asigna a cada uno un puntaje de 2 a 0, en donde 2 representa principalmente agregados finos con pocos terrones y 0 terrones grandes (Burce *et al.*, 2015).

Teniendo en cuenta que este método evalúa no solo índices estructurales sino que se complementa con cartas de puntaje que evalúa el estado de la planta en respuesta a la calidad del suelo, VSA es muy sensible para proveer una indicación de alerta temprana de algún cambio o declive de la calidad del suelo (Burce *et al.*, 2015).

DISCUSIÓN

Métodos de evaluación visual del suelo en Caña de azúcar para producción de panela y otros sistemas productivos

El método VESS se ha usado recientemente para la comparación de la efectividad de métodos nuevos que incluyen propiedades químicas. En un estudio realizado por Cherubin *et al.* (2016) se muestra la comparación entre el Marco de evaluación de gestión de suelos (SMAF), la presencia de carbono orgánico del suelo y el método de evaluación visual VESS en cultivos de caña ubicados en Brasil. En este trabajo encontraron una relación significativa entre los índices de calidad del suelo (densidad aparente, estabilidad de macro-agregados, carbono orgánico del suelo, biomasa microbiana, P, K Y pH) con el método VESS y que la variación de estos índices estaba explicada por el método VESS un 51% para suelos arenosos y un 25% bajo suelos arcillosos, lo que sugiere que este método no solo indica la calidad del suelo sino que también es útil para el monitoreo de los índices de calidad.

A pesar de que se ha demostrado que los métodos VESS y VAS son eficientes a la hora de evaluar la estructura y la calidad del suelo (Munkholm *et al.*, 2013) y de igual manera tener correlación entre sí; los resultados de VESS en suelos franco-arenosos discrepaban con VSA en el estudio de Moncada y colaboradores (2016).

Por otro lado, Askari *et al* (2013) reportaron que aunque el método VESS funcionó bien en una amplia gama de suelos (20 locaciones), en suelos de textura fina (arcillo-limoso), el método presentó dificultades a la hora de desarrollarse. En contraste Batey *et al* (2015) mencionan que se ha descubierto que VSA depende en gran medida de la textura del suelo.

Como ya se había mencionado antes, otro factor importante que se evalúa en el método VESS es la presencia de lombrices, dado que la presencia de bioporos es uno de los criterios que pesan sobre un puntaje bajo de VESS (Cherubin *et al.*, 2019). Franco *et al* (2017) confirman que los puntajes más bajos de este método se correlacionan significativamente con la abundancia de coleópteros e isópteros.

En adición, los puntajes VESS se correlacionan con el contenido de C (Cherubin *et al.*, 2019), lo que concierne con estudios previos realizados en suelos tropicales de Venezuela (Moncada *et al.*, 2014) y suelos templados irlandeses (Cui *et al.*, 2014). El carbono orgánico del suelo desempeña múltiples funciones para mantener las propiedades y procesos químicos, físicos y biológicos en el suelo, y por lo tanto, se considera el indicador principal para las evaluaciones de calidad del suelo (Cherubin *et al.* 2016; Buñemann *et al.* 2018). Por lo tanto, los puntajes VESS pueden integrarse en un solo valor no solo en los aspectos físicos del suelo, sino que también pueden ser uno de los "indicadores centrales" de la calidad del suelo (Cherubin *et al.* 2016, 2017; Ball *et al.* 2017).

CONCLUSIONES

Los métodos de evaluación visual del suelo se han ido perfeccionando desde 1946 para hacerlos más prácticos y más descifrables para cualquier persona que desee ponerlos en práctica. Sin embargo, de ellos sobresalen algunos como el VESS y VSA los cuales aparecen con más frecuencia en muchos trabajos realizados en diferentes lugares, siendo VESS el método más reciente de los dos. Aunque la realización de estos métodos ha resultado eficiente, presenta algunos problemas durante el desarrollo de los mismos; la creación de un conjunto mínimo de datos de indicadores para evaluar la complejidad de los cambios temporales y espaciales de la estructura del suelo debe diseñarse de tal manera que (i) la forma estructural, la estabilidad del agregado y las propiedades físicas del suelo estén integradas, y (ii) la reducción de redundancia de datos está involucrada. En adición, ampliar la valoración de componentes biológicos dado que dentro de la macrofauna no solo existen lombrices sino que también pueden existir otros individuos que aumenten o disminuyan el puntaje de la calidad del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Agronet (Red de Información y Comunicación Estratégica del Sector Agropecuario Colombiano). (2018). Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Estadísticas agropecuarias. Estadísticas agrícolas. Área cosechada, producción y rendimiento de Caña panelera. <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx> (Consulta: septiembre 10, 2018).
- Askari, M.S., Cui, J., Holden, N.M., (2013). The visual evaluation of soil structure under arable management. *Soil Tillage Res.* 134, 1–10.
- Ball, B. C., Batey, T., and Munkholm, L. J. (2007). Field assessment of soil structural quality—a development of the Peerlkamp test. *Soil use and Management*, 23(4), 329-337.
- Ball, B. C., Guimarães, R. M., Cloy, J. M., Hargreaves, P. R., Shepherd, T. G., and McKenzie, B. M. (2017). Visual soil evaluation: a summary of some applications and potential developments for agriculture. *Soil and Tillage Research*, 173, 114-124.
- Bangita, B. and Rao, B.K. (2012). Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under zonal tillage system. *Geoderma* 189:351-356.
- Batey, T. (2000). Soil profile description and evaluation. In: *Soil and environmental analysis, physical methods*, 2nd edn (eds K. Smith & C. Mullins), pp. 595–628. Marcel Dekker, New York.
- Batey, T., Guimarães, R.M., Peigné, J., Boizard, H., Ball, B.C., Munkholm, L.J., (2015). 2 assessing structural quality for crop performance and for agronomy (VESS, VSA, SOILpak, profil cultural SubVESS). *Visual Soil Evaluation: Realizing Potential Crop Production with Minimum Environmental Impact*, , pp. 15–28.

- Baquero, J. E., Ralisch, R., Medina, C. D. C., Tavares Filho, J., and Guimarães, M. D. F. 2012. Soil physical properties and sugarcane root growth in a red oxiso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(1), 63-70.
- Boizard, H., Batey, T., McKenzie, D.C., Richard, G., Roger-Estrade, J., Ball, B., Bradley, I., Cattle, S., Hasinger, G., Munkholm, L., Murphy, B., Nievergelt, J., Peigne, J., and Shepherd, G., (2007). Detailed Report. Field Meeting ‘Visual Soil Structure Assessment’, INRA Research Station, Estrées-Mons, France, 25–27 May 2005. Available at: http://iworx5.webextra.net/istroorg/p_frame.htm (accessed 01.03.16.).
- Braunack, M. V., McGarry, D., and Venture, S. Y. D. J. (2006). Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia. *Soil and Tillage Research*, 89(1), 86-102.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., ... & Pulleman, M. (2018). Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125.
- Buenaventura, C. E. (2018). El cultivo de caña de azúcar y la industria panelera en Colombia.
- Castro, A.M.C., Santos, K.H., Miglioranza, E., Gomes, C.J.A., y Marchione, M.S. (2013). Avaliação de atributos físicos do solo em diferentes anos de cultivo de cana-de-açúcar. *Rev. Agrar.* 6, 415–422.
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Franco, A. L., Cerri, C. E., Tormena, C. A., & Cerri, C. C. (2016). A Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. *Soil Science Society of America Journal*, 80(1), 215-226.
- Cherubin, M. R., Chavarro-Bermeo, J. P., & Silva-Olaya, A. M. (2019). Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. *Agroforestry Systems*, 93(5), 1741-1753.
- Cotler, H., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., y Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta ecológica*, (83).
- Cui J, Askari MS, Holden NM (2014) Visual Evaluation of Soil Structure under grassland management. *Soil Use Manag* 30:1–9
- de Boodt, M., de Leenheer, L., Frese, H., Lou, A. & Peerlkamp, P. (eds.) 1967. West-European methods for soil structure determination, Vol. II. The State Faculty of Agricultural Sciences, Ghent, Belgium.
- Emmet, J. P., Forristal, P. D., Fenton, O., Ball, B. C., & Holden, N. M. (2016). A review of visual soil evaluation techniques for soil structure. *Soil use and management*, 32(4), 623-634.
- Ferwerda, J. D. 1951. Over de werking van stalmest op bouwland: Over de werking van stalmest op bouwland (No. 57.13). Staatsdrukkerij en Uitgeverijbedrijf.
- Franco, A.L.C., 2015. Soil Engineering by Macroinvertebrates: Controls on Soil Organic Matter Storage, A cross Land Use Change. Thesis (PhD in Soil Science and Plant Nutrition) — “Luiz de Queiroz” College of Agriculture. University of São, Paulo (72 pp.).

- Giarola, N.F.B., Silva, A.P., Tormena, C.A., Ball, B. & Rosa, J.A. (2010). Visual soil structure quality assessment on oxisols under no- tillage
- Guerrero, M. E. y J. D. Escobar. (2015). Eficiencia técnica de la producción de panela. *Rev. Tecnol.* 14: 107-116.
- Guimarães, R. M. L., Ball, B. C., & Tormena, C. A. (2011). Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management*, 27(3), 395-403.
- Guimarães, R. M. L., Ball, B. C., Tormena, C. A., Giarola, N. F. B., and da Silva, Á. P. 2013. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. *Soil and Tillage Research*, 127, 92-99.
- Hunke, P., Roller, R., Zeilhofer, P., Schröder, B., Mueller, E.N., 2015. Soil changes under different land-uses in the Cerrado of Mato Grosso, Brazil. *Geoderma Reg.* 4, 31–43.
- Johnson, J. M., Strock, J. S., Tallaksen, J. E., y Reese, M. 2016. Corn stover harvest changes soil hydrology and soil aggregation. *Soil and Tillage Research*, 161, 106-115.
- Kay, B.D. and Angers, D.A. 2001. Soil structure. In: *Handbook of soil science* (ed. M.E. Sumner), pp. 229–276. CRC Press, Boca Raton, FL.
- McKenzie, D. C. 2013. Visual soil examination techniques as part of a soil appraisal framework for farm evaluation in Australia. *Soil and Tillage Research*, 127, 26-33.
- Moncada, M. P., Penning, L. H., Timm, L. C., Gabriels, D., & Cornelis, W. M. (2017). Visual examination of changes in soil structural quality due to land use. *Soil and Tillage Research*, 173, 83-91.
- Moncada MP, Gabriels D, Lobo D, Rey JC, Cornelis WM (2014) Visual field assessment of soil structural quality in tropical soils. *Soil Tillage Res* 139:8–18
- Mueller, L., Schindler, U., Shepherd, T. G., Ball, B. C., Smolentseva, E., Hu, C., and Schindwein, S. L. 2012. A framework for assessing agricultural soil quality on a global scale. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(sup1), S76-S82.
- Mueller, L., Shepherd, G., Schindler, U., Ball, B. C., Munkholm, L. J., Hennings, V., and Hu, C. 2013. Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. *Soil and Tillage Research*, 127, 74-84.
- Munkholm, L.J., Heck, R.J., Deen, B., 2013. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil Tillage Res.* 127, 85–91.
- Oades, J. M., & Waters, A. G. (1991). Aggregate hierarchy in soils. *Soil Research*, 29(6), 815-828.
- Peerlkamp, P. K. 1950. The influence on soil structure of the " natural organic manuring" by roots and stubble of crops. *Transactions 4th Int. Cong. Soil Sci.*, 1, 50-54.
- Peigné, J., Cannavaciolo, M., Gautronneau, Y., Aveline, A., Giteau, J.L. & Cluzeau, D. (2009). Earthworm populations under different tillage systems in organic farming. *Soil & Tillage Research*, 104, 207–214.

- Pérez, N., González, E., y Muñoz, E. (2015). Aportes de la agricultura familiar. *Revista de Protección Vegetal*, 30, 166-166.
- Pretty, J., and Bharucha, Z. P. (2018). *Sustainable Intensification of Agriculture: Greening the World's Food Economy*. Routledge.
- Pulido, M., Helwig, L., Timm, L. C., Gabriels, D., and Cornelis, W. M. 2017. Visual examination of changes in soil structural quality due to land use. *Soil and Tillage Research*, 173, 83–91.
- Roa, E. C., y Torres, L. E. 2002. *Sostenibilidad agropecuaria y sistemas de producción campesinos (Vol. 5)*. Instituto Latinoamericano de Servicios Legales Alternativos.
- Rodriguez, G. A., y Gottret, M. V. (2004). *Aprendiendo del pasado para proyectarnos hacia el futuro: Adopción e impacto de la tecnología de panela en la Hoya del río Suárez y Cundinamarca (Colombia)*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Proyecto de Desarrollo de Agroempresas Rurales.
- Rogé, P., Snapp, S., Kakwera, M. N., Mungai, L., Jambo, I., & Peter, B. (2016). Ratooning and perennial staple crops in Malawi. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(3), 50.
- Satiro, L. S., Cherubin, M. R., Lisboa, I. P., de Souza Noia Junior, R., Cerri, C. C., y Pellegrino Cerri, C. E. (2019). Prediction of sugarcane yield by soil attributes under straw removal management. *Agronomy Journal*, 111(1), 14-23.
- Shepherd, T. G., Sagar, S., Newman, R. H., Ross, C. W., & Dando, J. L. (2001). Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fractions in New Zealand soils. *Soil Research*, 39(3), 465-489.
- Shepherd, T.G., 2009. Visual soil assessment. In: Volume 1. Field Guide for Cropping and Pastoral Grazing on Flat to Rolling Country, 2nd ed. Horizons Regional Council, Palmerston North, New Zealand.
- Srivastava, T. K., Singh, K. P., Singh, P., Suman, A., Singh, S. R., Verma, R. R., ... y Singh, R. K. 2018. Effect of bio-manures on soil quality, cane productivity and soil carbon sequestration under long-term sugarcane (*Saccharum officinarum*) plant-ratoon system in Indian sub-tropics. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 88(11), 1696-1703.
- Surendran, U., Ramesh, V., Jayakumar, M., Marimuthu, S., & Sridevi, G. 2016. Improved sugarcane productivity with tillage and trash management practices in semi arid tropical agro ecosystem in India. *Soil and Tillage Research*, 158, 10-21.
- Young, I.M. and Crawford, J.W. 2004. Interactions and self-organization in the soil–microbe complex. *Science*, 304, 1634–1637.

ANEXOS

Anexo 1. Resumen de métodos de evaluación visual. (Emmet *et al.*, 2016)

Table 1 Outline of visual soil evaluation spade methods (Manual aggregate exposure procedures)

Method*	Origin	Objective	Land assessed	Characteristics assessed	Criteria employed	Depth assessed	Scoring system used	Intended users	Time requirement
Spade Diagnosis (Göbings, 1947)	Germany	To assess structure in relation to plant growth	Emphasis on arable	Anthropogenic impacts on structure	Aggregate size, shape, porosity and rooting	30 cm	No numeric scores used	Advisors and farmers	90 min ^b
Peerikamp Method (Peerikamp, 1959)	The Netherlands	To assess structure in relation to fertility, summarised by a single score	Emphasis on arable	Anthropic impacts on structure	Aggregate size shape, rupture resistance, inter- and intra-porosity, rooting and surface soil dispersion	15 cm	S/ Score between 1 and 10 (<i>1 = worst, 10 = best</i>)	Researchers, advisors and farmers ^a	30 min for 10 assessments ^a
The Werner Method (Werner & Thälmer, 1989)	Germany	To assess soil physical condition in relation to plant growth	-	Anthropogenic impacts on structure	Layers, aggregate size, width, shape, inter-aggregate porosity and bio-pores	50 cm	Scores between 1 and 4 or 1 and 5 used to describe individual properties, resulting in a five digit nominal value score for each layer	Researchers	-
Extended Spade Diagnosis (Beste, 1999)	Germany	To assess structure with regard to rooting conditions and habitats for soil biota	Emphasis on arable	Anthropogenic impacts on structure	Aggregate type, size, shape, along with aggregate stability	40 cm	Scores between 1 and 5 used for structure and between 0 and 2 for silting type. Three sample layers are assessed separately	Advisors and farmers	-
Spade Analysis (Munkholm, 2000)	Denmark	To describe and relate soil till to management while aiding and evaluating soil management decisions	Emphasis on arable	Intrinsic soil quality and anthropic impacts on structure	Texture, colour, layer boundaries, aggregate size, shape, grade, soil consistence, macro-porosity, pore distribution, connectivity, orientation and rooting, OM decomposition and soil fauna	30 cm	Different scoring systems used for different properties, though no summarising numeric scores used	Researchers and advisors ^a	1-3 h ^a

Table 1 (continued)

Method*	Origin	Objective	Land assessed	Characteristics assessed	Criteria employed	Depth assessed	Scoring system used	Intended users	Time requirement
Soil Quality Scoring Procedure (SQSP) (Ball & Douglas, 2003)	United Kingdom	To assess physical fertility in terms of structure, rooting and soil surface conditions	Arable and grassland	Anthropogenic impacts on structure	Soil surface, aggregate type, size, shape, rupture resistance and rooting	30 cm	Three separate scores are assigned, each between 1 and 5 (<i>1 = worst, 5 = best</i>)	Researchers and advisors ^a	1 h ^a
Visual Soil Structure Quality Assessment (VSSQA) – Visual Evaluation of Soil Structure (VSS) (Guimarães <i>et al.</i> , 2011)	United Kingdom	To semi-quantitatively assess soil structural quality in a manner accessible to non-experts	Arable and grassland	Anthropogenic impacts on structure	Aggregate size, shape, intra-porosity, rupture resistance, rooting and redox-morphology	25 cm	Sq Score between 1 and 5 (<i>1 = best, 5 = worst</i>)	Advisors and farmers	15 min
Thinksoils Manual (Environment Agency, 2007, 2010)	United Kingdom	To assess soil structure with regard to erosion and run-off potential	Arable and grassland	Anthropogenic impacts on structure	Fissures and porosity, aggregate size, shape, rupture resistance, redox morphology, rooting and crop growth	40 cm	No numeric scores used	Advisors and farmers	–

*Sources provided are not necessarily the original description of methods, ^aSourced from Boizard *et al.* (2005) ^bL. J. Munkholm, personal communication.

Table 2 Outline of visual soil evaluation spade methods (Drop test procedures)

Method*	Origin	Objective	Land assessed	Characteristics assessed	Criteria employed	Depth assessed	Scoring system used	Intended users	Time requirement
The Diez Method (Diez <i>et al.</i> , 2012)	Germany	To assess structure in relation to soil functioning, notably plant growth and water infiltration	Emphasis on arable	Anthropogenic impacts on structure	Aggregate type, size, shape, inter-aggregate porosity, rooting, redox morphology and transition layer	40 cm ^b	Score between 1 and 5 used (<i>1 = best</i> , <i>5 = worst</i>)	Advisors and farmers ^b	–
Visual Soil Assessment (VSA) (Shepherd, 2000, 2009, 2010)	New Zealand	To assess soil state, plant performance and the impact of farm management	Arable and grassland	Intrinsic soil quality and anthropogenic impacts on structure	Texture, aggregate size distribution, macro-porosity, redox morphology, surface ponding and deformation, earthworms, smell, colour and potential rooting depth	Varying depths	V/S score of between 0 and 50 (<i><20 = poor</i> , <i>20–35 = moderate</i> , <i>> 35 = good</i>)	Advisors and farmers	40 min
FAL Method (Hasinger <i>et al.</i> , 2004)	Switzerland	To provide an accurate evaluation of structural state at a specific point ^a	Arable and grassland	Anthropogenic impacts on structure	Aggregate type, size, distribution and mean weight diameter ^a	45 cm	Score between 1 and 14 used for aggregate mean score (<i>1 = worst</i> , <i>14 = best</i>). Aggregate mean weight diameter is described in mm	Researchers and advisors ^a	90 min ^a

*Sources provided are not necessarily the original description of methods, ^aSourced from Boizard *et al.* (2005), ^bPoints are of the authors' opinions.

Table 3 Outline of visual soil evaluation profile methods

Method*	Origin	Objective	Land assessed	Characteristics assessed	Criteria employed	Depth assessed	Scoring system used	Intended users	Time requirement
Le Profil Cultural (Gautronneau & Manichon, 1987)	France	To examine the impact of tillage on soil structure features	Arable	Emphasis on anthropogenic impacts on structure	Soil layers, structural zones, macro-pores, aggregate/clod size, intra-porosity, redox morphology and rooting	1.5 m	No numeric score used	Researchers	1–3 h ^a
Whole Profile Assessment (Batey, 2000)	United Kingdom	To assess the anthropogenic impact on intrinsic soil properties in relation to crop growth ^a	Arable and grassland	Intrinsic soil quality and anthropogenic impacts on structure	Soil layers, texture, aggregate size, shape, aggregate stability, compacted zones, soil bearing capacity, soil colour and redox morphology	1.2–1.5 m	No numeric score used	Researchers and consultants ^a	20–40 min ^a
SOIL-pak (McKenzie, 1998)	Australia	To identify and assess compaction in relation to crop growth	Emphasis on arable	Intrinsic soil quality and anthropogenic impacts on structure	Texture, soil surface, rooting, aggregate size, shape, rupture resistance, macro-pores and aggregate stability	1.5 m	Score between 0 and 2 used for structural (0 = <i>best</i>) <i>worst</i> , 2 = <i>best</i>) and ASWAT score between 0 and 16 used for aggregate stability (0 = <i>negligible dispersion</i> , 16 = <i>serious dispersion</i>)	Land surveyors, advisors and farmers	25–90 min ^a
SubVess Flowchart (Ball <i>et al.</i> , 2015)	United Kingdom	To assesses any anthropogenic transition layer in terms of crop growth	Emphasis on arable	Anthropogenic impacts on structure	Redox morphology, porosity, rooting, aggregate size and shape	1.4 m	Sag scores of between 1 and 5 (1 = <i>best</i> , 5 = <i>worst</i>)	Advisors	20 min

*Sources provided are not necessarily the original description of methods, ^aSourced from Boizard *et al.* (2005).