



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS EN SUELOS DEL URUGUAY: COMPARACIÓN DE MÉTODOS Y EVALUACIÓN BAJO DIFERENTES INTENSIDADES DE USO

María Victoria MANCASSOLA SOLER

Magíster en Ciencias Agrarias
Opción Ciencias del Suelo

JUNIO 2021

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. (Dra.) Lucía Salvo, Ing. Agr. (PhD.) Mario Pérez Bidegain, y Ing. Agr. (MSc.) Valentina Rubio, el 29 de junio de 2021. Autora: Ing. Agr. María Victoria Mancassola Soler. Directora Ing. Agr. (Dra.) Florencia Alliaume y Asesor Externo Ing. Agr. (PhD.) Ruben Puentes.

AGRADECIMIENTOS

A Florencia Alliaume y Ruben Puentes por haber orientado este trabajo con compromiso, dedicación y por sus valiosas sugerencias.

A Bettina Lado por sus aportes que ayudaron a mejorar este trabajo.

A Leonardo Paladino por la formación y la valiosa información suministrada.

A Álvaro Califra y Artigas Durán por la buena disposición a las consultas realizadas.

Suelos y Aguas:

Leticia Martínez, Maximiliano González, Jorge Hernández y Mario Pérez

EEMAC: Guillermo Siri, Oswaldo Ernst

CURE: Gastón De León

Biblioteca de Facultad de Agronomía

INIA Treinta y Tres:

Alexander Bordagorri, Ignacio Macedo, Belky Mesones y José Terra

INIA La Estanzuela: funcionarios de campo y Laboratorio de suelos, Valentina Rubio, Emiliano Barolín, Wilfredo Meza, Andrés Beretta y Andrés Quincke

A los productores que permitieron la extracción de muestras.

Dirección General de la DGRN- MGAP por permitir realizar esta tesis en el marco del Proyecto DACC-BM.

A todo el equipo de Cartografía DGRN en especial a Laura Moreira, Pablo Prieto, Pablo Rovira, Fernando Bideau y Adrián La Paz.

Regionales DGRN: Soriano Juan Herrera e Inés Barilani, Paysandú Gustavo Olivera y Treinta y Tres Pablo Lacuesta y Miguel

Laboratorio de Suelos DGRN: Alicia Gallo, Betina Fernández y Ruben Linares

A mi familia y amigos por el apoyo brindado durante este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN.....	IX
SUMMARY.....	X
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. OBJETIVOS	4
1.1.1. <u>Hipótesis general</u>	4
1.1.2. <u>Objetivo general</u>	5
1.1.3. <u>Hipótesis específicas</u>	5
1.1.4. <u>Objetivos específicos</u>	6
2. <u>EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA DETERMINAR LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS EN SUELOS DEL URUGUAY</u>	8
2.1. RESUMEN	8
2.2. SUMMARY	9
2.3. INTRODUCCIÓN	10
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.4.1. <u>Sitios de muestreo</u>	13
2.4.2. <u>Muestreo de campo</u>	16
2.4.3. <u>Procesamiento de las muestras</u>	17
2.4.4. <u>Determinaciones de EA con la técnica de USDA</u>	17
2.4.5. <u>Determinaciones de EA con la técnica de Le Bissonnais</u>	18

2.4.6. <u>Análisis químicos y físicos</u>	20
2.4.7. <u>Análisis estadísticos</u>	20
2.4.8. <u>Descripción de campo</u>	22
2.5. RESULTADOS.....	23
2.5.1. <u>Características físicas y químicas de los suelos</u>	23
2.5.2. <u>Evaluación de la sensibilidad, similitud y precisión de las técnicas para clasificar la EA</u>	25
2.5.2.1. Sensibilidad de la técnica de USDA para clasificar sitios según la EA	25
2.5.2.2. Sensibilidad de la técnica de Le Bissonnais para clasificar sitios según la EA.....	27
2.5.2.3. Similitud entre las estimaciones de EA por las diferentes técnicas y precisión de las mismas.....	29
2.5.3. <u>Determinación de las variables que mejor explican la diferencia entre sitios</u>	31
2.6. DISCUSIÓN.....	34
2.6.1. <u>Evaluación de técnicas de tamizado en húmedo</u>	34
2.6.2. <u>Aspectos operativos de las técnicas de tamizado en húmedo</u>	36
2.6.3. <u>Relación entre los sitios, la EA y otras variables del suelo</u>	37
2.7. CONCLUSIONES.....	39
2.8. BIBLIOGRAFÍA.....	40
3. <u>ESTABILIDAD DE AGREGADOS Y CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS BAJO DIFERENTES INTENSIDADES DE USO</u>	47
3.1. RESUMEN.....	47

3.2. SUMMARY.....	48
3.3. INTRODUCCIÓN.....	49
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	51
3.4.1. <u>Sitios de muestreo seleccionados</u>	51
3.4.2. <u>Muestreo de campo y procesamiento de las muestras</u>	53
3.4.3. <u>Determinaciones de EA con tamizado en húmedo y del índice de inestabilidad por dispersión de arcillas</u>	54
3.4.3.1. Técnica de USDA (2004)	54
3.4.3.2. Técnica de Le Bissonnais et al. (2002)	55
3.4.3.3. Índice de inestabilidad (IIn)	56
3.4.4. <u>Análisis químicos y físicos</u>	57
3.4.5. <u>Análisis estadísticos</u>	57
3.5. RESULTADOS	59
3.5.1. <u>Características físicas y químicas de los suelos</u>	59
3.5.2. <u>Efecto de la historia de uso y profundidad de muestreo en la EA</u>	60
3.5.2.1. Medido con la técnica USDA.....	60
3.5.2.2. Medido con la técnica de Le Bissonnais et al. (2002)	62
3.5.2.3. Estimación mediante el Índice de Inestabilidad (IIn)	64
3.5.3. <u>Efecto de la historia de uso y profundidad de muestreo en el COS</u>	66
3.5.4. <u>Relación del COS con la estabilidad de agregados</u>	67
3.5.5. <u>Contenido de carbono orgánico de los agregados para tamizado en húmedo</u>	69
3.6. DISCUSIÓN.....	70
3.6.1. <u>Efecto de la historia de uso y profundidad de muestreo en la EA medido con diferentes técnicas</u>	70

<u>3.6.2. Efecto de las diferentes historias de uso y profundidad de muestreo en el carbono orgánico</u>	71
<u>3.6.3. Correlación entre la EA determinado por dos técnicas de tamizado en húmedo y el índice de inestabilidad con el contenido de carbono orgánico</u> .	72
<u>3.6.4. Contenido de carbono en las distintas fracciones utilizadas para las técnicas de estabilidad de agregados para los diferentes sitios</u>	74
3.7. CONCLUSIONES	75
3.8. BIBLIOGRAFÍA	76
<u>4. SELECCIÓN DEL CÓDIGO DE ESTRUCTURA (s) DE LA USLE CON TÉCNICAS DE EA E IMPLICANCIAS EN LA ESTIMACIÓN DEL FACTOR K</u>	83
4.1 CONCORDANCIA EN LA ASIGNACIÓN DEL CÓDIGO (s) MEDIANTE DESCRIPCIONES DE CAMPO Y MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE EA	83
4.2 IMPLICANCIA EN LA ESTIMACIÓN DEL FACTOR K SEGÚN MÉTODO DE SELECCIÓN DEL CÓDIGO (s)	86
<u>5. DISCUSIÓN GENERAL</u>	91
<u>6. CONCLUSIONES GENERALES</u>	94
<u>7. BIBLIOGRAFÍA</u>	96
<u>8. ANEXOS</u>	101
8.1 ANEXO I CLASIFICACIÓN DEL CÓDIGO DE ESTRUCTURA (s) USLE Y SU REASIGNACIÓN PARA SUELOS DE URUGUAY	101
8.2 ANEXO II CLASIFICACIÓN DEL CÓDIGO DE PERMEABILIDAD (p) USLE Y SU REASIGNACIÓN PARA SUELOS DE URUGUAY	102

RESUMEN

La estabilidad de los agregados (EA) influye en la erodabilidad del suelo y se incluye en la ecuación del factor K del modelo USLE/RUSLE a través del código de estructura (s), asignado en Uruguay con la descripción a campo. Los objetivos de este trabajo fueron: evaluar técnicas de laboratorio para determinar la EA, evaluar la EA bajo diferentes intensidades de uso y estratos del horizonte A, estudiar su relación con diferentes propiedades del suelo, con el carbono orgánico del suelo (COS), y evaluar el efecto en la estimación del factor K al usar el s asignado por las técnicas de laboratorio. Se muestrearon suelos de diferentes texturas, incluyendo tres ensayos experimentales con historias de uso de cultivo continuo (cc), rotación cultivo-pastura (cp) y pastura permanente (pp). Se extrajeron bloques de suelo imperturbado de 20 por 20 cm y de la profundidad del horizonte A, estudiando los estratos de 0-5 cm, de 5-10 cm y todo el horizonte A. Las técnicas evaluadas fueron USDA (% de agregados estables), Le Bissonnais (diámetro medio ponderado promedio en mm) para tres pretratamientos: estallido, disgregación mecánica y capilaridad, e índice de inestabilidad (IIn). USDA y Le Bissonnais fueron sensibles para diferenciar sitios e historias de uso. La EA fue mayor bajo cp y pp con respecto a cc, siendo los agregados estables (USDA) un 45 % mayor en promedio en sitios con cp y pp. El efecto de la profundidad de muestreo en la EA no fue significativo, por lo que se podría reducir la profundidad de muestreo de campo de confirmarse esto a futuro. El COS fue 21 % mayor bajo cp y pp respecto a cc, y se verificó una estratificación del mismo. Existió una correlación positiva entre las técnicas USDA y Le Bissonnais y el COS. El IIn no fue lo suficientemente sensible para diferenciar historia de uso. USDA y el pretratamiento de estallido de Le Bissonnais presentaron una mayor concordancia con la clasificación del s de la descripción de campo. El factor K estimado con el s asignado mediante la técnica de USDA fue un 23 % mayor en el suelo de cc respecto a pasturas (cp y pp). USDA fue la técnica más precisa, sensible y fácil de ejecutar, se propone para el laboratorio de caracterización de suelos Palabras clave: estructura, arcilla dispersa, erosión, tamizado en húmedo, uso del suelo

STUDY OF AGGREGATE STABILITY IN SOILS OF URUGUAY: COMPARISON OF METHODS AND EVALUATION UNDER DIFFERENT INTENSITIES OF USE

SUMMARY

Aggregates stability (AS) influences the erodability of the soil and is included in the equation of the K Factor of the USLE / RUSLE model through the structure code (s), assigned in Uruguay with the field description. The objectives of this work were: to evaluate laboratory techniques to determine the AS, to evaluate the AS under different intensities of use and strata of the horizon A, to study its relationship with different properties of the soil, with the soil organic carbon (SOC), and to evaluate the effect on factor K estimates when the s assigned by the laboratory techniques are used. Soils of different textures were sampled, including three experimental trials with use histories of continuous cultivation (cc), crop-pasture rotation (cp) and permanent pasture (pp). Blocks of undisturbed soil of 20 by 20 cm and the depth of horizon A were extracted, studying the strata of 0-5 cm, 5-10 cm and the entire horizon A. The techniques evaluated were USDA (% of stable aggregates), Le Bissonnais (average weighted mean diameter in mm) for three pretreatments: fast wetting, mechanical disintegration and capillarity, and instability index (IIn). USDA and Le Bissonnais differentiated sites and usage histories. The AS was higher under cp and pp with respect to cc, being the stable aggregates (USDA) 45 % higher on average in sites with cp and pp. The effect of the sampling depth on the AS was not significant, if this is confirmed in future studies, sampling depth could be reduced. The SOC was 21 % higher under cp and pp with respect to cc, and SOC stratification was verified. There was a positive correlation between the USDA and Le Bissonnais techniques and SOC. The IIn was not sensitive enough to differentiate use histories. USDA and Le Bissonnais fast wetting pretreatment showed greater agreement with the s classification given by the field description. The K factor estimated with the s assigned by the USDA technique was 23 % higher under cc compared with pastures (cp and pp). USDA was the most precise, sensitive and easy to execute technique. It is proposed for the soil characterization laboratory.

Keywords: structure, water dispersion, erosion, wet sieving, land use

1. INTRODUCCIÓN

La degradación de los suelos es uno de los problemas ambientales más importantes a escala global entre otros aspectos por su impacto en el cambio climático (Kopittke et al. 2019, FAO 2015). Uruguay no está fuera de esta realidad, desde el año 2004 aumentó la superficie agrícola hasta su máximo de 1.558.000 ha en 2015, explicado por la expansión del cultivo de soja desde suelos agrícolas hacia suelos marginales con mayor riesgo de erosión. En este contexto la Dirección General de Recursos Naturales del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (DGRN-MGAP) ejecuta desde el año 2012 el Componente 3 del Proyecto Manejo Sostenible de los Recursos Naturales y Adaptación al Cambio Climático - Banco Mundial 8099-UY (OPYPA 2020, 2017, 2013), que implica la evaluación de planes de uso y manejo responsable del suelo exigibles para poder realizar una explotación agrícola en superficies mayores a 100 ha. Para valorar el impacto en los suelos de los planes de uso presentados por los responsables de cada unidad productiva, se aplica el modelo USLE/RUSLE (Renard et al. 1997, Wischmeier y Smith 1978) de la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE). En este modelo, el factor K de erodabilidad (USDA-ARS 2008, García Prechác 1992) se estima por la ecuación de Wischmeier y Mannering (1969) ajustada para Uruguay por Puentes (1981).

La ecuación del factor K incluye las características del suelo que más afectan la erodabilidad (Wischmeier y Mannering, 1969): la materia orgánica, arcilla, limo y arena muy fina que se determinan en laboratorio, y la estructura y permeabilidad que se clasifican a través de los códigos de estructura (s) y del código de permeabilidad (p) asignados mediante la descripción de campo (Wischmeier et al. 1971). Los códigos s y p son la parte más compleja y subjetiva de la ecuación, ya que no se cuenta con una técnica de laboratorio que contribuya a la clasificación de las categorías de cada código de forma objetiva (Puentes y Szogi, 1983). La estabilidad estructural a su vez se relaciona con el contenido de arcilla, limo, arena, materia

orgánica, sodio, óxidos, y pH (Puentes 1981, Wischmeier et al. 1971, Wischmeier y Mannering 1969).

La estabilidad estructural se puede medir a través de la estabilidad de los agregados (EA) o la dispersión de arcillas (Mataix-Solera et al. 2010). Como indicador asociado al efecto de erosión hídrica se utilizan técnicas de tamizado en húmedo, y las más utilizadas y reportadas en los últimos años han sido las adaptaciones de Kemper y Rosenau (1986), dentro de las cuales se encuentra el protocolo de USDA (2004); y Le Bissonnais et al. (2002) (Mataix-Solera et al 2010, Nimmo y Perkins 2002). En Uruguay la EA no se ha estudiado sistemáticamente, se han utilizado distintas técnicas y adaptaciones: Yoder (1936), Henin et al. (1958), Kemper y Chepil (1965), Kemper y Rosenau (1986), Le Bissonnais et al. (2002). Si bien se ha definido evitar el uso de la técnica de Henin et al. (1958) por usar benceno, respecto al resto no existe un consenso sobre qué técnica utilizar, y los resultados no son comparables.

En Uruguay las adaptaciones de Kemper y Rosenau (1986) han sido utilizadas por diversos autores entre ellos Salvo et al. (2019), García de Souza et al. (2011), Terzaghi (1996), encontrando que los sistemas con pasturas tienen mayor EA que los sistemas de cultivo. Para la técnica de USDA (2004) no hay reportes registrados en Uruguay. Por otro lado, Le Bissonnais et al. (2002) fue utilizada por Rubio (2018) para molisoles donde diferenció historias de uso.

Otro tipo de técnicas son las de dispersión de arcillas que incluyen distintos índices (Lal y Shukla 2004, Sombroek et al. 1969, Middleton 1930). La arcilla dispersa recobró interés porque se utiliza como algoritmo en el modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project), al ser uno de los aspectos que influye en la erodabilidad (Brubaker et al. 1992). Este índice se incluyó en este trabajo debido a que se utiliza la misma muestra de análisis químicos (molido a menos de 2 mm), por lo que permitiría evitar el muestreo y preparación de la muestra que requieren las técnicas de tamizado en húmedo. En Uruguay la relación entre arcilla dispersa y arcilla total ha sido utilizada como indicador de estabilidad estructural. Sombroek et al. (1969)

reportaron valores bajos de este índice para suelos con elevados contenidos de sodio. En este trabajo se utiliza el I_{in} que es la relación entre arcilla dispersa y arcilla total (Durán y García Préchac 2013; Cayota et al. 1981; Sombroek et al. 1969).

La técnica de Le Bissonnais et al. (2002) tiene como ventaja incluir los tres factores más importantes que afectan los agregados (estallido, disgregación mecánica y diferenciación del tipo de arcillas por capilaridad), (Wilson y Sasal 2010, Nimmo y Perkins 2002); y como desventaja la cantidad de tamices que se utilizan y el proceso de los tres pretratamientos, que puede ser poco práctico para incorporar de rutina en un laboratorio (Mataix-Solera et al. 2010, Kemper y Koch 1966). La técnica de USDA (2004) es una técnica adaptada de Kemper y Rosenau (1986) presenta la ventaja de utilizar sólo un tamiz por muestra y su procedimiento es simple (Nimmo y Perkins 2002, Kemper y Koch 1966).

Por otro lado, la información disponible sobre las propiedades del suelo asociadas a la EA es limitada, en Uruguay Rubio (2018) asoció resultados de Le Bissonnais et al (2002) con propiedades del suelo en molisoles. No existen resultados disponibles de Le Bissonnais et al. (2002) y USDA (2004) para propiedades del suelo en un amplio rango de texturas. Esta información es de interés ya que, en vista a las dificultades metodológicas y la falta de consenso en definir una técnica, la selección de una técnica de laboratorio para caracterización de suelos permitirá generar información de campo sobre esta compleja propiedad, apoyar la descripción de campo, y asociarla a otras propiedades para posibles aplicaciones en modelos. Por otro lado, Beretta-Blanco y Carrasco-Letelier (2017) han desarrollado un modelo mixto como alternativa al modelo de estimación del factor K estimado para USLE/RUSLE.

En cuanto a las historias de uso, se ha reportado por distintos autores que bajo cultivo continuo disminuye el COS y la EA (Rubio, 2018; Gabioud et al. 2011; Bronick y Lal, 2005). En este trabajo se estudiará en tres sitios la relación entre el COS y la EA, donde para un mismo suelo la diferencia en COS está determinada por la historia de uso contrastante. En cuanto a la estratificación del suelo por el uso de siembra directa

se ha encontrado estratificación del COS (Ernst y Siri 2009; Salvo et al. 2019). Sobre la estratificación de la EA está el trabajo de Salvo et al. 2019, comparando laboreo convencional con siembra directa, donde en este último, aumenta la EA en los primeros cm del suelo con pasturas perennes o cultivos con alto aporte de residuos. Por lo que es muy poca la información sobre la EA en distintos estratos del suelo a nivel nacional, y no se encuentra información con las técnicas de Le Bissonnais et al. (2002), USDA (2004) e IIn (Sombroek et al., 1969).

En Uruguay se está desarrollando una cartografía más detallada que la existente a nivel país, a escala 1:40.000 (OPYPA 2017), y en la información generada se incluye la estimación del factor K, este se aplica en el modelo USLE/RUSLE utilizado en los planes de uso y manejo responsable del suelo. La información para generar nueva cartografía también requiere una actualización o incorporación de técnicas de laboratorio. Actualmente no se cuenta con una técnica para EA por lo que el s de la USLE se clasifica con la descripción de campo.

Por lo antes mencionado, es necesario investigar y comparar metodologías, para elegir una técnica de EA que pueda ser incorporada al laboratorio de caracterización de suelos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Hipótesis general

Al menos una de las técnicas evaluadas para estimar la EA se puede utilizar para caracterizar esa propiedad del suelo y diferenciar muestras de diferentes suelos con diferentes texturas, historias de uso y/o estratos del horizonte A.

Al menos una de las técnicas evaluadas permitirá detectar una asociación entre el valor de EA con el contenido de COS de un mismo suelo bajo diferentes historias de uso.

1.1.2. Objetivo general

Contribuir a la selección del código de estructura (s) utilizado en la ecuación del factor K de la ecuación universal de pérdida del suelo por medio de evaluar dos técnicas de laboratorio (Le Bissonnais y USDA) para estimar la EA en suelos con diferentes texturas e intensidades de uso.

Evaluar la relación de EA con el COS y la EA en muestras de diferentes estratos del horizonte A.

1.1.3. Hipótesis específicas

- i) Al menos una de las técnicas evaluadas para determinar la EA es precisa y sensible para clasificar muestras de diferentes texturas y/o historias de uso.
- ii) El contenido de arcilla, EA y COS, son las variables que explican la mayor parte de la diferencia entre sitios.
- iii) En los sitios bajo rotación cultivo-pastura, la EA medido con al menos una de las técnicas evaluadas y el COS, son mayores respecto a los sitios de cultivo continuo.
- iv) El muestreo realizado en diferentes estratos o todo el horizonte A no hace variar la clasificación obtenida por las diferentes técnicas para la EA.
- v) Es posible establecer una alta correlación entre la EA determinado por alguna de las técnicas de estabilidad estructural evaluadas y el COS.

1.1.4. Objetivos específicos

- i) Evaluar dos técnicas de laboratorio (Le Bissonnais y USDA) para estimar la EA en suelos con diferentes texturas e intensidades de uso.
- ii) Generar una base de datos relacionando los valores de EA (Le Bissonnais y USDA) con otras propiedades, para suelos con un amplio rango de texturas y evaluar las variables que mejor explican la diferencia entre sitios. Se consideraron: EA por USDA, el pretratamiento de estallido de Le Bissonnais (DMPest), arena (Ar), limo (L), arcilla (Ac), carbono (C), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), capacidad de intercambio catiónico (CICpH7) y densidad aparente (DAP).
- iii) Evaluar el efecto de la historia de uso en la EA por diferentes técnicas, y en el COS.
- iv) Estudiar el efecto de la profundidad de muestreo en las clasificaciones de EA obtenida por las diferentes técnicas.
- v) Cuantificar la asociación entre la EA determinado por las técnicas con el COS.
- vi) Evaluar el efecto en la estimación del factor K al usar el s asignado por las técnicas de EA (Le Bissonnais y USDA) para los suelos estudiados y los ensayos experimentales.

La estrategia planteada consistió en utilizar las diferentes técnicas citadas como promisorias para estimar EA, y evaluar la sensibilidad en suelos con texturas diferentes (vertisoles, brunosoles, argisoles). Parte de las muestras provinieron de ensayos para cuantificar más precisamente el efecto del COS, ya que en esos casos se cuenta con un mismo suelo bajo diferentes historias de uso y diferentes contenidos de COS (Gabioud et al. 2011, Ernst y Siri 2009, Terzaghi 1996). El trabajo final de tesis generó dos artículos científicos. El primero se centró en el objetivo general y en los objetivos específicos i) y ii) donde se planteó el poder seleccionar una técnica para estimar EA, que pueda ser utilizada en un laboratorio de caracterización de suelos. El segundo se centró en evaluar la capacidad de las técnicas de diferenciar historias de

uso, y cuantificar el efecto del COS, incluyendo los objetivos específicos: iii), iv) y v). Para este trabajo fueron utilizadas las muestras de los ensayos experimentales que también se incluyeron en el primer artículo. El objetivo específico vi) se desarrolla en el capítulo 4.

2. EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA DETERMINAR LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS EN SUELOS DEL URUGUAY

Artículo para presentar en Agrociencia Uruguay

Victoria Mancassola, Florencia Alliaume, Bettina Lado, Ruben Puentes

2.1. RESUMEN

La estabilidad de los agregados (EA) influye en la erodabilidad del suelo, y se incluye en la ecuación del factor K del modelo USLE/RUSLE usando un código de estructura (s) asignado con la descripción a campo. El objetivo de este trabajo fue evaluar dos técnicas de laboratorio en suelos del Uruguay, como aporte metodológico en la determinación de la EA. Se evaluaron la sensibilidad y precisión de las técnicas para clasificar las muestras y la similitud entre ellas. Se generó una base de datos de propiedades del suelo incluyendo EA y se analizaron las variables que mejor explican la diferencia entre los sitios. Se utilizaron muestras de 12 sitios, 6 de predios comerciales y 6 de ensayos de larga duración. Las técnicas para EA fueron USDA expresada en % de agregados estables, y Le Bissonnais expresada en diámetro medio ponderado (DMP) en mm. Para caracterizar los suelos se determinaron: textura, carbono orgánico, bases intercambiables, capacidad de intercambio catiónico a pH7 (CICpH7), pH en agua y en KCl, aluminio intercambiable; densidad aparente y descripciones a campo. USDA y Le Bissonnais asignaron menor EA a suelos más limosos y mayor EA a los suelos con pasturas respecto a los de cultivos. Las variables que más explicaron la variabilidad entre los sitios fueron arcilla, calcio, CICpH7, arena y EA con la técnica USDA. La técnica de USDA fue la que tuvo mayor precisión, ejecución más práctica y rápida, por lo que se propone para ser aplicada en un laboratorio de caracterización de suelos.

Palabras clave: estructura del suelo, tamizado en húmedo, USLE/RUSLE, erodabilidad

2.2. SUMMARY

Aggregates stability (AS) influences on soil erodibility, and it is included in the USLE / RUSLE model's equation of the K factor using the structure code (s) assigned by field description. The objective of this work was to evaluate two laboratory techniques in Uruguayan soils, as a methodological contribution in determining AS. The sensitivity and precision of the techniques to classify the samples, and the similarity between them, were evaluated. A database of soil properties incorporating AS results was generated, and the variables that best explain the difference between the sites were analyzed. Samples from 12 sites were used, 6 from commercial farms and 6 from long-term trials. The techniques for AS were USDA expressed in % of stable aggregates, and Le Bissonnais expressed in weighted mean diameter (WMD) in mm. Soil texture, organic carbon, exchangeable bases, cation exchange capacity at pH7 (CICpH7), pH in water and in KCl, exchangeable aluminum, and bulk density were determined, and aggregate's field descriptions done. USDA and Le Bissonnais assigned the lowest AS to silty soils and higher AS to soils with pastures compared to those of crops. The variables that best explained the variability between the sites were clay, calcium, CICpH7, sand and AS with the USDA technique. It is concluded that the USDA technique was the one with the largest precision, the most practical execution and faster one, therefore it is proposed to be applied in a soil characterization laboratory.

Keywords: soil structure, wet sieving, USLE/RUSLE, erodibility

2.3. INTRODUCCIÓN

En Uruguay a partir del año 2004 comienza a aumentar la superficie de agricultura de secano de 650.000 ha, hasta llegar a un máximo de 1.558.000 ha en el año 2015, expandiéndose de suelos agrícolas a suelos marginales, donde la soja ocupó el 86% de la superficie⁽¹⁾. El aumento en la intensidad de uso del suelo, sumado a la mayor frecuencia de eventos extremos dado por el cambio climático, propicia la erosión hídrica del suelo que constituye uno de los mayores problemas ambientales del país⁽²⁾. Como respuesta a esto, en Uruguay se está desarrollando desde el año 2012 una nueva cartografía a escala 1:40.000, se están actualizando las técnicas de laboratorio para caracterizar el suelo y se realiza la reglamentación e implementación de planes de uso y manejo responsable del suelo⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾.

Con el fin de evaluar los planes de uso y manejo responsable del suelo, se aplica el modelo USLE/RUSLE que estima la pérdida de suelo⁽⁵⁾⁽⁶⁾. En el mencionado modelo, la erodabilidad o susceptibilidad de un suelo a erosionarse, se estima a través del factor K.

El factor K se estima para cada nueva Serie de suelos de la cartografía en desarrollo (escala 1:40.000) en Uruguay. El factor K es estimado a su vez mediante una ecuación o nomograma⁽⁷⁾ adaptada para las condiciones de Uruguay por Puentes⁽⁸⁾, siendo el código de estructura (s) una variable sensible incluida en dicha ecuación, basándose en las descripciones de campo. Esta descripción es realizada por distintos mapeadores aportándole subjetividad a la información generada. En Uruguay no se ha definido una técnica de laboratorio para determinar la estabilidad de agregados (EA de ahora en más) para caracterización de suelos, como apoyo a las descripciones de campo en la designación del s de forma objetiva. Existen diferentes técnicas de laboratorio para determinar la EA, pero no todas reúnen las características de simplicidad, sensibilidad y aplicabilidad universal. Además, expresan los resultados en distintas unidades, lo que dificulta su comparación e interpretación⁽⁸⁾⁽⁹⁾.

Para condiciones de erosión hídrica se utilizan principalmente técnicas de tamizado en húmedo⁽⁹⁾. En el Uruguay la EA no se ha determinado sistemáticamente; se han utilizado distintas técnicas de tamizado en húmedo y adaptaciones⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾. No existe un consenso sobre qué técnica utilizar, y los resultados no son comparables.

Para caracterización de suelos en Uruguay se utilizó hasta el año 1990 la técnica de Henin et al.⁽¹¹⁾ que determina la inestabilidad de agregados⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾, pero se dejó de aplicar porque utiliza benceno que es perjudicial para la salud. La técnica de Le Bissonnais et al.⁽¹⁴⁾ es una adaptación de la técnica de Henin et al.⁽¹¹⁾, y ha sido utilizada por Rubio⁽¹⁷⁾ para molisoles, quien reporta que diferencia historias de uso. La técnica del manual de laboratorios de USDA⁽¹⁸⁾, es una adaptación de Kemper y Rosenau⁽¹³⁾⁽¹⁹⁾, y sus variantes también han sido utilizadas a nivel nacional⁽¹⁵⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾ encontrando que los sistemas que incluyen pasturas presentan mayor EA que sistemas con cultivos.

En Uruguay la información sobre la relación entre propiedades del suelo y la EA es limitada, encontrándose el trabajo de Rubio⁽¹⁷⁾ con la técnica de Le Bissonnais et al.⁽¹⁴⁾ para molisoles. Por lo tanto, no existen resultados de EA con Le Bissonnais et al.⁽¹⁴⁾ y USDA⁽¹⁸⁾ aplicadas a un amplio rango de texturas y asociados a distintas propiedades del suelo. Por tratarse de una propiedad compleja, es de interés contar con una técnica de laboratorio que permita generar información y asociarla a otras propiedades, para posibles aplicaciones en modelos. Lo mismo sucede con el factor K, frente a las dificultades metodológicas de la ecuación, Beretta-Blanco y Carrasco-Letelier⁽²²⁾ propusieron un modelo mixto para estimarlo.

Disponer de una técnica de referencia en el país para estimar la EA posibilitaría seleccionar el s de forma objetiva para la estimación del factor K, definir un indicador del estado físico del suelo, disponer de una técnica de consenso para ser utilizada en laboratorios y poder comparar resultados a futuro.

El objetivo general de este trabajo fue evaluar dos técnicas de laboratorio (USDA⁽¹⁸⁾ y Le Bissonnais et al.⁽¹⁴⁾) en suelos del Uruguay, como aporte metodológico en la determinación de la EA.

Los objetivos específicos fueron:

- 1) Evaluar la sensibilidad, similitud y precisión de dos técnicas de laboratorio (USDA⁽¹⁸⁾ y Le Bissonnais et al.⁽¹⁴⁾) para clasificar la EA en suelos con diferentes texturas e intensidades de uso.
- 2) Generar una base de datos relacionando los valores de EA (Le Bissonnais et al.⁽¹⁴⁾ y USDA⁽¹⁸⁾) con otras propiedades para suelos con un amplio rango de texturas, y evaluar las variables que mejor explican la diferencia entre los sitios estudiados.

Para cumplir estos objetivos se tomaron muestras imperturbadas de horizontes A, cubriendo un amplio rango de texturas (arcillosos a francos) y contenidos de carbono orgánico (desde 19 a 33 gC.Kg⁻¹).

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Sitios de muestreo

Uruguay se encuentra en América del Sur, entre los paralelos 30 ° y 35 ° de latitud Sur y los meridianos 53 ° y 58 ° de longitud Oeste, presenta una precipitación media anual de 1300 mm, y en zona templada con una temperatura media de 17,5 °C⁽²³⁾⁽²⁴⁾.

Los sitios de muestreo consistieron en seis predios comerciales donde se disponía de información cartográfica, y seis sitios en ensayos experimentales bajo diferentes historias de uso: cultivo continuo, rotaciones de cultivo-pastura y pastura permanente.

En el Cuadro 1 se presenta la información de los sitios, y en la Figura 1 la distribución geográfica.

Cuadro 1. Descripción de los sitios seleccionados.

Ref. sitio	Historia de uso	Coordenadas geográficas	Taxonomía Uruguaya ¹	Soil Taxonomy USDA ²	Unidad 1:1.000.000 ¹	Serie 1:40.000 ³
Vc	cultivo	32°36'54.95"S - 57°32'49.97"O	Vertisol Rúptico Lúvico	Typic Hapludert	Young	Sin definir
Vp	pastura	33°33'50.35"S - 57°27'22.81"O	LAc		Risso	Sin definir
BEcp _{LE}	Rot. cultivo-pastura	34°20'33.45"S - 57°43'31.25"O	Brunosol Eutrítico Típico LAc	Vertic Argiudoll	Ecilda Paullier-Las Brujas	La Estanzuela (LEs)
BEcc _{LE}	cultivo continuo	34°20'33.34"S - 57°43'31.95"O			Fray Bentos	Portones de Haedo (PdH)
BEc	cultivo	33°28'45.53"S - 58°17'16.22"O				
BEcp _{EM}	Rot. cultivo-pastura	32°22'34.97"S - 58°3'54.38"O	Brunosol Eutrítico Típico F	Typic Argiudoll	San Manuel	Sin definir
BEcc _{EM}	cultivo continuo	32°22'34.99"S - 58°3'54.82"O				
BEp	pastura	34°5'28.23"S - 55°49'45.31"O	Brunosol Eutrítico Típico LAc a F	Typic Argiudoll	San Gabriel - Guaycurú	La Carolina (B)
BSp	pastura	34°4'10.38"S - 55°49'36.54"O	Brunosol Subéutrítico Lúvico F		Reboledo (Re)	
ARpp _{TT}	pastura permanente	33°15'51.45"S - 54°29'15.65"O	Argisol Subéutrítico	Oxyaquic Argiudoll	Alferez	Estación Sanz (ES)
ARcc _{TT}	cultivo continuo	33°15'57.72"S - 54°29'29.80"O	Melánisol Abrúptico F		Vergara	
ARp	pastura	33°12'5.37"S - 54°12'4.73"O				

Referencias: Suelos: V vertisol, BE brunosol éutrítico, BS brunosol subéutrítico, AR argisol. Historias de uso: c cultivo, cc cultivo continuo, cp rotación cultivo pastura, p

pastura, pp pastura permanente. Estaciones experimentales: EM Estación Experimental Mario A. Cassinoni, LE INIA La Estanzuela, TT INIA Treinta y Tres.

Fuentes: ¹(25), ²(26), ³(27).

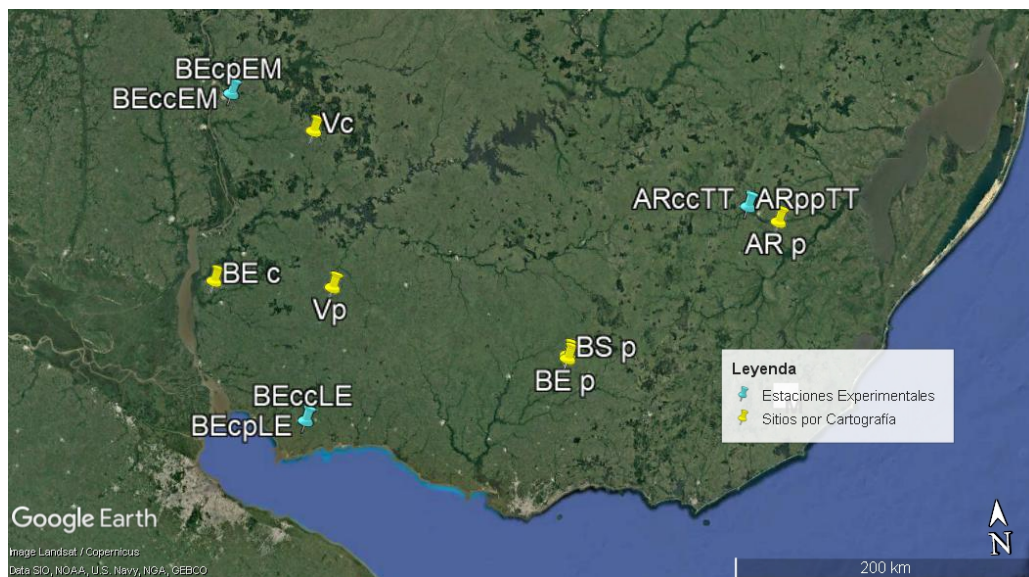


Figura 1. Distribución geográfica de los sitios.

Referencias: Suelos: V vertisol, BE brunosol éutrico, BS brunosol subéutrico, AR argisol. Historias de uso: c cultivo, cc cultivo continuo, cp rotación cultivo pastura, p pastura, pp pastura permanente. Estaciones experimentales: EM Estación Experimental Mario A. Cassinoni, LE INIA La Estanzuela, TT INIA Treinta y Tres.

A continuación, se describen brevemente los ensayos experimentales:

1) Los sitios BEcPLE y BEccLE corresponden a rotaciones de larga duración de INIA La Estanzuela (LE), instaladas en el año 1963. Estos ensayos están en parcelas de 25 m de ancho y 200 m de largo, con una pendiente de entre 2 y 4 %⁽²⁸⁾. Los tratamientos utilizados estuvieron sometidos a rotaciones de 6 años y se realizan con siembra directa desde el año 2007.

El sitio BEcPLE está bajo una rotación cultivo (50 %)-pastura (50 %), con 3 años de cultivos (maíz, cebada y sorgo, trigo y girasol), y 3 años de pradera mixta de festuca,

trébol blanco y lotus, en la que no se hace pastoreo, y se hace fertilización con P y N. El muestreo se hizo sobre el tercer año de pastura.

En los sitios BEcCLE, se practica cultivo continuo (maíz, cebada y sorgo, trigo y girasol, maíz, cebada y sorgo, y trigo y girasol) con fertilización con P y N. Los muestreos de este sitio se hicieron sobre un cultivo de sorgo próximo a cosecha.

2) Los sitios BEcPEM y BEcCEM se ubican en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC) de la Facultad de Agronomía (FAGRO). La rotación se instaló en el año 1994 utilizando siembra directa. Estos sitios presentan una pendiente de 1%⁽²⁹⁾ y son parcelas de 10 m de ancho por 50 m de largo.

El sitio BEcPEM está en el potrero 34-faja 2, en una rotación cultivo-pastura de 7 años, 50 % con cultivos (trigo, soja, cebada, sorgo y barbecho de soja) y 50 % con pastura. El muestreo se hizo en el último año de la pastura.

El sitio BEcCEM corresponde al potrero 34-faja 1, bajo cultivo continuo, que consiste en una secuencia de los mismos cultivos que en BEcPEM. El muestreo se hizo sobre trigo.

3) Los sitios ARppTT y ARcCTT corresponden a rotaciones de larga duración de la Estación Experimental Palo a Pique de INIA Treinta y Tres (TT), instaladas en el año 1995 utilizando siembra directa⁽³⁰⁾. Estos sitios presentan una pendiente de entre 2 y 3 %⁽³¹⁾.

El sitio ARppTT corresponde a una zona de pastura permanente bajo pastoreo donde se renueva cada 4 a 5 años con festuca, trébol blanco y lotus⁽³¹⁾. La parcela de este sitio es de 200 m de ancho por 300 m de largo.

El sitio ARcCTT corresponde a una zona de cultivo continuo con una secuencia de trigo, avena, sorgo y soja. El muestreo se hizo sobre el rastrojo del cultivo de avena. La parcela de este sitio es de 100 m de ancho por 300 m de largo.

2.4.2. Muestreo de campo

El muestreo del suelo se realizó con un contenido de humedad próximo a capacidad de campo, sacando bloques sobre una transecta cada dos metros. Siguiendo el manual del INTA⁽³²⁾, se extrajeron con pala de corte bloques de suelo sin perturbar, de 20 por 20 cm y de la profundidad del horizonte A. Los mismos se trasladaron en cajas rígidas acondicionadas con material amortiguador⁽³³⁾.

De los mismos sitios se extrajeron 3 anillos de 0 a 5 cm y de 5 a 10 cm, para determinar la densidad aparente. También se recolectaron muestras compuestas con 10 tomas a 20 cm con un calador, para determinar el contenido de agua por método gravimétrico.

En cuanto al número de bloques de suelo a extraer, Santanatoglia y Fernández⁽³³⁾ con la técnica de De Boodt y De Leenheer⁽³⁴⁾ señalan que con 5 bloques, obtuvieron una precisión de la media de 10 % en un Argiudol vértico. Considerando esto, para determinar el número mínimo de bloques de suelo que permitieran medir adecuadamente el error experimental, se hizo un muestreo previo para conocer la variabilidad de suelo en relación a la EA. Se definió un máximo de 6 bloques a extraer, para asegurar ser procesados en el laboratorio, dentro de las tres semanas como sugiere la bibliografía⁽¹³⁾.

En base a los resultados, se decidió extraer como mínimo cuatro bloques de suelo, ya que no se perdía precisión en mayor medida respecto a usar 6 bloques. Sin embargo, en los ensayos experimentales de LE y de la EM, se extrajeron tres bloques por tratarse de superficies reducidas.

2.4.3. Procesamiento de las muestras

Cada bloque de suelo se separó en dos partes: una se mantuvo fresca para analizar EA, y otra fue secada a 40 °C, molida con molino de martillos y tamizada a 2 mm para realizar análisis químicos y granulometría. Se determinó el porcentaje de gravillas con la fracción mayor a 2 mm.

En los sitios de ensayos experimentales cada mitad de bloque se subdividió a su vez en tres partes: toda la profundidad del horizonte A, un estrato de 0 a 5 cm, y otro de 5 a 10 cm. Los datos obtenidos a las tres profundidades se utilizaron para tener un mayor número de muestras analizadas y evaluar mejor la similitud, precisión y sensibilidad de las técnicas.

Las muestras para determinar EA se desagregaron a mano en bandejas, y se secaron al aire. El tamizado se realizó en forma manual, utilizando tamices de 5 y 3 mm para la técnica de Le Bissonnais et al.⁽¹⁴⁾, y tamices de 2 y 1 mm siguiendo la técnica de USDA⁽¹⁸⁾. Luego se determinó el peso seco de cada fracción de agregados, y se calculó su porcentaje respecto a la muestra inicial de suelo.

2.4.4. Determinaciones de EA con la técnica de USDA

Se utilizó el protocolo de la técnica de USDA⁽¹⁸⁾ para la determinación de agregados estables en agua. Se colocaron 3 g de agregados de entre 2 y 1 mm sobre un tamiz de 0,5 mm sumergido en un recipiente con agua, y se dejaron en remojo durante 16 h. Luego el tamiz se sumergió en agua 20 veces en 40 segundos. Los agregados retenidos en el tamiz se llevaron a estufa 18 h a 105 °C y se pesaron. La masa de la arena retenida en el tamiz de 0,5 mm se determinó agregando 15 mL de dispersante (solución de hexametáfosfato de sodio y carbonato de sodio), y tamizando con agua secando nuevamente y pesando la arena retenida en el tamiz. La masa de la arena se

utilizó para corregir la masa de los agregados estables y la masa total utilizada para la determinación.

Los resultados se expresaron en porcentaje de agregados estables en agua retenidos en un tamiz de 0,5 mm, según la ecuación [1].

$$\text{USDA \% Agr. estables} = \frac{(\text{MAg} - \text{MAr})}{(\text{MT} - \text{MAr})} \times 100 \quad [1]$$

MAg = masa de agregados retenidos en el tamiz de 0,5 mm

MAr = masa de arena retenida en el tamiz de 0,5 mm

MT = masa total de agregados entre 2 y 1 mm

Esta técnica se realizó en muestras con menos de 50 % de arena, tal como se recomienda. Se realizaron 3 repeticiones de laboratorio por muestra.

2.4.5. Determinaciones de EA con la técnica de Le Bissonais

Para la técnica de Le Bissonais et al.⁽¹⁴⁾ se siguió el protocolo ajustado por Rubio⁽¹⁷⁾. Los agregados entre 5 y 3 mm se llevaron a estufa por 12 h a 40 °C, luego se separaron 10 g para cada uno de los tres pretratamientos: estallido, disgregación mecánica y capilaridad. Los resultados se expresaron en diámetro medio ponderado (DMP) en mm. Se hicieron tres repeticiones por pretratamiento.

El pretratamiento por estallido (DMPest) consistió en colocar los agregados en un matraz, agregar 50 mL de agua y dejar en reposo por 10 min.

En el pretratamiento por disgregación mecánica (DMPmec), los agregados se colocaron en un matraz con 50 mL de etanol, se dejaron en reposo 30 min, se sacó el etanol del recipiente; se trasvasaron los agregados a un matraz con 50 mL de agua, se agitó manualmente con 10 giros y se dejó reposar 30 min más.

En el pretratamiento por capilaridad (DMPcap) los agregados se colocaron por 1 h en papel de filtro sobre una tabla de succión con una presión de 3 cm.

Cada pretratamiento finalizó con un tamizado en etanol, con un tamiz de 0,05 mm que se sumergió en un recipiente con etanol aplicando un movimiento helicoidal cinco veces en 10 segundos. Para este trabajo, se utilizó el tamizador de Feodoroff en cinco sitios y en los restantes se hizo tamizado manual por razones de disponibilidad del equipo, las dos formas de tamizado están contempladas en la norma ISO 10930:2012(E)⁽³⁵⁾. Para verificar que esto no influyera en los resultados, se hizo un ensayo del método de tamizado, no habiendo diferencias significativas entre los métodos para ninguno de los pretratamientos ($p < 0,05$).

Después del tamizado con etanol los agregados se pasaron a una placa de Petri, se cubrieron con etanol para evitar su reagregación, y se llevaron a estufa por 48 h a 40 °C. Finalmente se transfirieron al tamiz superior de una columna de seis tamices (2,0 1,0 0,5 0,2 0,1 y 0,05 mm), se agitaron manualmente y se pesó lo retenido en cada tamiz. De esta forma se calculó el diámetro medio ponderado, según la ecuación [2]⁽³⁵⁾.

$$\text{DMP (mm)} = [3,5 * (\% > 2 \text{ mm})] + [1,5 * (\% 2-1 \text{ mm})] + [0,75 * (\% 1-0,5 \text{ mm})] + [0,35 * (\% 0,5-0,2 \text{ mm})] + [0,15 * (\% 0,2-0,1 \text{ mm})] + [0,075 * (\% 0,1-0,05 \text{ mm})] + [0,025 * (\% < 0,05 \text{ mm})] / 100 \quad [2]$$

Los resultados de cada pretratamiento se presentan de forma individual, y por medio de un indicador con el promedio de los tres pretratamientos (DMPm).

En Wilson y Sasal⁽³⁶⁾ indican que, si la proporción de elementos gruesos en la fracción entre 2 y 5 mm está entre 10 y 40 %, se debe calcular un DMP con y sin ellos. Si la proporción entre estos resultados es mayor a 40 % la técnica no se puede aplicar a ese suelo.

2.4.6. Análisis químicos y físicos

El pH se determinó en agua y en KCl con relación 1:1 por el método potenciométrico⁽³⁷⁾. Para los suelos con un pH en KCl menor a 4,2 se determinó aluminio intercambiable⁽³⁸⁾.

Las bases intercambiables y la CIC a pH7 (CICpH7) se extrajeron por percolado a través de un extractor mecánico de vacío SampleTek, utilizando solución de acetato de amonio a pH7, lavado con etanol y solución de NaCl⁽³⁹⁾. La determinación de las bases intercambiables se hizo por absorción atómica (Ca, Mg) y emisión atómica (K, Na)⁽³⁹⁾. Se estimó el porcentaje de sodio calculado como sodio sobre la sumatoria de las bases. La CIC se determinó por destilación y titulación⁽³⁹⁾. Se calculó la CIC de la arcilla (CIC_{Ac}), según la ecuación [3]⁽⁴⁰⁾:

$$\text{CIC}_{Ac} = \frac{\text{CICpH7} - 2 \times \text{Materia Orgánica (\%)}}{\text{Ac (kg) / suelo (kg)}} \quad [3]$$

La granulometría del suelo se determinó por el análisis mecánico de la pipeta⁽⁴¹⁾ y la clase textural por USDA⁽⁴²⁾. El COS se determinó por la técnica de Walkley y Black⁽⁴³⁾. La densidad aparente (DAP) se determinó mediante el método de los anillos a saturación⁽⁴⁴⁾, se utilizaron anillos de 95 cm³.

2.4.7. Análisis estadísticos

Para estimar la similitud de las técnicas en la medición de la EA, se utilizaron las determinaciones de los sitios de ensayos experimentales con cultivo continuo (BE_{CCL}, BE_{CCEM} y AR_{CCTT}), rotación cultivo-pastura (BE_{CPL} y BE_{CPEM}), y pastura permanente (AR_{PPTT}) de cada sitio por separado. La similitud entre técnicas se determinó mediante correlaciones de Pearson de los residuales del siguiente modelo de análisis ecuación [4]. Se ajustó un modelo por variable y por sitio.

$$y_{ijk} = \mu + M_i + P_j + MP_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad [4]$$

y es el valor de EA; μ es la media general; M_i es el efecto del i -ésimo historia de uso (cultivo continuo, rotación cultivo-pastura, pastura permanente); P_j es j -ésima profundidad (0-5 cm; 5-10 cm; profundidad del horizonte A); MP es la interacción entre el efecto M_i y el efecto P_j ; ϵ_{ijk} , se asume tiene distribución normal con varianzas homogéneas.

El supuesto de homogeneidad de varianza se chequeó en cada modelo de análisis y se observó que en algunos casos existía heterogeneidad de varianzas entre las historias de uso. Para solucionar este problema se ajustó un modelo que estima una varianza por historia de uso.

La precisión de las técnicas se comparó con el coeficiente de variación (CV) calculado por separado para cada sitio de ensayo experimental, para su cálculo se usó la varianza del error estimada con el modelo de la ecuación [4].

Luego, para evaluar la sensibilidad de las técnicas, entendida como la capacidad de la técnica para diferenciar la historia de uso del suelo en los ensayos experimentales, se realizaron análisis de varianza y de comparación múltiples (Tukey) por sitio, utilizando el modelo de análisis mencionado de la ecuación [4].

También, para todos los horizontes A de todos los sitios (experimentales y comerciales) se analizaron por separado sitios con pastura (incluye cp y pp) de sitios con cultivo (incluye cc); en cada caso se comparó la capacidad de las técnicas de diferenciar entre los sitios mediante el análisis de varianza y de comparaciones múltiples de los siguientes modelos de análisis por variable y por historia de uso ecuación [5]:

$$y_{ij} = \mu + S_i + \epsilon_{ij} \quad [5]$$

y el valor de EA para cada técnica, o carbono orgánico; μ es la media general; S_i es el efecto del i -ésimo sitio; ϵ son los residuales del modelo que se usaron para

comparar ambas técnicas ϵ_{ij} , se asume tiene distribución normal con varianzas homogéneas.

El supuesto de homogeneidad de varianza se chequeó en cada modelo de análisis y se observó que en algunos casos existía heterogeneidad de varianzas entre sitios. Para solucionar este problema se ajustó un modelo que estima una varianza por sitio.

Para los test de hipótesis se utilizó un nivel de significancia igual o menor a 0,05 con un 95 % de confianza. Para los análisis estadísticos se utilizó el nlme⁽⁴⁵⁾ y emmeans⁽⁴⁶⁾ del software estadístico R⁽⁴⁷⁾.

Para analizar las variables de los suelos que pueden explicar la diferencia entre los sitios estudiados, se utilizó el análisis multivariado por componentes principales con el software estadístico R⁽⁴⁷⁾.

2.4.8. Descripción de campo

Se utilizaron las planillas de descripción de campo para seleccionar los suelos y para la descripción morfológica de la estructura siguiendo las pautas de MGA. PELS. FAGRO⁽⁴⁸⁾ considerando todo el horizonte A.

2.5. RESULTADOS

2.5.1. Características físicas y químicas de los suelos

Las características de los suelos seleccionados se presentan en el Cuadro 2, donde los sitios están ordenados de mayor a menor contenido de arcilla. El porcentaje de gravillas fue en todos los casos menor a 3 %.

Cuadro 2. Características físicas y químicas de los suelos.

Sitio e historia de uso*	Ar	L	Ac	Clase textural	C	pH rel 1:1			Bases intercambiables					CIC pH 7	CIC Ac	Estructura del horizonte A**
						H2O	KCl	Ca	Mg	K	Na	Na / Σ Bases %	Al int %			
Vc	20,7	29,3	50,1	Ac	32,6	5,6	4,7	37,4	2,9	0,75	0,10	0,24	-	45,2	67,8	bs 2-1 d
Vp	29,1	33,4	37,5	FAc	32,9	5,4	4,4	20,1	5,0	0,62	0,12	0,46	-	29,1	47,3	bs 2-1 f
BEcpLE	8,0	61,0	31,1	FAcL	25,7	5,4	4,4	12,6	2,4	0,53	0,13	0,80	-	20,7	38,1	bs3-2m gr2m
BEccLE	10,2	58,2	31,7	FAcL	18,6	5,1	4,3	12,2	3,0	0,61	0,10	0,65	-	19,2	40,3	masivo
BEc	8,8	61,2	30,1	FAcL	21,2	5,3	4,4	11,6	1,6	0,68	0,09	0,65	-	17,0	32,3	bs 2 m
BEcpEM	28,1	42,9	29,1	FAc	25,5	5,4	4,5	14,1	2,2	0,80	0,08	0,44	-	20,4	39,8	bs3 rompen a 2 y 1mf
BEccEM	20,9	48,5	30,6	FAc/FAcL	21,4	5,3	4,4	14,2	2,0	0,53	0,08	0,47	-	19,9	40,8	bs y ba 2-3 mf
BEp	25,2	45,6	29,3	FAc	22,6	5,7	4,5	13,0	4,1	0,44	0,35	1,94	-	21,4	46,5	ba 3 m
BSp	34,4	39,2	26,5	F/FAc	21,2	5,5	4,4	7,1	2,2	0,45	0,21	2,06	-	14,4	26,9	bs 1 f
ARp	43,1	32,9	24,1	F	19,7	5,2	4,2	5,7	2,0	0,30	0,13	1,54	0,8	12,8	25,0	bs3d
ARppTT	40,3	38,9	20,9	F	21,8	5,7	4,6	6,9	2,3	0,20	0,29	2,99	-	12,1	22,0	bs3d
ARccTT	40,4	37,1	22,6	F	18,8	4,8	3,9	6,0	1,8	0,29	0,11	1,27	4,5	12,7	27,5	bs4d rompen a 3 y 2

* Suelos: V vertisol, BE brunisol éutrico, BS brunisol subéutrico, AR argisol. Historias de uso: c cultivo, cc cultivo continuo, cp rotación cultivo pastura, p pastura, pp pastura permanente. Estaciones experimentales: EM Estación Experimental Mario A. Cassinoni, LE INIA La Estanzuela, TT INIA Treinta y Tres. ** Forma de agregados: bs, bloques subangulares; gr, granular; ba, bloques angulares; 1, finos; 2, medios; 3, gruesos; d, débil; m, moderado; f, fuerte⁽⁴⁸⁾.

2.5.2. Evaluación de la sensibilidad, similitud y precisión de las técnicas para clasificar la EA

Dando respuesta al primer objetivo específico se presentan los resultados de EA.

2.5.2.1. Sensibilidad de la técnica de USDA para clasificar sitios según la EA

Los valores resultantes de la técnica de USDA⁽¹⁸⁾ se clasificaron según Cuadro 3 en 5 categorías, desde muy estable a muy inestable.

Cuadro 3. Categorías en las que se clasifican la EA en USDA⁽⁹⁾⁽⁴⁹⁾

USDA (% Agr. estables)	Clasificación
80-100	Muy estable
60-80	Estable
40-60	Medianamente estable
20-40	Inestable
0-20	Muy inestable

El 70 % de los suelos con pasturas fue clasificado como estable (Cuadro 4), mientras que solo el 20 % de los suelos con cultivos, fue estable. La clasificación en categorías de EA de los diferentes sitios bajo cultivo coincidió con la separación que surgió de la diferencia de medias, no así para los sitios bajo pastura ya que la separación de medias no fue tan categórica.

Cuadro 4. Resultados de la EA con la técnica de USDA y su clasificación, para todos los sitios según historia de uso.

Sitio e historia de uso	% Agr. estables	Clasificación USDA
Pasturas		
ARp	85,5 a	Muy estable
BEp	78,9 b	
BEcp _{EM}	74,4 bc	
Vp	69,1 cd	Estable
ARpp _{TT}	66,4 d	
BSp	62,3 cde	
BEcp _{LE}	51,4 e	Medianamente estable
p-valor		< .0001
Cultivos		
Vc	67,4 a	Estable
BEcc _{EM}	48,7 b	Medianamente estable
ARcc _{TT}	33,7 c	
BEc	30,2 c	Inestable
BEcc _{LE}	23,7 c	
p-valor		< .0001

Referencias: EM EEMAC, LE La Estanzuela, TT Treinta y Tres. Historia de uso: c cultivo, cc cultivo continuo, cp rotación cultivo-pastura, p pastura, pp pastura permanente. Letras distintas indican diferencias significativas para pastura (incluye cp y pp) y cultivo (incluye cc) por separado. Clasificación USDA⁽⁹⁾⁽⁴⁹⁾.

2.5.2.2. Sensibilidad de la técnica de Le Bissonnais para clasificar sitios según la EA

Los valores resultantes de la técnica de Le Bissonnais⁽¹⁴⁾ (DMP mm) se clasificaron según los criterios propuestos en la técnica⁽³⁵⁾ (Cuadro 5).

Cuadro 5. Categorías en las que se clasifican la EA en Le Bissonnais⁽¹⁴⁾⁽³⁴⁾.

Le Bissonnais (DMP mm)	Clasificación
> 2,0	Muy estable
1,3 - 2,0	Estable
0,8 - 1,3	Medianamente estable
0,4 - 0,8	Inestable
< 0,4	Muy inestable

En el Cuadro 6 se muestra que el 71 % de los suelos con pasturas fue clasificado como muy estable, mientras que solo el 20 % de los suelos con cultivos fue muy estable según el DMPm. Los vertisoles fueron clasificados como estables tanto bajo pastura como bajo cultivo, obteniendo los menores valores. Al igual que con el método de USDA, la separación de medias fue más categórica entre sitios bajo cultivo respecto a los sitios bajo pasturas.

Cuadro 6. La EA por la técnica de Le Bissonnais⁽¹⁴⁾ para los tres pre-tratamientos y el promedio, para todos los sitios según historia de uso.

a) Pastura				b) Cultivo			
Pre-trat.	Sitio e historia de uso	DMP (mm)	Clasificación Le Bissonnais	Pre-trat.	Sitio e historia de uso	DMP (mm)	Clasificación Le Bissonnais
DMP _{pest}	BE _p	2,17 a	Muy Estable	DMP _{pest}	BE _{ccEM}	0,77 a	Inestable
	AR _p	1,95 ab	Estable		V _c	0,70 ab	
	BE _{cpEM}	1,70 b			AR _{ccTT}	0,58 b	
	AR _{ppTT}	1,48 bc			BE _{ccLE}	0,47 b	
	B _{Sp}	0,92 cd	Medianamente Estable		BE _c	0,23 c	Muy Inestable
	BE _{cpLE}	0,70 d			p-valor	< .0001	
	V _p	0,58 d					
	p-valor	< .0001					
DMP _{mec}	BE _{cpEM}	2,83 a	Muy Estable	DMP _{mec}	BE _c	2,70 a	Muy Estable
	BE _p	2,82 a			BE _{ccEM}	2,63 a	
	BE _{cpLE}	2,70 a			BE _{ccLE}	2,50 ab	
	AR _{ppTT}	2,67 ab			AR _{ccTT}	2,30 b	
	AR _p	2,50 b			V _c	1,38 c	Estable
	B _{Sp}	2,04 c			Estable	p-valor	< .0001
	V _p	1,83 c					
	p-valor	< .0001					
DMP _{cap}	BE _{cpEM}	3,30 a	Muy Estable	DMP _{cap}	BE _c	3,18 a	Muy Estable
	AR _{ppTT}	3,23 a			BE _{ccEM}	3,17 a	
	BE _p	3,20 a			AR _{ccTT}	3,15 a	
	BE _{cpLE}	3,20 a			BE _{ccLE}	3,10 ab	
	V _p	3,10 ab			V _c	2,73 b	
	AR _p	2,93 bc				p-valor	< .0001
	B _{Sp}	2,74 c					
	p-valor	< .0001					
DMP _m	BE _p	2,75 a	Muy Estable	DMP _m	BE _{ccEM}	2,20 a	Muy Estable
	BE _{cpEM}	2,63 ab			BE _c	2,03 ab	Estable
	AR _p	2,48 abc			AR _{ccTT}	2,02 b	
	AR _{ppTT}	2,45 bc			BE _{ccLE}	2,00 b	
	BE _{cpLE}	2,20 cd			V _c	1,58 c	
	B _{Sp}	1,92 de			Estable	p-valor	< .0001
	V _p	1,83 e					
	p-valor	< .0001					

Referencias: EM EEMAC, LE La Estanzuela, TT Treinta y Tres. Suelos: AR argisol, BE brunosol éútrico, BS brunosol subéútrico y V vertisol. Historia de uso: c cultivo, cc cultivo continuo, cp rotación cultivo-pastura, p pastura, pp pastura permanente. Letras distintas indican diferencias significativas para pastura (incluye cp y pp) y cultivo (incluye cc) por separado. DMP diámetro medio ponderado en

mm, Pre-trat. pretratamiento, est estallido, mec disgregación mecánica, cap capilaridad y m promedio de los tres pretratamientos.

De los tres pretratamientos, el que clasificó las muestras de forma más extrema fue el DMPest, donde el 85 % de los suelos con pasturas se clasificaron como estables y medianamente estables, y bajo cultivos el 80 % de los suelos se clasificaron como inestables y muy inestable. El DMPmec clasificó como muy estables al 70 % y 80 % de los suelos con pasturas y cultivos respectivamente. El DMPcap clasificó a todos los suelos como muy estables, por lo que no diferenció a los suelos.

2.5.2.3. Similitud entre las estimaciones de EA por las diferentes técnicas y precisión de las mismas

Siguiendo con el objetivo específico 1, para analizar la similitud de las técnicas entre sí, se evaluó la correlación entre los residuales con una matriz de correlaciones, para cada sitio experimental por separado. Los resultados de las técnicas analizadas presentaron correlaciones positivas y significativas entre sí (Cuadro 7).

De la evaluación de sensibilidad de las técnicas, surgió que en general para los tres ensayos, fueron sensibles para separar historias de uso con un p-valor $< .0001$, a excepción del DMPcap en TT con un p-valor de 0,4282.

Cuadro 7. Comparación de la similitud de las técnicas entre sí a través de una matriz de correlaciones para cada sitio experimental.

	DMPm	0,85 ***	0,89 ***	0,74 ***	0,74 ***
BEcp _{LE}	DMPmec		0,79 ***	0,37	0,61 **
BEcc _{LE}			DMPest	0,55 *	0,69 **
				DMPcap	0,53 *
				USDA	
	DMPm	0,94 ***	0,78 ***	0,84 ***	0,68 **
BEcp _{EM}	DMPmec		0,70 **	0,79 ***	0,66 **
BEcc _{EM}			DMPest	0,47 *	0,69 **
				DMPcap	0,40
				USDA	
	DMPm	0,80 ***	0,93 ***	0,60 ***	0,58 ***
ARpp _{TT}	DMPmec		0,58 ***	0,45 **	0,49 **
ARcc _{TT}			DMPest	0,45 **	0,52 **
				DMPcap	0,47 **
				USDA	

Código de significancia: 0 '***' 0,001 '***' 0,01 '*' 0,05 ', ' 0,1 ' ' 1

Para comparar la precisión de las técnicas se estimó el coeficiente de variación (CV %) en cada ensayo experimental, obteniéndose el valor promedio más bajo para la técnica USDA, y más alto para DMPmec (Cuadro 8).

Cuadro 8. Precisión para cada técnica por sitio experimental y promedio para cada técnica, a través del coeficiente de variación (CV %).

	BEcp _{LE}	BEcp _{EM}	ARpp _{TT}	Promedio
	BEcc _{LE}	BEcc _{EM}	ARcc _{TT}	
Técnica	CV %			
USDA	5,7	3,3	4,5	4,5
DMPm	9,5	15,9	19,5	15,0
DMPest	11,4	15,1	24,3	16,9
DMPmec	29,7	36,6	36,4	34,3
DMPcap	7,9	11,5	8,9	9,4

2.5.3. Determinación de las variables que mejor explican la diferencia entre sitios

Para identificar las variables del suelo que puedan explicar la diferencia entre sitios y dar respuesta así al segundo objetivo específico, se utilizó un análisis multivariado por componentes principales (ACP).

Se consideraron las siguientes variables: EA por USDA y el pretratamiento de estallido de Le Bissonnais (DMPEst), arena (Ar), limo (L), arcilla (Ac), carbono (C), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), capacidad de intercambio catiónico (CICpH7) y densidad aparente (DAP). Se incorporó sólo el DMPEst por ser el pretratamiento que diferenció más a los suelos.

Los componentes 1 y 2 (Figura 2) explicaron el 73 % de la variabilidad entre los sitios. En el componente 1 las variables de mayor peso fueron arcilla, calcio y CICpH7. Las variables que tuvieron mayor peso en el componente 2 fueron la EA por la técnica de USDA, la arena, y en menor medida el DMPEst. USDA y DMPEst se correlacionaron entre sí, y presentaron una asociación directa con la arena e inversa con el limo y la densidad aparente, pero no se observó una asociación clara con el resto de las variables estudiadas.

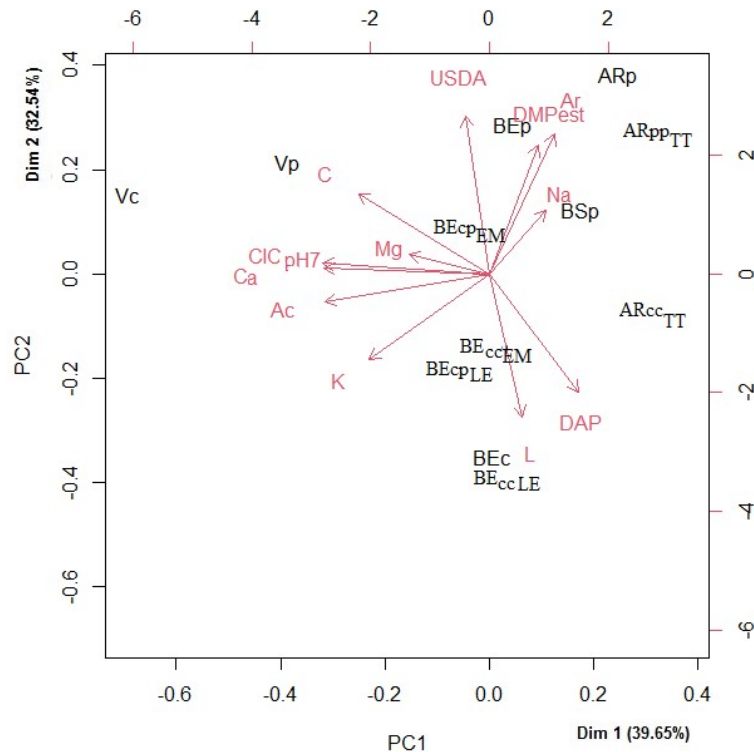


Figura 2. Análisis multivariado por componentes principales para las variables analizadas y los sitios, según dimensión 1 y 2.

Referencias: Variables: USDA, DMPest pretratamiento de estallido de Le Bissonnais, Ar arena, L limo, Ac arcilla, C carbono, Ca calcio, Mg magnesio, K potasio, Na sodio, CICpH7 capacidad de intercambio catiónico a pH7 y DAP densidad aparente. Sitios: AR argisol, BE brunosol éútrico, BS brunosol subéútrico y V vertisol. EM EEMAC, LE La Estanzuela, TT Treinta y Tres. Historia de uso: c cultivo, cc cultivo continuo, cp rotación cultivo-pastura, p pastura, pp pastura permanente.

En la Figura 2 también se observa cómo las variables analizadas explicaron el agrupamiento de los sitios, donde el componente 1 está explicado por características que son poco modificables por historia de uso. En este sentido, agrupó por un lado a los sitios de mayor contenido de arcilla, Ca y CIC (vertisoles) y por otro a los de menor contenido de arcilla, es decir a los argisoles y al BSp. Por otro lado, el componente 2 está explicado en gran medida por características modificables por las

historias de uso, la EA evaluada por las técnicas de USDA y DMPEst, además del contenido de limo y densidad aparente en sentido inverso. Este componente agrupó en el cuadrante superior a los sitios bajo pasturas y en el inferior los sitios bajo cultivos, excepto en los vertisoles porque la EA de estos suelos está fuertemente vinculada a la arcilla.

2.6. DISCUSIÓN

2.6.1. Evaluación de técnicas de tamizado en húmedo

La técnica de USDA fue sensible para separar sitios. Bajo pasturas más de 50 % de agregados fueron estables, en cambio, bajo cultivos sin ser el Vc, los demás suelos presentaron menos de 50 % de agregados estables. USDA fue sensible también a la textura, asignándole menos estabilidad a los sitios más limosos (LE, y BEc con 60 % de limo), y menos arcilla, lo que repercute en la formación de complejos arcillo húmicos y por lo tanto no favorece la agregación⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾.

De la técnica de Le Bissonnais et al.⁽¹⁴⁾, el DMPEst fue el pretratamiento más sensible para diferenciar sitios, y más categórico en la clasificación de los suelos. Los suelos con pasturas fueron clasificados como muy estables, estables y medianamente estables, mientras que los suelos bajo cultivo fueron clasificados como inestables, y muy inestable el suelo más limoso (BEc).

En el DMPmec la EA queda clasificada en un 70 y 80 % en la misma categoría para pasturas y cultivos respectivamente. Por otro lado, este pretratamiento fue considerado por Rubio⁽¹⁷⁾ como el más sensible de los tres. Para Gabioud et al.⁽⁵¹⁾ la importancia de este mecanismo se reduce en condiciones de siembra directa, ya que los resultados entre cultivos y suelo inalterado pueden ser similares dado que los residuos protegen el suelo de la lluvia. Además, éste fue el pretratamiento que requirió mayor tiempo de ejecución.

En el DMPcap todos los suelos quedaron clasificados como muy estables lo que no permitió diferenciarlos. Este último pretratamiento presentó dificultades en su ejecución, como fue lograr un humedecimiento homogéneo de las muestras y requirió varias repeticiones. Rubio⁽¹⁷⁾ también indicó dificultades en su ejecución.

El DMPm promedia los resultados de los tres pretratamientos por lo que no sería un buen indicador dado que incluye las dificultades mencionadas en el pretratamiento DMPcap. Los resultados concuerdan con lo señalado por Rubio⁽¹⁷⁾ en el sentido que el DMPm resultó menos sensible a las diferencias de sitio e historia de uso. Sin embargo, con mayor o menor sensibilidad, Rubio⁽¹⁷⁾ y Gabioud et al.⁽⁵¹⁾ señalan que los tres pretratamientos lograron diferenciar historias de uso, asignando mayor EA en sistemas que incluyen pasturas que los basados en cultivos.

Los vertisoles son clasificados por USDA, DMPm y DMPmec como estables tanto para pastura como para cultivo, y el DMPest los clasificó como inestables. La alta estabilidad atribuida a los vertisoles está dada por la cantidad y el tipo de arcillas predominantes como las esmectitas, que aportan mayor superficie específica a los agregados del suelo y actúa como protector del carbono orgánico de dichos suelos⁽⁴⁹⁾ ⁽⁵⁰⁾. Para Novelli⁽⁵²⁾ en vertisoles la agregación fue una variable poco sensible al intentar diferenciar historias de uso, debido a que su agregación depende fuertemente de la arcilla. Una explicación para este comportamiento lo señala Ford⁽⁴⁰⁾, dado que los suelos con elevada cantidad de montmorillonita, forman agregados por secado y contracción, y la estabilidad de los mismos depende de la interacción con otros componentes orgánicos. Este autor indica también que los agregados con este tipo de arcillas son inestables frente al agua porque las arcillas se expanden y estallan cuando el suelo se moja.

Los suelos con mayor porcentaje de limo, (BEc con 61 %, BEcpLE con 60% y BEccLE con 58,2 %), clasificados como franco arcillo limosos, fueron los que obtuvieron menos estabilidad, especialmente con las técnicas USDA y DMPest en presencia de estallido. Esto coincide con la mayor erodabilidad reportada para los suelos limosos que presentan menor contenido de arcillas y en consecuencia menor formación de complejo arcillo-húmicos que permitan el desarrollo de agregados estables⁽⁴⁹⁾. Sin embargo, el BEc en el pretratamiento DMPmec y en el DMPcap obtuvo el mayor tamaño de agregados estables en suelos con cultivos, indicando que sería un suelo más estable en condiciones de no estallido, y por el contrario, es muy

sensible a condiciones de humedecimiento rápido por estallido. Por otro lado, los suelos franco-arcillosos (BE_{cpEM}, BE_{ccEM} y BE_p), presentaron mayor estabilidad en todas las técnicas, lo que se puede deber a su menor contenido de limo, y suficiente contenido de arcilla para mantener su cementación. En el brunosol subéutrico y en los argisoles, que son de texturas francas, las técnicas también fueron sensibles para asignar más estabilidad a suelos con pasturas que a suelos con cultivos. Estos resultados coinciden con lo reportado en la bibliografía respecto a que, en molisoles, la EA es más dependiente del COS⁽⁵¹⁾⁽⁵²⁾.

La precisión de las técnicas fue variable. La técnica de USDA presentó mayor precisión, con un CV de 4,5 %, siendo este resultado similar al presentado para este tipo de técnica por⁽¹³⁾⁽⁴⁹⁾. Explicado por el tamaño de agregado, Kemper y Koch⁽⁴⁹⁾ indican que utilizando una misma técnica, los agregados de 1 a 2 mm tienen una mayor repetibilidad que los de 3 a 5 mm, por lo tanto, seleccionaron agregados de 1 a 2 mm para tener mayor precisión sacrificando otra información que puedan aportar los agregados de mayor tamaño. Sin embargo, Deviren Saygin et al.⁽⁵³⁾ reportaron un CV de 19,3 % aplicando una técnica similar a la de Kemper y Rosenau⁽¹³⁾. Para los pretratamientos de Le Bissonnais que utiliza agregados de 3 a 5 mm, la precisión fue desde 34 % para DMP_{mec}, hasta 9 % para DMP_{cap}. Gabioud et al.⁽⁵¹⁾ encontraron que el DMP_m no superó el 20 % de CV. Deviren Saygin et al.⁽⁵³⁾ reportaron valores similares a los encontrados en este trabajo: DMP_{est} 18,7 %, DMP_{mec} 11,5 % y DMP_{cap} 33,4 %. En la norma ISO10930:2012(E)⁽³⁵⁾ reportan que la sensibilidad y repetibilidad de la técnica en promedio es de 10 %. El tipo de suelo no afectó el CV ya que el orden de magnitud para cada pretratamiento fue similar en los distintos sitios, coincidiendo con Gabioud et al.⁽⁵¹⁾.

2.6.2. Aspectos operativos de las técnicas de tamizado en húmedo

El número de bloques extraídos fue entre 4 y 6, siendo aproximado a lo reportado por Santanatoglia y Fernández⁽³³⁾ para la técnica de De Boodt y De Leenheer⁽³⁴⁾ de 5

bloques para un Argiudol vértico. En los casos de LE y EM si bien fueron menos bloques de suelo, la superficie fue más homogénea, en cambio en TT fueron el doble de bloques con una superficie mucho mayor, por lo que se puede inferir que los muestreos fueron adecuados en cada sitio. De acuerdo a los resultados obtenidos y por aspectos operativos se encontró que 4 bloques de suelo fueron la cantidad adecuada a extraer en campo.

El desagregado inicial del suelo lleva 1 jornada por cada bloque y medio aproximadamente en relación a las dimensiones y objetivos de este trabajo, y el secado al aire una semana.

En Le Bissonnais hacer la determinación para los tres pretratamientos requiere de 10 a 15 días para cada tanda de muestras, con un procesado de 57 min / muestra, similar a lo reportado por Gabioud et al.⁽⁵¹⁾.

Por otro lado, en la técnica de USDA el proceso fue tres veces más rápido, llevando 18 min/muestra. Las tandas dependen de la disponibilidad de tamices en este caso 10, y el resultado se obtuvo en 5 días.

2.6.3. Relación entre los sitios, la EA y otras variables del suelo

Los contenidos de arcilla, calcio y CICpH7 fueron las variables con mayor peso, con correlación mayor a 0,95 con el componente 1 del análisis multivariado de componentes principales (ACP), que explicó casi el 40 % de la variabilidad entre sitios. Una gran parte de la variabilidad entre sitios se explicó por estas propiedades, poco modificables por la historia de uso. El componente 1 agrupó a los suelos con más de 35 % de arcilla por un lado (vertisoles), de los de menos de 25 % de arcilla por otro (argisoles). Contrariamente a lo esperado la arcilla no tuvo correlación con la EA medida por las técnicas de USDA y DMPest⁽⁵⁴⁾.

La EA por USDA y el contenido de arena fueron las variables de mayor peso en el componente 2 del ACP que explicó otro 33 % de la variabilidad entre sitios. La arena también fue reportada como variable de peso por Beretta-Blanco y Carrasco-Letelier⁽²²⁾ en un modelo lineal mixto para factor K, y por Rubio⁽¹⁷⁾ relacionado de forma positiva y significativa con el DMPcap, pero de forma negativa con el DMPmec. El componente 2 diferenció historias de uso, en el cuadrante superior ubicó a los suelos con pastura y en el inferior a los de cultivo a los que se adjudicó en general menor estabilidad, a excepción del ARp que se ubicó con alta estabilidad.

La DAP y el limo se correlacionaron negativamente con la EA, coincidiendo con lo reportado⁽⁵⁴⁾, ya que una alta DAP puede estar indicando compactación (para un mismo suelo bajo diferentes historias de uso), y un alto contenido de limo no contribuye a la EA.

Del ACP surge que la correlación entre el COS y el componente 1 fue de 0,76 explicando también un alto porcentaje del mismo en identificar la variabilidad entre sitios. De la relación entre EA y COS, se observó que a medida que aumenta el COS, mayor fue la EA. El valor más alto lo registraron los vertisoles con 33 gC.kg⁻¹, y los menores valores los argisoles con menos de 20 gC.kg⁻¹. Novelli⁽⁵²⁾ señala que en los molisoles la agregación aumenta hasta un máximo de 30 gC.kg⁻¹, valores mayores no afectaron la agregación. Este autor, para vertisoles indica que, el COS influye en la agregación cuando es mayor a 35 gC.kg⁻¹, en valores menores a este, el principal agente de agregación es la arcilla.

De las bases analizadas sólo el calcio explicó las diferencias entre sitios, el sodio no fue significativo y esto se puede deber a que los suelos estudiados presentaron bajos contenidos de Na (menor a 3 % de las bases).

2.7. CONCLUSIONES

Se pudo cumplir el objetivo planteado ya que se seleccionó una técnica como mejora metodológica en la determinación de la EA. En general, las técnicas estudiadas fueron sensibles para diferenciar los suelos. La técnica de USDA es la que reúne las mejores condiciones, por su sensibilidad para diferenciar la EA, precisión y menor tiempo de ejecución. De seleccionar la técnica de Le Bissonnais, se propone utilizar sólo el pretratamiento DMPest en vez de todos los pretratamientos, por su sensibilidad a diferenciar la EA, su precisión y menor tiempo de ejecución. Se desaconseja el uso de DMPcap que presentó dificultades de ejecución y no diferenció suelos, así como el DMPm ya que lo incluye.

Se pudo desarrollar una base de datos de propiedades del suelo con los resultados de EA. Del análisis multivariado por componentes principales surge que las variables que explican la mayor parte de la variabilidad entre sitios son, por un lado, la arcilla, el calcio y la CICpH7, y en menor medida % C y por otro, la EA estimada por USDA, la arena, y en sentido opuesto, el limo y la densidad aparente. La relación entre arcilla y COS y la EA fue menor a la esperada, posiblemente debido a la gran interacción entre diferentes factores.

Por último, para próximos trabajos sería interesante evaluar la biología del suelo asociada a la EA, el carbono orgánico particulado asociado a la EA y continuar evaluando la técnica USDA para disponer de más resultados analíticos.

2.8. BIBLIOGRAFÍA

1. DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). Anuario estadístico agropecuario 2020. MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca) [Internet]. 2020. [Consultado 4 abril 2021];23:p.268 Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/anuario-estadistico-agropecuario-2020>
2. OPYPA (Oficina de Programación y Política Agropecuaria). Temas de Política: Avances en la política de conservación de suelos. [En línea]. En: Anuario OPYPA 2013. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2013. Consultado: 20 enero 2021. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2013>
3. OPYPA (Oficina de Programación y Política Agropecuaria). Temas de Política: Estimación del impacto de la implementación de la política de Planes de Uso y Manejo Responsable del Suelo en la reducción de las pérdidas de los suelos por erosión hídrica. [En línea]. En: Anuario OPYPA 2020. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2020. Consultado: 20 enero 2021. Disponible en: <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/anuario2020/anuario2020.pdf>
4. OPYPA (Oficina de Programación y Política Agropecuaria). Temas de Política: Cartografía de suelos del Uruguay: historia y estado actual. [En línea]. En: Anuario OPYPA 2017. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2017. Consultado: 20 enero 2021. Disponible en: https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuario%202017/anuario_opypa_2017.pdf5
5. Renard KG, Foster GR, Weesies GA, Mc Cool DK, Yoder DC. Predicting Soil Erosion by Water: A guide to Conservation Planning with the Revised

Universal Soil Loss Equation (RUSLE), USDA-ARS Agriculture Handbook Number 703. 1997. 384p.

6. Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook 537. Washington: USDA; 1978. p. 58.
7. Wischmeier WH, Johnson CB, Cross BV. A soil credibility nomograph for farmland and construction sites. J. Soil Water Conserv. 1971;26(5):189-193.
8. Puentes R. A framework for the use of the universal soil loss equation in Uruguay. Master of Science. Texas. Texas A&M University. 1981.157p.
9. Mataix-Solera J, Benito E, Andreu V, Cerdà A, Llovet J, Úbeda X, Martí C, Varela E, Gimeno E, Arcenegui V, Rubio JL, Campo J, García-Orenes F, Badía D. Actualización en métodos y técnicas para el estudio de suelos afectados por incendios forestales. Capítulo 2.3 ¿Cómo estudiar la estabilidad de agregados en suelos afectados por incendios? Métodos e interpretación de resultados. Càtedra de Divulgació de la Ciència. Universitat de Valencia. 2010. p.109-143
10. Yoder, R.E. A directed method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. Agron. J. 1936;28(5):337-351.
11. Henin S, Monnier G, Combeau A. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. Ann. Agron. 1958;9:73-92.
12. Kemper WD, Chepil WS. Size distribution of aggregates. In: Black C.A. Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties Madison: ASA. 1965. p.495-509
13. Kemper WD, Rosenau RC. Aggregate stability and size distribution. In: Klute A, editor. Methods of soil analysis. Part 1. Agronomy Monograph 9. 2nd ed. Madison: ASA-SSSA; 1986. p. 425-442.
14. Le Bissonnais Y, Duval O, Gaillard H. Fiche de protocole: Mesure de la stabilité d'agregats de sols. Orléans. INRA Orléans, Institut de Science du Sol. 2002.
15. Terzaghi A. Soil management for improvement of soil physical characteristics related to erosion in Uruguay. Ph.D. thesis, Department of Soil Tillage, Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 1996. p. 164.

16. Bak H, Cayssials R. Estabilidad estructural de algunos suelos del Uruguay. Montevideo: Ministerio de Ganadería y Agricultura, Dirección de suelos y fertilizantes; 1974. p. 58
17. Rubio V. Diagnóstico de la calidad física del suelo: impacto en el cultivo de maíz, efecto del paraplow como medida correctiva. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Tesis de Maestría. Montevideo. 2018. 61p.
18. USDA (United States Department of Agriculture). Wet Aggregate Stability (3F) Wet-Sieving (3F1) Air-Dry, 2 to 1 mm, 2 to 0.5 mm. In: Burt R. editor. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Lincoln: Natural Resources Conservation Service. Soil Survey Investigations. Report No. 42. Version 4.0. 2004. p. 163-165 [Consultado 25 feb 2013] Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_0_54247
19. Nimmo JR, Perkins KS. Aggregate stability and size distribution. In Dane JH, Topp GC. editors. Part 4 Physical methods. Soil Sci. Am. Book Series No. 5. ASA-SSSA, Madison. 2002. p. 317-328.
20. Salvo L, Bayer C, Ernst O, Siri-Prieto G. Efecto del uso y manejo de sistemas agrícolas en la estabilidad estructural del suelo. En: Congreso Latinoamericano de Suelos; 7 al 11 de octubre 2019; Montevideo. Montevideo: SUCS-SLCS; 2019. Poster
21. García de Souza M, Alliaume F, Mancassola V, Dogliotti S. Carbono orgánico y propiedades físicas del suelo en predios hortícolas del sur de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. 2011;15(1):70-81.
22. Beretta-Blanco A, Carrasco-Letelier L. USLE/RUSLE K-factors allocated through a linear mixed model for Uruguayan soils. *Cienc. Inv. Agr.* [Internet]. 2017 [consultado 21 abr 2017];44(1):100-112. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.7764/rcia.v44i1.1622>.
23. DNM (Dirección Nacional de Meteorología). Características climáticas. [Internet]. 2021. [Consultado: 15 junio 2021] Disponible en:

<https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/caracteristicas-climaticas>

24. IGM (Instituto Geográfico Militar). Coordenadas e información geográfica [Internet]. 2021. [Consultado: 15 junio 2021] Disponible en: <http://www.igm.gub.uy/situacion-geografica/>
25. MGA. DSF. (Ministerio de Ganadería y Agricultura. Dirección de Suelos y Fertilizantes). Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Tomo I. Clasificación de suelos. Montevideo: MGA. DSF.; 1976. p. 83
26. Durán A, Califra A, Molfino JH, Lynn W. Keys to Soil Taxonomy for Uruguay. USDA-NRCS editor. 2006. p. 77
27. MGAP-DGRN (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General de Recursos Naturales) Coneat, carta de suelos y cartografía de campo natural. 2021. [Consultado 03 mayo 2021] Disponible en: <http://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/dgrn/>.
28. Grahmann K, Rubio Dellepiane V, Terra J A, Quincke JA. Long-term observations in contrasting crop-pasture rotations over half a century: Statistical analysis of chemical soil properties and implications for soil sampling frequency. *Agric Ecosyst Environ.* 2020;287,106710.
29. Ernst O, Siri-Prieto G. Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil Tillage Res.* 2009;105(2):260-268.
30. Rovira P, Ayala W, Terra J, García-Préchac F, Harris P, Lee MR, Rivero MJ. The ‘Palo a Pique’ long-term research platform: first 25 years of a crop–livestock experiment in Uruguay. *Agronomy*, 2020. 10 (3), 441 doi:10.3390/agronomy10030441
31. De León AG. Estado estructural del suelo en sistemas agrícolas pastoriles. Tesis de Maestría. Montevideo: Universidad de la República. Facultad de Agronomía; 2018. p.44
32. INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo: protocolos básicos comunes. Santos DJ, Wilson MG, Ostinelli M. editores. Paraná: INTA; 2012. p. 68.

33. Santanatoglia OJ, Fernández N. Modificación del método de De Boodt y De Leenheer para el análisis de la distribución de agregados y efecto del tipo de embalaje y acondicionamiento de la muestra sobre la estabilidad estructural. *RIA*. 1982;17(1):23-31.
34. De Boodt M, De Leenheer L. West European methods for soil structure Determinations, VII. Ghent: State Faculty Agric. Sci. 1967;7: 60–62.
35. ISO 10930:2012(E). International Standard. Soil quality — Measurement of the stability of soil aggregates subjected to the action of water. First edition. Geneva. 2012. [Consultado 19 feb 2018] Disponible en: <https://www.iso.org/standard/46433.html>
36. Wilson M, Sasal C. 2010. Protocolo de ensayo. Estabilidad de agregados metodología de Le Bissonnais et al. (2002). En: PE Desarrollo e implementación de un modelo de gestión en red para los laboratorios de suelo, agua y material vegetal del INTA (RILSAV) (AERN 295531). Paraná. Red INTA de Laboratorios de SAV. 4 p.
37. Thomas GW. Soil pH and Soil Acidity. In Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston CT, Sumner ME. editors. Part 3 Chemical methods. *Soil Sci. Am. ASA-SSSA*, Madison. 1996. p. 487-488.
38. Page AL, Miller RH, Keeney DR. editors. Part 2 Chemical and Microbiological Properties Methods of Soil Analysis. *Soil Sci. Am. ASA-SSSA*, Madison. 1982. p. 163-164.
39. USDA (United States Department of Agriculture). In: Burt R. editor. *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Lincoln: Natural Resources Conservation Service. *Soil Survey Investigations*. Report No. 42. Version 4.0. 2004. p. 700 [Consultado 25 feb 2013] Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054247
40. Ford I. Introducción a la argilología. Ciencia de las arcillas. Universidad de la República. Montevideo. Facultad de Agronomía. 1998. p.155

41. Kilmer VJ, Alexander LT. Methods of making mechanical analyses of soils. *Soil Sci.* 1949; 68(1):15-24.
42. USDA (United States Department of Agriculture). Soil survey manual. Soil Survey Staff. Handbook No. 18. Washington: Agricultural Research Administration. 1951. p. 203 [Consultado 25 feb 2013] Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/alabama/soilmanual1951/soilsurveymanual1951file1.pdf
43. Walkley A, Black A. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 1934.37:29-38.
44. Blake G, Hartge K. Bulk Density. In: Klute A, editor. *Methods of soil Analysis. Part 1 Agronomy Monograph 9 (2nd Edition)*. Madison: ASA-Soil Science Society of America; 1986. p. 363-375.
45. Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D, R Core Team nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3. 2021: 1-152.
46. Length RV. Least-Squares Means: The R Package lsmeans. *Journal of Statistical Software.* 2016;69(1):1-33.
47. R Core Team R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2017. URL <https://www.R-project.org/>
48. MGA. PELS. FAGRO (Ministerio de Ganadería y Agricultura. Programa de Estudio y Levantamiento de Suelos. Facultad de Agronomía). Normas de descripciones de suelos. Montevideo: MGA. PELS. FAGRO. 1968. p. 34
49. Kemper WD, Koch E. Aggregate Stability of Soils from Western United States and Canada. Washington: ARS-USDA. Technical Bulletin, No. 1355; 1966.p.52
50. Le Bissonnais Y, Duval O, Gaillard H. Fiche de protocole: Mesure de la stabilité d'agrégats de sols. Orléans. INRA Orléans, Institut de Science du Sol. 2002.
51. Gabioud EA, Wilson MG, Sasal MC. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Asociación Argentina ciencia del suelo. Ciencia del suelo. Argentina.* 2011;29(2):129-139.

52. Novelli LE. Intensificación de las secuencias de cultivos en un Molisol y un Vertisol: cambios en la estabilidad estructural y en el almacenaje de C en agregados. Tesis Doctorado. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 2013. 127p.
53. Deviren Saygin S, Cornelis WM, Erpul G, Gabriels D. Comparison of different aggregate stability approaches for loamy sand soils. *Appl. Soil Ecol.* [Internet].2012[consultado 5 ago 2019];54:1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.11.012>
54. Bronick CJ, Lal R. Soil structure and management: a review. *Geoderma.* 2005;124(1-2):3-22.

3. ESTABILIDAD DE AGREGADOS Y CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS BAJO DIFERENTES INTENSIDADES DE USO

Artículo para presentar en Agrociencia Uruguay

Victoria Mancassola, Florencia Alliaume, Bettina Lado, Andrés Quincke

3.1. RESUMEN

La intensificación en el uso del suelo aumenta el riesgo de erosión y degradación del suelo. La estabilidad de agregados (EA) es un indicador sensible del estado físico del suelo, y se incluye en modelos de simulación de la erosión. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de la historia de uso y profundidad de muestreo en el carbono orgánico del suelo (COS) y en la EA estimada con tres técnicas: USDA, Le Bissonnais y el índice de inestabilidad (IIn). Se extrajeron bloques de suelo imperturbado de 20 por 20 cm y de la profundidad del horizonte A, de tres ensayos experimentales con historias de uso contrastantes: cultivo continuo (cc), rotación cultivo-pastura (cp) y pastura permanente (pp). Cada bloque de suelo se subdividió en los estratos: 0-5 cm, 5-10 cm y horizonte A. Para USDA y Le Bissonnais la EA fue mayor en sitios con pasturas, siendo la diferencia de porcentaje de agregados estables (USDA) de 45 % mayor en cp y pp respecto a cc. El IIn no fue sensible a diferenciar historias de uso y presentó un alto coeficiente de variación. El efecto de la profundidad de muestreo en la EA no fue concluyente, de comprobarse que los resultados no varían, se podría disminuir la profundidad de muestreo. El COS fue 21 % mayor en sitios con pasturas, y fue en promedio 33 % mayor en el estrato de 0-5 cm. La EA se correlacionó positivamente con el COS, y el IIn lo hizo negativamente. Palabras clave: agregados del suelo, arcilla dispersa, carbono orgánico, uso del suelo

3.2. SUMMARY

Land use intensification raises soil erosion and degradation risk. Aggregate stability (AS) is a sensitive indicator of the soil physical status and it is included in simulation models of soil erosion. The objective of the work was to evaluate the effect of the soil use history and sampling depth on the soil organic carbon (SOC) and on the AS estimated with three techniques: USDA, Le Bissonnais and the instability index (IIn). Blocks of undisturbed soil measuring 20 by 20 cm and the depth of the A horizon were extracted from three experimental trials with contrasting use histories: continuous cultivation (cc), crop-pasture rotation (cp), and permanent pasture (pp). Each block of soil was subdivided into strata: 0-5 cm, 5-10 cm and A horizon. For USDA and Le Bissonnais, the AS was larger under pasture sites, being the stable aggregates (USDA) 45 % higher under cp and pp with respect to cc. The IIn was not sensitive in differentiating use histories and presented a large coefficient of variation. The effect of the sampling depth on the AS was not conclusive; if the lack of difference among the results from different sampling depth is corroborated, sampling depth could be reduced. The SOC was 21 % larger under pasture sites, and it was on average 33 % larger at 0-5 cm strata. The AS measured with USDA and Le Bissonnais were positively correlated with SOC, and IIn was negatively correlated with the SOC.

Keywords: land use, organic carbon, soil aggregates, water dispersion

3.3. INTRODUCCIÓN

La intensificación del uso del suelo en los últimos años es un fenómeno a escala global, propiciando el deterioro y la erosión de los suelos e influyendo en el cambio climático⁽¹⁾⁽²⁾. En Uruguay en los últimos 15 años la agricultura aumentó de 650.000 ha en 2004 a un máximo de 1.558.000 ha en 2015, expandiéndose a suelos marginales, debido al aumento del cultivo de soja⁽³⁾. Al mismo tiempo se han incorporado prácticas que mitigan los efectos de la erosión y degradación del suelo a través de los planes de uso y manejo responsable del suelo⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

Evaluar los efectos del aumento de la intensidad de uso del suelo en la calidad del mismo debería implicar el estudio de propiedades físicas del suelo como es la estabilidad de agregados (EA). La agregación de las partículas del suelo favorece el almacenaje del agua, la porosidad y aireación del suelo, el desarrollo de las raíces, la disponibilidad de nutrientes, y la resistencia a la erosión⁽⁶⁾. La estabilidad estructural se puede determinar mediante diferentes técnicas de laboratorio, lo que dificulta su comparación e interpretación⁽⁷⁾⁽⁸⁾.

En el Uruguay la EA no se ha determinado sistemáticamente, se han utilizado distintas técnicas de tamizado en húmedo y adaptaciones, que requieren muestreo de campo específico y uso de distintos tamices⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾. También se ha utilizado un indicador indirecto, el porcentaje de agregación cuyo opuesto es el índice de inestabilidad (IIn)⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾. El IIn es un cociente entre arcilla dispersa y arcilla total. La arcilla dispersa se utiliza como algoritmo en el modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) dado que la erodabilidad es influenciada, entre otras propiedades, por una fracción de la arcilla que se dispersa en agua⁽¹⁶⁾. El IIn tiene como ventaja frente a las técnicas de tamizado en húmedo, que utiliza la muestra seca y molida a menos de 2 mm al igual que los análisis químicos.

El carbono orgánico del suelo (COS) es reconocido como indicador que integra la dinámica física, química y biológica de los suelos. Se ha reconocido que el COS

tiene una relación directa con la EA⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾. Al someter a un mismo suelo bajo diferentes manejos o usos, el contenido de COS varía⁽¹⁹⁾. En este trabajo se evaluó la relación entre la EA y el COS en situaciones de historias de uso contrastantes.

Por otro lado, la estratificación del COS en los sistemas con siembra directa está bien reportado⁽²¹⁾⁽²²⁾. Si la relación del COS con la EA es directa⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾, se busca conocer cómo es la estratificación en la EA y que tan sensibles son las técnicas para detectarlo, ya que los primeros cm del suelo reciben directamente la acción de los agentes erosivos. A nivel nacional, Salvo et al.⁽²²⁾ aporta información sobre EA en estratos, donde compara siembra directa con laboreo convencional, y concluye que en los primeros 3 cm de suelo, en sistemas con siembra directa e inclusión de pasturas o especies con alto aporte de residuos, la EA aumenta. Mientras que, estos mismos autores, no observaron diferencias entre EA para los distintos laboreos del suelo en el estrato de 3 a 6 cm. Dada la escasa información sobre EA en estratos del suelo, este trabajo generará información con las técnicas estudiadas: Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾, USDA⁽²³⁾ e IIn⁽¹⁵⁾.

El objetivo general de este trabajo fue estudiar la EA por tres técnicas en tres suelos de Uruguay bajo diferentes historias de uso, y su relación con el COS.

Los objetivos específicos fueron:

- 1) Evaluar el efecto de la historia de uso en la EA determinada por tres técnicas (Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾, USDA⁽²³⁾ e IIn⁽¹⁵⁾), y en el COS.
- 2) Estudiar el efecto de la profundidad de muestreo en las clasificaciones de EA obtenidas por las diferentes técnicas.
- 3) Cuantificar la asociación entre la EA determinada por las técnicas con el COS.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1. Sitios de muestreo seleccionados

Uruguay se encuentra en América del Sur, entre los paralelos 30 ° y 35 ° de latitud Sur y los meridianos 53 ° y 58 ° de longitud Oeste, presenta una precipitación media anual de 1300 mm, y en zona templada con una temperatura media de 17,5 °C⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾.

Los sitios de muestreo seleccionados fueron tres ensayos experimentales de larga duración, tomando muestras de 2 historias de uso contrastantes en cada uno. En el Cuadro 1 se presenta la información de los ensayos.

Cuadro 1. Descripción de los sitios seleccionados.

Ref. sitio	Historia de uso	Coordenadas geográficas	Taxonomía Uruguaya ¹	Soil Taxonomy USDA ²	Serie 1:40.000 ³
BE _{cPLE}	rot. cultivo-pastura	34°20'33.45"S - 57°43'31.25"O	Brunosol Eutrico	Vertic	La Estanzuela (LEs)
BE _{cCLE}	cultivo continuo	34°20'33.34"S - 57°43'31.95"O	Típico LAc	Argiudoll	
BE _{cPEM}	rot. cultivo-pastura	32°22'34.97"S - 58° 3'54.38"O	Brunosol Eutrico	Typic	Sin definir
BE _{cCEM}	cultivo continuo	32°22'34.99"S - 58° 3'54.82"O	Típico F	Argiudoll	
AR _{ppTT}	pastura permanente	33°15'51.45"S - 54°29'15.65"O	Argisol Subéutrico Melánico	Oxyacuic	Estación Sanz (ES)
AR _{ccTT}	cultivo continuo	33°15'57.72"S - 54°29'29.80"O	Abrúptico F	Argiudoll	

Referencias: LE INIA La Estanzuela, EM EEMAC, TT INIA Treinta y Tres; cc cultivo continuo, cp rotación cultivo-pastura, pp pastura permanente.

Fuentes: 1⁽²⁶⁾, 2⁽²⁷⁾, 3⁽²⁸⁾.

Los ensayos experimentales se describen brevemente, ya que están descritos detalladamente en las referencias citadas.

1) Sitios (LE) BE_{cPLE} y BE_{cCLE} - corresponden a rotaciones de larga duración de INIA La Estanzuela (LE), instaladas en el año 1963. Estos ensayos están en parcelas

de 25 m de ancho y 200 m de largo, con una pendiente de entre 2 y 4 %⁽²⁹⁾. Los cultivos se hacen con siembra directa desde el año 2007. Los tratamientos utilizados estuvieron sometidos a rotaciones de 6 años.

El sitio BEc_{LE}, es una rotación cultivo (50 %) - pastura (50 %), se rotan 3 años de cultivos (maíz, cebada y sorgo, trigo y girasol), con 3 años de pradera mixta de festuca, trébol blanco y lotus, en la que no se hace pastoreo, y se hace fertilización con P y N. El muestreo se hizo sobre el tercer año de pastura.

En los sitios BEc_{LE}, se practica cultivo continuo (maíz, cebada y sorgo, trigo y girasol, maíz, cebada y sorgo, y trigo y girasol) con fertilización con P y N. Los muestreos se hicieron sobre un cultivo de sorgo próximo a cosecha.

2) Sitios (EM) BEc_{EM} y BEc_{EM} - se ubican en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC) de la Facultad de Agronomía (FAGRO). La rotación se instaló en el año 1994 utilizando siembra directa. Estos sitios presentan una pendiente de 1 %⁽²¹⁾ con parcelas de 10 m de ancho por 50 m de largo.

El sitio BEc_{EM} está en el potrero 34-faja 2, en una rotación cultivo-pastura de 7 años, 50 % con cultivos (trigo, soja, cebada, sorgo y barbecho de soja) y 50 % con pastura. El muestreo se hizo en el último año de la pastura.

El sitio BEc_{EM} corresponde al potrero 34-faja 1, en cultivo continuo, que consiste en una secuencia de cultivos con los mismos cultivos que bajo BEc_{EM}. El muestreo se hizo sobre trigo.

3) Sitios (TT) ARp_{TT} y ARc_{TT} - corresponden a rotaciones de larga duración de la Estación Experimental Palo a Pique de INIA Treinta y Tres (TT), instaladas en 1995 utilizando siembra directa⁽³⁰⁾. Estos sitios presentan una pendiente de entre 2 y 3 %⁽³¹⁾.

El sitio ARp_{TT} corresponde a una zona de pastura permanente bajo pastoreo donde se renueva cada 4 a 5 años con festuca, trébol blanco y lotus⁽³¹⁾. La parcela de este sitio es de 200 m de ancho por 300 m de largo.

El sitio ARccTT corresponde a una zona de cultivo continuo con una secuencia de cultivos de trigo, avena, sorgo y soja, en una parcela de 100 m de ancho por 300 m de largo. El muestreo se hizo sobre el rastrojo del cultivo de avena.

3.4.2. Muestreo de campo y procesamiento de las muestras

Siguiendo el manual del INTA⁽³²⁾ se tomaron muestras imperturbadas de bloques del horizonte A con pala de corte (Figura 1), y en el momento de muestreo, el contenido de humedad del suelo estaba próximo a capacidad de campo. El muestreo se hizo sobre una transecta con muestreos regulares cada 2 m. También se colectaron muestras compuestas con calador para determinar el contenido de agua.



Figura 1. Bloque imperturbado de suelo: a) extracción y b) acondicionamiento para su traslado.

El número de bloques muestreado para cada sitio se definió considerando la variabilidad del sitio y el tamaño de parcela. En TT se extrajeron seis bloques de suelo, mientras que en LE y en EM se extrajeron tres bloques por tratarse de superficies reducidas (parcelas de 60000 m², 30000 m², 5000 m² y 500 m² respectivamente).

Los bloques de suelo se dividieron en dos partes, una para técnicas de EA y otra para análisis con muestra molida a menos de 2 mm. A su vez, cada mitad de bloque se subdividió por profundidad en tres partes: un estrato de 0-5 cm, 5-10 cm, y otra conservando toda la profundidad del horizonte A.

Para la determinación de EA con tamizado en húmedo (Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾ y USDA⁽²³⁾), las muestras de suelo se desagregaron a mano y se secaron al aire. El suelo se tamizó manualmente, utilizando tamices de 5 y 3 mm para Le Bissonnais, y tamices de 2 y 1 mm para USDA.

3.4.3. Determinaciones de EA con tamizado en húmedo y del índice de inestabilidad por dispersión de arcillas

3.4.3.1. Técnica de USDA (2004)

Se utilizó el protocolo de la técnica de USDA⁽²³⁾ para la determinación de agregados estables en agua. Se colocaron 3 g de agregados de entre 2 y 1 mm sobre un tamiz de 0,5 mm sumergido en un recipiente con agua, y se dejaron en remojo durante 16 h. Luego el tamiz se sumergió en agua 20 veces en 40 segundos. Los agregados retenidos en el tamiz se llevaron a estufa 18 h a 105 °C y se pesaron. La masa de la arena retenida en el tamiz de 0,5 mm se determinó agregando 15 mL de dispersante (solución de hexametáfosfato de sodio y carbonato de sodio), y tamizando con agua secando nuevamente y pesando la arena retenida en el tamiz. La masa de la arena se utilizó para corregir la masa de los agregados estables y la masa total utilizada para la determinación.

Los resultados se expresaron en porcentaje de agregados estables en agua retenidos en un tamiz de 0,5 mm, según la ecuación [1].

$$\text{USDA \% Agr. estables} = \frac{(\text{MAg} - \text{MAr})}{(\text{MT} - \text{MAr})} \times 100 \quad [1]$$

MAg = masa de agregados retenidos en el tamiz de 0,5 mm

MAr = masa de arena retenida en el tamiz de 0,5 mm

MT = masa total de agregados entre 2 y 1 mm

Esta técnica se realizó en muestras con menos de 50 % de arena, tal como se recomienda. Se realizaron 3 repeticiones de laboratorio por muestra.

3.4.3.2. Técnica de Le Bissonnais et al. (2002)

Para la técnica de Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾ se siguió el protocolo ajustado por Rubio⁽¹⁷⁾. Los agregados entre 5 y 3 mm se llevaron a estufa por 12 h a 40 °C, luego se separaron 10 g para cada uno de los tres pretratamientos: estallido, disgregación mecánica y capilaridad. Los resultados se expresaron en diámetro medio ponderado (DMP) en mm. Se hicieron tres repeticiones por pretratamiento.

El pretratamiento por estallido (DMPest) consistió en colocar los agregados en un matraz, agregar 50 mL de agua y dejar en reposo por 10 min.

En el pretratamiento por disgregación mecánica (DMPmec), los agregados se colocaron en un matraz con 50 mL de etanol, se dejaron en reposo 30 min, se sacó el etanol del recipiente; se trasvasaron los agregados a un matraz con 50 mL de agua, se agitó manualmente con 10 giros y se dejó reposar 30 min más.

En el pretratamiento por capilaridad (DMPcap) los agregados se colocaron por una hora en papel de filtro sobre una tabla de succión con una presión de 3 cm.

Cada pretratamiento finalizó con un tamizado en etanol, con un tamiz de 0,05 mm que se sumergió en un recipiente con etanol aplicando un movimiento helicoidal cinco veces en 10 segundos. Para este trabajo, se utilizó el tamizador de Feodoroff en TT, y en LE y EM se hizo tamizado manual por razones de disponibilidad del equipo, las dos formas de tamizado están contempladas en la norma ISO 10930:2012(E)⁽³³⁾. Para verificar que esto no influyera en los resultados, se hizo un ensayo del método de tamizado, no habiendo diferencias significativas entre los métodos para ninguno de los pretratamientos ($p < 0,05$).

Después del tamizado con etanol los agregados se pasaron a una placa de Petri, se cubrieron con etanol para evitar su reagregación, y se llevaron a estufa por 48 h a 40 °C. Finalmente se transfirieron al tamiz superior de una columna de seis tamices (2,0 1,0 0,5 0,2 0,1 y 0,05 mm), se agitaron manualmente y se pesó lo retenido en cada tamiz. De esta forma se calculó el diámetro medio ponderado, según la ecuación [2]⁽³⁴⁾.

$$\text{DMP (mm)} = [3,5 * (\% > 2 \text{ mm})] + [1,5 * (\% 2-1 \text{ mm})] + [0,75 * (\% 1-0,5 \text{ mm})] + [0,35 * (\% 0,5-0,2 \text{ mm})] + [0,15 * (\% 0,2-0,1 \text{ mm})] + [0,075 * (\% 0,1-0,05 \text{ mm})] + [0,025 * (\% < 0,05 \text{ mm})] / 100 \quad [2]$$

Los resultados de cada pretratamiento se presentan de forma individual, o por medio de un indicador con el promedio de los tres pretratamientos (DMPm).

En Wilson y Sasal⁽³⁴⁾ indican que, si la proporción de elementos gruesos en la fracción entre 2 y 5 mm está entre 10 y 40 %, se debe calcular un DMP con y sin ellos. Si la proporción entre estos resultados es mayor a 40 % la técnica no se puede aplicar a ese suelo.

3.4.3.3. Índice de inestabilidad (IIn)

El IIn se encuentra dentro de las técnicas de dispersión de arcillas. Es la relación que representa la fracción de arcilla que está dispersa en vez de estar formando agregados respecto a la arcilla total (ecuación [3])⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾. La estimación se realizó para todas las muestras a las distintas profundidades.

$$\text{IIn} = \text{AD \%} / \text{Ac \%} \quad [3]$$

Donde:

AD arcilla dispersa en agua %, arcilla por el método mecánico de la pipeta⁽³⁸⁾ pero sin destrucción de carbono y sin dispersante. Se hizo para todas las muestras.

Ac arcilla total %, por el método mecánico de la pipeta⁽³⁸⁾. Se hizo sobre el bloque de suelo N°1 de cada sitio y profundidad.

3.4.4. Análisis químicos y físicos

El pH se determinó en agua y en KCl con relación 1:1 por el método potenciométrico⁽³⁹⁾. Para los suelos con un pH en KCl menor a 4,2 se determinó aluminio intercambiable⁽⁴⁰⁾.

Las bases intercambiables y la CIC a pH7 (CICpH7) se extrajeron por percolado a través de un extractor mecánico de vacío SampleTek, utilizando solución de acetato de amonio a pH7, lavado con etanol y solución de NaCl⁽⁴¹⁾. La determinación de las bases intercambiables se hizo por absorción atómica (Ca, Mg) y emisión atómica (K, Na)⁽⁴¹⁾. La CICpH7 se determinó por destilación y titulación⁽⁴¹⁾.

El COS se determinó en la muestra molida por la técnica Walkley y Black⁽⁴³⁾. También se determinó el COS de los agregados de 5 a 3 mm y de 2 a 1 mm, para un bloque de suelo con rotación de cultivo-pastura (LE y EM), pastura permanente (TT) y cultivo continuo de cada sitio y cada profundidad.

La granulometría del suelo se determinó por el análisis mecánico de la pipeta⁽³⁸⁾ y la clase textural por USDA⁽⁴²⁾.

3.4.5. Análisis estadísticos

Para evaluar el efecto de la historia de uso y profundidad de muestreo en la EA medido con diferentes técnicas y en el COS, se ajustó un modelo por variable y por sitio (ecuación [4]):

$$y_{ijk} = \mu + M_i + P_j + MP_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad [4]$$

Donde:

y es el valor de EA, IIn o COS; μ es la media general; M_i es el efecto del i-ésimo historia de uso (cultivo continuo, rotación cultivo-pastura, pastura permanente); P_j es j-ésima profundidad (0-5 cm; 5-10 cm; profundidad del horizonte A); MP es la interacción entre el efecto M_i y el efecto P_j ; ϵ_{ijk} , se asume tiene distribución normal con varianzas homogéneas. El supuesto de homogeneidad de varianza se chequeó en cada modelo de análisis y se observó que en algunos casos existía heterogeneidad de varianzas entre las historias de uso. Para solucionar este problema se ajustó un modelo que estima una varianza por historia de uso.

Se realizaron análisis de varianza y de comparación múltiples (Tukey) por sitio, utilizando el modelo de análisis mencionado (ecuación [4]).

Para los test de hipótesis se utilizó un nivel de significancia igual o menor a 0,05 con un 95 % de confianza. Para los análisis estadísticos se utilizó el nlme⁽⁴⁴⁾ y emmeans⁽⁴⁵⁾ del software estadístico R⁽⁴⁶⁾.

La precisión de las técnicas se comparó con el coeficiente de variación (CV %) calculado por separado para cada sitio de ensayo experimental, para su cálculo se usó la varianza del error estimada con el modelo de la ecuación [4].

La existencia de correlación entre la EA medida con las diferentes técnicas y el COS se analizó por sitio mediante correlación de Pearson de los valores predichos del modelo (ecuación [4]).

Para evaluar si existían diferencias entre el COS entre las diferentes fracciones de agregados y el suelo molido, se realizó la prueba no paramétrica Wilcoxon, dado que, en caso de COS en suelo molido, la variable no presenta distribución normal (p 0,5632). Se utilizó el software InfoStat⁽⁴⁷⁾.

3.5. RESULTADOS

3.5.1. Características físicas y químicas de los suelos

En los Cuadros 2 y 3 se presentan los resultados de los análisis físicos y químicos para cada sitio estudiado. En estos suelos el porcentaje de gravillas fue menor a 1 %.

Cuadro 2. Características físicas de los suelos por sitio e historia de uso según profundidad.

Sitio	Historia de uso	Prof. cm	Ar	L %	Ac	Clase Textural	
BEcp _{LE}	cp	0-5	11,7	58,0	30,4	FAcL	
		5-10	9,5	60,1	30,5		
		HzA	8,0	61,0	31,1		
BEcc _{LE}	cc	0-5	9,6	60,8	29,7		
		5-10	13,3	55,1	31,7		
		HzA	10,2	58,2	31,7		
BEcp _{EM}	cp	0-5	23,1	48,9	28,1		FAc
		5-10	22,6	48,3	29,1		
		HzA	28,1	42,9	29,1		
BEcc _{EM}	cc	0-5	27,2	42,9	30,0		
		5-10	24,4	45,2	30,4		
		HzA	20,9	48,5	30,6		
ARpp _{TT}	pp	0-5	44,1	35,5	20,5	F	
		5-10	43,2	37,0	19,9		
		HzA	40,3	38,9	20,9		
ARcc _{TT}	cc	0-5	40,5	37,7	21,8		
		5-10	34,8	42,5	22,8		
		HzA	40,4	37,1	22,6		

Referencias: LE La Estanzuela, EM EEMAC, TT Treinta y Tres; cc cultivo continuo, cp rotación cultivo-pastura, pp pastura permanente.

Cuadro 3. Características químicas de los suelos por sitio e historia de uso según profundidad.

Sitio	Historia de uso	Prof. cm	pH 1:1		C g.kg ⁻¹	Bases intercambiables				Na Ext. %	Al int. %	CIC pH7 cmol _c .kg ⁻¹
			KCl	H ₂ O		Ca	Mg	K	Na			
BEcp _{LE}	cp	0-5	4,5	5,3	35,7	13,0	2,8	0,93	0,09	0,40	-	21,6
		5-10	4,3	5,3	25,6	12,7	2,3	0,48	0,12	0,56	-	20,9
		HzA	4,4	5,4	25,7	12,6	2,4	0,53	0,13	0,61	-	20,7
BEcc _{LE}	cc	0-5	4,0	4,7	29,5	10,3	2,7	0,85	0,08	0,39	1,1	20,4
		5-10	4,6	5,6	17,6	12,4	2,9	0,55	0,11	0,60	-	18,5
		HzA	4,3	5,1	18,6	12,2	3,0	0,61	0,10	0,54	-	19,2
BEcp _{EM}	cp	0-5	4,7	5,5	34,1	14,0	2,5	1,15	0,05	0,25	-	20,9
		5-10	4,5	5,3	23,5	13,3	2,1	0,84	0,06	0,31	-	20,4
		HzA	4,5	5,4	25,5	14,1	2,2	0,80	0,08	0,37	-	20,4
BEcc _{EM}	cc	0-5	4,4	5,2	26,6	14,1	2,3	0,82	0,05	0,23	-	22,0
		5-10	4,3	5,3	20,5	13,9	2,0	0,56	0,08	0,40	-	20,0
		HzA	4,4	5,3	21,4	14,2	2,0	0,53	0,08	0,39	-	19,9
ARpp _{TT}	pp	0-5	5,2	6,0	36,5	8,1	2,5	0,26	0,27	1,80	-	14,8
		5-10	5,4	6,3	16,5	5,9	1,7	0,15	0,19	1,79	-	10,7
		HzA	5,5	6,5	21,8	6,9	2,3	0,20	0,29	2,40	-	12,1
ARcc _{TT}	cc	0-5	4,1	4,8	25,8	5,3	1,7	0,33	0,10	0,81	5,5	12,5
		5-10	3,9	4,8	14,6	5,1	1,5	0,16	0,08	0,69	8,0	11,6
		HzA	3,9	4,8	18,8	6,0	1,8	0,29	0,11	0,83	4,4	12,7

Referencias: LE La Estanzuela, EM EEMAC, TT Treinta y Tres; cc cultivo continuo, cp rotación cultivo-pastura, pp pastura permanente.

3.5.2. Efecto de la historia de uso y profundidad de muestreo en la EA

3.5.2.1. Medido con la técnica USDA

La clasificación de la EA por la técnica de USDA se presenta en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Categorías en las que se clasifica la EA en USDA⁽⁷⁾⁽²⁰⁾

USDA (% Agr. estables)	Clasificación
80-100	Muy estable
60-80	Estable
40-60	Medianamente estable
20-40	Inestable
0-20	Muy inestable

La EA por esta técnica, fue mayor en todas las muestras provenientes de pastura respecto a las de cultivo para todos los estratos y ensayos experimentales (Cuadro 5). Sin embargo, solo en TT hubo diferencias entre profundidades, donde el % de agregados estables fue mayor de 0 a 5 cm respecto al segundo estrato o a todo el horizonte A. El coeficiente de variación (CV %) para esta técnica en estos sitios fue en promedio de 4,5 %.

Cuadro 5. Resultados de EA expresada en porcentaje de agregados estables mayores a 0,5 mm y clasificación USDA para cada sitio a distintas profundidades según historia de uso.

Prof. cm	Historia de uso	BEcp ^{LE}		BEcp ^{EM}		ARpp ^{TT}	
		BEcc ^{LE} % Agr. estables	Clasif. USDA	BEcc ^{EM} % Agr. estables	Clasif. USDA	ARcc ^{TT} % Agr. estables	Clasif. USDA
0-5	p	64,2 a	estable	73,1 a	estable	76,3 a	estable
	cc	33,1 b	inestable	47,4 b	medianamente estable	41,1 b	medianamente estable
5-10	p	58,8 a	medianamente estable	75,9 a	estable	68,1 a	estable
	cc	26,5 b	inestable	51,4 b	medianamente estable	32,4 b	inestable
HzA	p	51,4 a	medianamente estable	74,4 a	estable	66,4 a	estable
	cc	23,7 b	inestable	48,7 b	medianamente estable	33,7 b	inestable
p-valor	Historia de uso	< .0001		< .0001		< .0001	
	Prof.	0,1522		0,2036		< .0001	

Referencias: LE La Estanzuela, EM EEMAC, TT Treinta y Tres; p pastura, cc cultivo continuo, cp rotación cultivo-pastura, pp pastura permanente. Las letras

distintas indican diferencia significativa para cada sitio y cada estrato. Clasificación USDA⁽⁷⁾⁽²⁰⁾.

3.5.2.2. Medido con la técnica de Le Bissonnais et al. (2002)

Las categorías en las que se clasifica la EA en Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾⁽³³⁾ se presenta en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Categorías en las que se clasifican la EA en Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾⁽³³⁾.

Le Bissonnais (DMP mm)	Clasificación
> 2,0	Muy estable
1,3 - 2,0	Estable
0,8 - 1,3	Medianamente estable
0,4 - 0,8	Inestable
< 0,4	Muy inestable

La EA medida con el promedio DMPm y con el pretratamiento DMPest fue mayor en muestras bajo pastura respecto a muestras bajo cultivo, tanto en el estrato de 0-5 cm, como en el de 5-10 cm en los tres ensayos (Cuadro 7). Al tomar todo el horizonte A, se observaron diferencias entre historias de uso en EM y TT, aunque no en LE. La separación en clases de acuerdo a la clasificación de Le Bissonnais no siempre fue concordante con las separaciones de medias encontradas. El CV promedio para DMPm y DMPest, fue de 15 % y 17 % respectivamente.

La EA medida con los pretratamientos DMPmec y DMPcap no fue siempre significativa. Los valores mayores de DMPmec y DMPcap se observaron para muestras bajo pasturas para los estratos de 0-5 cm y 5-10 cm, aunque al tomar todo el horizonte A, la diferencia a favor de la pastura sólo se detectó en TT para DMPmec. Para estos pretratamientos todas las muestras fueron clasificadas como muy estables pese a las separaciones de medias encontradas (Cuadro 7). El CV promedio para DMPmec y DMPcap, fue de 34 % y 9 % respectivamente.

Cuadro 7. Resultados de EA con Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾ para cada sitio por profundidad según historia de uso para el DMP promedio y los pretratamientos.

Sitio		BEc _{PLE}	BEc _{PEM}	ARpp _{TT}					
Prof. cm	Historia de uso	BEc _{CLE}	BEc _{CEM}	ARcc _{TT}					
		DMP (mm)	Clasif. Le Bissonnais	DMP (mm)	Clasif. Le Bissonnais	DMP (mm)	Clasif. Le Bissonnais		
DMP _m	0-5	p	2,53 a	muy estable	2,60 a	muy estable	2,63 a	muy estable	
		cc	1,97 b	estable	1,93 b	estable	2,02 b	estable	
	5-10	p	2,37 a	muy estable	2,77 a	muy estable	2,45 a	muy estable	
		cc	2,03 b	estable	2,23 b		2,00 b	estable	
	HzA	p	2,20 a	muy estable	2,63 a	muy estable	2,45 a	muy estable	
		cc	2,00 a	estable	2,20 b		2,02 b	estable	
	p-valor	Historia de uso prof.		<.0001		<.0001		<.0001	
				<.0001		<.0001		0,5930	
	DMP _{est}	0-5	p	1,21 a	medianamente estable	1,70 a	estable	1,85 a	estable
			cc	0,53 b	inestable	0,67 b	inestable	0,65 b	inestable
5-10		p	0,76 a	inestable	1,90 a	estable	1,52 a	estable	
		cc	0,44 b		0,77 b	inestable	0,52 b	inestable	
HzA		p	0,69 a	inestable	1,70 a	estable	1,48 a	estable	
		cc	0,45 a		0,77 b	inestable	0,58 b	inestable	
p-valor		Historia de uso prof.		<.0001		<.0001		<.0001	
				<.0001		0,2621		0,1121	
DMP _{nec}		0-5	p	3,06 a	muy estable	2,83 a	muy estable	2,80 a	muy estable
			cc	2,33 b		2,20 b		2,23 b	
	5-10	p	2,96 a	muy estable	3,07 a	muy estable	2,68 a	muy estable	
		cc	2,57 b		2,70 b		2,25 b		
	HzA	p	2,70 a	muy estable	2,83 a	muy estable	2,67 a	muy estable	
		cc	2,52 a		2,63 a		2,30 b		
	p-valor	Historia de uso prof.		<.0001		<.0001		<.0001	
				<.0001		<.0001		0,7087	
	DMP _{cap}	0-5	p	3,34 a	muy estable	3,30 a	muy estable	3,28 a	muy estable
			cc	3,03 b		2,97 b		3,20 a	
5-10		p	3,33 a	muy estable	3,40 a	muy estable	3,25 a	muy estable	
		cc	3,00 b		3,23 a		3,15 b		
HzA		p	3,21 a	muy estable	3,30 a	muy estable	3,23 a	muy estable	
		cc	3,07 a		3,17 a		3,15 a		
p-valor		Historia de uso prof.		<.0001		<.0001		0,42817	
				0,0681		0,10342		0,30100	

Referencias: LE La Estanzuela, EM EEMAC, TT Treinta y Tres; c cultivo, cc cultivo continuo, cp rotación cultivo-pastura, p pastura, pp pastura permanente. Para cada

sitio por profundidad en los resultados de DMP promedio (m) y de cada pretratamiento (est estallido, mec disgregación mecánica y cap capilaridad) las letras distintas indican diferencia significativa dentro de cada estrato y ensayo experimental y pretratamiento o promedio, HzA horizonte A. Clasificación de EA de Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾⁽³³⁾.

El efecto profundidad fue variable para los diferentes ensayos y para las mediciones con los diferentes pretratamientos, y no hubo una tendencia clara que permitiera concluir a cerca de la sensibilidad de estos según profundidad de muestreo (Cuadro 7).

3.5.2.3. Estimación mediante el Índice de Inestabilidad (IIn)

Ambos efectos de la historia de uso y la profundidad en el IIn fueron significativos únicamente en el ensayo de LE (Cuadro 8). En este caso el IIn fue mayor (menor estabilidad) bajo cultivo respecto a pastura para los tres estratos muestreados, y fue mayor a la profundidad de 5-10 cm y en todo el horizonte A respecto al primer estrato de 0-5 cm. El CV promedio para IIn fue de 89 %.

En el ensayo de EM, solo se observó mayor IIn para el cultivo en el primer estrato de 0-5 cm. No se hizo comparación múltiple para profundidad por no ser significativo el efecto de historia de uso.

Cuadro 8. Resultados de Arcilla %, Arcilla Dispersa % e IIn para cada sitio por profundidad según historia de uso.

Sitio	Historia de uso	Prof. cm	Ac %	AD %	IIn
BEcp _{LE} BEcc _{LE}	cc	0-5	29,7	5,8	0,19 a B
	cp		30,4	4,4	0,15 b B
	cc	5-10	32	8,1	0,26 a A
	cp		30,5	5,8	0,19 b A
	cc	HzA	31,7	7,8	0,25 a A
	cp		31,1	6,2	0,20 b A
p-valor IIn		Historia de uso		<,0001	
		Profundidad		<,0001	
BEcp _{EM} BEcc _{EM}	cc	0-5	30,0	6,3	0,21 a
	cp		28,1	4,9	0,17 b
	cc	5-10	30,4	7,8	0,26 a
	cp		29,1	7,4	0,25 a
	cc	HzA	30,6	7,6	0,25 a
	cp		29,1	6,8	0,24 a
p-valor IIn		Historia de uso		0,050133 .	
		Profundidad		<,0001	
ARpp _{TT} ARcc _{TT}	cc	0-5	21,8	4,6	0,21 a
	pp		20,5	3,5	0,17 a
	cc	5-10	22,8	5,9	0,26 a
	pp		19,9	6,0	0,30 a
	cc	HzA	22,6	5,8	0,26 a
	pp		20,9	5,5	0,26 a
p-valor IIn		Historia de uso		0,8851	
		Profundidad		0,0931	

Referencias: LE La Estanzuela, EM EEMAC, TT Treinta y Tres; cc cultivo continuo, cp rotación cultivo-pastura, pp pastura permanente. Para cada sitio experimental y profundidad, las letras minúsculas distintas indican diferencia significativa para historia de uso. En INIA LE por ser significativo para historia de uso y profundidad, el cuadro muestra la comparación múltiple de la profundidad por historia de uso con la letra mayúscula.

3.5.3. Efecto de la historia de uso y profundidad de muestreo en el COS

Ambos efectos historia de uso y profundidad, fueron significativos en el análisis de varianza para la variable COS en los tres ensayos como se muestra en el Cuadro 9. En la comparación múltiple del COS para cada sitio y profundidad, se observó que la historia de uso afectó el COS en todos los casos excepto en la profundidad de 5-10 cm en TT, donde se observaron los valores más bajos de COS.

Cuadro 9. Comparación múltiple del C (%) a distintas profundidades de muestreo, según historia de uso para los tres ensayos experimentales.

Sitio	Prof.	Historia de Uso	C %
BE _{cpLE} BE _{ccLE}	0-5	cp	3,6 a
		cc	3,0 b
	5-10	cp	2,6 a
		cc	1,8 b
	HzA	cp	2,6 a
		cc	1,9 b
p-valor Historia de Uso		<.0001	
p-valor Profundidad		<.0001	
BE _{cpEM} BE _{ccEM}	0-5	cp	3,4 a
		cc	2,7 b
	5-10	cp	2,4 a
		cc	2,0 b
	HzA	cp	2,6 a
		cc	2,1 b
p-valor Historia de Uso		<.0001	
p-valor Profundidad		<.0001	
AR _{ppTT} AR _{ccTT}	0-5	pp	3,7 a
		cc	2,6 b
	5-10	pp	1,7 a
		cc	1,5 a
	HzA	pp	2,2 a
		cc	1,9 b
p-valor Historia de Uso		<.0001	
p-valor Profundidad		<.0001	

Referencias: Letras minúsculas distintas indican diferencia significativa entre historias de uso dentro de cada estrato y ensayo. LE La Estanzuela, EM EEMAC, TT Treinta y Tres; cc cultivo continuo, cp rotación cultivo-pastura, pp pastura permanente.

El porcentaje de pérdida de COS bajo cultivo respecto a pasturas fue mayor en el estrato de 0-5 cm para EM y TT (22 y 29 % respectivamente), y menor en LE (17 %), respecto a las otras profundidades. El porcentaje de pérdida de COS en el estrato de 5-10 cm y todo el horizonte A fue similar para EM y TT (de 12 a 16 %), y mayor en LE (de 28 %).

3.5.4. Relación del COS con la estabilidad de agregados

Existió una correlación positiva entre la EA medida por USDA y el COS, y variable según el pretratamiento para la técnica de Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾ (Cuadro 10). Entre el IIn y el COS se obtuvo una correlación negativa y significativa en los tres sitios.

Cuadro 10. Correlación de Pearson entre las diferentes estimaciones de EA y el COS (%) según sitio.

Sitio	BEcp _{LE}	BEcp _{EM}	ARpp _{TT}
	BEcc _{LE}	BEcc _{EM}	ARcc _{TT}
Técnica	Correlación de Pearson		
USDA	0,71 **	0,03	0,60 ***
DMPest	0,76 ***	0,14	0,60 ***
DMPmec	0,31	0,08	0,26
DMPcap	0,60 **	0,11	0,35 *
DMPm	0,32	0,03	0,66 ***
IIn	-0,91 ***	-0,93 ***	-0,60 ***

Código de significancia: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 ', ' 0,1 ' ' 1

En la Figura 2 se presenta la EA medida por diferentes técnicas en relación al COS. Se señala con un círculo las muestras del estrato de 0 a 5 cm de pastura, que

presentaron valores de estabilidad superiores a 1 mm (DMPest) y mayores a 60 % (USDA), y valores mayores a 30 gC.kg⁻¹. En sentido inverso, la inestabilidad disminuye a medida que aumenta el COS.

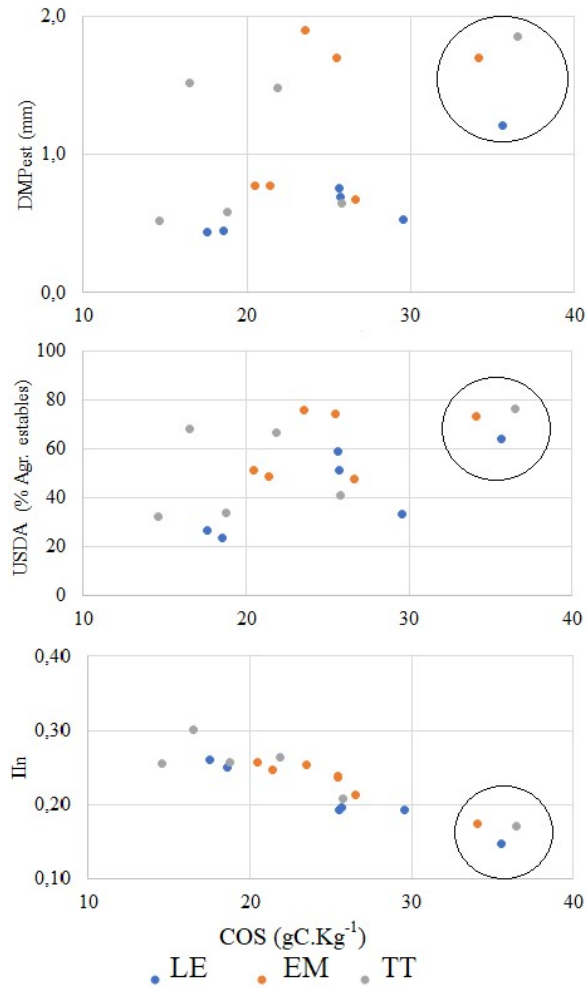


Figura 2. Relaciones de EA promedio estimados mediante DMP est (mm), USDA (% Agr. estables) e IIn en función del COS según sitio, para los tres ensayos experimentales. Referencias: en la figura se señala con un círculo los puntos correspondientes al estrato de 0 a 5 cm de rotación cultivo-pastura y pastura permanente de cada sitio.

3.5.5. Contenido de carbono orgánico de los agregados para tamizado en húmedo

La distribución de la masa de agregados según tamaño respecto al total de la muestra traída del campo antes de desagregar y tamizar, para las tres profundidades en todos los sitios, fue en promedio: 30 % de agregados entre 5 y 3 mm, y 17 % entre 2 y 1 mm. Por otro lado, para el In y en el resto de las propiedades se utilizó la muestra molida menor a 2 mm que representó el 100 % de la muestra traída del campo.

La fracción de agregados de 5 a 3 mm presentó en promedio un 7 % menos de COS respecto a la fracción de 2 a 1 mm o la muestra molida. El COS (%) de la muestra molida y de los agregados entre 2 a 1 mm no resultó distinto estadísticamente.

3.6. DISCUSIÓN

Los horizontes A de los suelos estudiados son de distinta clase textural, siendo FAcL en LE, FAc en EM y F en TT. LE tiene un mayor contenido de limo, lo que no contribuye a la estabilidad de los agregados, mientras que EM tiene el mismo contenido de arcilla que LE pero casi un 10 % menos de limo, aspecto que contribuye a una mejor EA⁽¹⁷⁾⁽²⁰⁾. En molisoles el agente más importante para la agregación es el COS⁽⁴⁸⁾. En TT en cambio, tiene menor contenido de limo y arcilla, y más contenido de arena, posiblemente limitando el proceso de agregación ⁽⁴⁹⁾.

3.6.1. Efecto de la historia de uso y profundidad de muestreo en la EA medido con diferentes técnicas

La técnica de USDA diferenció historia de uso en los tres sitios, mientras que Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾ lo hizo en forma variable según pretratamiento y sitio. Ambas técnicas asignaron más estabilidad a las rotaciones de cultivo-pastura y pastura permanente que al cultivo continuo, coincidiendo con lo reportado⁽¹⁷⁾⁽²²⁾⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾. Respecto a la pastura (cp y pp), el cultivo continuo produjo una disminución relativa de la EA (USDA) de 52, 34 y 49 % en promedio para todas las profundidades en LE, EM y TT respectivamente. Para DMPest la diferencia relativa de EA fue aún mayor en EM y TT.

En general, los valores resultantes de los análisis de EA medidos tanto por USDA como por Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾, son clasificados en las mismas categorías si el muestreo se realiza por estratos o en todo el horizonte A. Además, el efecto de incluir la profundidad de muestreo en el modelo estadístico (ecuación [4]) en general no fue significativo. De acuerdo a los datos obtenidos, resultaría interesante corroborar a futuro la falta de efecto de la profundidad de muestreo en la EA. Esto tiene una implicancia práctica, ya que se podría hacer el muestreo de campo a menor profundidad.

Para los sitios de LE, la técnica USDA separó de forma más extrema a las muestras bajo rotación cultivo-pastura de muestras bajo cultivo. Esto puede explicarse debido a que en este sitio se detectó una importante pérdida del horizonte A, y éste fue masivo. En cambio, en EM y TT, los experimentos son más recientes y no se detectó un deterioro tan importante del horizonte A bajo los tratamientos de cultivo continuo, lo que puede explicar que la clasificación de EA por USDA es de solo una clase más estable bajo cp respecto a las muestras bajo cc.

Los resultados de Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾ indican que no todos los pretratamientos fueron igualmente sensibles, los que tuvieron mayor sensibilidad fueron DMPm y DMPest. El pretratamiento DMPmec diferenció historia de uso, pero la clasificación de EA agrupa a los suelos en las mismas categorías. El DMPcap no diferenció historias de uso a diferencia de lo reportado por otros autores⁽¹⁷⁾⁽⁴⁹⁾.

Para el IIn en LE existió efecto significativo de la historia de uso y de la profundidad, mientras que en EM y TT no hubo efecto de la historia de uso. Esto se puede deber a que los horizontes A de EM y TT son de profundidad similar entre pastura y cultivo, no siendo así en LE. El IIn no fue un indicador lo suficientemente sensible para diferenciar historia de uso y presentó un CV muy alto, por lo que no sería recomendable su uso. Según Mataix-Solera et al.⁽⁷⁾ los índices basados en dispersión de arcillas hacen grandes agrupaciones, pero a la interna de esos grupos no es clara la distinción que se hace en la EA.

3.6.2. Efecto de las diferentes historias de uso y profundidad de muestreo en el carbono orgánico

Los resultados indican que existió estratificación del COS, concentrándose en los primeros 5 cm del suelo, coincidiendo con la bibliografía⁽²¹⁾⁽²²⁾. Estos autores encontraron que la siembra directa mitiga los efectos del laboreo convencional (rápida descomposición de residuos, mayor oxidación ambiental y erosión).

En LE en los primeros 5 cm de suelo se dio una menor disminución del COS bajo cultivo respecto a pastura en comparación a los otros estratos. En EM y TT la mayor disminución de COS se dio en los primeros 5 cm del suelo de cultivo respecto a pastura. Esto puede deberse a que en LE, la mitad del horizonte A bajo cultivo se perdió, quedando de 13 cm en comparación a 26 cm bajo pastura, por lo que tanto de 0-5 cm como de 5-10 cm representan la base del horizonte A. En cambio, los horizontes A en EM y TT fueron de profundidad similar bajo las dos historias de uso. En EM el valor de COS fue mayor bajo rotación cultivo-pastura (sin pastoreo) en todos los estratos, lo que no coincide con lo encontrado por Ernst y Siri (2009) donde indican que de 0 a 6 cm fue mayor la acumulación de COS en cultivo continuo que en rotación de pastura con pastoreo, y de 6 a 12 cm fue mayor el COS en rotación con pastura que en cultivo continuo. En cambio, en TT los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Terra et al.⁽⁵¹⁾ quienes encontraron que de 0 a 15 cm se redujo un 17 % el COS en cultivo continuo respecto a las rotaciones de pasturas.

El enriquecimiento de COS bajo pasturas se explica por una mayor densidad de raíces, la microbiología asociada a la misma (masa microbiana, hifas de hongos) y fauna del suelo como las lombrices⁽³⁷⁾⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾. Por otro lado, se encuentra una disminución de agregados estables en cultivo continuo. Para las rotaciones de pasturas con cultivos la fase de pastura incrementa el COS y en la fase de cultivo disminuye⁽²¹⁾⁽⁵⁴⁾.

3.6.3. Correlación entre la EA determinado por dos técnicas de tamizado en húmedo y el índice de inestabilidad con el contenido de carbono orgánico

Las correlaciones entre COS y EA fueron en torno a 0,66 por la técnica USDA, y variable según pretratamiento para la técnica de Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾, siendo de 0,68 para el DMPest, variable entre 0,34 y 0,63 para DMPm y DMPcap, y sin correlación para el DMPmec. Rubio⁽¹⁷⁾ reportó para el pretratamiento DMPmec y DMPm una correlación entre EA y COS de 0,61 y 0,46 respectivamente. En tanto,

Kemper y Koch⁽²⁰⁾ que es una técnica comparable con USDA encontraron una correlación entre EA y COS en el entorno de 0,65. Sin embargo, en EM no se vio una correlación significativa entre COS y EA, probablemente relacionado a que el rango, tanto para los valores de COS como de EA entre historias de uso fue menor.

Haynes⁽⁵²⁾ señala que la relación entre el COS y la EA puede ser curvilínea y no lineal, y estar significativamente influenciado por el método utilizado y la forma en que los agregados fueron pretratados. También, Kemper y Koch⁽²⁰⁾ asocian la respuesta del COS a una respuesta logarítmica y no lineal, donde el aumento de COS aumenta la EA y pasado un 2 % de materia orgánica el aumento en la EA es menor. En este sentido Novelli⁽⁴⁸⁾ señala que en los molisoles la agregación aumenta hasta un máximo de 30 gC.kg⁻¹, valores mayores no afectaron la agregación. Además, Kemper y Koch⁽²⁰⁾ indican que valores menores a 1 % de materia orgánica se asocian a una disminución de EA.

El IIn presentó una correlación alta e inversa con el COS, en los tres sitios con un promedio de -0,81, indicando que la inestabilidad disminuye al aumentar el COS, lo que es esperable dado el efecto cementante del mismo.

Algunos autores señalan que la correlación entre el COS y la EA no es tan alta como con otros componentes del suelo, como la arcilla⁽⁵⁵⁾. Una posible explicación fue dada por Haynes⁽⁵²⁾ quien indica que el incremento en la agregación del suelo se explica por el incremento tanto del COS total como del carbono lábil orgánico, que puede no detectarse aún bajo años de pasturas. Esto se puede explicar por los distintos agentes de agregación mencionados por Bronick y Lal⁽⁵⁶⁾ tales como el COS (carbono inorgánico, carbono orgánico, materia orgánica particulada, carbohidratos, polisacáridos, fenoles, lignina, lípidos, sustancias húmicas e hidrofobicidad), mineralogía de arcillas, cationes, plantas, microorganismos y fauna del suelo que influyen en la cohesión y protección de los agregados.

3.6.4. Contenido de carbono en las distintas fracciones utilizadas para las técnicas de estabilidad de agregados para los diferentes sitios

Tanto USDA⁽²³⁾ como Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾ utilizan para el desarrollo de la técnica agregados cuyo tamaño se clasifican como macroagregados (mayores a 250 μm)⁽⁵³⁾⁽⁵⁷⁾ Sin embargo, USDA⁽²³⁾ expresa los resultados como porcentaje de macroagregados (entre 2000 y 500 μm) estables en agua, mientras que Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾ expresa los resultados como un promedio ponderado de macroagregados y microagregados entre 5000 y 50 μm estables en cada uno de los pretratamientos. Mientras que los macroagregados se ven afectados por el manejo, los microagregados no son tan sensibles⁽⁵³⁾⁽⁵⁷⁾.

La muestra molida menor a 2 mm es el 100 % de la muestra de campo y fue la utilizada para el IIn y para el resto de las determinaciones. Las fracciones del suelo que utilizan las técnicas de Le Bissonnais et al.⁽¹³⁾ (5-3 mm) y USDA⁽²³⁾ (2-1 mm) para medir la EA correspondieron a un 30 % y un 17 % del peso de la muestra de campo secada al aire respectivamente.

El COS de los agregados de 5 a 3 mm fue en promedio un 7 % menor que en el suelo molido y en los agregados de 2 a 1 mm. En cambio, el contenido de COS de la muestra molida fue igual a la de los agregados de 2 a 1 mm. Esto estaría indicando que los agregados más grandes contienen menos COS, mientras que los de 2 a 1 mm mantienen el mismo nivel que cuando se muele todo el suelo. En esta fracción más pequeña estaría el COS más protegido por la arcilla, que no disminuye.

3.7. CONCLUSIONES

La EA medida con la técnica de USDA fue en promedio 45 % mayor bajo cp y pp respecto a cc. Con la técnica de Le Bissonnais, la EA medida para el DMPm y el DMPest fueron en promedio 19 % y 55 % mayor bajo cp y pp respecto a cc respectivamente. Esta disminución en la EA podría estar indicando un aumento en la degradación y riesgo de erosión del suelo al pasar a un uso más intensivo. La correlación entre la EA y el COS fue en promedio de 0.66.

La correlación entre el IIn con el COS fue de -0,81, coherente con una mayor dispersión de arcilla al disminuir el COS. Sin embargo, el CV de la técnica de IIn fue muy alto y no fue sensible a diferenciar historia de uso, por lo tanto, no se recomienda su uso como indicador.

La EA en general no presentó diferencia significativa para profundidad de muestreo, por lo tanto, con el objetivo de simplificar el muestro de campo, se sugiere continuar investigando sobre el efecto de la profundidad de muestreo en la EA en más suelos, por ejemplo, muestreo a 10 cm de profundidad.

El COS fue 21 % mayor bajo las cp y pp respecto a cc. Se observó estratificación del COS, que fue en promedio 33 % mayor en el estrato de 0-5 cm comparado con las otras profundidades de muestreo.

El COS de los agregados de 2 a 1 mm es igual al del suelo molido, y el COS de los agregados de 5 a 3 mm fue en promedio un 7 % menor que en los agregados menores o muestra molida, evidenciando una mayor acumulación de COS en los agregados más pequeños.

Por último, sería interesante además en próximos trabajos estudiar la biología del suelo asociada a estos sistemas y las fracciones de COS.

3.8. BIBLIOGRAFÍA

1. Kopittke PM, Menzies NW, Wang P, McKenna BA, Lombi E. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environ. Int.* 2019;132. p.105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
2. FAO. Estado Mundial del Recurso Suelo. Resumen Técnico. FAO [Internet]. 2015 [Consultado 26 may 2021]; p.92 Disponible en: <http://www.fao.org/3/i5126s/i5126s.pdf> ISBN 978-92-5-308960-4
3. DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). Anuario estadístico agropecuario 2020. MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca) [Internet]. 2020. [Consultado 4 abril 2021];23:p.268 Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/anuario-estadistico-agropecuario-2020>
4. OPYPA (Oficina de Programación y Política Agropecuaria). Temas de Política: Estimación del impacto de la implementación de la política de Planes de Uso y Manejo Responsable del Suelo en la reducción de las pérdidas de los suelos por erosión hídrica. [En línea]. En: Anuario OPYPA 2020. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2020. Consultado: 20 enero 2021. Disponible en: <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/anuario2020/anuario2020.pdf>
5. OPYPA (Oficina de Programación y Política Agropecuaria). Temas de Política: Avances en la política de conservación de suelos. [En línea]. En: Anuario OPYPA 2013. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2013. Consultado: 20 enero 2021. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2013>
6. Hillel D. Chapter 5 Soil structure and aggregation. In: *Environmental Soil Physics*. San Diego: Academic Press; 1998. p. 101-125.

7. Mataix-Solera J, Benito E, Andreu V, Cerdà A, Llovet J, Úbeda X, Martí C, Varela E, Gimeno E, Arcenegui V, Rubio JL, Campo J, García-Orenes F, Badía D. Actualización en métodos y técnicas para el estudio de suelos afectados por incendios forestales. Capítulo 2.3 ¿Cómo estudiar la estabilidad de agregados en suelos afectados por incendios? Métodos e interpretación de resultados. Càtedra de Divulgació de la Ciència. Universitat de Valencia. 2010. p.109-143
8. Puentes R. A framework for the use of the universal soil loss equation in Uruguay. Master of Science. Texas. Texas A&M University. 1981.157p.
9. Yoder, R.E. A directed method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Agron. J.* 1936;28(5):337-351.
10. Henin S, Monnier G, Combeau A. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.* 1958;9:73-92.
11. Kemper WD, Chepil WS. Size distribution of aggregates. In: Black C.A. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties* Madison: ASA. 1965. p.495-509
12. Kemper WD, Rosenau RC. Aggregate stability and size distribution. In: Klute A, editor. *Methods of soil analysis. Part 1. Agronomy Monograph 9.* 2nd ed. Madison: ASA-SSSA; 1986. p. 425-442.
13. Le Bissonnais Y, Duval O, Gaillard H. Fiche de protocole: Mesure de la stabilité d'agrégats de sols. Orléans. INRA Orléans, Institut de Science du Sol. 2002.
14. Cayota S, Freiria H, Petraglia C. Caracterización física, química y mineralógica de algunos suelos de las asociaciones Arroyo Blanco, Los Mimbres, Fraile Muerto y Zapallar (Departamento de Cerro Largo). Tesis de Grado. Montevideo: Facultad de Agronomía; 1981. p. 261
15. Sombroek WG, Awerbeck H, Duran A. Soil studies in the Merim Lagoon basin. Merim Lagoon Regional Project. CLM/PNUD/FAO. Treinta y Tres, Uruguay. 1969. p. 325.
16. Brubaker SC, Holzhey CS, Brasher B R. Estimating the water-dispersible clay content of soils. *Soil Sci Soc Am J.* 1992;56(4):1226-1232.

17. Rubio V. Diagnóstico de la calidad física del suelo: impacto en el cultivo de maíz, efecto del paraplow como medida correctiva. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Tesis de Maestría. Montevideo. 2018. 61p.
18. Dutartre F, Bartoli F, Andreaux F, Portal JM, Ange A. Influence of content and nature of organic matter on the structure of some sandy soils from West Africa. *Geoderma*. 1993;56:459-478.
19. Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 1982;33:141-163.
20. Kemper WD, Koch E. Aggregate Stability of Soils from Western United States and Canada. Washington: ARS-USDA. Technical Bulletin, No. 1355; 1966.p.52
21. Ernst O, Siri-Prieto G. Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil Tillage Res.* 2009;105(2):260-268.
22. Salvo L, Bayer C, Ernst O, Siri-Prieto G. Efecto del uso y manejo de sistemas agrícolas en la estabilidad estructural del suelo. En: Congreso Latinoamericano de Suelos; 7 al 11 de octubre 2019; Montevideo. Montevideo: SUCS-SLCS; 2019. Poster
23. USDA (United States Department of Agriculture). Wet Aggregate Stability (3F) Wet-Sieving (3F1) Air-Dry, 2 to 1 mm, 2 to 0.5 mm. In: Burt R. editor. *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Lincoln: Natural Resources Conservation Service. Soil Survey Investigations. Report No. 42. Version 4.0. 2004. p. 163-165 [Consultado 25 feb 2013] Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054247
24. DNM (Dirección Nacional de Meteorología). Características climáticas. [Internet]. 2021. [Consultado: 15 junio 2021] Disponible en: <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/caracteristicas-climaticas>

25. IGM (Instituto Geográfico Militar). Coordenadas e información geográfica [Internet]. 2021. [Consultado: 15 junio 2021] Disponible en: <http://www.igm.gub.uy/situacion-geografica/>
26. MGA. DSF. (Ministerio de Ganadería y Agricultura. Dirección de Suelos y Fertilizantes). Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Tomo I. Clasificación de suelos. Montevideo: MGA. DSF.; 1976. p. 83
27. Durán A, Califra A, Molfino JH, Lynn W. Keys to Soil Taxonomy for Uruguay. USDA-NRCS editor. 2006. p. 77
28. MGAP-DGRN (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General de Recursos Naturales) Coneat, carta de suelos y cartografía de campo natural. 2021. [Consultado 03 mayo 2021] Disponible en: <http://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/dgrn/>.
29. Grahmann K, Rubio Dellepiane V, Terra J A, Quincke JA. Long-term observations in contrasting crop-pasture rotations over half a century: Statistical analysis of chemical soil properties and implications for soil sampling frequency. *Agric Ecosyst Environ.* 2020;287,106710.
30. Rovira P, Ayala W, Terra J, García-Préchac F, Harris P, Lee MR, Rivero MJ. The ‘Palo a Pique’ long-term research platform: first 25 years of a crop–livestock experiment in Uruguay. *Agronomy*, 2020. 10 (3), 441 doi:10.3390/agronomy10030441
31. De León AG. Estado estructural del suelo en sistemas agrícolas pastoriles. Tesis de Maestría. Montevideo: Universidad de la República. Facultad de Agronomía; 2018. p.44
32. INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo: protocolos básicos comunes. Santos DJ, Wilson MG, Ostinelli M. editores. Paraná: INTA; 2012. p. 68.
33. ISO 10930:2012(E). International Standard. Soil quality — Measurement of the stability of soil aggregates subjected to the action of water. First edition. Geneva. 2012. [Consultado 19 feb 2018] Disponible en: <https://www.iso.org/standard/46433.html>

34. Wilson M, Sasal C. 2010. Protocolo de ensayo. Estabilidad de agregados metodología de Le Bissonnais et al. (2002). En: PE Desarrollo e implementación de un modelo de gestión en red para los laboratorios de suelo, agua y material vegetal del INTA (RILSAV) (AERN 295531). Paraná. Red INTA de Laboratorios de SAV. 4 p.
35. Durán A, García Préchac F. Suelos del Uruguay. Origen, clasificación, manejo y conservación. Vol I. Montevideo: Editorial Hemisferio Sur. 2013. p.334
36. Middleton HE. Properties of soils which influence soil erosion. USDA. Technical Bulletin No.178. 1930.16p.
37. Lal R, Shukla MK. Principles of Soil Physics. Dekker M. editor. New York. 2004. p.716
38. Kilmer VJ, Alexander LT. Methods of making mechanical analyses of soils. Soil Sci. 1949; 68(1):15-24.
39. Thomas GW. Soil pH and Soil Acidity. In Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston CT, Sumner ME. editors. Part 3 Chemical methods. Soil Sci. Am. ASA-SSSA, Madison. 1996. p. 487-488.
40. Page AL, Miller RH, Keeney DR. editors. Part 2 Chemical and Microbiological Properties Methods of Soil Analysis. Soil Sci. Am. ASA-SSSA, Madison. 1982.p.163-164.
41. USDA (United States Department of Agriculture). In: Burt R. editor. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Lincoln: Natural Resources Conservation Service. Soil Survey Investigations. Report No. 42. Version 4.0. 2004. p. 700 [Consultado 25 feb 2013] Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054247
42. USDA (United States Department of Agriculture). Soil survey manual. Soil Survey Staff. Handbook No. 18. Washington: Agricultural Research Administration. 1951. p. 203 [Consultado 25 feb 2013] Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/alabama/soilmanual1951/soilsurveymanual1951file1.pdf

43. Walkley A, Black A. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 1934;37:29-38.
44. Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D, R Core Team nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3. 2021: 1-152.
45. Length RV. Least-Squares Means: The R Package lsmeans. *Journal of Statistical Software.* 2016;69(1):1-33.
46. R Core Team R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2017. URL <https://www.R-project.org/>
47. Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW, 2008. InfoStat versión, Grupo InfoStat. FCA. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba. 2008.
48. Novelli LE. Intensificación de las secuencias de cultivos en un Molisol y un Vertisol: cambios en la estabilidad estructural y en el almacenaje de C en agregados. Tesis Doctorado. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 2013. 127p.
49. Gabioud EA, Wilson MG, Sasal MC. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Asociación Argentina ciencia del suelo. Ciencia del suelo. Argentina.* 2011;29(2):129-139.
50. Terzaghi A. Soil management for improvement of soil physical characteristics related to erosion in Uruguay. Ph.D. thesis, Department of Soil Tillage, Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 1996. p. 164.
51. Terra J, García-Préchac F, Salvo L, Hernández J. Soil use intensity impacts on total and particulate soil organic matter in no-till pasture-crop rotations under direct grazing. *Adv. Geoclo.* 2006;38:233-241.
52. Haynes RJ. Interactions between soil organic matter status, cropping history, method of quantification and sample pretreatment and their effects on measured aggregate stability. *Biol Fertil Soils.* 2000;30:270-275.
53. Oades JM. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil.* 1984;76:319-337.

54. Haynes RJ, Swift RS, Stephen RC. Influence of mixed cropping rotations (pasture arable) on organic matter content, water stable aggregations and clod porosity in a group of soils. *Soil Till. Res.* 1991;19:77-87.
55. Beretta-Blanco A, Carrasco-Letelier L. USLE/RUSLE K-factors allocated through a linear mixed model for Uruguayan soils. *Cienc. Inv. Agr.* [Internet]. 2017 [consultado 21 abr 2017];44(1):100-112. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.7764/rcia.v44i1.1622>.
56. Bronick CJ, Lal R. Soil structure and management: a review. *Geoderma.* 2005;124(1-2):3-22.
57. Dexter AR. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.* 1988;11: 199-238.

4. SELECCIÓN DEL CÓDIGO DE ESTRUCTURA (s) DE LA USLE CON TÉCNICAS DE EA E IMPLICANCIAS EN LA ESTIMACIÓN DEL FACTOR K

Para cumplir con el objetivo específico vi) se presentará a continuación la concordancia entre la selección del s con la clasificación dada por las técnicas y con la descripción de campo. Se presentará también un análisis de la implicancia que tendría la asignación del s por las técnicas, en la estimación del factor K para los suelos estudiados y los ensayos experimentales en condiciones de historia de uso contrastantes.

4.1. CONCORDANCIA EN LA ASIGNACIÓN DEL CODIGO (S) MEDIANTE DESCRIPCIONES DE CAMPO Y MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE EA

La erodabilidad o susceptibilidad de un suelo a ser erosionado, se estima con la ecuación del factor K de Wischmeier et al. (1971) ajustada para Uruguay por Puentes (1981). Esta incluye: materia orgánica (Walkley y Black, 1934), granulometría (arcilla, limo, arena muy fina, por el análisis mecánico de la pipeta, Kilmer y Alexander, 1949), el código de estructura (s), y el código de permeabilidad (p). Las clasificaciones de s y p para todos los suelos estudiados se realizaron en base a las descripciones de campo siguiendo las pautas de MGA. PELS. FAGRO. (1968) y se presentan en el Cuadro 1. Para la clasificación del s (clases de 1 a 4) se siguieron las pautas redefinidas para Uruguay por Puentes (1981) (Anexo I). En el Anexo II se presenta la clasificación para el p (Puentes y Szogi 1983, Wischmeier et al. 1971).

Cuadro 1. Granulometría, materia orgánica, códigos s y p asignados mediante la descripción de campo para estimar el factor K, y descripción de campo de la estructura del horizonte A.

Sitio e historia de uso	Arena muy fina %	L %	Ac %	MO%	p	Estructura del horizonte A	s
Vc ¹	6,0	29,3	50,1	5,6	2	bs 2-1 d	2
Vc ²	6,0	29,3	50,1	5,6	6		
Vp ¹	0,5	33,4	37,5	5,7	2	bs 2-1 f	2
Vp ²	0,5	33,4	37,5	5,7	6		
BEcp _{LE}	3,7	61,0	31,1	4,4	4	bs3-2m gr2m	2
BEcc _{LE}	5,0	58,2	31,7	3,3	6	masivo	4
BEc	2,5	61,2	30,1	3,7	4	bs 2 m	2
BEcp _{EM}	7,9	42,9	29,1	4,4	4	bs3 rompen a 2 y 1mf	2
BEcc _{EM}	1,0	48,5	30,6	3,7	4	bs y ba 2-3 mf	2
BEp	2,0	45,6	29,3	3,9	4	ba 3 m	1
BSp	2,6	39,2	26,5	3,7	4	bs 1 f	2
ARp	5,0	32,9	24,1	3,4	4	bs3d	2
ARpp _{TT}	2,8	38,9	20,9	3,8	4	bs3d	2
ARcc _{TT}	7,9	37,1	22,6	3,2	4	bs4d rompen a 3 y 2	4

Referencias: Clasificación de s en Anexo I y de p en Anexo II. 1 estimación del K de verano, 2 estimación del K de invierno.

El s asignado mediante descripciones de campo presenta cuatro categorías, y las técnicas de laboratorio tienen 5 categorías. Por lo tanto, para poder compararlas, las dos categorías de las técnicas de laboratorio correspondientes a las estabilidades más bajas se unieron y se equipararon a la categoría 4 del s (Cuadro 2) al igual que lo hicieron Puentes y Szogi (1983) con resultados de la técnica de Henin et al. (1958) para inestabilidad estructural (Bak y Cayssials, 1974).

Cuadro 2. Códigos s utilizados con la descripción de campo y clasificación de la EA de acuerdo a las técnicas USDA (2004) y Le Bissonnais et al. (2002).

Código de estructura (s) USLE		USDA (% Agr. estables)	Le Bissonnais et al. (DMP mm)
1	Muy estable	80-100	> 2,0
2	Estable	60-80	1,3 - 2,0
3	Medianamente estable	40-60	0,8 - 1,3
4	Inestable	20-40	0,4 - 0,8
		0-20	< 0,4

Referencias: s USLE Wischmeier et al. 1971; clasificación para USDA Kemper y Koch 1966, Mataix-Solera et al. 2010; y clasificación para Le Bissonnais et al. (2002) ISO 10930:2012(E). En el s 4 inestable, incluye las categorías, inestable y muy inestable de las técnicas mencionadas.

En el Cuadro 3 se presenta el número de sitios clasificados en cada categoría de estabilidad por las diferentes técnicas de laboratorio para los 12 sitios utilizados. Se presentan sólo de USDA, DMPm y DMPest que fueron las que tuvieron la mayor concordancia con el código asignado mediante las descripciones de campo. La técnica USDA tiene concordancia en la clasificación asignada con la descripción de campo en 8 suelos, el DMPest en 7, y el DMPm en 4, El DMPmec diferenció historias de uso, pero la clasificación de categorías de EA por la técnica hace que la selección del s no tenga buena concordancia con la descripción de campo. En cambio, en el DMPcap sus resultados fueron menos sensibles para separar muestras y tampoco diferenció historias de uso, no presentó la sensibilidad esperada para el objetivo de este trabajo.

Cuadro 3. Número de sitios clasificados en las diferentes categorías según el s, y las categorías asignadas según la EA por el % de agregados estables de USDA, DMPm y DMPest.

Código de estructura (s) USLE	Descripción de campo	USDA	Le Bissonais DMPm	Le Bissonais DMPest
1 - Muy estable	1	1	6	1
2 - Estable	8	6	6	3
3 - Medianamente estable		1		3
4 - Inestable	3	4		5

4.2. IMPLICANCIA EN LA ESTIMACIÓN DEL FACTOR K SEGÚN METODO DE SELECCIÓN DEL CODIGO (s)

Los factores K de los horizontes A de los suelos estudiados se estimaron con la ecuación [1] adaptada por Puentes (1981). En la estimación se incluyeron los resultados analíticos de cada sitio y el código de permeabilidad de la descripción de campo (Cuadro 1), el código s se seleccionó a partir de la categoría asignada por el resultado de la técnica de laboratorio, y a partir de la descripción de campo (Cuadro 4). También se agrega para vertisoles la estimación para verano e invierno donde se mantiene el s y cambia el p.

$$K = 1,317 [2,1 M^{1,14} (10^{-4}) (12-MO) + 3,25 (s-2) + 2,5 (p-3)] [10^{-2}] \quad [1]$$

Dónde:

MO = % de materia orgánica

M = [% limo + % arena muy fina (0,1-0,002 mm)] [100 - % de arcilla (< 0,002 mm)]

s = código para estructura (de 1 a 4)

p = código para permeabilidad (de 1 a 6)

Las estimaciones del factor K para los suelos estudiados se encontraron en un rango de 0,06 a 0,53 (Cuadro 4). Para Uruguay el rango de valores estimados de factor K se

encuentra entre 0,01 y 0,88 (Puentes, 1983). Un mismo suelo si está degradado, presentará un valor K mayor, por ejemplo, BE_{ccLE} (Cuadro 4).

El tratamiento BE_{ccLE} presentó el valor máximo de factor K 0,53, lo que se explica por una gran pérdida de COS que se asocia también a un horizonte A masivo. Este ensayo es el de mayor cantidad de años en cuanto a condiciones extremas, 28 años con laborero convencional más aproximadamente 28 años con siembra directa. En estas comparaciones, el s asignado a partir de la descripción de campo fue el que varió más entre sitios, hay que recordar que la descripción de campo siempre contiene la subjetividad del mapeador.

Cuadro 4. Código s y el correspondiente factor K estimado a partir de la asignación del s por la descripción de campo, la técnica de USDA y la técnica DM_{Pest} para cada sitio.

Sitio	Descripción		USDA		DM _{Pest}	
	s	K	s	K	s	K
V _c ¹	2	0,06	2	0,06	4	0,14
V _c ²	2	0,19	2	0,19	4	0,28
V _p ¹	2	0,08	2	0,08	4	0,17
V _p ²	2	0,21	2	0,21	4	0,30
BE _{cpLE}	2	0,35	3	0,39	4	0,43
BE _{ccLE}	4	0,53	4	0,53	4	0,53
BE _c	2	0,38	4	0,46	4	0,46
BE _{cpEM}	2	0,28	2	0,28	2	0,28
BE _{ccEM}	2	0,29	3	0,33	4	0,37
BE _p	1	0,23	2	0,28	1	0,23
BS _p	2	0,26	2	0,26	3	0,30
AR _{ppTT}	2	0,28	2	0,28	2	0,28
AR _{ccTT}	4	0,39	4	0,39	4	0,39
AR _p	2	0,25	1	0,21	2	0,25

Ref. sitio: EM EEMAC, LE La Estanzuela, TT Treinta y Tres. AR argisol, BE brunosol éútrico, BS brunosol subéútrico y V vertisol. Historia de uso: c cultivo, cc

cultivo continuo, cp rotación cultivo-pastura, p pastura, pp pastura permanente. 1 estimación para verano y 2 estimación para invierno.

Para cada ensayo experimental se calculó la diferencia entre el factor K, el COS % y la EA con USDA y DMPEst, para cultivo continuo respecto a la rotación cultivo-pastura o pastura permanente (Cuadro5).

Cuadro 5. Aumento en el factor K promedio %* estimado para los ensayos de larga duración (código s asignado a campo), disminución en el COS % y en la EA de USDA y DMPEst.

Sitio	Aumento en Factor K	Disminuye COS %	Disminuye EA	
			USDA	DMPEst
BEcp _{LE}	26	28	52	44
BEcc _{LE}				
BEcp _{EM}	14	16	34	58
BEcc _{EM}				
ARpp _{TT}	28	14	49	64
ARcc _{TT}				

* Promedio del factor K obtenido con el s de la descripción de campo y de las técnicas USDA y DMPEst a igualdad de condiciones de los demás componentes.

En el Cuadro 4 se observa que para los ensayos experimentales el aumento de factor K al comparar cultivo continuo con pastura (cp y pp) con el s asignado por descripción de campo, USDA y DMPEst fue en LE 34, 26 y 19 %; en EM fue 3, 15 y 24 %, y para TT fueron todos de 28 %, respectivamente. En el Cuadro 5 se resume el aumento en el factor K para los ensayos experimentales y como estuvo acompañado de una disminución del COS % en el horizonte A de 28, 16 y 14 % para LE, EM y TT respectivamente. Además de una disminución en la EA por USDA de 34 a 52 % y en DMPEst valores entre 44 y 64 %.

La relación entre los valores estimados de K a partir del s de la descripción de campo y a partir de las técnicas de laboratorio se muestran en la Figura 1.

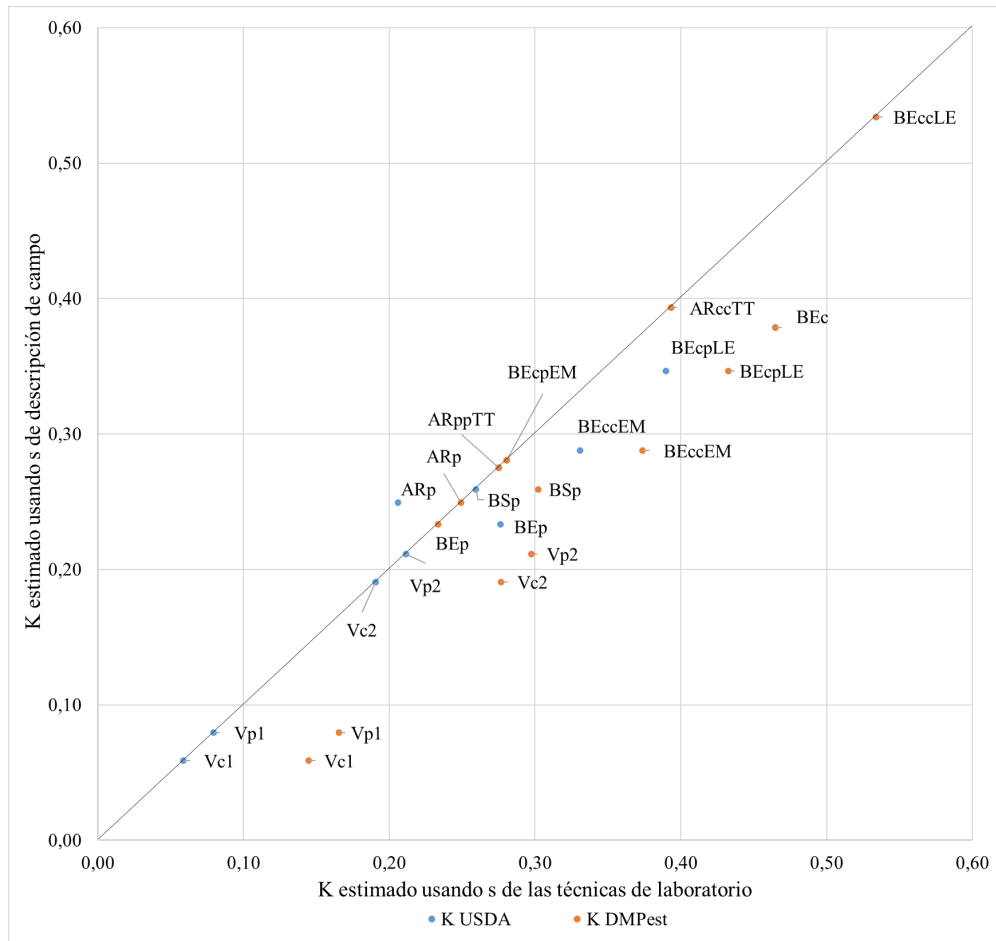


Figura 1. Relación entre los valores de factor K estimados a partir del s seleccionado por la descripción de campo, con los estimados a partir de la clasificación con los resultados de las técnicas de laboratorio USDA y DMPEst. Referencias: EM EEMAC, LE La Estanzuela, TT INIA Treinta y Tres. AR argisol, BE brunosol éútrico, BS brunosol subéútrico y V vertisol. Historia de uso: c cultivo, cc cultivo continuo, cp rotación cultivo-pastura, p pastura, pp pastura permanente.

En la figura 1 se muestra el alto R^2 entre el factor K estimado con el s seleccionado por la descripción de campo y por las técnicas evaluadas siendo con USDA (0,96) y

con DMPest (0,90). Por otro lado, no se observó un desvío muy notorio de la relación 1:1 en la estimación a partir de la técnica USDA. Por su parte, las estimaciones obtenidas utilizando la clasificación del DMPest fueron en algunos casos (vertisoles, BE_{CCEM}, BE_C y BE_{CPL}E) mayores que las obtenidas a partir del s asignado por descripción a campo.

Por otro lado, la estimación del factor K tiene parte de su cálculo con determinaciones analíticas que no revisten dificultad (materia orgánica, arcilla, limo y arena muy fina), sin embargo, la complejidad radica en la selección de los códigos de estructura y permeabilidad. Beretta-Blanco y Carrasco-Letelier (2017) han propuesto un modelo lineal mixto para Uruguay que incluye la clasificación del suelo, el material parental, contenido de arcilla y arena. Estos autores encontraron que el COS tiene una tendencia estadística significativa pero no fue mayor a las mencionadas anteriormente.

5. DISCUSIÓN GENERAL

Se evaluaron dos técnicas de tamizado en húmedo: USDA (2004) y Le Bissonnais et al. (2002). La técnica de USDA fue sensible para clasificar EA entre sitios, fue precisa, práctica y requirió poco tiempo de ejecución. En Le Bissonnais los resultados fueron variables. El pretratamiento DMPest, clasificó EA e historia de uso, la precisión fue acorde a lo reportado en la bibliografía. El DMPmec diferenció historia de uso, pero la clasificación de la técnica no refleja diferencias en categorías, agrupando a la EA mayoritariamente en las mismas categorías. El DMPcap no diferenció historias de uso y no diferenció suelos, presentó dificultades prácticas para realizarlo. El DMPm no se considera un buen indicador porque reúne las dificultades observadas en los otros pretratamientos. El interés en que las clasificaciones de los resultados permitan diferenciar los suelos está en que la técnica de EA aplicada sea sensible a las historias de uso, donde el COS se puede ver afectado en contextos de aumento en la intensidad de uso del suelo. Por otro lado, tanto USDA como Le Bissonnais asignaron al vertisol menos estabilidad respecto a algunos brunosoles, lo que se puede deber al tipo de arcillas expansivas, como la montmorillonita, que al entrar en contacto con el agua hace estallar los agregados (Ford, 1998).

Las variables que mejor explicaron la variabilidad entre sitios fueron la arcilla, el calcio, la CICpH7, la EA por la técnica USDA, la arena, el contenido de limo, el COS y la densidad aparente y la EA por la técnica de DMPest. Del ACP surge que la EA medida por USDA se correlaciona negativamente con el limo y la densidad aparente, coincidiendo con lo reportado en la bibliografía en el que se indica que la EA se correlaciona negativamente con el limo y la densidad aparente (Rubio 2018, Gabioud et al. 2011, Kemper y Koch 1966). La arcilla estuvo dentro de las variables que mejor explican la diferencia entre sitios.

Se encontró que en la rotación cultivo-pastura o pastura permanente, la EA y el COS fueron mayores respecto a los sitios con cultivo continuo, confirmándose la hipótesis

iii). Esto coincide con lo reportado por la bibliografía (Rubio 2018, Gabioud et al. 2011, Bronick y Lal 2005). Particularmente las técnicas de USDA y el pretratamiento DMPest, clasificaron a los suelos con pasturas con más EA que los suelos con cultivo continuo. Sin embargo, de los pretratamientos de Le Bissonnais, el DMPcap no diferenció EA por historia de uso.

Con la hipótesis de que pudiera existir estratificación en cuanto a la EA, se estudió la misma a diferentes profundidades. El estrato que presentó algunas diferencias significativas entre profundidades fue el de 0-5 cm respecto al de 5-10 cm o todo el horizonte A. Esto no coincide con lo registrado por Salvo et al. (2019), en donde verifica que existe estratificación de EA, y las historias de uso se diferenciaron solo de 0-6 cm. Sin embargo, para los resultados obtenidos en la mayoría de los sitios y técnicas de EA el efecto de la profundidad no fue significativo. Con los resultados obtenidos estaríamos aprobando la hipótesis específica iv) de que el muestreo en estratos o en todo el horizonte A no hace variar la clasificación obtenida por las técnicas de EA. Esto último, permite a futuro explorar la posibilidad de optimizar el muestreo de campo, haciéndolo en los primeros 10 cm de suelo, lo que permitiría hacer un muestreo más ágil, considerando que se deben extraer 4 bloques de suelo por sitio.

En cuanto a la estratificación del COS en los ensayos experimentales, fue significativa para los tres sitios y las tres profundidades, siendo mayor en los primeros 5 cm del suelo y bajo las dos historias de uso comparadas.

La correlación entre el COS y la EA para las técnicas de tamizado en húmedo resultó en promedio 0,66 para dos de los sitios experimentales, coincidiendo con la bibliografía (Rubio 2018, Kemper y Koch 1966). En EM esta correlación fue sensiblemente menor, y una de las explicaciones es que la diferencia entre COS entre tratamientos no es tan grande como en los otros dos sitios.

Amezqueta et al. (1996) señala que la clasificación de agregados estables de Kemper y Rosenau (1986) no clasifica la estabilidad en el mismo orden que la de Le Bissonnais, indicando que no están correlacionadas significativamente. Los resultados para la matriz de correlaciones realizada en esta tesis muestran que las técnicas de tamizado en húmedo son similares entre sí con una correlación entre USDA y DMPm de entre 0,58 a 0,74. A pesar de que hubo una gran concordancia en términos generales, sobre todo entre DMPest y USDA, coincidiendo con lo citado por Amezqueta et al. (1996), se observó que no siempre los agregados fueron clasificados en el mismo orden.

Las estimaciones del factor K para los suelos estudiados se encontraron en un rango de 0,06 a 0,53. Un mismo suelo si está degradado, presentará un valor K mayor. Esto coincidió con las estimaciones realizadas en esta tesis. Para los ensayos de larga duración el aumento de factor K al comparar cultivo continuo con pastura (cp y pp), para descripción de campo, USDA y DMPest fue en promedio de 26 %,14 % y 28 %, para LE, EM y TT respectivamente. Esto fue acompañado de una disminución de COS en el horizonte A de 28, 16 y 14 % para LE, EM y TT respectivamente. Según estos resultados, a futuro se podría considerar usar códigos s diferentes para la estimación del factor K de la USLE/RUSLE según la historia de uso si las mismas afectaron la EA de la forma que lo hicieron en los ensayos experimentales.

6. CONCLUSIONES GENERALES

La técnica de USDA, y en segundo lugar el pretratamiento DMPest de Le Bissonnais presentaron sensibilidad para diferenciar la EA, precisión, y menor tiempo de ejecución. Se propone la técnica de USDA para ser adoptada en un laboratorio de caracterización de suelos. Se desaconseja el uso DMPcap que presentó dificultades de ejecución y la clasificación de EA no diferenció suelos, tampoco el DMPm ya que incluye al DMPcap en su cálculo.

Las variables que mejor explicaron la variabilidad entre los sitios en el análisis de componentes principales fueron la arcilla, el calcio y la CICpH7 en primer lugar, y el COS con menor peso en el componente 1; y la técnica de USDA, la arena, el limo en primer lugar, y la técnica de DMPest y la densidad aparente en segundo lugar en el componente 2.

La EA en los sitios con pasturas fue en promedio 45, 19 y 55 % mayor que bajo cultivo continuo medida con la técnica de USDA, DMPm y DMPest respectivamente. Acompañando estos resultados, el COS fue 21 % mayor bajo las rotaciones pastura-cultivo respecto a cultivo continuo. A su vez, fue en promedio 33 % mayor en el estrato de 0-5 cm comparado con las otras profundidades de muestreo. El COS fue significativo para historia de uso y profundidades. En cambio, la EA fue significativa para historia de uso, pero no para profundidad de muestreo. De comprobarse en futuros trabajos que un muestreo más superficial arroja los mismos resultados para EA respecto a un muestreo de todo el horizonte A, se podría simplificar el muestreo de campo, por ejemplo, hacer un muestreo en los primeros 10 cm de suelo.

Los factores K disponibles en Uruguay fueron calculados en los años 80, y están realizados sobre campo natural. Asimismo, en la nueva cartografía 1:40.000 se están incorporando las estimaciones de factor K para las Series de suelos. En este trabajo

se exploró sobre el efecto de las diferentes intensidades de uso del suelo sobre el factor K, analizando los resultados de las estaciones experimentales con el mismo suelo e historias de uso contrastantes. El factor K fue 23 % más alto en promedio para los tres sitios experimentales con cultivo continuo respecto a los tratamientos con pastura (cp y pp). El aumento del factor K estuvo acompañado de una disminución del COS y de la EA.

En un contexto de mayor intensidad de uso del suelo y desarrollándose la nueva cartografía 1:40.000, donde se estima el factor K para ser utilizado en los planes de uso y manejo responsable del suelo, es necesario aportar mejoras metodológicas a las estimaciones del factor K, en particular en el s cuya selección actualmente es por la descripción de campo. Se concluye que la técnica USDA puede aportar objetividad a las tareas de descripción de campo que son realizadas por distintos mapeadores.

Para próximos trabajos sería interesante evaluar la biología del suelo asociada a la EA, evaluar la posibilidad de sustituir el código de estructura discreto por una variable continua de estabilidad estructural, además de posibles formas alternativas de calcular el factor K. Por último, sería interesante seguir investigando sobre la correlación entre COS y EA, de forma de poder predecir el impacto de una reducción del COS en la estabilidad estructural en un determinado suelo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Amezketta E, Singer MJ, Le Bissonnais Y. 1996. Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 60(3), 888-894.
- Bak H, Cayssials R. 1974. Estabilidad estructural de algunos suelos del Uruguay. Montevideo: Ministerio de Ganadería y Agricultura, Dirección de suelos y fertilizantes. p. 58
- Beretta-Blanco A, Carrasco-Letelier L. 2017. USLE/RUSLE K-factors allocated through a linear mixed model for Uruguayan soils. *Ciencia e Investigación Agraria*. 44(1): 100-112. doi: 10.7764/rcia.v44i1.1622.
- Bronick CJ, Lal R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2): 3-22. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.03.005.
- Brubaker SC, Holzhey CS, Brasher BR. 1992. Estimating the water-dispersible clay content of soils. *Soil Science Society of America Journal*. 56(4): 1226-1232. doi: 10.2136/sssaj1992.03615995005600040036x.
- Cayota S, Freiria H, Petraglia C. 1981. Caracterización física, química y mineralógica de algunos suelos de las asociaciones Arroyo Blanco, Los Mimbres, Fraile Muerto y Zapallar (Departamento de Cerro Largo). Tesis de Grado. Montevideo: Facultad de Agronomía. p. 261
- Durán A, García Préchac F. 2013. Suelos del Uruguay. Origen, clasificación, manejo y conservación. Vol I. Montevideo: Editorial Hemisferio Sur. p.334
- Ernst O, Siri-Prieto G. 2009. Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil and Tillage Research*. 105(2): 260-268. doi: 10.1016/j.still.2009.08.001
- FAO. 2015. Estado Mundial del Recurso Suelo. Resumen Técnico. 92p. Consultado 26 mayo 2021. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i5126s/i5126s.pdf>
- Ford I. 1998. Introducción a la argilología. Ciencia de las arcillas. Universidad de la República. Montevideo. Facultad de Agronomía. p.155

- Gabioud EA, Wilson MG, Sasal MC. 2011. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencia del suelo*. 29(2): 129-139.
- García de Souza M, Alliaume F, Mancassola V, Dogliotti S. 2011. Carbono orgánico y propiedades físicas del suelo en predios hortícolas del sur de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. 15(1):70-81.
- García Prechác F. 1992. Guía para la toma de decisiones en conservación de suelos. 3a Aproximación. Serie Técnica N° 26. INIA. Montevideo. 63 p.
- Henin S, Monnier G, Combeau A. 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Annales agronomiques*. 9: 73-92.
- ISO 10930:2012(E). 2012. International Standard. Soil quality — Measurement of the stability of soil aggregates subjected to the action of water. First edition. Geneva. 13p. Consultado 19 febrero 2018. Disponible en <https://www.iso.org/standard/46433.html>
- Kemper WD, Rosenau RC. 1986. Aggregate Stability and Size Distribution. En: Klute A. editor. *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods-Agronomy*. Madison: ASA-SSSA. 9: 425-442.
- Kemper WD, Koch E. 1966. Aggregate Stability of Soils from Western United States and Canada. *ARS-USDA. Technical Bulletin, No. 1355*: 1-52.
- Kemper WD, Chepil WS. 1965. Size distribution of aggregates. En: Black CA. editor. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties*. Madison: ASA. 9: 495-509.
- Kilmer VJ, Alexander LT. 1949. Methods of making mechanical analyses of soils. *Soil Science*. 68(1):15-24.
- Kopittke PM, Menzies NW, Wang P, McKenna BA, Lombi E. 2019. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*. 132: 105078. doi: 10.1016/j.envint.2019.105078.
- Lal R, Shukla MK. 2004. *Principles of Soil Physics*. New York, NY: Marcel Dekker. 716 pp.
- Le Bissonnais Y, Duval O, Gaillard H. 2002. Fiche de protocole: Mesure de la stabilité d'agrégats de sols. Orléans. INRA Orléans, Institut de Science du Sol.

- Mataix-Solera J, Benito E, Andreu V, Cerdà A, Llovet J, Úbeda X, Martí C, Varela E, Gimeno E, Arcenegui V, Rubio JL, Campo J, García-Orenes F, Badía D. 2010. ¿Cómo estudiar la estabilidad de agregados en suelos afectados por incendios? Métodos e interpretación de resultados. En: Actualización en métodos y técnicas para el estudio de suelos afectados por incendios forestales. Valencia: Càtedra de Divulgació de la Ciència. 109-143.
- MGA. PELS. FAGRO (Ministerio de Ganadería y Agricultura. Programa de Estudio y Levantamiento de Suelos. Facultad de Agronomía). 1968. Normas de descripciones de suelos. Montevideo: MGA. PELS. FAGRO. p. 34
- Middleton HE. 1930. Properties of soils which influence soil erosion. Technical Bulletin No.178. Washington. USDA. 1-16.
- Nimmo JR, Perkins KS. 2002. Aggregate stability and size distribution. En: Dane JH, Topp GC. editors. Part 4. Physical methods. Madison: SSSA. 5:317-328.
- OPYPA (Oficina de Programación y Política Agropecuaria). 2020. Temas de Política: Estimación del impacto de la implementación de la política de Planes de Uso y Manejo Responsable del Suelo en la reducción de las pérdidas de los suelos por erosión hídrica. [En línea]. En: Anuario OPYPA 2020. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). Consultado: 20 enero 2021. Disponible en: <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/anuario2020/anuario2020.pdf>
- OPYPA (Oficina de Programación y Política Agropecuaria). 2017. Temas de Política: Cartografía de suelos del Uruguay: historia y estado actual. [En línea]. En: Anuario OPYPA 2017. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). Consultado: 20 enero 2021. Disponible en: https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuario%202017/anuario_opypa_2017.pdf
- OPYPA (Oficina de Programación y Política Agropecuaria). 2013. Temas de Política: Avances en la política de conservación de suelos. [En línea]. En: Anuario OPYPA 2013. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). Consultado: 20 enero 2021. Disponible en:

<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2013>

- Puentes R. 1983. Una metodología para evaluar la capacidad de uso de las tierras, primeros resultados. Montevideo: MAP. INC. IICA. 46 p.
- Puentes R, Szogi A. 1983. Manual para la utilización de la ecuación universal de pérdidas de suelo en el Uruguay. Serie: Normas Técnicas en conservación de suelos. No.1. Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos. 80p.
- Puentes R. 1981. A framework for the use of the universal soil loss equation in Uruguay. Master of Science. Texas. Texas A&M University. 157 p.
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA, Mc Cool DK, Yoder DC. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington: USDA-ARS.703.384 p.
- Rubio V. 2018. Diagnóstico de la calidad física del suelo: impacto en el cultivo de maíz, efecto del paraplow como medida correctiva. Tesis de Maestría. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 61p.
- Salvo L, Bayer C, Ernst O, Siri-Prieto G. 2019. Efecto del uso y manejo de sistemas agrícolas en la estabilidad estructural del suelo. Poster. Congreso Latinoamericano de Suelos. Montevideo, Uruguay.
- Sombroek WG, Averbeck H, Durán A. 1969. Soil studies in the Merim Lagoon basin. Merim Lagoon Regional Project. Treinta y Tres: CLM/PNUD/FAO. 325 p.
- Terzaghi A. 1996. Soil management for improvement of soil physical characteristics related to erosion in Uruguay. Ph.D. thesis. The Netherlands: Department of Soil Tillage, Wageningen Agricultural University. 164 p.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2004. Wet Aggregate Stability (3F) Wet-Sieving. En: Burt R. editor. Laboratory Methods Manual. Lincoln: NRCS, Soil Survey Investigations Report. 42(4): 163-165. [Consultado 25 feb 2013] Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054247

- USDA-ARS (United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service). 2008. User's reference guide. Revised Universal Soil Loss Equation. Version 2. (RUSLE2). Washington: USDA-ARS. 431p. Consultado 24-03-2019. Disponible: https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/60600505/RUSLE/RUSLE2_User_Ref_Guide.pdf
- Walkley A, Black A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*.37:29-38.
- Wilson M, Sasal C. 2010. Protocolo de ensayo. Estabilidad de agregados metodología de Le Bissonnais et al. (2002). En: PE Desarrollo e implementación de un modelo de gestión en red para los laboratorios de suelo, agua y material vegetal del INTA (RILSAV) (AERN 295531). Paraná. Red INTA de Laboratorios de SAV. 4 p.
- Wischmeier WH, Smith DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: USDA. 537: 58 p.
- Wischmeier WH, Johnson CB, Cross BV. 1971. A soil credibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation* 26:189-193.
- Wischmeier WH, Mannering JV. 1969. Relation of soil properties to its erodibility. Division S-6-Soil and Water Management and Conservation. *Soil Science Society of America Journal*. 33(1):131-137.
- Yoder RE. 1936. A directed method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of the American Society of Agronomy*. 28(5): 337-351.

8. ANEXOS

8.1. ANEXO I CLASIFICACIÓN DEL CÓDIGO DE ESTRUCTURA (s) USLE Y SU REASIGNACIÓN PARA SUELOS DE URUGUAY

Código de estructura (s)	Wischmeier et al. (1971)	Puentes y Szogi (1983)	* Is Henin et al. (1958) Bak y Cayssials (1974)
1	Granular muy fina	Hz A, índice de inestabilidad estructural (Is) menor de 0,3. Estructura en bloques pequeños, medianos (a veces granular) en horizontes melánicos. En general en Brunosoles Eútricos melánicos. En general en Brunosoles Eútricos desarrollados sobre materiales de Fray Bentos, Basalto y algunas lodolitas, y Vertisoles y Litosoles Eútricos Melánicos de basalto.	Is < 0,3 excelente
2	Granular fina	Hz A con un índice de Is entre 0,3 y 0,7. Estructura granular o en bloques pequeños o medianos en horizontes melánicos de Brunosoles Eútricos, Vertisoles y algunos Argisoles Eútricos Melánicos	0,3 < Is < 0,7 buena
3	Granular mediana o gruesa	Hz A con un índice de Is entre 0,7 y 1,5. Estructura en bloques medianos o gruesos en horizontes melánicos de Brunosoles Subeútricos y Argisoles Eútricos y Subeútricos y algunos Planosoles; y horizontes ócricos o úmbricos de Argisoles, Planosoles, Luvisoles, Acrisoles e Inceptisoles.	0,7 < Is < 1,5 moderada
4	Bloques, platy o masiva	Hz A con un índice de Is mayor a 1,5. En general en suelos Halomórficos, la mayor parte de los Gleysoles y algunos Planosoles. Se incluyen los horizontes con estructura masivo o sin estructura.	débil: 1,50 < Is < 5,00 y mediocre: Is > 5,0

Fuente: Adaptado de Wischmeier et al. (1971), Puentes y Szogi (1983),
* interpretación de resultados de Is Bak y Cayssials (1974)

8.2. ANEXO II CLASIFICACIÓN DEL CÓDIGO DE PERMEABILIDAD (p) USLE Y SU REASIGNACIÓN PARA SUELOS DE URUGUAY

Código de permeabilidad (p)	Wischmeier et al. (1971)	Adaptado de Puentes y Szogi (1983)
1	rápido	1 - Suelos excesivamente bien drenados, texturas gruesas, sin restricciones en el movimiento vertical
2	moderado a rápido	2a - Suelos bien drenados, texturas gruesas o medias, alta velocidad de infiltración pero con Bt profundo Luvisoles Acrisoles y Brunosoles háplicos 2b - Vertisoles en períodos secos
3	moderado	3 - Moderadamente bien drenados, texturas medias pero Bt entre 40 y 80 cm
4	lento a moderado	4a- Moderadamente bien drenados, texturas medias, pero Bt a menos de 40 cm 4b- Moderadamente bien drenados como los de código 3, pero Bt arcilloso arcillolimoso ubicado a los 40 a 80 cm el límite superior
5	lento	5a- Idem pero el Bt esta a menos de 40 cm de profundidad 5b- Suelos con drenaje moderado a pobre, arcilloso Bt masivo límite superior del Bt entre 40 y 80 cm Planosoles o Argisoles Brunosoles lúvicos
6	muy lento	6a- Contacto lítico a menos de 50 cm 6b- Suelos halomórficos o fases sódicas 6c- Histosoles y gleysoles napa fráctictuante drenajere pobre a muy pobre 6d- Bt arcilloso a menos de 40 cm de profundidad transición abrupta estructura prismática del Bt extremadamente duro cuando seco 6e- Suelos de estructuras pesadas desde el A arcillas expansivas Vertisoles en condiciones húmedas.

Fuente: Adaptado de Wischmeier et al. (1971), Puentes y Szogi (1983)