



Facultad de Ciencias Agrarias

Universidad Nacional de Lomas de Zamora

Carrera: Ingeniería Agronómica

Espacio de Prácticas Profesionales

Título: “Efecto del cultivo de cobertura sobre el carbono orgánico total del suelo y sus fracciones y sobre la Estabilidad de los agregados en un suelo de la Región Pampeana Arenosa”

Autor: Germán Cabrera

DNI: 33.857.623

Director: Ing. Agr. Hernán Rodríguez

Codirector: Ing. Agr. Mg. Javier De Grazia

Lugar y Fecha: Lomas de Zamora, 12 de septiembre de 2024

Trabajo Final de Grado

EXPEDIENTE Nº: 002047

Índice General

INDICE DE TABLAS	3
INDICE DE FIGURAS	3
ABREVIATURAS	5
RESUMEN	6
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 Planteo del problema y revisión de antecedentes	8
1.2. Justificación	12
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	14
<i>Objetivo general</i>	14
<i>Objetivos específicos</i>	14
<i>Hipótesis general</i>	14
<i>Hipótesis específicas</i>	14
3. MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.1 Ubicación	16
3.2 Clima	17
3.3 Suelos	18
3.4 Tratamientos	19
3.5 Determinaciones	20
3.5.1 Carbono orgánico total del suelo	20
3.5.2 Fracciones del Carbono Orgánico	22
3.5.3 Estabilidad de los agregados	23
3.6 Análisis estadístico	28
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1 Carbono orgánico del suelo y estabilidad de agregados en relación al número de cultivos de cobertura incluidos en la rotación agrícola	29
4.2 Carbono orgánico del suelo y estabilidad de agregados y tiempo transcurrido entre el cultivo de cobertura y el muestro de suelos	33
4.3 Relación entre el carbono orgánico del suelo y la estabilidad de agregados	38
5 CONCLUSIONES	41
6 BIBLIOGRAFÍA	43
7 ANEXO	47

INDICE DE TABLAS

Tabla I: Secuencia de cultivos en los lotes 2, 3, 11n y 14 para las ultimas 15 campañas agrícolas.	17
Tabla II: Tratamientos evaluados para cada Lote según las variables N° CC y Años desde último CC	18
Tabla III: Valores de referencia de carbono orgánico total del suelo según INTA.	19
Tabla IV: Clases de estabilidad de agregados sobre la base de los valores de DMP después de la desagregación.	25
Tabla V. de datos analíticos del perfil de serie “Santa Isabel”.	45
Tabla VI. Datos analíticos del perfil de serie “Saforcada”.	45
Tabla VII. Análisis de varianza del carbono orgánico total del suelo (COT) y sus fracciones en función del número de cultivo de cobertura (CC) en un intervalo de 15 campañas agrícolas (1, 2 y 3 cultivos de cobertura). A. (COT); B. Fracción Fina (C FF). C. Fracción Gruesa (C FG).	45
Tabla VIII. Análisis de varianza del Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) del suelo según la cantidad de cultivos de cobertura (CC) en un intervalo de 15 campañas agrícolas (1, 2 y 3 cultivos de cobertura).	46
Tabla IX. Análisis de varianza para los valores de Carbono Orgánico Total del suelo (COT) y sus fracciones según la cantidad de años que pasaron desde la última presencia de cultivos de cobertura (CC). A. (COT); B. Fracción Fina (C FF) y C. Fracción Gruesa (C FG).	46
Tabla X. Análisis de varianza para el Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) del suelo según la cantidad de años que pasaron desde la última presencia de cultivos de cobertura (CC)	47
Tabla XI. Análisis de Regresión Lineal relacionando las variables Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) y el nivel de Carbono Orgánico Total del suelo (COT).	47
Tabla XII. Análisis de Regresión Lineal relacionando las variables Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) y la Fracción Gruesa del carbono orgánico (C FG).	48
Tabla XIII. Análisis de Regresión Lineal relacionando las variables Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) y la Fracción Fina del carbono orgánico (C FF).	48

INDICE DE FIGURAS

Figuras 1: Mapa de la Región Pampeana indicando el contenido de carbono orgánico total del suelo (COT) estimada en una situación prístina (izquierda) y la calculada en el año 2019 (derecha).	7
Figuras 2: Ubicación del establecimiento Santa Inés..	14
Figuras 3: Establecimiento del estudio, identificado los lotes de las muestras..	14
Figuras 4: Temperaturas y precipitaciones promedio en la serie 2010-2022 para la zona..	16
Figuras 5: Establecimiento del estudio con las unidades cartográficas delimitadas..	16
Figuras 6: Determinación de Carbono Orgánico en las muestras de suelo según Walkley & Black.	20
Figuras 7: Desarrollo del método tamizado húmedo de suelo para la obtención de las distintas fracciones..	21
Figuras 8: Preparación de las muestras de suelo para determinar EA por metodología Le Bissonnais (1996)..	21
Figuras 9: Agregados vertidos en agua destilada marca el pretratamiento de humectación rápida..	22
Figuras 10: Agregados sobre papel de filtro muestra el pretratamiento de humectación lenta..	23
Figuras 11: Agitación en agua destilada de los agregados luego de estar inmersos en etanol es el otro pretratamiento..	23
Figuras 12: Agregados fraccionados por tamices..	24
Figuras 13: Procedimiento de tamizado para cada pretratamiento..	24
Figuras 14: Diagrama de la metodología de Le Bissonnais (1996)..	26

Figuras 15: Carbono orgánico total del suelo (COT) y sus fracciones en función del número de cultivo de cobertura (CC) en un intervalo de 15 campañas agrícolas (1, 2 y 3 cultivos de cobertura). 15A. COT; 15B. Fracción Fina (C FF). 15C. Fracción Gruesa (C FG)..	27
Figuras 16: Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) del suelo según la cantidad de cultivos de cobertura (CC) en un intervalo de 15 campañas agrícolas (1, 2 y 3 cultivos de cobertura).	30
Figuras 17: Valores de Carbono Orgánico Total del suelo (COT) y sus fracciones según la cantidad de años que pasaron desde la última presencia de cultivos de cobertura (CC). 17 A (COT), 17 B Fracción Fina (C FF) y 17 C. Fracción Gruesa (C FG)..	32
Figuras 18: Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) del suelo según la cantidad de años que pasaron desde la última presencia de cultivos de cobertura (CC)..	34
Figuras 19: Regresión Lineal relacionando las variables Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) y el nivel de Carbono Orgánico Total del suelo (COT)..	36
Figuras 20: Regresión Lineal relacionando las variables Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) y la Fracción Gruesa del carbono orgánico (C FG)..	36
Figuras 21: Regresión Lineal relacionando las variables Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) y la Fracción Fina del carbono orgánico (C FF)..	37

ABREVIATURAS

μ: Micrones

C: Carbono

CC: Cultivos de Cobertura

C FF: Carbono orgánico del suelo fracción fina

C FG: Carbono orgánico del suelo fracción gruesa

C FM: Carbono orgánico del suelo fracción media

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico

COAM: Carbono Orgánico asociado a la fracción Mineral

COP: Carbono Orgánico Particulado

COT: Carbono Orgánico total del suelo

DMP: Diámetro Medio Ponderado

EA: Estabilidad de los agregados

HEta: Humectación en etanol

HLen: Humectación lenta

HRap: Humectación rápida

meq: Miliequivalentes

mg: Miligramos

mm: Milímetros

MO: Materia Orgánica

MOS: Materia Orgánica del Suelo

Prom E: Promedio de estabilidad de los agregados

RESUMEN

El carbono orgánico total del suelo (COT) es un componente esencial de la materia orgánica del suelo (MOS) y su cantidad y calidad son fundamentales para mantener las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo. Muchos investigadores proponen utilizar el contenido y la calidad del COT y su relación con la estabilidad de agregados (EA), para evaluar el estado o condición de los sistemas productivos. Partiendo de una idea de balance de carbono, se desprenden diversas prácticas agrícolas que permiten mantener y mejorar los niveles de COT. Una estrategia para incrementar el COT y la EA del suelo, es incorporar un mayor número de cultivos por año a la rotación considerando los cultivos de cobertura (CC), ya que, ante una mayor intensificación agrícola, se incorpora una mayor cantidad de carbono (C) al sistema, dejando más cantidad de biomasa por unidad de superficie y de manera proporcional, mayor COT al agrosistema. Con el fin de estudiar el efecto de la inclusión de CC en las rotaciones agrícolas sobre el COT y sus fracciones y sobre el Promedio de la estabilidad de agregados (Prom E), se trabajó en cuatro lotes homogéneos ubicados en las cercanías de las localidades Vedia y Alberdi, provincia de Buenos Aires. Los lotes tenían más de 20 años de agricultura continua y presentaban distintos niveles de intensificación agrícola (secuencia de rotación agrícola) en las últimas 15 campañas. El lote 2 incluyó 1 CC y este se realizó dos años previo al muestro; el 11n incluyó 1 CC y estuvo un año previo al muestreo, el 3 presentó 2 CC y estaba saliendo del mismo al momento del muestreo (0 años desde último CC) y el lote 14 presentó 3 CC, también con 0 años desde último CC. El CC utilizado en todos los lotes y oportunidades que ingresaba en la rotación fue el Centeno (*Secale cereale*), exceptuando el lote 14, donde en una campaña se utilizó Avena (*Avena sativa*). A partir de muestras compuestas de suelo de los primeros 10 cm de suelo, se determinó el carbono orgánico total del suelo (COT) y sus fracciones (Fracción Gruesa, Fracción Media y Fracción Fina). Se analizaron teniendo en cuenta, por un lado, la cantidad de CC incluidos dentro de la rotación agrícola y por el otro el

tiempo entre el CC y el muestreo del suelo. Asimismo, se determinó el índice promedio de estabilidad de los agregados (Prom E). El aumento de CC dentro de la rotación agrícola no afectó el COT y sus fracciones ($p>0,05$) pero si incrementó el Prom E ($p<0,05$). Por otro lado, al estudiar el tiempo entre el último CC y el muestro de suelo se encontraron aumentos ($p<0,05$) para el Prom E; mientras que no se determinaron aumentos en el COT ni en las fracciones de C ($p>0,05$). Ambos efectos fueron encontrados en el corto plazo. Asimismo, no se encontró regresión lineal significativa ($p>0,05$) entre COT y sus fracciones con el Prom E.

Palabras claves: **carbono orgánico total, fraccionamiento, estabilidad agregados, cultivo cobertura, rotaciones.**

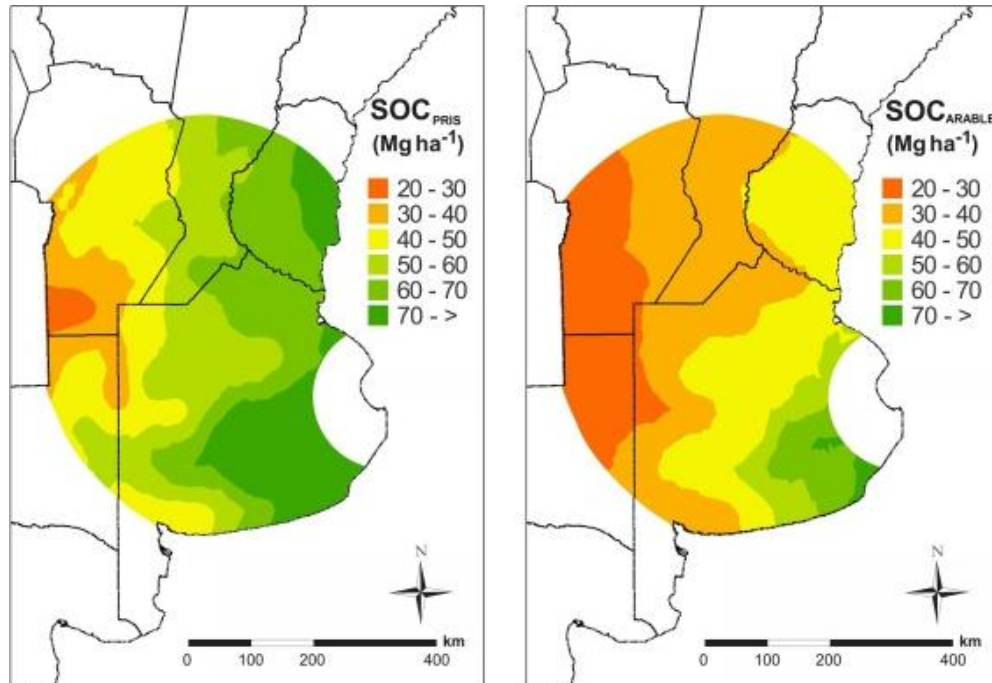
1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteo del problema y revisión de antecedentes

La producción de granos en Argentina y particularmente de la Región Pampeana es una actividad muy importante para la economía y la población. Sin embargo, en la búsqueda de mayores rendimientos se ha dejado de lado, en muchos casos, los efectos que esta actividad tiene sobre los recursos y principalmente sobre el suelo (Oosterheld, et al., 2002). El COT es la propiedad más afectada debido a la prolongada historia agrícola de esta Región sumado a que el fertilizado exógeno se incorporó como labor recién en la década del 90, dependiendo por varios años de nutrientes derivados de la mineralización del COT. Asimismo, la baja rotación de cultivos con altos aportes de C o con pasturas plurianuales, la insuficiente fertilización para los requerimientos del cultivo y las labranzas convencionales inadecuadas realizadas por décadas, redujeron el COT entre 40 % y 50 % en relación con una situación prístina (Lavado & Chezzo, 2005).

El COT es la resultante del balance de carbono que presenta un suelo, donde las entradas al agrosistema se dan a través de la fotosíntesis y las salidas por respiración radical y microbiana. Las rotaciones agrícolas realizadas en la región Pampeana suelen ser de baja diversidad, con un bajo número de cultivos por año (uno por año). Se busca “preservar” recursos como agua y nutrientes para el cultivo de renta, lo que derivan en la presencia de “barbecho largo”. Este planteo característico de la región no genera un balance positivo de carbono en el suelo (Cazorla, 2012). Dentro de la región Pampeana, características intrínsecas como la temperatura, el régimen hídrico, proporción de arcillas en la granulometría del suelo y la erosión eólica o hídrica, determinan los niveles de COT. A mayores temperaturas medias y menores precipitaciones con prevalencia de clases texturales gruesas (arenas) y altos riesgos erosivos, son determinantes de un bajo porcentaje de COT potencial (Alvarez & Steinbach, 2006).

En la Figura 1 se observa una comparación realizada del contenido de COT estimado para una situación prístina en relación al contenido encontrado actualmente (año 2019) para la Región Pampeana.



Figuras 1: Mapa de la Región Pampeana indicando el contenido de carbono orgánico total del suelo (COT) estimada en una situación prístina (izquierda) y la calculada en el año 2019 (derecha). Fuente: (Sainz, et al., 2019).

Se observa una disminución generalizada del contenido de carbono orgánico total del suelo (COT) en diversas subregiones, destacando la Pampa arenosa, donde los suelos de texturas gruesas y las menores precipitaciones presentan claros déficits. En el sureste de Buenos Aires, donde históricamente se han observado valores elevados de COT, actualmente se evidencia una tendencia a la baja, mientras que en la zona núcleo se reportan caídas medias del 35%. Por otro lado, en la Pampa mesopotámica, los altos porcentajes de arcillas protegen el COT de los ataques microbianos, lo que resulta en disminuciones menos acentuadas a pesar de la intensificación agrícola similar a la del resto de la región Pampeana. (Echeverría, et al., 2010). De acuerdo con el grado de transformación del COT, es posible identificar diferentes porciones mediante fraccionamiento físico, como el carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COAM), que se refiere a las partículas de tamaño inferior a 53 μ . El mismo presenta valores

estables en el tiempo (fracciones humificadas) con mayor grado de transformación asociadas íntimamente con fracciones minerales, o sea, menos dependiente a corto y mediano plazo a las decisiones de manejo. La porción menos transformada o más lábil, es el carbono orgánico particulado (COP) y corresponde a las partículas que van de 2000 a 53 μ . A su vez., dentro del COP se puede subdividir en una fracción gruesa que va desde 2000 a 105 μ y una fracción fina desde 105 a 53 μ . El COP se caracteriza por su alta dependencia a corto y mediano plazo al manejo agronómico y se relaciona con la capacidad potencial de mineralización para distintos nutrientes dejándolo disponible en la solución suelo para aprovechamiento de las plantas (Galantini, et al., 2007). Mantener óptimos valores de COT es importante para mantener la calidad, sustentabilidad y capacidad productiva de los suelos (Sanchez, et al., 2004). Un nivel adecuado de COT incrementa la EA, la resistencia a la erosión, la capacidad de retención de agua útil en el perfil y la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Asimismo, colabora con la diversidad microbiológica del sistema suelo, clave para el ciclo de nutrientes y el mantenimiento de niveles de fertilidad deseables (Kane, 2015).

Por otro lado, para estudiar la fertilidad física de los suelos, un indicador muy utilizado es la EA. La misma se puede definir como la resistencia que presentan los agregados de suelo ante agentes externos disgregantes, como el agua, viento, manipulación mecánica o el pisoteo (Taboada, 2008). La estructura en el suelo depende de sus componentes minerales y orgánicos y su ordenamiento o relación espacial. El COT, aunque minoritario dentro de los componentes del suelo, es imprescindible y determinante para generar estabilidad en esta estructura ya que actúa de cementante entre partículas e incrementa la resistencia ante los agentes disgregantes (Novelli, et al., 2010). En sistemas de manejo sustentables, la labranza reducida, la siembra directa, la incorporación de materia orgánica o la rotación de cultivos, son estrategias utilizadas para mantener y mejorar los niveles de COT (Bono, et al., 2004).

En la región Pampeana, la rotación agrícola es una práctica habitual utilizada en los sistemas de producción agrícola. Las mismas dejan rastrojos que aportan nutrientes y materia orgánica (MO) y tienen efectos positivos sobre la estructura física del suelo (aireación, capacidad infiltración del agua y retención de humedad). Asimismo, sistemas radicales diferentes, permiten explorar y extraer macro y micro nutrientes de distintas profundidades y cortan ciclos biológicos de plagas y malezas, manifestando ventajas agronómicas y económicas, (Caviglia & Novelli, 2011). La calidad de los residuos orgánicos y su efecto sobre el suelo, depende de las especies utilizadas en las rotaciones y de la relación C/N de cada una. Las gramíneas presentan valores altos, lo que aporta C al suelo, mientras que las leguminosas presentan valores bajos, siendo residuos fácilmente degradables aportando nitrógeno (N) al suelo. Estas familias son claves dentro de las rotaciones agrícolas típicas, generando efectos sinérgicos positivos entre ambas (Micucci & Taboada, 2006).

En Argentina y particularmente en la región Pampeana, la producción agrícola extensiva se destina a cultivos oleaginosos y cereales. Los cultivos principales son soja, trigo, maíz y girasol, siendo de menor importancia cebada, sorgo, avena y maní. Por lo tanto, las rotaciones agrícolas planificadas deben incluir estas especies. Entre las más utilizadas se menciona: trigo/soja 2°-maíz, soja-soja (monocultivo), cebada/soja 2°- trigo/soja 2°, trigo/girasol-maíz (Ministerio de Economía Argentina, 2018). En los últimos años, se han estado incluyendo dentro de las rotaciones agrícolas, los cultivos de cobertura (CC), debido a sus beneficios o servicios ecosistémicos en la sostenibilidad del sistema agrícola (Duval, et al., 2015).

El CC es una cobertura viva del suelo, que es sembrada dentro o después de un cultivo principal, que no se pastorea ni cosecha y tampoco se incorpora, quedando en superficie, para proteger el suelo y liberar nutrientes como resultado de la degradación de la biomasa aérea y radical (Pugni, 2017). Aportan una mayor biomasa, lo que contribuye a incrementar la captura de carbono en el suelo y a reducir la erosión. Además, generan menor presión de malezas, lo

que reduce la necesidad de herbicidas, y mejoran la infiltración de agua al crear más macroporos en la estructura del suelo. Esto también aumenta la eficiencia en el uso del agua (EUA) al disminuir la amplitud térmica en la superficie y reduce la pérdida de nutrientes móviles, como nitratos y sulfatos, por lixiviación. (Restovich & Andriulo, 2013). Por otro lado, fomentan una mayor diversidad y abundancia de microorganismos edáficos, lo que mejora su actividad y el ciclo de nutrientes (Frasier, et al., 2012) En los sistemas agrícolas de la región pampeana, el objetivo principal de aplicar CC es enriquecer el suelo con carbono, manteniendo una relación adecuada entre carbono y nitrógeno que asegure una descomposición lenta del material vegetal. Esto permite una cobertura prolongada de residuos y favorece los mecanismos de estructuración superficial y el almacenamiento de materia orgánica en los agregados del suelo (Novelli, et al., 2010). Es fundamental que esta práctica no interfiera con la implantación de cultivos comerciales ni comprometa su rendimiento, evitando así la reducción de las reservas hídricas o nutricionales del perfil del suelo (Cazorla, et al., 2017).

1.2. Justificación

El suelo es la base de la agricultura y el medio en el que crecen las plantas destinadas a la producción de alimentos. La calidad y la cantidad de los alimentos está directamente relacionada con la calidad y salud del suelo. Se estima que 95 % de los mismos se producen directa o indirectamente a partir de los suelos y sólo 12 % de la superficie de la tierra es fácilmente cultivable (FAO, 2015).

Durante los últimos 50 años, los avances en tecnología agrícola y el aumento de la demanda provocado por el crecimiento de la población han ejercido una creciente presión sobre los suelos. Los sistemas productivos agrícolas actuales con baja diversidad han ocasionado el agotamiento de los suelos poniendo en peligro su capacidad productiva y la posibilidad de satisfacer las necesidades de las generaciones futuras. En este sentido, implementar prácticas

sostenibles es necesario para aumentar los rendimientos sin afectar la calidad de los alimentos ni deteriorar aún más los suelos (FAO, 2015).

Una práctica que permite mantener o elevar el COT, es la inclusión de CC en la rotación. La técnica de cobertura se utiliza desde hace miles de años en el mundo. Sin embargo, el efecto sobre el suelo dependerá de las características de los CC, los cultivos a sembrar y la zona donde se desarrolla la actividad productiva (Teasdale, 2004). Se han reportado incrementos en la superficie sembrada de CC. Datos agrícolas trazados del CREA, determinaron que el área total de CC para la campaña 2019/20 alcanzó 54883 hectáreas (4,7 % del área relevada). Como antecesor de la soja se destacaron centeno y avena, mientras que en el caso del maíz fueron centeno y vicia villosa (DAT-CREA, 2020).

Si bien se observa gran adopción de esta práctica por parte de los productores, aún faltan estudios sobre su manejo agronómico y los beneficios producidos sobre los sistemas productivos y particularmente sobre la calidad del suelo. Por esto mismo, este trabajo busca generar más información sobre el efecto de esta práctica sobre el suelo a partir de indicadores físicos y biológicos como la EA y el COT.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general

Estudiar el efecto de incluir cultivos de coberturas en las rotaciones agrícolas sobre la calidad del suelo destinado a la producción agrícola extensiva.

Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto de la cantidad de cultivos de cobertura dentro de una rotación agrícola efectuada en un intervalo de 15 años sobre el carbono orgánico total del suelo y sus fracciones y sobre la estabilidad de agregados en los primeros 10 cm de un suelo de Pampa Arenosa.
2. Evaluar el efecto del tiempo desde el último cultivo de cobertura y el muestreo del suelo sobre el carbono orgánico total del suelo y sus fracciones y sobre la estabilidad de agregado del suelo en los primeros 10 cm de un suelo de Pampa Arenosa.
3. Analizar la relación entre el carbono orgánico total del suelo y sus fracciones con la estabilidad de agregado de un suelo dedicado a la agricultura extensiva en Pampa Arenosa

Hipótesis general

La inclusión de cultivos de cobertura en la rotación agrícola planificada mejora la calidad del suelo destinado a la producción agrícola extensiva.

Hipótesis específicas

1. La cantidad de cultivos de cobertura incluidos dentro de las rotaciones intensificadas incrementa el carbono orgánico total del suelo a través del aumento de la fracción particulada lábil (fracción gruesa) del carbono orgánico, además de la estabilidad de agregados en los primeros 10 cm de un suelo de Pampa Arenosa.
2. El tiempo transcurrido entre la inclusión de los cultivos de cobertura y el muestreo del suelo afecta el carbono orgánico total del suelo a través del aumento de la fracción

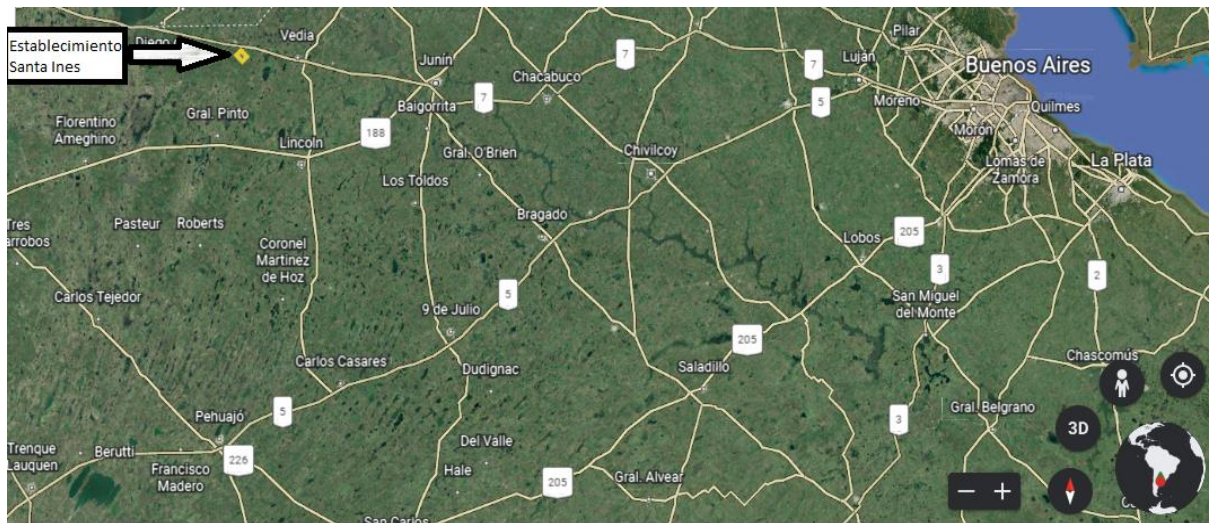
particulada lábil (fracción gruesa) del carbono orgánico, además de la estabilidad de agregados del suelo en los primeros 10 cm de un suelo de Pampa Arenosa.

3. Existe una relación positiva entre el carbono orgánico total del suelo y la estabilidad de agregado de un suelo dedicado a la agricultura extensiva en Pampa Arenosa

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación

El muestreo del suelo se realizó en cuatro lotes homogéneos pertenecientes a un establecimiento productivo ubicado en la Región geomorfológica Pampa Arenosa. El mismo se encuentra cercano a la Ruta Nacional N° 7, entre las localidades de Vedia y Alberdi, provincia de Buenos Aires (Figura 2), con georreferenciación $-35^{\circ}28'04''$ Latitud; $-61^{\circ}47'24''$ Longitud.



Figuras 2: Ubicación del establecimiento Santa Inés. Fuente: (Google Earth Pro, 2020).

En la figura 3 se ubican de manera detallada los lotes de dónde se obtuvieron las muestras de suelo para el presente estudio.

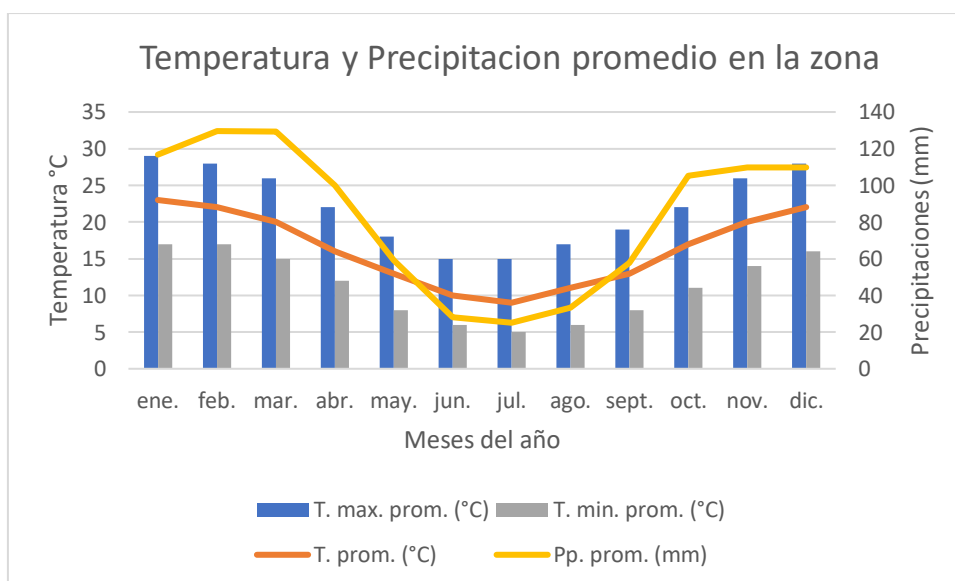


Figuras 3: Establecimiento del estudio, identificado los lotes de las muestras. Fuente: (Google Earth Pro, 2020).

Esta Región se caracteriza por la carencia de vías naturales de drenaje debido a la disposición de los médanos que están en sentido transversal a la pendiente, es decir, es una planicie de extensos espacios sin desagüe. En cuanto a sus suelos, son arenosos con aptitud agrícola-ganadero, susceptibles a erosión eólica.

3.2 Clima

La zona donde se encuentra el establecimiento posee un clima templado-húmedo, con una temperatura media anual de 16,3 °C, la cual oscila entre 9 °C y 23 °C correspondiente a los meses de julio y enero, siendo respectivamente el mes más frío y el más cálido. La temperatura máxima anual media es de 22,1 °C, variando entre 15 °C y 29 °C y la temperatura mínima anual media es de 11,2 °C con un rango que varía entre 5 °C y 17 °C. Presenta un régimen de precipitaciones que alcanza un promedio anual de 1004 mm que, si bien es considerado isohigro, concentra la mayor parte de las mismas en los meses de primavera-verano (octubre a abril). La pluviometría media mensual fluctúa entre 25,1 mm en el mes de julio y 129,6 mm correspondiente al mes de febrero (Figura 4). La humedad relativa media anual es de 72 %, siendo más baja en los meses de verano debido al efecto de las temperaturas más elevadas y menores durante el otoño-invierno.



Figuras 4: Temperaturas y precipitaciones promedio en la serie 2010-2022 para la zona. Fuente: (SIGA, 2022).

3.3 Suelos

Dentro del establecimiento se identificaron dos unidades cartográficas de suelos (Figura 5).



Figuras 5: Establecimiento del estudio con las unidades cartográficas delimitadas. Fuente: (INTA, 2002).

Los lotes de donde se obtuvieron las muestras de suelo pertenecen a la asociación de las series Santa Isabel y Saforcada, pertenecientes a la unidad cartográfica SI 5. La unidad se encuentra ubicada en lomas arenosas suavemente onduladas, está compuesta por un 80 % de la serie Santa Isabel 80% (crestas y pendientes) y un 20 % de la serie Saforcada (cordones arenosos) y tiene un índice de productividad de 82 (B). La serie Santa Isabel se clasificó taxonómicamente como Hapludol típico, limosa fina, mixta, térmica (Instituto de Suelos, 2006). Es un suelo profundo y liviano, de aptitud agrícola (IP 82, Capacidad de uso de I o II, donde varía por limitantes relacionadas a características edáficas como compactación del perfil) que se encuentra en un paisaje plano, normal, ocupando un micro relieve ondulado, en sitios de lomas de la Subregión Pampa Arenosa, bien drenado, con escaso desarrollo de material eólico, sobre sedimentos loésicos franco arenosos que evoluciona sobre un paisaje de antiguos médanos estabilizados, remodelado en épocas más secas, no alcalino, no salino con pendiente de 0-1 %.

Por su parte, la serie Saforcada, se clasificó taxonómicamente como Hapludol éntico, franca gruesa, mixta; térmica (Instituto de Suelos, 2006). Es un suelo profundo, arenoso, con escaso desarrollo, de aptitud agrícola que se encuentra en un paisaje ondulado, ocupando algunas de las crestas de lomas y medias lomas de la Subregión Pampa Arenosa, algo excesivamente drenado, habiendo evolucionado sobre un sedimento eólico areno-francos y arenosos de origen medanoso, no alcalino, no salino con pendiente predominante de 0-1 %.

3.4 Tratamientos

Dentro del establecimiento se seleccionaron cuatro lotes específicos denominados como 2, 3, 11n y 14. Todos los lotes venían de un historial con más de 20 años de agricultura continua bajo siembra directa. Las rotaciones que presentaron los lotes de estudio se explicitan en el cuadro a continuación (Tabla I):

Tabla I: Secuencia de cultivos en los lotes 2, 3, 11n y 14 para las últimas 15 campañas agrícolas.

Lo te	06/ 07	07/ 08	08/ 09	09/ 10	10/ 11	11/ 12	12/ 13	13/ 14	14/ 15	15/ 16	16/ 17	17/ 18	18/ 19	19/ 20	20/ 21
2	T/S	M	T/S	M	S	T/S	M	S	T/S	S	T/S	M	Ce/ S	T/S	M
3	S	T/S	S	T/S	M	S	C/S	M	S	T/S	M	Ce/ S	T/S	M	Ce/ S
11 n	T/S	M	T/S	M	S	T/S	M	S	T/S	M	S	T/S	M	Ce/ S	T/S
14	A/S	T/S	S	T/S	M	S	T/S	M	S	T/S	M	Ce/ S	T/S	M	Ce/ S

T/S (Trigo/Soja 2°), S (Soja 1°), M (Maíz 1°), C/S (Cebada/Soja 2°), A/S (Avena/Soja 1°) y Ce/S (Centeno/Soja 1°).

En cada lote, se muestreó en tres puntos distintos (repeticiones) tomados en los primeros 10 cm de perfil. Todos los puntos muestreados pertenecían a la misma Unidad Cartográfica. El muestreo fue realizado en el mes de septiembre del 2021. Los tratamientos quedaron determinados por:

- 1- número de CC incluidos en el esquema de rotaciones durante los últimos 15 años de producción agrícola.
- 2- tiempo transcurrido desde el último CC implantado hasta el muestreo.

El lote 2 fue el de menor intensidad en la rotación (1 CC) y el de mayor tiempo entre el CC y muestreo y el lote 14, de mayor diversidad en la rotación (3 CC) con un menor tiempo desde último CC presente (0 años). A su vez el lote 11n y 3 presentan condiciones intermedias de las presentadas. En la Tabla II se observan los tratamientos evaluados:

Tabla II: Tratamientos evaluados para cada Lote según las variables N° CC y Años desde último CC.

Lote	Cantidad de cultivos de cobertura incluidos en la rotación	Años desde último cultivo de cobertura y el muestreo de suelo
2	1	2
11n	1	1
3	2	0
14	3	0

3.5 Determinaciones

Sobre muestras compuestas de suelo se determinó el carbono orgánico total del suelo (COT) y su fracción gruesa (C FG), media (C FM) y fina (C FF). Asimismo, se tomaron tres muestras para estabilidad de agregados (EA). Ambas determinaciones se hicieron en los primeros 10 cm de suelo en puntos muy cercanos.

3.5.1 Carbono orgánico total del suelo

El COT del suelo se determinó por vía húmeda (micrométodo). El método se basa en el procedimiento propuesto por Walkley & Black (Galantini, et al., 1994), en el que el C es oxidado con una solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y ácido sulfúrico concentrado al 98 % (H_2SO_4). La reacción toma el calor de la disolución del ácido, lo que eleva la temperatura y logra la oxidación del carbono orgánico (Figura 6). El dicromato residual es posteriormente titulado con una sal ferrosa (sulfato ferroso). El método determina sólo una parte del carbono orgánico, discriminando las formas condensadas y excluyendo en un 90 a 95% el carbono elemental. Dado que la oxidación de la MO que se logra es incompleta se utiliza un factor de corrección (1,22) que puede variar de acuerdo al tipo de suelo y al horizonte considerado, basándose en la suposición de que el 82% del C es oxidado. Para el cálculo de COT en % se utilizó la siguiente ecuación (Ecuación 1):

$$\text{COT \%} = \frac{(\text{B-M}) \times 0,3 \times 300}{P_M \times 0,82}$$

Ecuación 1

Siendo:

B: volumen (mL) de sal consumido por el Blanco.

M: volumen (mL) de sal consumido por la Muestra.

PM: Peso de la Muestra (mg).

0,3: Normalidad de la sal

300: Corresponde a la transformación de meq de C a mg y por 100 mg de suelo.

0,82: Factor de corrección por oxidación (82%).

Si se desea estimar el contenido de MOS (materia orgánica del suelo), se multiplica el valor obtenido del COT por un factor convencional de 1,724 (factor de Van Benmelem) (Martinez, 2017). Este mismo factor de Van Benmelen, fue el que utilizó el INTA para el cálculo de valores de referencia del COT en suelos de la Región Pampeana (Tabla III).

Tabla III: Valores de referencia de carbono orgánico total del suelo según INTA. Fuente: (INTA, 1989)

COT %	Nivel de COT
<0,87	Muy bajo
0,87-1,45	Bajo
1,45-2,61	Medio
2,61-3,77	Alto
>3,77	Muy alto

COT: carbono orgánico total del suelo



Figuras 6: Determinación de Carbono Orgánico en las muestras de suelo según Walkley & Black (Galantini, et al., 1994). Fuente: (Laboratorio Suelos UNLZ, 2023).

3.5.2 Fracciones del Carbono Orgánico

Para el fraccionamiento por tamaño del COT se utilizó el tamizado húmedo de suelo según el método Cambardella & Elliott (Cambardella & Elliott, 1992). Para el presente trabajo se procedió a pesar 50 g de la muestra de suelo previamente secada al aire y tamizada (2 mm), se dispersaron en recipientes de 120 mL, y se suspendieron con 100 mL de agua destilada. Se agregaron diez esferas de vidrio (5 mm de diámetro) para destrucción de los agregados y reducir los problemas potenciales creados por diferente contenido de arena. Las muestras fueron sometidos a dispersión mecánica (en vez de dispersión química propuesta por el método original) a través de un agitador rotatorio (40 RPM) por aproximadamente 16 h para desintegrar los agregados. El tamizado en húmedo se realizó con un par de tamices de 53 μm y 105 μm de diámetro de malla, aplicando agua destilada con un pulverizador y realizando movimientos rotatorios de ida y vuelta hasta que el agua destilada que salía por el tamiz era clara a simple vista (Figura 7). Se obtuvieron tres fracciones:

- Fracción gruesa (C FG): partículas retenidas por encima de 105 y menos de 2000 μm , que contiene partículas gruesas de carbono orgánico y arenas finas a muy gruesas.
- Fracción media (C FM): partículas retenidas de entre 53–105 μm , que incluye partículas finas carbono orgánico y arena muy fina.
- Fracción fina (C FF): partículas menores a 53 μm , que contiene minerales asociados al carbono orgánico, así como minerales de limo y arcilla.

El material retenido en cada tamiz fue transferido a frascos de vidrio pulverizando agua destilada sobre ellos, secándose en estufa a 70 °C durante 96 h para pesaje posterior. Se determinó de esta manera la masa de cada fracción.



Figuras 7: Desarrollo del método tamizado húmedo de suelo para la obtención de las distintas fracciones. Fuente (Laboratorio Suelos UNLZ, 2023).

3.5.3 Estabilidad de los agregados

La EA del suelo se determinó a través de la técnica de Le Bissonnais (1996). La misma consiste en someter agregados de 3-5 mm (Figura 8), a tres pretratamientos de laboratorio para el cálculo del diámetro medio ponderado de agregados estables (DMP) por:

1. Humectación rápida por inmersión en agua o efecto estallido (HRap).
2. Humectación lenta con agua por capilaridad (HLen).
3. Disgregación mecánica por agitación después de la re-humectación en etanol (HEta).



Figuras 8: Preparación de las muestras de suelo para determinar EA por metodología Le Bissonnais (1996). Fuente: (Laboratorio Suelos UNLZ, 2023).

El DMP de los agregados luego de la humectación rápida (HRap) mide el estallido, el cual es causado por la compresión del aire ocluido. El procedimiento consistió en pesar 6 g de agregados de 3-5 mm (peso inicial) y colocarlos en 50 ml de agua destilada en un vaso de

precipitado y luego se vertieron los agregados (Figura 9). Luego de 10 minutos de reposo se eliminó el agua y se transfirieron los agregados a un tamiz de 0,05 mm inmerso en etanol.



Figuras 9: Agregados vertidos en agua destilada marca el pretratamiento de humectación rápida. Fuente: (*Laboratorio Suelos UNLZ, 2023*).

El DMP luego de la humectación lenta (HLen) mide la desagregación debida a la microfisuración por expansión diferencial de las arcillas. Este pretratamiento es menos destructivo que la humectación rápida y, por lo tanto, discrimina sólo suelos muy inestables. El procedimiento metodológico consistió en pesar 6 g de agregados de 3-5 mm (peso inicial) y disponer los agregados sobre un papel filtro, colocados sobre un material absorbente parcialmente sumergido en agua (Figura 10). Se esperó a que se produzca la humectación de los agregados por ascenso capilar del agua durante una hora y se transfirieron los agregados en el tamiz de 0,05 mm inmerso en etanol.



Figuras 10: Agregados sobre papel de filtro muestra el pretratamiento de humectación lenta. Fuente: (*Laboratorio Suelos UNLZ, 2023*).

El DMP luego de agitación mecánica de los agregados (HEta) habiendo sido pre-humectados al alcohol mide la cohesión interparticular independientemente del estallido y la microfisuración diferencial. Dicho tratamiento permite evaluar el fraccionamiento por disgregación mecánica, simulando el efecto que ocurre al impactar las gotas de lluvia sobre el suelo. El procedimiento metodológico consistió en pesar 6 g de agregados de 3-5 mm (peso inicial) y colocarlos en 50 ml de etanol en un vaso de precipitado y luego se vertieron los agregados. Se dejó reposar 30 minutos y luego se evacuó el exceso de etanol. Se vertieron 50 ml de agua destilada en un erlenmeyer y se traspasaron los agregados y se ajustó el nivel del agua destilada a 250 ml. Se agitó manualmente el erlenmeyer y se dejó reposar 30 minutos observándose la decantación (Figura 11). Se eliminó el exceso de agua y se transfirieron los agregados en el tamiz de 0,05 mm inmerso en etanol.

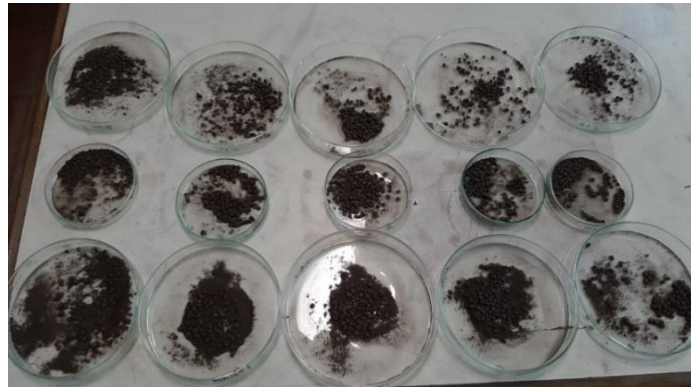


Figuras 11: Agitación en agua destilada de los agregados luego de estar inmersos en etanol es el otro pretratamiento.
Fuente: (Laboratorio Suelos UNLZ, 2023).

Determinación de la distribución del tamaño de los agregados:

El objetivo de esta parte del método es determinar el resultado de la desagregación causada por los pretratamientos evitando al máximo cualquier otra desintegración. El procedimiento fue idéntico para los tres pretratamientos. Se depositaron las muestras luego de cada uno de los pretratamientos (antes sumergido en etanol en el tamiz de 0,05 mm) y se recuperó la fracción $> 0,05$ mm (o > 50 μ m) en un vaso de vidrio, se la secó a 40° C durante 48 horas para luego tamizarla en una columna de seis tamices con el fin de lograr la distribución de

agregados para cada rango de tamaños (Figura 12). Estos son $>2.000\ \mu\text{m}$, $2.000\text{-}1.000\ \mu\text{m}$, $1.000\text{-}500\ \mu\text{m}$, $500\text{-}250\ \mu\text{m}$, $250\text{-}100\ \mu\text{m}$ y $100\text{-}50\ \mu\text{m}$ (Figura 13).



Figuras 12: Agregados fraccionados por tamices. Fuente: (Laboratorio Suelos UNLZ, 2023).



Figuras 13: Procedimiento de tamizado para cada pretratamiento. Fuente: (Laboratorio Suelos UNLZ, 2023).

El DMP representa el tamaño promedio de los agregados resultante luego de la desagregación, a mayor DMP, mayor es la estabilidad de agregados. El DMP de cada pretratamiento se obtuvo como la suma algebraica del diámetro medio de apertura de los tamices adyacentes, multiplicado al porcentaje de partículas de las fracciones retenidas sobre cada tamiz como lo indica la siguiente fórmula (Ecuación 2):

$$\sum [\text{Diámetro medio entre dos tamices (mm)}] * [\% \text{ de partículas retenidas sobre el tamiz}]/100$$

Ecuación 2

Finalmente se calculó el índice promedio (Prom E) de los DMP de los tres pretratamientos obteniéndose un valor de síntesis de la estabilidad de los agregados. Los resultados fueron

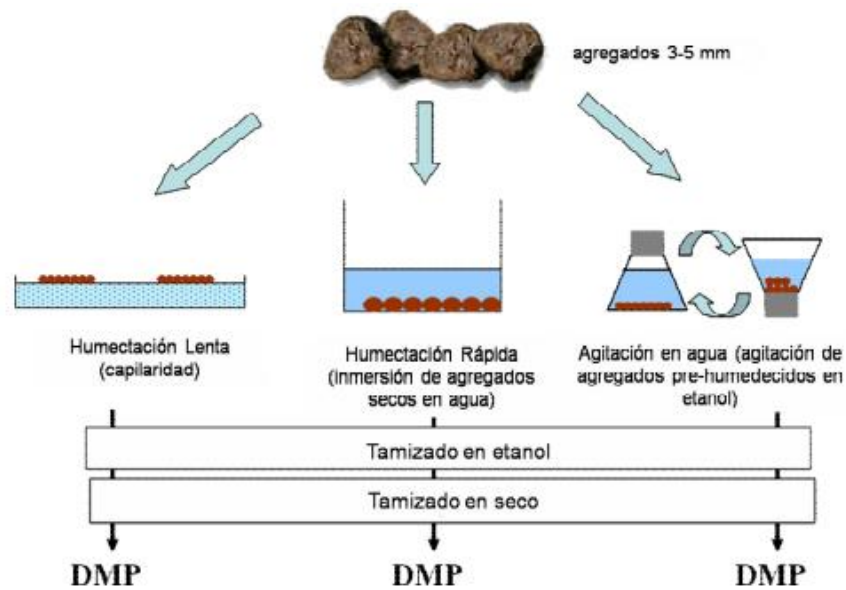
comparados con la escala de “Clases de estabilidad” propuesta por Le Bissonnais (1996) (Tabla IV).

Tabla IV: Clases de estabilidad de agregados sobre la base de los valores de DMP después de la desagregación. Fuente: (Le Bissonnais, 1996)

DMP (mm)	Estabilidad
<0,4 mm	Muy Inestable
0,4-0,8 mm	Inestable
0,8-1,3 mm	Moderadamente Estable
1,3-2,0 mm	Estable
>2,0 mm	Muy Estable

DMP: diámetro medio ponderado

Este método otorga especial importancia a la utilización del etanol que permite, por un lado, controlar la desagregación y, por otro, limita la reagregación de las partículas durante el secado. Al mismo tiempo, el alcohol controla la desagregación de la fracción fina del suelo y el efecto de hinchamiento diferencial, poniendo así en evidencia mecanismos que actúan en la cohesión de los coloides. La metodología de Le Bissonnais (1996) (Figura 14) permite, no sólo conocer el estado actual de la estabilidad de los suelos sino también, al distinguir entre mecanismos de fragmentación, facilita la identificación de aquellas propiedades de los suelos con mayor incidencia en la estabilidad de los agregados. De este modo se puede reconocer la incidencia sobre la agregación de propiedades inherentes, como la textura y de propiedades más dinámicas, que dependen en mayor medida del manejo, como las distintas fracciones de la materia orgánica.



Figuras 14: Diagrama de la metodología de Le Bissonnais (1996). Fuente: (Gonzalez, et al., 2017).

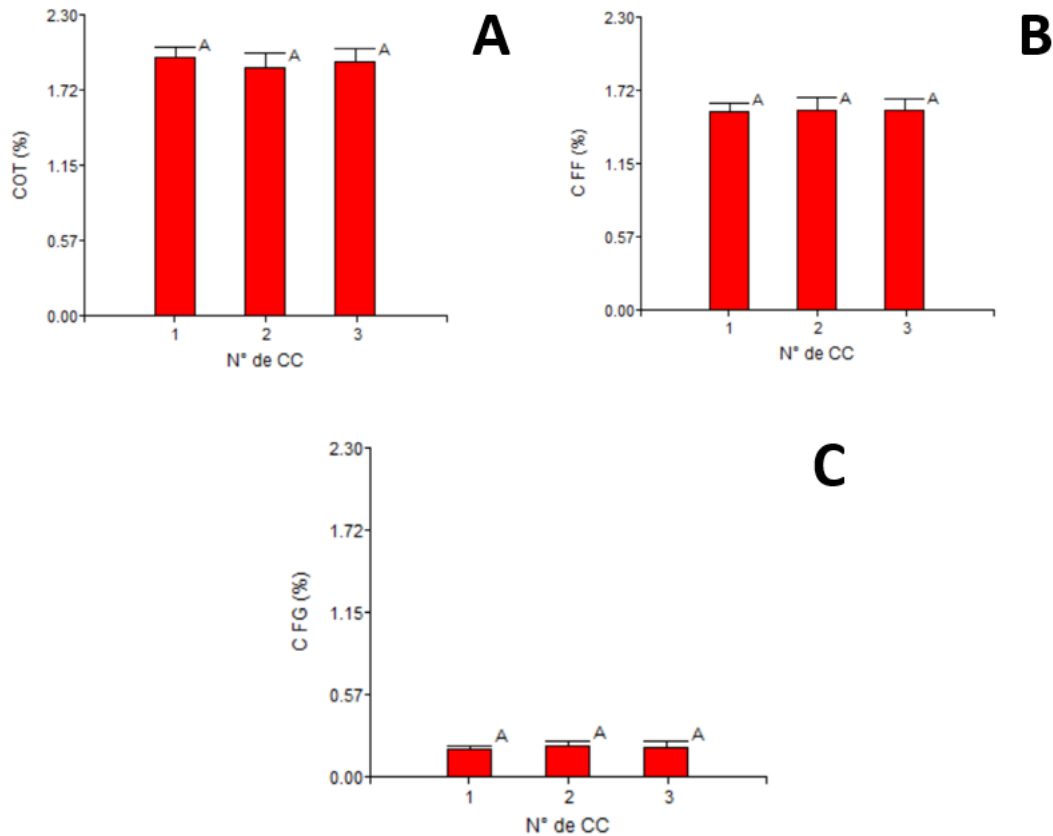
3.6 Análisis estadístico

El diseño estadístico fue un completamente aleatorizado con tres tratamientos y tres repeticiones. Se utilizó un ANOVA para estudiar el efecto de la cantidad de CC incluidos en las rotaciones y el efecto del tiempo entre el CC y el muestro sobre COT y sus fracciones y sobre Prom E. Asimismo, se realizó una regresión lineal para estudiar la relación entre COT y sus fracciones con el Prom E. Los efectos de los tratamientos sobre los parámetros medidos se evaluaron estadísticamente mediante un análisis de varianza utilizando el programa estadístico Infostat versión 2020 (Di Rienzo, 2020). Las medias significativamente diferentes se separaron usando test de Duncan ($p < 0,05$).

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Carbono orgánico del suelo y estabilidad de agregados en relación al número de cultivos de cobertura incluidos en la rotación agrícola

La cantidad de cultivos de cobertura incluidos en la rotación agrícola no tuvo efecto significativo ($p < 0,05$) sobre el nivel de COT superficial (Figura 15 A) ni sus fracciones (Figura 15 B y C).



Figuras 15: Carbono orgánico total del suelo (COT) y sus fracciones en función del número de cultivo de cobertura (CC) en un intervalo de 15 campañas agrícolas (1, 2 y 3 cultivos de cobertura). 15A. COT; 15B. Fracción Fina (CFF). 15C. Fracción Gruesa (CFG). Letras diferentes muestran diferencias significativas entre los tratamientos según prueba de Duncan ($p < 0,05$). Las líneas verticales de cada barra representan el desvío estándar de la media.

Los resultados no coinciden con la bibliografía internacional donde se reportan incrementos en COT en los primeros 5-10 cm de profundidad en sistemas agrícolas intensificados. Los efectos dependerán de los cultivos antecesores en la rotación agrícola (Restovich, et al., 2011). El contenido de COT en el suelo expresa el balance entre las tasas de humificación y mineralización, el cual se ve afectado por la cantidad, calidad y la manera en que el carbono

regresa al suelo por medio de los restos de cosecha o raíces (Echeverría, et al., 2015). Es importante la elección de los cultivos agrícolas que forman parte de la secuencia de la rotación, pues permite regular la contribución de carbono al suelo, interviniendo sobre las pérdidas y ganancias en el suelo. Mientras se mantengan rotaciones que solo incluyan cultivos agrícolas, sin diversificar las mismas, las caídas del C orgánico serán inevitables (Dominguez & Studdert, 2015).

En este trabajo, la ausencia de diferencias podría deberse a insuficientes números de CC incorporados a la rotación y los tiempos muy largos entre uno y otro. En este sentido, Rillo (2018) detectó, que en una rotación de cultivos estivales (soja) con inclusión de distintos CC a lo largo de 10 años, se incrementó un 58 % el COT en comparación con un testigo (barbecho químico). El COP fue la fracción más influenciada y la responsable de generar las diferencias observables (Rillo, et al., 2018)

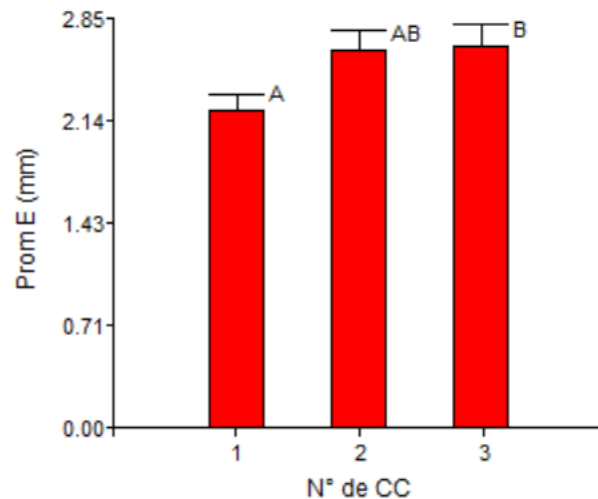
En sistemas agrícolas, el nivel de residuos de cultivos aportados está principalmente controlado por las labranzas, fertilización y la rotación de cultivos. Se observaron incrementos lineales del COT con adiciones crecientes de residuos de cultivos, aunque la pendiente de la curva depende del clima, tipo de suelo y manejo del mismo. Los incrementos en los aportes de C son clave para incrementar los contenidos de COT (Cazorla, 2012). Esta discrepancia entre los resultados actuales y la literatura existente sugiere la complejidad de la dinámica del carbono en el suelo y la necesidad de investigaciones adicionales para seguir evaluando los factores que influyen en la acumulación de carbono orgánico en sistemas con CC.

La mayor inclusión de CC en las rotaciones agrícolas tampoco tuvo efecto significativo ($p < 0,05$) sobre la fracción fina de carbono (C FF) en los primeros 10 cm del suelo (Figura 15B). Este resultado confirma lo marcado por Duval (2014) sobre estos agregados de carbono de partículas muy chicas (microagregados) asociadas a la arcilla, que son muy estables en el tiempo y que tardan mucho tiempo en generarse dentro del ciclo de carbono, por lo tanto,

son poco sensibles al manejo agronómico como lo puede ser la elección del cultivo a introducir en la rotación. (Duval, et al., 2014)

Conclusiones similares se observaron en C FG (Figura 15 C), sin diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos para los primeros 10 cm del suelo. Estos resultados encontrados se contraponen a lo observado por otros autores. Esta fracción particulada más lábil está muy influenciada por el manejo agrícola, donde un punto es la secuencia de cultivos que presentó la rotación agrícola. Presentan un reciclado relativamente rápido, ya que están fácilmente disponible como sustratos para los microorganismos del suelo (Duval, et al., 2015). La mayor influencia del nivel de rotaciones agrícolas sobre esta fracción de C se observa en los primeros 5 cm del perfil (Cazorla, et al., 2017). Por otro lado, Frasier (2012) enfatiza la importancia de evaluar a las raíces como factor determinante en la acumulación del COT, debido a una mayor superficie de contacto con la matriz del suelo rodeada de una rizosfera activa que se desarrolla durante el ciclo del cultivo. En el cultivo de centeno, mayor representante como CC de este estudio, presenta el 90 % de su biomasa radicular en los primeros 6-8 cm en suelos de textura franca, como es el caso del presente estudio (Frasier, et al., 2012)

Por otro lado, la inclusión de CC en la rotación agrícola tuvo un efecto significativo ($p < 0,05$) sobre Prom E. El tratamiento que presentó más cantidad de CC (3) en los últimos 15 años obtuvo un mayor valor que el tratamiento con solo un (1) CC, mientras que no presentó diferencia significativa ($p < 0,05$) entre estos y el tratamiento con 2 CC (Figura 16), presentando valores intermedios a los comparados previamente.



Figuras 16: Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) del suelo según la cantidad de cultivos de cobertura (CC) en un intervalo de 15 campañas agrícolas (1, 2 y 3 cultivos de cobertura). Letras diferentes muestran diferencias significativas entre los tratamientos según Duncan ($p < 0,05$). Las líneas verticales de cada barra representan el desvío estándar de la media.

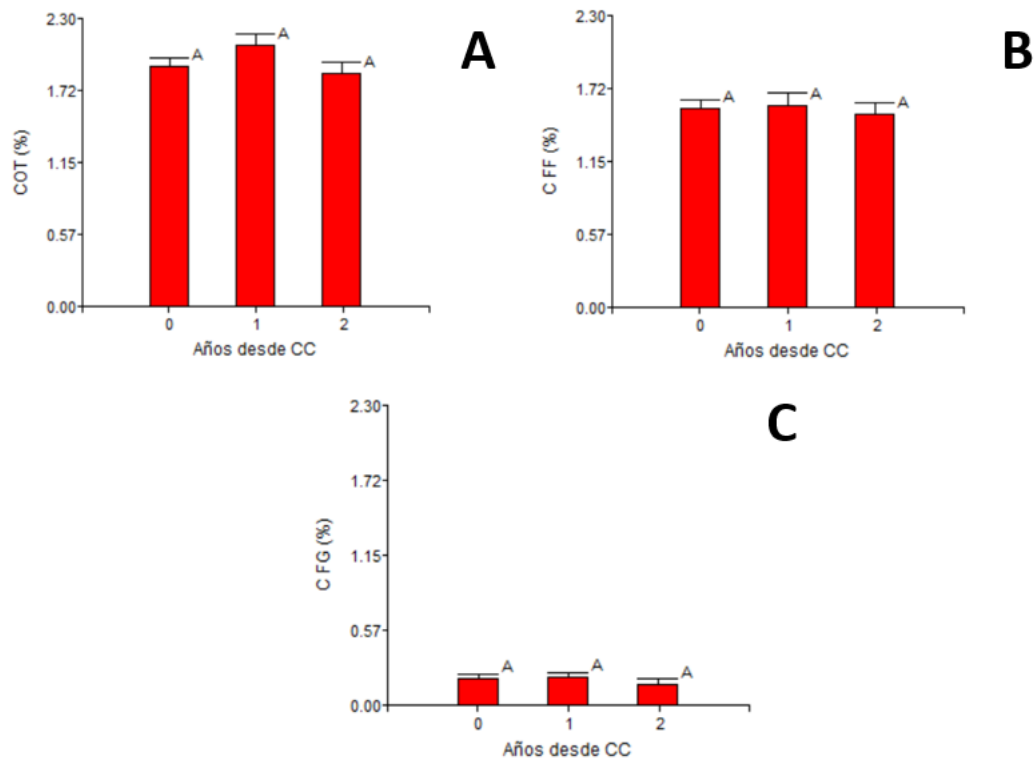
Ante bajas incorporaciones de CC a la rotación, Restovich (2011) al evaluar el efecto de distintos CC luego de un solo año de implantación en suelos franco-arenosos, no encontró diferencias significativas en la EA de los primeros 5-7 cm; solo en algunos casos particulares, para casos contrastantes (avena como CC vs barbecho tradicional), se encontraron diferencias (Restovich, et al., 2011). De este punto, se puede desprender más de un factor que puede condicionar el valor encontrado del indicador, como el momento de muestreo (final de CC o final del cultivo de renta) o a cuanta profundidad del perfil se lo realiza, entre otras. El incremento en la EA en respuesta a la incorporación de los CC sugiere la potencialidad de generar estabilidad en la intensificación agrícola a través de las rotaciones con mayor diversidad, en este tipo de suelos. Este incremento podría relacionarse con la influencia tanto de las raíces como de los residuos de los CC. Debido a los distintos períodos de desarrollo que tuvieron los CC en los diferentes experimentos, se esperarían diferencias en la calidad de los residuos (concentración de lignina, celulosa, relación C/N) aportados al suelo. Estas diferencias de labilidad de los residuos podrían condicionar los efectos sobre la EA. Otros autores reportaron cambios favorables sobre la estabilidad de agregados en el corto plazo

(Varela, et al., 2011). Como es el caso de Behrends Kraemer (2015), quien reportó un aumento en la estabilidad de agregados indicando que es posible que la intensificación de cultivos genere mejores rasgos estructurales (Behrends Kraemer, 2015). Mientras que Calonego, afirma que la estabilidad de un suelo es sensible a las prácticas de manejo y a la actividad biológica (Calonego, et al., 2017).

Esta observación se alinea con los hallazgos de Bonvecchi (2020), quien reportó que la inclusión de cuatro ciclos de gramíneas como CC incrementa significativamente la producción de glomalina, una glicoproteína asociada a la materia orgánica, raíces e hifas de hongos micorrícicos. La glomalina ha demostrado una alta correlación con la EA debido a su función como agente de agregación (Bonvecchi, et al., 2020). Considerando estos resultados, se recomienda realizar estudios adicionales que incluyan un mayor número de ciclos de CC en comparación con el presente trabajo, lo que permitiría obtener determinaciones más precisas sobre la relación entre la cantidad de CC y la EA, proporcionando así una comprensión más robusta de esta interacción.

4.2 Carbono orgánico del suelo y estabilidad de agregados y tiempo transcurrido entre el cultivo de cobertura y el muestreo de suelos

El tiempo que transcurre entre el último cultivo de cobertura y el muestreo del suelo, no tuvo efecto significativo ($p < 0,05$) sobre el COT del suelo (Figura 17 A), ni tampoco se observaron efectos significativos ($p < 0,05$) en sus fracciones (Figura 17 B y C).



Figuras 17: Valores de Carbono Orgánico Total del suelo (COT) y sus fracciones según la cantidad de años que pasaron desde la última presencia de cultivos de cobertura (CC). 17 A (COT), 17 B Fracción Fina (C FF) y 17 C. Fracción Gruesa (C FG). Letras diferentes muestran diferencias significativas entre los tratamientos según Duncan ($p < 0,05$). Las líneas verticales de cada barra representan el desvío estándar de la media.

Dado que el COP forma parte del COT, cambios en uno repercute sobre el otro (Dominguez, et al., 2016). Ambos se determinan por el balance de entradas (cantidad y la calidad de los residuos devueltos al suelo) y salidas. Secuencias de cultivos con mayor aporte de C permiten compensar más fácil y rápidamente las salidas de C, que aquéllas con menor aporte. Por lo tanto, la elección de las especies involucradas en las secuencias de cultivos y su rendimiento influirían sobre la dinámica del COT (Mazzilli, et al., 2014). El seguimiento de la variación del COP puede dar indicios tempranos de los efectos de las prácticas de manejo. No obstante, dado su carácter de fracción altamente dinámica, las características del material vegetal recientemente aportado al suelo pueden provocar cambios de corto plazo en el COP, afectando inevitablemente al COT (Studdert, et al., 2017). El efecto positivo sobre el COT que se puede esperar de un cultivo como el centeno (CC más utilizado para este establecimiento) con una alta producción de materia seca y relación C/N, haciendo que la degradación sea más

lenta (comparado con residuos de baja relación C/N) no se observa ($p < 0,05$) en el presente estudio. Se contrapone a lo marcado por Oderiz (2017) sobre este cultivo, donde resalta un COT significativamente superior, afectando el perfil del suelo debido a la biomasa generada por su abundante sistema radicular y exudados radiculares en descomposición luego de la senescencia del cultivo (Oderiz, et al., 2017).

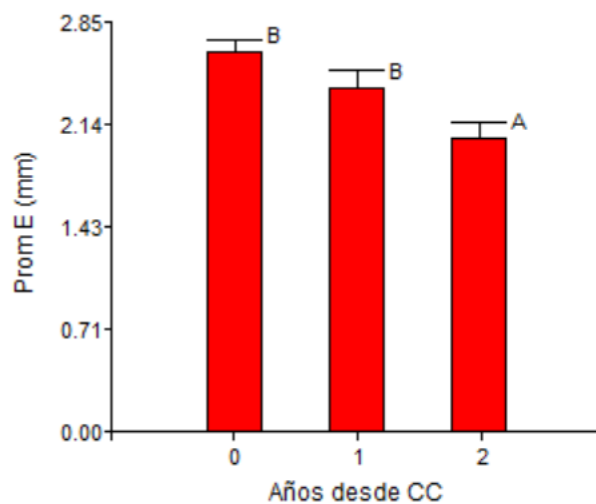
Cabe destacar que, con el tiempo, la presencia de residuos en superficie bajo un sistema de SD conduce a una estratificación del C en el perfil con mayor acumulación cerca de su superficie (Powlson, et al., 2014), pero no necesariamente acumulación de COT por debajo de la capa más superficial. Confirmando este punto, varios autores reportan de manera consistente, mayores contenidos de COT y COP en la capa de 0-5 cm observados bajo SD (Dominguez, et al., 2016). Sobre este punto se puede inferir que el efecto que puede dejar los residuos del CC después de los primeros años sobre el COT, solo afectarían los 5 cm iniciales del perfil. Al analizar los primeros 10 cm en profundidad se diluye los valores de COT y muestra una baja considerable.

Al determinar la fracción C FF, no se observan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en los primeros 10 cm del perfil (Figura 17 B). Esta observación es esperable, ya que son fracciones que sufren variaciones a largo plazo o, dicho de otro modo, presentan alta estabilidad a lo largo de los años.

A la hora de hacer foco en el C FG, no se observan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en los primeros 10 cm del perfil (Figura 17 C), acompañando el comportamiento del COT en relación a los años pasados desde el último CC presente, siendo que esta fracción de C (FG) es de origen reciente y muy sensible a cambios (constituida por restos vegetales en descomposición y por hifas de hongos, esporas, granos de polen y restos de fauna edáfica) (Studdert, et al., 2015), son resultados no esperables. Una razón posible es la estratificación de C que presenta en el perfil del suelo, concentrando el efecto de la entrada del C al suelo en

los primeros 5 cm de suelo (Dominguez, et al., 2016). Este punto ya desarrollado, nos puede marcar que al tomar un rango de 10 cm del perfil para el análisis, pudo haber generado una dilución en cuanto al efecto que puede presentar esta fracción gruesa (que es la fracción más sensible a los cambios) ante el tiempo pasado después de un CC.

Al analizar la EA en relación a los años desde último CC presente (Figura 18), se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) a favor de los tratamientos que hace un año o menos, presentaron un CC comparado a el tratamiento que hace dos campañas no se realizaban CC.



Figuras 18: Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) del suelo según la cantidad de años que pasaron desde la última presencia de cultivos de cobertura (CC). Letras diferentes muestran diferencias significativas entre los tratamientos según Duncan ($p < 0,05$). Las líneas verticales de cada barra representan el desvío estándar de la media.

Este fenómeno fue reportado por Rillo (2013), cuando en situaciones donde el CC se recurría más seguido en la rotación, producía cambios significativos en la EA de suelo a nivel superficial (especialmente en los primeros 5 cm). La mejora se manifestó también en la distribución de los agregados por tamaño, donde en los tratamientos con CC, incrementó la proporción de macroagregados mayores a 2 mm (Rillo, et al., 2013).

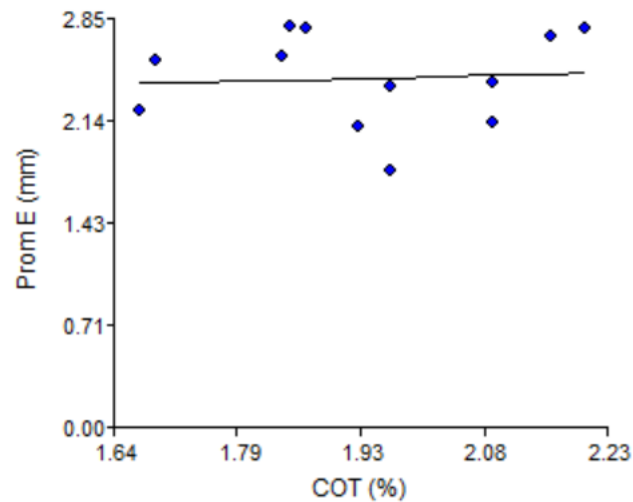
Este comportamiento en la EA posiblemente se deba a un aumento en los agentes cementantes transitorios (polisacáridos) y temporarios (principalmente raíces e hifas de hongos) que pueden generar macroagregados jóvenes a partir de microagregados estables cuando se incorpora materia orgánica lábil con el CC. Dichos agentes aglutinantes pueden acumularse en el suelo en pocas semanas o meses a medida que crece el sistema radicular y de hifas asociadas al cultivo (Rillo, et al., 2013). La macroagregación resulta más dinámica y sensible (respecto de la formación de microagregados) a las prácticas de labranzas, secuencias y rotación de cultivos, aplicación de fertilizantes debido a la naturaleza lábil de los agentes temporarios y transitorios (Godoy, 2019).

Por otro lado, los CC modifican la estructura mediante la actividad de las raíces y generan porosidad debido al decaimiento de las mismas, protegiendo al suelo de los eventos externos como el impacto de las gotas de lluvia y el viento, factores que degradan la estructura del suelo (Blanco-Canqui & Ruis, 2018). La presencia de CC podría permitir revertir procesos de degradación física, debilitando la estructura laminar u otras capas compactadas gracias a la actividad de las raíces y a la capacidad estructurante de la MO que derivara en incorporación de COT y biota asociada (Behrends Kraemer, et al., 2019).

Por lo tanto, el CC tiene un efecto positivo sobre la EA, pero este efecto es de corta duración debido a la alta sensibilidad y labilidad que presentan los agentes cementantes temporarios y transitorios formadores de agregados.

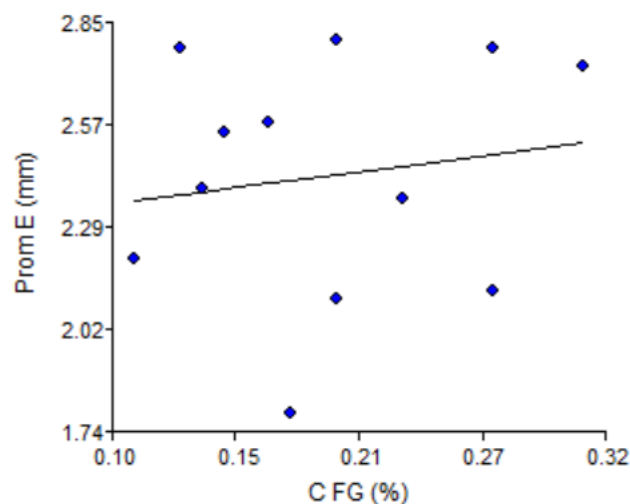
4.3 Relación entre el carbono orgánico del suelo y la estabilidad de agregados

Para estudiar la relación entre el COT y la EA promedio, se utilizó la regresión lineal. Al relacionar la EA con el COT no se encontró relación positiva estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre ambas variables (Figura 19).



Figuras 19: Regresión Lineal relacionando las variables Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) y el nivel de Carbono Orgánico Total del suelo (COT). El valor $p < 0,05$ determina la relación estadística significativa.

Al analizar la relación entre la EA y la fracción gruesa del C, se observó que no existe una regresión lineal estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre las variables (Figura 20).



Figuras 20: Regresión Lineal relacionando las variables Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) y la Fracción Gruesa del carbono orgánico (C FG). El valor $p < 0,05$ determina la relación estadística significativa.

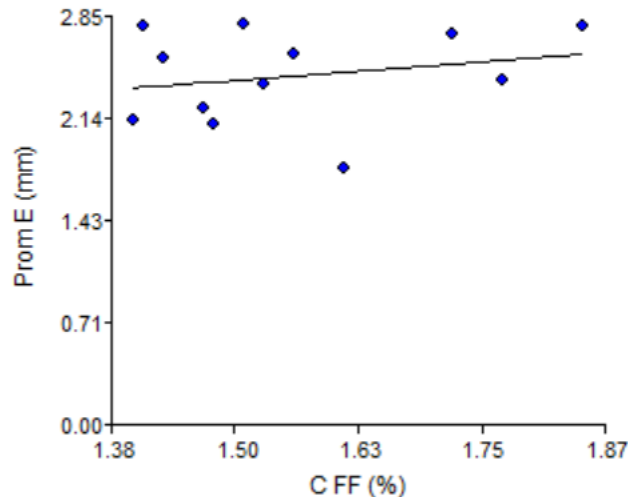
Previamente, se propuso que el aumento observado en la EA podría atribuirse a la influencia de las raíces y los residuos de los CC. Sin embargo, la regresión actual presenta una elevada dispersión de datos, lo que parece contradecir esta hipótesis inicial. Considerando la extensa literatura que respalda una relación positiva entre los CC y la EA, se recomienda profundizar este análisis en dos direcciones: primero, mediante la incorporación de un mayor número de CC en las rotaciones para ampliar el rango de observaciones; y segundo, estratificando la respuesta de este indicador según las distintas clases texturales de suelo representativas de

la región pampeana. Este enfoque más detallado podría proporcionar una comprensión más precisa de la interacción entre los CC y la EA en diferentes condiciones edáficas.

Lo observado en estas dos últimas regresiones no condice con lo expresado por Agostini (2012) quien concluye que la EA de los agregados en la capa superficial del suelo está relacionada con el contenido de C FG (medida a través de la fracción particulada COP) y con el de COT, siendo altamente significativa (nivel de error más restrictivo, $p < 0,01$), y con un mayor coeficiente de determinación para el C FG (Agostini, et al., 2012).

Esta situación fue reportada en agroecosistemas con bajo disturbio y ausencia de monocultivo, similar a este estudio, con siembra directa y presencia de rotaciones.

Por otro lado, se observó que no hay una regresión lineal estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre la EA y la fracción fina del C (Figura 21).



Figuras 21: Regresión Lineal relacionando las variables Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) y la Fracción Fina del carbono orgánico (C FF). El valor $p < 0,05$ determina la relación estadística significativa.

No es esperable ver estos resultados ya que muchos autores (Cambardella, Six, Gallali, entre otros) sugieren que la EA (microagregados y macroagregados) se debe a un incremento en la concentración de C dentro de los mismos. A su vez, se ha observado una mayor proporción de C FF retenida en los microagregados (el conjunto de estos forman los macroagregados) en

sistemas de siembra directa, por lo que concluyen que promover la formación de macroagregados (a través de transformaciones de los residuos vegetales en el sistema del suelo, entre otras cosas) conduce a la captura de C, principalmente como C FF a largo plazo, lo que lleva a presentar mayor EA (Roldan, 2012).

A la luz de las relaciones estudiadas y resultados obtenidos, se pueden plantear líneas de investigación para ampliar y profundizar los conocimientos en relación a esta práctica de manejo y los cambios que produce sobre distintos indicadores del suelo.

El clima y el tipo de suelo, según Cazorla (2012), influyen en la capacidad de almacenar COT debido a las interacciones de precipitaciones y temperatura en la productividad de las plantas y la capacidad de los componentes minerales del suelo de retener los compuestos orgánicos. El COT está positivamente correlacionado con la relación precipitación/temperatura, aumentando los contenidos de COT con altas precipitaciones y porcentaje de fracciones finas minerales (arcillas y limos), mientras que disminuye con altas temperaturas (Cazorla, 2012).

De esta manera, sería recomendable evaluar el efecto de los CC en otras texturas y/o condiciones climáticas, además de aplicar por más tiempo los CC en las rotaciones (mayor N° de CC) y también ampliar el tiempo transcurrido en un lote desde último CC, con la intención de generar conclusiones más consistentes.

5 CONCLUSIONES

Se acepta la hipótesis general propuesta. La inclusión de cultivos de cobertura en la rotación agrícola planificada, mejora la calidad del suelo destinado a la producción agrícola extensiva.

Se acepta parcialmente la primera hipótesis específica “La cantidad de cultivos de cobertura incluidos dentro de las rotaciones intensificadas incrementa el carbono orgánico total del suelo a través del aumento de la fracción particulada lábil (fracción gruesa) del carbono orgánico, además de la estabilidad de agregados en los primeros 10 cm de un suelo de Pampa Arenosa”, pero su efecto depende de la variable estudiada. Intensificar las rotaciones agrícolas a través del aumento de la cantidad de cultivos de cobertura (centeno y avena) en la rotación agrícola, no afecta el carbono orgánico total del suelo pero si incrementa la estabilidad de agregados promedio. No se ve afectada la fracción gruesa del carbono orgánico ante esta intensificación agrícola. Es de vital importancia considerar esta intensificación a través de la implementación de cultivos de cobertura en las estrategias de manejo para optimizar el aumento en la estabilidad de los agregados del suelo en los sistemas productivos agrícolas.

Por otro lado, se acepta parcialmente la segunda hipótesis específica “El tiempo transcurrido entre la inclusión de los cultivos de cobertura y el muestro del suelo afecta el carbono orgánico total del suelo a través del aumento de la fracción particulada lábil (fracción gruesa) del carbono orgánico, además de la estabilidad de agregados del suelo en los primeros 10 cm de un suelo de Pampa Arenosa”. La estabilidad de agregados mejora con la mayor periodicidad de cultivo de cobertura en la rotación agrícola (menor tiempo transcurrido desde el último CC). A su vez, este efecto es de corta duración debido a la alta sensibilidad y labilidad que presentan los agentes cementantes temporarios y transitorios formadores de agregados. En cuanto al carbono orgánico total y su fracción gruesa, no se ve afectada ante esta mayor periodicidad.

Se rechaza la tercera hipótesis específica. No se observa una regresión lineal entre el carbono orgánico total del suelo y sus fracciones con la estabilidad de agregados.

La inclusión de cultivos de cobertura en la intensificación agrícola (mayor número y mayor frecuencia) afecta aumentando en el corto plazo al promedio de la estabilidad de los agregados, para este tipo de suelo y sistema agrícola específico. No se determina la misma relación positiva en cuanto al carbono orgánico total y sus fracciones respecto al agregado de estos cultivos.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Agostini, M., Studdert, G. & Dominguez, G., 2012. *Relación entre el cambio en el diámetro medio de agregados y el Carbono Orgánico y sus fracciones*. Mar del Plata, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.
- Alvarez, R. & Steinbach, H., 2006. Factores climáticos y edáficos reguladores del nivel de materia orgánica. En: R. Alvarez, ed. *Materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. Buenos Aires: Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, pp. 41-53.
- Behrends Kraemer, F., 2015. *Influencia de la granulometría y la mineralogía en el comportamiento hidro-físico y estructural en suelos con distinta intensidad y secuencia de cultivos bajo siembra directa*. Buenos Aires(Buenos Aires): FAUBA.
- Behrends Kraemer, F., Hallett, P., Morrás, H. & Garibaldi, L., 2019. Soil stabilization by water repellency under no-till management for soils with contrasting mineralogy and carbon quality. *Geoderma*, Volumen 355.
- Blanco-Canqui, H. & Ruis, S., 2018. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, Volumen 326, pp. 164-200.
- Bono, A., Alvarez, R. & Buschiazzo, D., 2004. *Dinámica del carbono del suelo bajo dos sistemas de labranza en la Región Semiárida Pampeana Central Argentina*. Paraná, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.
- Bonvecchi, V., Petrasek, M., Irigoien, J. & Bulos, L., 2020. *¿Es posible mejorar la agregación del Suelo con Cultivos de Cobertura en el mediano plazo?*. Corrientes, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, pp. 1319-1324.
- Calonego, J., Raphael, J., Oliveira, L. & Rosolem, C., 2017. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *European Journal of Agronomy*, Volumen 85, pp. 31-37.
- Cambardella, C. & Elliott, E., 1992. Particulate soil organic matter. Changes across a grassland cultivation sequence.. *Soil Sci. Soc. Am.*, Volumen 56, pp. 777-783.
- Caviglia, O. & Novelli, L., 2011. *Intensificación agrícola: un enfoque a nivel de sistema para mejorar la eficiencia en el uso de recursos y nutrientes, y la sustentabilidad ambiental*. Rosario, Simposio Fertilidad.
- Cazorla, C., 2012. *Influencia de la fertilización y de los cultivos de cobertura en los contenidos de Carbono Orgánico, Estabilidad de agregados y densidad aparente del Suelo*. Rio Cuarto(Cordoba): Universidad Nacional de Rio Cuarto.
- Cazorla, C., Cisneros, J., Moreno, I. & Galarza, C., 2017. Mejora en el carbono del suelo y estabilidad de agregados por fertilización y cultivos de cobertura. *Ciencia del Suelo*, 35(2), pp. 301-313.
- Cazorla, C., Cisneros, J., Moreno, I. & Galarza, C., 2017. Mejora en el Carbono del Suelo y Estabilidad de Agregados por Fertilización y Cultivos de Cobertura. *Ciencia del Suelo (Argentina)*, 35(2), pp. 301-313.
- DAT-CREA, 2020. *crea.org*. [En línea]
Available at: <https://www.crea.org.ar/litoral-sur-lidera-el-ranking-de-siembra-de-cultivos-de-servicio/>

Di Rienzo, A., 2020. *Infostat Software Estadístico. Grupo Infostat, FCA, UNC, Argentina.* [En línea]
Available at: <http://www.infostat.com.ar>

Dominguez, G., Garcia, G., Studdert, G. & Agostini, M., 2016. ¿Is anaerobic mineralizable nitrogen suitable as a soil quality/health indicator?. *Spanish Journal of Soil Science*, 6(2), pp. 82-97.

Dominguez, G. & Studdert, G., 2015. Balance de Carbono en el SE Bonaerense: El rol de los Sistemas de Cultivo. En: E. Sá Pereira, G. Minoldo & J. Galantini, edits. *El Impacto de los Sistemas actuales de cultivo sobre las propiedades Químicas del Suelo y sus efectos sobre los Balances de Carbono*. Coronel Suarez: INTA Editoriales, pp. 45-50.

Duval, M., Capurro, J., Galantini, J. & Andriani, J., 2015. Utilización de cultivos de cobertura en monocultivo de soja: efecto sobre el balance del carbono. *Ciencia del Suelo*, pp. 247-261.

Duval, M., Martinez, J., Iglesias, J. & Galantini, J., 2015. Secuencia de Cultivos y su efecto sobre las Fracciones Orgánicas del Suelo. En: E. Sa Pereira, G. Minoldo & J. Galantini, edits. *El Impacto de los Sistemas actuales de Cultivo sobre las Propiedades Químicas del Suelo y sus efectos sobre los Balances de Carbono*. Coronel Suarez: INTA Editoriales, pp. 51-55.

Duval, M., Sa Pereira, E., Iglesias, J. & Galantini, J., 2014. Efecto de Uso y Manejo del Suelo sobre las Fracciones de Carbono Orgánico en un Argiudol. *Ciencia del Suelo (Argentina)*, 32(1), pp. 105-115.

Echeverria, H., Angelini, H. & Sainz, H., 2010. Niveles de Materia Orgánica y pH en suelos agrícolas de la Región Pampeana y extrapampeana Argentina. *Informaciones Agronómicas - No. 2. IPNI*, pp. 6-12.

Echeverria, N., Silvia, Q., De Lucia, M. & Silenzi, J., 2015. Estabilidad y Carbono Orgánico de agregados bajo rotaciones en Siembra Directa. En: E. Sá Pereira, G. Minoldo & J. Galantini, edits. *El Impacto de los sistemas actuales de cultivo sobre las Propiedades Químicas del Suelo y sus efectos sobre los Balances de Carbono*. Coronel Suarez: INTA Editoriales, pp. 56-61.

FAO, 2015. *fao.org*. [En línea]

Available at: <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/277721>

Frasier, I., Noellemeyer, E., Figuerola, E. & Erijman, L., 2016. High quality residues from cover crops favor changes in microbial community and enhance C and N sequestration. *Global Ecology and Conservation*, Volumen 6, pp. 242-256.

Frasier, I., Riestra, D., Noellemeyer, E. & Quiroga, A., 2012. Aporte de C y N de raíces de Cultivos de Cobertura. En: E. Sá Pereira, G. Minoldo & J. Galantini, edits. *El Impacto de los Sistemas actuales de cultivo sobre las Propiedades Químicas del Suelo y sus efectos sobre los Balances de Carbono*. Coronel Suarez: INTA Editoriales, pp. 83-87.

Galantini, J., Landriscini, M. & Hevia, C., 2007. Contenido y calidad de la Materia Orgánica particulada del suelo. *Apressid - Revista Técnica Especial en Siembra Directa*, pp. 36-40.

Galantini, J., Rosell, R. & Iglesias, J., 1994. Determinación de Materia Orgánica empleando el Método de Walkley y Black en fracciones granulométricas del suelo. *Ciencia del Suelo*, Volumen 12, pp. 81-83.

Godoy, J., 2019. *Efecto en el corto plazo de los cultivos de cobertura sobre las fracciones orgánicas lábiles del Suelo y la Estabilidad Estructural*. Lujan(Buenos Aires): Universidad Nacional de Lujan.

Gonzalez, H., Restovich, S. & Portela, S., 2017. *Efecto de los Cultivos de Cobertura sobre la Estabilidad Estructural del Suelo: Método de Le Bissonais*. Pergamino, INTA Editoriales.

Google Earth Pro, I., 2020. *Software Google Earth Pro. Versión 7.3.* [En línea].

Instituto de Suelos, 2006. *Serie de Suelos de la provincia de Buenos Aires - Saforcada (Sf)*, Buenos Aires: INTA.

Instituto de Suelos, 2006. *Serie de Suelos de la provincia de Buenos Aires - Santa Isabel (SI)*, Buenos Aires: INTA.

INTA, 1989. Degradación de Suelos en el Norte de la Región Pampeana. *Publicación técnica N° 6*, p. 66.

INTA, 2002. *Carta de suelos de la Republica Argentina, Provincia de Buenos Aires*. [En línea]
Available at: <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/>

Kane, D., 2015. *Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices*, s.l.: National Sustainable Agriculture Coalition Breakthrough Strategies and Solutions, LLC.

Laboratorio Suelos UNLZ, F., 2023. *Laboratorio Catedra Suelos de la Facultad Ciencias Agrarias, UNLZ, Argentina*. Lomas de Zamora(Buenos Aires): s.n.

Lavado, R. & Chezzo, R., 2005. *A different history: phosphate runoff from an Argentinean Typic Argiudoll*. Rochester, NY, Soil and Water Conservation Society.

Le Bissonnais, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, pp. 425-437.

Martinez, J., 2017. *Suelos.org.ar*. [En línea]
Available at: <https://www.suelos.org.ar/publicaciones/v35n1-html/vol35-n1-html/v35n1a16.htm>

Mazzilli, S., Kemanian, A., Ernst, O. & Jackson, R., 2014. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. *Soil Biology and Biochemistry*, Volumen 75, pp. 273-281.

Micucci, F. & Taboada, M., 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, pp. 152-162.

Ministerio de Economía Argentina, 2018. *INDEC*. [En línea]
Available at: https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/economia/cna2018_resultados_definitivos.pdf

Novelli, L., Caviglia, O., Wilson, M. & Sasal, C., 2010. *Impacto de la frecuencia de soja sobre la agregación y el almacenaje de C en Molisoles y Vertisoles de Entre Rios*. Rosario, AACs.

Oderiz, J., Uhaldegaray, M., Frasier, I. & Quiroga, A., 2017. Raíces de Cultivos de Cobertura. Cantidad, Distribución e influencia sobre el N mineral. *Ciencia Suelo (Argentina)*, 35(2), pp. 249-258.

Oesterheld, M., Semmartin, M. & Hall, A., 2002. Análisis bibliográfico de la investigación agronómica en la Argentina. *Ciencia hoy*, pp. 52-62.

Powlson, D., Stirling, C., Gerard, B. & Palm, C., 2014. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change*, Volumen 4, pp. 678-683.

Pugni, R., 2017. Vicia: Estratégica en las rotaciones agrícolas. *Aapresid*.

Restovich, S. & Andriulo, A., 2013. Cultivos de cobertura en la rotación soja-maíz: Biomasa aérea, captura de nitrógeno, consumo de agua y efecto sobre el rendimiento en grano. En: C. Alvarez, A. Quiroga, D. Santos & M. Bodrero, edits. *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción*. Anguil: Ediciones INTA, pp. 29-35.

- Restovich, S., Andriulo, A. & Améndola, C., 2011. Introducción de Cultivos de Cobertura en la Rotación Soja-Maiz: Efecto sobre algunas propiedades del Suelo. *Ci. Suelo (Argentina)*, 29(1), pp. 61-73.
- Restovich, S., Andriulo, A. & Améndola, C., 2011. Introducción de los Cultivos de Cobertura en la rotación soja-maiz: Efecto sobre algunas propiedades del Suelo. *Ciencia del Suelo*, 29(1), pp. 61-73.
- Rillo, S., Alvarez, C., Bagnato, R. & Noellemeyer, E., 2013. Cultivos de Cobertura: gramíneas y leguminosas en el Centro Oeste de la provincia de Buenos Aires. En: C. Alvarez, A. Quiroga, D. Santos & M. Bodrero, eds. *Contribuciones de los Cultivos de Coberturas a la sostenibilidad de los sistemas de producción*. Anguil: INTA Editoriales, pp. 58-68.
- Rillo, S., Alvarez, C., Quiroga, A. & Diaz, M., 2018. *Cambios en los Contenidos de Carbono e Infiltración por la inclusión de Cultivos de Cobertura*. Tucuman, INTA Editoriales, pp. 1303-1307.
- Roldan, M., 2012. *Distribución del Carbono Orgánico Particulado por tamaño de agregados bajo distintos sistemas de labranza*. Balcarce(Buenos Aires): Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Sainz, H., Eyherabide, M., Larrea, G. & Martinez, N., 2019. *Relevamiento y Determinación de Propiedades Químicas en Suelos de aptitud agrícola de la Región Pampeana*. Rosario, Fertilizar, pp. 141-158.
- Sanchez, J., Harwood, R., Willson, T. & Kizilkaya, K., 2004. Managing soil carbon and nitrogen for productivity and environmental quality. *Agronomy Journal*, pp. 769-775.
- SIGA, 2022. *Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica*. [En línea]
Available at: <http://siga.inta.gob.ar/#/data>
- Studdert, G., Domingo, M., Garcia, G. & Dominguez, G., 2017. Carbono Orgánico del Suelo bajo sistemas de cultivo contrastantes y su relación con la capacidad de proveer Nitrógeno. *Ciencia Suelo (Argentina)*, 35(2), pp. 285-299.
- Studdert, G., Dominguez, G., Zagame, M. & Carabaca, J., 2015. Variación Estacional de Carbono Orgánico Particulado y Nitrógeno Anaeróbico. *Ciencia del Suelo (Argentina)*, 33(1), pp. 65-77.
- Taboada, M., 2008. Influencia de la textura y la estructura de los suelos sobre la fertilidad física. En: M. Taboada & C. Alvarez, eds. *Fertilidad Física de los suelos*. Buenos Aires: Facultad de Agronomía, p. 15.
- Teasdale, J., 2004. Principios y practicas para el uso de cultivos de cobertura en el manejo de sistemas de malezas. En: *Manejo de malezas para paises en desarrollo Addendum I*. Roma: Estudio FAO Producción y Protección Vegetal.
- Varela, M., Fernandez, P., Rubio, G. & Taboada, M., 2011. Cover crops: effects on soil macroporosity and soil structural stability in a silt loam soil. *Ciencia del suelo*, 29(1), pp. 99-106.

7 ANEXO

Tabla V. de datos analíticos del perfil de serie "Santa Isabel".

Horizonte	Profundidad (cm)	Arc <2 $\mu\%$	Li 2-50 $\mu\%$	Ar >50 $\mu\%$	pH H ₂ O 1:2,5	M.O (%)	N (%)	Na (% de T)	Ca meq/100 gr	CIC meq/100 gr
Ap	0-20	16	43	41	6,6	2,20	0,102	2,0	9,1	15,0
AB	20-36	24	39	37	6,9	1,56	0,062	4,7	10,7	18,8
B _w	36-67	22	40	39	7,0	1,01	0,071	2,4	9,7	16,5
BC	67-98	17	43	40	7,6	6,36	0,035	2,4	8,7	16,1
C	98-145	16	42	42	8,0	0,20	NA	3,5	7,0	13,9

Fuente: (INTA, 2002).

Tabla VI. Datos analíticos del perfil de serie "Saforcada".

Horizonte	Profundidad (cm)	Arc <2 $\mu\%$	Li 2-50 $\mu\%$	Ar >50 $\mu\%$	pH H ₂ O 1:2,5	M.O (%)	N (%)	Na (% de T)	Ca meq/100 gr	CIC meq/100 gr
Ap	0-16	9	9	82	6,1	1,44	0,082	1,5	8,4	12,9
A	16-38	10	10	81	6,7	1,19	0,064	1,5	6,4	13,1
AC	38-73	9	8	83	6,7	0,36	0,034	2,7	6,4	11,0
C	73-140	8	6	85	7,5	0,15	ND	3,8	5,3	10,5

Fuente: (INTA, 2002).

Tabla VII. Análisis de varianza del carbono orgánico total del suelo (COT) y sus fracciones en función del número de cultivo de cobertura (CC) en un intervalo de 15 campañas agrícolas (1, 2 y 3 cultivos de cobertura). A. (COT); B. Fracción Fina (C FF). C. Fracción Gruesa (C FG).

A

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
COT (%)	12	0.04	0.00	9.54

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.01	2	0.01	0.17	0.8489
N° de CC	0.01	2	0.01	0.17	0.8489
Error	0.31	9	0.03		
Total	0.32	11			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0344 gl: 9

N° de CC Medias n E.E.

2	1.90	3	0.11	A
3	1.94	3	0.11	A
1	1.97	6	0.08	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

B

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
C FF (%)	12	1.5E-03	0.00	10.43

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3.7E-04	2	1.8E-04	0.01	0.9931
N° de CC	3.7E-04	2	1.8E-04	0.01	0.9931
Error	0.24	9	0.03		
Total	0.24	11			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0265 gl: 9

N° de CC Medias n E.E.

1	1.56	6	0.07	A
3	1.56	3	0.09	A
2	1.57	3	0.09	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

C

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
C FG (%)	12	0.03	0.00	34.65

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1.3E-03	2	6.3E-04	0.14	0.8743
Nº de CC	1.3E-03	2	6.3E-04	0.14	0.8743
Error	0.04	9	4.6E-03		
Total	0.04	11			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0046 gl: 9

Nº de CC Medias n E.E.

1	0.19	6	0.03	A
3	0.20	3	0.04	A
2	0.21	3	0.04	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Tabla VIII. Análisis de varianza del Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) del suelo según la cantidad de cultivos de cobertura (CC) en un intervalo de 15 campañas agrícolas (1, 2 y 3 cultivos de cobertura).

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Prom E (mm)	12	0.50	0.38	10.31

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.55	2	0.28	4.42	0.0461
Nº de CC	0.55	2	0.28	4.42	0.0461
Error	0.56	9	0.06		
Total	1.12	11			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0626 gl: 9

Nº de CC Medias n E.E.

1	2.21	6	0.10	A
2	2.62	3	0.14	A B
3	2.66	3	0.14	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Tabla IX. Análisis de varianza para los valores de Carbono Orgánico Total del suelo (COT) y sus fracciones según la cantidad de años que pasaron desde la última presencia de cultivos de cobertura (CC). A. (COT); B. Fracción Fina (C FF) y C. Fracción Gruesa (C FG).

A

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
COT (%)	12	0.28	0.11	8.27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.09	2	0.04	1.71	0.2347
Años desde CC	0.09	2	0.04	1.71	0.2347
Error	0.23	9	0.03		
Total	0.32	11			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0259 gl: 9

Años desde CC Medias n E.E.

2	1.86	3	0.09	A
0	1.92	6	0.07	A
1	2.09	3	0.09	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

B

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
C FF (%)	12	0.03	0.00	10.25

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.01	2	4.2E-03	0.16	0.8519
Años desde CC	0.01	2	4.2E-03	0.16	0.8519
Error	0.23	9	0.03		
Total	0.24	11			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0256 gl: 9

Años desde CC Medias n E.E.

2	1.52	3	0.09	A
0	1.57	6	0.07	A
1	1.59	3	0.09	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

C

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
C FG (%)	12	0.10	0.00	33.30

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4.5E-03	2	2.2E-03	0.52	0.6110
Años desde CC	4.5E-03	2	2.2E-03	0.52	0.6110
Error	0.04	9	4.3E-03		
Total	0.04	11			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0043 gl: 9

Años desde CC Medias n E.E.

2	0.16	3	0.04	A
0	0.21	6	0.03	A
1	0.21	3	0.04	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Tabla X. Análisis de varianza para el Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) del suelo según la cantidad de años que pasaron desde la última presencia de cultivos de cobertura (CC)

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Prom E (mm)	12	0.66	0.59	8.41

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.74	2	0.37	8.90	0.0074
Años desde CC	0.74	2	0.37	8.90	0.0074
Error	0.37	9	0.04		
Total	1.12	11			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0417 gl: 9

Años desde CC Medias n E.E.

2	2.03	3	0.12	A
1	2.39	3	0.12	B
0	2.64	6	0.08	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Tabla XI. Análisis de Regresión Lineal relacionando las variables Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) y el nivel de Carbono Orgánico Total del suelo (COT).

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Prom E (mm)	12	0.01	0.00	0.16	12.12	13.57

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	2.16	1.18	-0.46	4.79	1.84	0.0960		
COT (%)	0.14	0.60	-1.21	1.48	0.23	0.8223	0.05	1.00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.01	1	0.01	0.05	0.8223
COT (%)	0.01	1	0.01	0.05	0.8223
Error	1.17	10	0.12		
Total	1.18	11			

Tabla XII. Análisis de Regresión Lineal relacionando las variables Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) y la Fracción Gruesa del carbono orgánico (C FG).

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Prom E (mm)	12	0.02	0.00	0.16	11.91	13.37

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	2.28	0.34	1.53	3.03	6.79	<0.0001		
C FG (%)	0.78	1.63	-2.86	4.42	0.48	0.6436	0.23	1.00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.03	1	0.03	0.23	0.6436
C FG (%)	0.03	1	0.03	0.23	0.6436
Error	1.15	10	0.11		
Total	1.18	11			

Tabla XIII. Análisis de Regresión Lineal relacionando las variables Promedio de Estabilidad de los agregados (mm) y la Fracción Fina del carbono orgánico (C FF).

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Prom E (mm)	12	0.05	0.00	0.15	11.53	12.98

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	1.64	1.07	-0.75	4.02	1.53	0.1571		
C FF (%)	0.51	0.68	-1.01	2.03	0.75	0.4716	0.56	1.00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.06	1	0.06	0.56	0.4716
C FF (%)	0.06	1	0.06	0.56	0.4716
Error	1.11	10	0.11		
Total	1.18	11			