

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**EVALUACIÓN DEL USO DE PERMANGANATO DE POTASIO COMO MÉTODO
PARA ESTIMAR CARBONO BIOLÓGICAMENTE ACTIVO EN SUELOS
AGRÍCOLAS DE LA ZONA CENTRO- SUR DE CHILE**

POR

CARLOS DANIEL LOBOS BASSANO

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN – CHILE
2025**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EVALUACIÓN DEL USO DE PERMANGANATO DE POTASIO COMO MÉTODO
PARA ESTIMAR CARBONO BIOLÓGICAMENTE ACTIVO EN SUELOS
AGRÍCOLAS DE LA ZONA CENTRO- SUR DE CHILE**

POR

CARLOS DANIEL LOBOS BASSANO

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN – CHILE
2025**

Aprobada por:

Profesor Titular. Erick Zagal V.
Ing. Agrónomo, M.Sc, Ph.D.

Guía

Profesora Asociada. Cristina Muñoz V.
Ing. Agrónomo, Dr. Cs.

Asesor

Profesor Asociado. Leandro Paulino.
Ing. Forestal, M.Sc., Dr.

Asesor

María de los Ángeles Sepúlveda P.
Bioquímica, M.Sc.

Asesor

Profesor. Guillermo Wells Moncada
Ing. Agrónomo, M.Sc.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen	1
Summary.....	1
Introducción	2
Materiales y Métodos	3
Resultados y Discusión	7
Conclusiones	18
Referencias	18

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		Página
Figura 1	Precisión analítica mediante CV por método y sitio de muestreo en un diagrama de burbujas.....	10
Figura 2	Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables: POX-C (mg kg^{-1}) y COT (%)......	11
Figura 3	Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables: POX-C (mg kg^{-1}) y β -glucosidasa ($\mu\text{moles de p- nitrofenol gss}^{-1} \text{ h}^{-1}$), considerando los sitios con rotaciones de cultivos.....	11
Figura 4	Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables: POX-C (mg kg^{-1}) y β -glucosidasa ($\mu\text{moles de p- nitrofenol gss}^{-1} \text{ h}^{-1}$) considerando los sitios manejados con especies de manera permanente.....	12
Figura 5	Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables: POX-C (mg kg^{-1}) y SPR ($\mu\text{g C- CO}_2 \text{ gss}^{-1} \text{ COS h}^{-1}$)......	13
Figura 6	Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables: COT_0-20 (kg m^{-2}) y SPR ($\mu\text{g C- CO}_2 \text{ gss}^{-1} \text{ COS h}^{-1}$)......	14
Figura 7	Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables: POX-C (mg kg^{-1}) y MAOM (% C)......	15
Figura 8	Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables: POX-C (mg kg^{-1}) y POM (% C)......	16
Figura 9	Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables POX-C (mg kg^{-1}) y carbono orgánico total en la profundidad de 0 a 20 cm COT_0-20 (kg m^{-2})......	16
Figura 10	Análisis de correlación (r) entre (POX_C), propiedades del suelo, atributos y funciones microbianas.....	17

Tabla 1	Identificación, coordenadas geográficas, cultivo y clasificación taxonómica de los sitios muestreados.....	4
Tabla 2	Propiedades físicas de los suelos.....	7
Tabla 3	Propiedades químicas de los suelos.....	8
Tabla 4	Promedios, desviación estándar y medidas de tendencia central de los análisis de propiedades biológicas, fracciones de C y almacenamiento de C.....	9

EVALUACIÓN DEL USO DE PERMANGANATO DE POTASIO COMO MÉTODO PARA ESTIMAR CARBONO BIOLÓGICAMENTE ACTIVO EN SUELOS AGRÍCOLAS DE LA ZONA CENTRO- SUR DE CHILE

EVALUATION OF POTASSIUM PERMANGANATE USE AS A METHOD TO ESTIMATE BIOLOGICALLY ACTIVE CARBON IN AGRICULTURAL SOILS FROM CENTRAL-SOUTHERN CHILE

Palabras índice adicionales: carbono, lábil, suelos, indicadores, calidad, microorganismos.

RESUMEN

Evaluar la calidad del suelo es clave para entender su capacidad de sostener biodiversidad, producción agrícola y retención de nutrientes, agua y carbono. El carbono (C) lábil, fracción fácilmente disponible de la materia orgánica, es fuente de energía para los microorganismos. Se requiere un método sencillo y efectivo para estimar estas fracciones y su relación con la actividad biológica del suelo. Este estudio evaluó el método de carbono oxidable con permanganato de potasio (POX-C) en suelos con distintos manejos agrícolas. Se comparó con indicadores como carbono orgánico total (COT), respiración acumulada (RFA), respiración potencial específica (SPR), actividad microbiana (FDA), actividad enzimática de β -glucosidasa, materia orgánica particulada (POM) y materia orgánica asociada a minerales (MAOM). POX-C mostró correlaciones positivas con el carbono orgánico total y la materia orgánica particulada, pero no con la respiración acumulada ni la actividad microbiana, lo que indica que refleja el reservorio de carbono lábil más que la actividad biológica directa. Así, POX-C se presenta como un indicador confiable de calidad del suelo en agroecosistemas diversos.

SUMMARY

Assessing soil quality is essential to understand its capacity to support biodiversity, agricultural production, and the retention of nutrients, water, and carbon. Labile carbon (C), the readily available fraction of soil organic matter, serves as an energy source for microorganisms. A simple and effective method is needed to estimate these fractions and their relationship with soil biological activity. This study evaluated the potassium permanganate oxidizable carbon method (POX-C) in soils under

different agricultural management practices. It was compared with indicators such as total organic carbon (TOC), cumulative respiration (RFA), specific potential respiration (SPR), microbial activity (FDA), β -glucosidase enzymatic activity, particulate organic matter (POM), and mineral-associated organic matter (MAOM). POX-C showed positive correlations with total organic carbon and particulate organic matter, but not with cumulative respiration or microbial activity, suggesting it reflects the labile carbon reservoir rather than direct biological activity. Thus, POX-C emerges as a reliable indicator of soil quality in diverse agroecosystems.

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica del suelo (MOS) es clave en agroecosistemas, representando en promedio un 4 % del contenido de suelos cultivados. Entre un 55–60 % corresponde a carbono orgánico del suelo (COS), presente en distintos grados de descomposición (FAO, 2017; Ondrasek *et al.*, 2019).

El COS participa activamente en procesos biogeoquímicos, influenciado por el manejo del suelo (Lal *et al.*, 2015). Además, define patrones que inciden en una serie de funciones del suelo (Lal, 2016) que favorecen la generación de servicios ecosistémicos (SE), los cuales pueden clasificarse como provisionales, de regulación o de apoyo, e incluyen la provisión de hábitats para la biodiversidad, la producción de biomasa agrícola y forestal, el almacenamiento de nutrientes y agua, y la filtración de residuos y contaminantes (Adhikari *et al.*, 2016; Wachira *et al.*, 2014). El almacenamiento de carbono (C) contribuye a mejorar la estructura del suelo, reducir la erosión y atenuar su degradación (De Nijs y Cammeraat, 2020), lo cual resulta especialmente relevante considerando que cerca del 33 % de los suelos a nivel global presenta algún grado de degradación, afectando negativamente su capacidad productiva (Kopittke *et al.*, 2024). La textura y propiedades del suelo condicionan el secuestro de C: los francos favorecen la retención de agua, los arcillosos aumentan la adsorción de C, y los arenosos requieren manejo específico (Rodrigues *et al.*, 2023).

En Chile, métodos como Walkley-Black y combustión seca se utilizan para medir el COS, aunque presentan limitaciones (Arévalo *et al.*, 2022; Eyherabide *et al.*, 2014). Técnicas como MidIR (espectroscopía de infrarrojo medio) son efectivas pero

costosas (Ramírez *et al.*, 2020).

La fracción lábil del COS es esencial para la actividad microbiana y la salud del suelo, definida como su capacidad para sostener vida y funciones ecológicas (USDA; Hughes *et al.*, 2023).

El COS se divide en materia orgánica particulada (POM) de rápidamente disponibilidad y materia orgánica asociada a minerales (MAOM) protegido y estable. Estas fracciones difieren en su origen, relación carbono: nitrógeno (C/N) y tiempo de permanencia en el suelo (Lavalley *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2022). Sin embargo, un alto contenido de C estable no implica mayor fertilidad, ya que la fracción lábil es clave en la mineralización de nutrientes (O'Rourke *et al.*, 2015).

La fracción lábil de C se asocia a la actividad de la biomasa microbiana, siendo útil como indicador de calidad del suelo (Ginebra *et al.*, 2015; Bongiorno *et al.*, 2019)). Así, el manejo convencional intensifica la pérdida de C, mientras que el conservacionista promueve su acumulación.

El C oxidable con permanganato de potasio (KMnO₄), denominado como POX-C, representa un reservorio sensible a cambios de manejo, reflejando la fracción activa (lábil) de C y su vinculación con la biota microbiana (Blair, 1995; Moebius-Clune *et al.*, 2016). La medición de fracciones lábiles puede ser laboriosa; por ello, se requieren métodos prácticos y eficientes (Weil *et al.*, 2003). Por ello, el método POX-C, basado en la oxidación con KMnO₄ (0,02 M), es una alternativa prometedora para estimar el C lábil (Weil, 2003; Culman *et al.*, 2012).

Este estudio evalúa la efectividad de POX-C y su relación con fracciones de C (POM, MAOM), el COT, y actividad microbiana en suelos agrícolas de la zona centro-sur de Chile con distintos manejos y orígenes edáficos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectaron muestras de suelo en nueve sitios ubicados en las regiones de Ñuble, Biobío y La Araucanía, a una profundidad de 0 – 20 cm, con tres réplicas por sitio. Cada muestra compuesta estuvo conformada por 15 y 21 submuestras, las que fueron almacenadas a 4 °C hasta su análisis.

La selección de los sitios consideró tres criterios: (1) uso del suelo (rotación o cultivo permanente); (2) clase textural (fina, media, gruesa); origen del suelo

(volcánico o no volcánico).

Los sitios 1, 3, 6 y 7 corresponden a rotaciones de cultivos; los demás, a cultivos permanentes (principalmente frutales). Los suelos volcánicos (Andisoles) se encuentran en los sitios 2, 6, 7 y 9, mientras que los no volcánicos incluyen Entisoles, un Ultisol y un Alfisol (Tabla 1).

Tabla 1. Identificación, coordenadas geográficas, cultivo y clasificación taxonómica de los sitios muestreados.

Sitio ¹	Comuna	Coordenadas geográficas	Cultivo ²	Serie de suelo ³	Clasificación
1	Cañete	37°51'4.58"S; 73°25'23.74"O	Trigo	Merilupo ^c	Very fine, kaolinitic, mesic Humic Hapludults
2	Freire	38°57'58.49"S; 72°39'50.99"O	Arándano	Barros Arana ^{ad}	Medial skeletal sandstone, mesic Typic Hapludands
3	Traiguén	38°22'23.92"S; 72°40'56.23"O	Cebada	Chufquén ^{ab}	Fine, mixed, mesic Fluventic Humic Dystrudepts
4	Angol	37°46'44.72"S; 72°36'55.33"O	Kiwi	Asociación San Esteban ^{ab}	Fine, mixed, thermal Typic Dystraxepts
5	Angol	37°48'49.21"S; 72°37'28.33"O	Cerezo	Asociación San Esteban ^{ab}	Fine, mixed, thermal Typic Dystraxepts
6	Gorbea	39°08'13.82"S; 72°35'59.83"O	Trigo	Paicaví ^a	Medial, mesic Typic Hapludands
7	Chillán	36°35'47.07"S; 72°04'48.64"O	Trigo	Arrayán ^{ac}	Medial, amorphic, thermic, Humic Haploxerands
8	Coilemu	36°35'12.55"S; 72°41'14.78"O	Viña	Copiulemu ^a	Fine, mixed, isomesic Ultic Palexeralfs
9	El Carmen	36°52'3.73"S; 71°45'23.22"O	Nogales	Santa Bárbara ^{ac}	Medial, amorphic, mesic, Typic Haploxerand

¹Sitio corresponde a los lugares de muestreo incluidos en el estudio. ²Los nombres científicos de las especies frutales y cultivos son los siguientes: trigo (*Triticum aestivum* L.), arándano (*Vaccinium corymbosum* L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.), kiwi (*Actinidia deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R.

Ferguson), cerezo (*Prunus avium* L.), viña (*Vitis vinifera* L.) y nogales (*Juglans regia* L.).³ Las fuentes consultadas para la clasificación de suelos son las siguientes: ^aCIREN (2014); ^bVial (2020); ^cStolpe (2006) y ^dCIREN (2002).

Preparación de las muestras

Las muestras de suelo se tamizaron a 2 mm para análisis químicos, físicos y biológicos.

Para los análisis físicos del suelo se determinó densidad aparente mediante el método del cilindro (Agostini *et al.*, 2014); densidad real con picnómetro (Sandoval *et al.*, 2012); y humedad gravimétrica secando 10 g de suelo a 105 °C por 24 h (Sandoval *et al.*, 2012). Estos parámetros permitieron ajustar las muestras a un contenido de humedad estándar del 60 % del espacio poroso ocupado con agua, conocido en inglés como wáter - filled pore space (WFPS; Linn & Doran, 1984). Además, se determinó textura del suelo a través del método del hidrómetro de Bouyoucos, con dispersión previa con NaOH, expresando los resultados en porcentaje (Sandoval *et al.*, 2012).

Los análisis químicos del suelo consistieron en los protocolos de Sadzawka *et al.* (2006). Brevemente, para determinar **carbono orgánico (CO; %)** a través de colorimetría, previa oxidación con dicromato; **pH** en suspensión acuosa (suelo : agua 1 : 2,5) con pH - metro; **conductividad eléctrica (CE; dS m⁻¹)** en extracto de saturación con conductímetro; **contenido de nitrógeno (N), fósforo (P), y azufre (S) (mg kg⁻¹)** a través de colorimetría UV-vis, **potasio (K)** por espectrofotometría de emisión atómica (EEA), previa extracción con soluciones específicas; para determinación de la Capacidad de intercambio de cationes efectiva (CICE), los **cationes intercambiables** como calcio (Ca ⁺²), magnesio (Mg ⁺²), potasio (K ⁺), sodio (Na ⁺) y Aluminio (Al ⁺³) (cmol kg⁻¹), a través de extracción con acetato de amonio o cloruro de potasio (KCl). Todos los análisis se realizaron en laboratorios de servicios de Análisis Químicos y Físicos de Suelos de la Universidad de Concepción

Los análisis biológicos del suelo fueron realizados en el Laboratorio de Espectroscopía (Vis-IR) y Manejo Sostenible de Suelos de la Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción y consistieron en:

Respiración del suelo

Se determinó usando una incubación cerrada de los suelos en tubos Falcon

siguiendo el principio de Craine *et al.* (2010). Se incubaron 15 g de suelo húmedo en tubos Falcon a 22 °C, midiendo el CO₂ acumulado a los días 3, 5 y 7 mediante un analizador infrarrojo de gases Licor LI-820 (LI-COR Biosciences, Estados Unidos) Los resultados se expresaron como flujo acumulado de CO₂ (mg CO₂ g⁻¹ suelo seco) y como respiración potencial específica (SPR) ajustada al contenido de CO total (COT) (μg CO₂-C g⁻¹ COT h⁻¹).

Actividad de la biomasa microbiana (FDA)

Se determinó según la metodología descrita por Alef (1995). Se incubó 1 g de suelo con fluoresceína diacetato a 25 °C durante 1 h. La actividad microbiana se midió por colorimetría a 490 nm y se expresó como μg de fluoresceína g⁻¹ h⁻¹.

Actividad enzimática (β-glucosidasa)

Se determinó mediante la metodología de Tabatabai (1982). Se incubó 0,1g suelo con p-nitrofenil-β-D-glucopiranosido a pH 6 durante 1 h. El p-nitrofenol liberado se midió a 400 nm y se expresó como μmol p-nitrofenol g⁻¹ h⁻¹.

Carbono oxidable con permanganato (POX-C)

La determinación se basó en el principio propuesto por Weil (2003). Se utilizó 2,5 g de suelo con una solución de KMnO₄ (0,02 mol L⁻¹) a pH 7,2, que oxida compuestos lábiles del C. La intensidad del color púrpura generado se midió a 550 nm, según el método de Culman *et al.* (2012, 2021). El POX-C, expresado en mg de POX-C por kg de suelo seco al aire, se determinó de acuerdo la siguiente fórmula: $POX-C = (Ci - (a + b \times Abs) \times (Mox) \times (Vpp/mss)$, donde: Ci = 0,02 mol L⁻¹ concentración inicial de la solución de KMnO₄; a= intercepción de la curva estándar; b= pendiente de la curva estándar; Abs= absorbancia de la muestra de suelo; Mox = 9000 mg, masa de C oxidado por 1 mol de MnO₄ que cambia de Mn⁷⁺ a Mn⁴⁺; Vpp = 0,02 L, volumen de solución de KMnO₄ reaccionado; mss = masa de suelo seco (kg) de la muestra.

Fracciones de materia orgánica (POM y MAOM)

De acuerdo con el principio de Cambardella y Elliot (1992), similar a lo descrito en (Cotrufo *et al.*, 2019). Se separaron mediante dispersión con hexametáfosfato de sodio al 5 %, tamizado a 53 μm y decantación. Las fracciones se secaron, molieron y analizaron por combustión seca utilizando un analizador LECO 630-100-100 (LECO Corporation, Estados Unidos), expresando el contenido de C como

porcentaje.

Carbono orgánico total (COT)

Se determinó por combustión seca (método de Dumas) y se expresó como porcentaje y en kg m^{-2} para la capa 0 – 20 cm.

Los análisis de los datos se enfocaron en el cálculo de coeficientes de variación (CV) para evaluar precisión. Se usaron regresiones lineales y gráficos de dispersión para comparar POX-C con otros métodos, diferenciando por uso del suelo. Se aplicó una matriz de correlación de Pearson ($P \leq 0,05$) para evaluar asociaciones. El análisis se realizó en R (v4.4.1) (R Core Team, 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades Físicas. Los suelos mostraron variabilidad en textura y densidades (Tabla 2), lo que era esperable dada la diversidad de sitios. Las densidades aparentes en Andisoles fueron generalmente menores a $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ (Dörner *et al.*, 2010; Luzio y Casanova Pinto, 2006), con excepción del sitio 7 ($1,13 \text{ g cm}^{-3}$), lo que podría indicar degradación física por erosión o compactación debido al uso intensivo con cultivos como trigo y maíz. Las densidades reales más altas se observaron en Inceptisoles y en un Alfisol de origen granítico.

Tabla 2. Propiedades físicas de los suelos

Sitio ¹	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase Textural ²	Clasificación	Da ³	Dr ⁴
1	22,4	36,7	40,9	A	Fina	1,29	2,30
2	23,9	41,5	34,6	FA	Media	0,71	2,32
3	19,4	35,8	44,8	A	Fina	1,18	2,37
4	13,8	73,4	12,9	FL	Media	1,31	2,64
5	6,4	72,1	21,5	FL	Media	1,31	2,54
6	27	52,4	20,6	FL	Media	0,78	2,31
7	28,5	37,8	33,7	FA	Media	1,13	2,35
8	60,3	20,9	18,7	Fa	Gruesa	1,50	2,47
9	30,5	49,2	20,3	F	Media	0,90	2,13

¹ Sitio corresponde a los lugares de muestreo incluidos en el estudio. ² A= arcilloso; FA= franco arcilloso; FL= franco limoso; Fa= franco arenoso; F= franco. ³ Da = Densidad aparente en (g cm^{-3}), ⁴ Dr = Densidad real (g cm^{-3}).

Propiedades Químicas. De acuerdo con la Tabla 3, los suelos volcánicos

presentaron menores niveles de fósforo, atribuibles al material parental y a la mineralogía de sus arcillas (Sadzawka y Carrasco, 1985). El manejo también influyó: sitios con frutales (manejo permanente) mostraron menor P que los de rotación con fertilización frecuente. El sitio 8, sin prácticas de fertilización y con viñas centenarias, mostró empobrecimiento nutricional y baja MOS. En cuanto al pH, los valores fueron moderadamente a fuertemente ácidos, característicos del centro-sur de Chile. El CO fue significativamente mayor en suelos volcánicos, como se evidencia al comparar el sitio 2 con el 1.

Tabla 3. Propiedades químicas de los suelos.

Sitio ¹	CO ² (%)	pH ³	CICE ⁴ (cmol kg ⁻¹)	CE ⁵ (dS m ⁻¹)	N ⁶ (mg kg ⁻¹)	P ⁷ (mg kg ⁻¹)	K ⁸ (mg kg ⁻¹)	S ⁹ (mg kg ⁻¹)
1	4,23	5,01	5,57	0,1	39,8	11,5	90,9	22,5
2	8,38	5,42	3,75	0,2	49,8	5,5	31,9	5,8
3	3,05	5,71	11,77	0,2	45,4	20,9	213,7	12,5
4	2,96	6,18	10,58	0,1	33,9	23,3	490,2	2,8
5	1,77	5,80	9,38	0,1	30,0	48,5	508,2	2,1
6	6,01	5,56	3,45	0,1	36,0	11,1	97,8	28,0
7	3,66	5,57	9,47	0,1	44,0	21,8	549,1	6,7
8	0,51	5,85	2,61	0,1	13,0	5,6	86,9	0,7
9	5,56	5,60	3,17	0,1	13,9	3,6	103,8	8,2

¹ Sitio corresponde a los lugares de muestreo incluidos en el estudio. ² CO (%) corresponde al carbono orgánico derivado de la MO y considerando el factor estimado de conversión 1,724 descrito en Sadzawka *et al.*, (2006). ³ pH potencial del hidrogeno (H⁺) en el suelo determinado en una suspensión suelo agua 1: 2,5 según Sadzawka *et al.*, (2006). ⁴ CICE (cmol kg⁻¹) corresponde a la capacidad de intercambio de cationes efectiva, suma de bases de intercambio Ca, Mg, K, Na y aluminio (Al), descrito en Sadzawka *et al.*, (2006). ⁵ CE (dS m⁻¹) corresponde a la conductividad eléctrica del suelo, según lo descrito en Sadzawka *et al.*, (2006). ⁶ N (mg kg⁻¹) corresponde al nitrógeno mineral, nitrato (NO₃⁻) más amonio (NH₄⁺) total, en el suelo. ⁷ P (mg kg⁻¹) representa al contenido de fósforo determinado por el método de Olsen, descrito en Sadzawka *et al.*, (2006). ⁸ K (mg kg⁻¹) representa el contenido de potasio total disponible en el suelo. ⁹ S (mg kg⁻¹) representa el contenido de azufre total disponible en el suelo.

Propiedades biológicas. Las propiedades biológicas de los suelos pueden ser observadas en la Tabla 4. La actividad microbiana activa (FDA) mayor en los sitios 1, 7 y 9 (Adam y Duncan, 2001), y menor en 5, 3 y 4. La β-glucosidasa se relacionó con suelos arcillosos y presentó mayores valores en los sitios 3, 7 y 1 (Xia y Wander,

2021). POX-C fue alto en sitios 2, 6 y 9, todos con texturas medias, y bajo en 8, 5 y 3. Según Culman *et al.* (2012), el contenido de arcilla influye en el aumento de POX-C, lo que también se reflejó en las fracciones POM y MAOM.

Tabla 4. Promedios, desviación estándar y estadísticas descriptivas de los análisis de propiedades biológicas, fracciones de C y almacenamiento de C.

Sitio ¹	FDA ² ($\mu\text{g F gss}^{-1}\text{h}^{-1}$)	β -gluco ³ ($\mu\text{moles PNF gss}^{-1}\text{h}^{-1}$)	POX-C ⁴ (mg kg^{-1})	RFA ⁵ ($\text{mg CO}_2 \text{ gss}^{-1}$)	COT ⁶ (%)	POM ⁷ (%)	MAOM ⁸ (%)	SPR ⁹ ($\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}\text{COT h}^{-1}$)	COT 0-20 cm ¹⁰ (kg m^{-2})
1	41,32 ± (19,46)	1,25 ± (0,14)	823,17 ± (145,3)	0,533 ± (0,068)	4,6 ± (0,85)	3,65 ± (0,63)	4,9 ± (1,37)	18,7 ± (2,37)	12,07 ± (1,92)
2	31,31 ± (14,16)	1,07 ± (0,10)	1093,6 ± (79,99)	0,397 ± (0,038)	8,41 ± (0,37)	8,00 ± (0,58)	9,98 ± (0,25)	7,67 ± (0,73)	11,94 ± (0,46)
3	9,51 ± (1,48)	1,67 ± (0,17)	517,43 ± (57,59)	0,788 ± (0,115)	3,42 ± (0,19)	2,59 ± (0,18)	3,16 ± (0,18)	37,63 ± (6,92)	8,07 ± (0,4)
4	9,78 ± (4,66)	1,17 ± (0,06)	813,40 ± (41,96)	0,717 ± (0,024)	2,90 ± (0,13)	2,37 ± (0,08)	1,75 ± (0,06)	40,19 ± (2,76)	8,18 ± (0,32)
5	5,84 ± (1,07)	0,74 ± (0,13)	487,60 ± (26,67)	0,678 ± (0,053)	1,91 ± (0,16)	1,63 ± (0,12)	1,27 ± (0,10)	58,09 ± (7,68)	5,38 ± (0,39)
6	16,26 ± (1,66)	0,42 ± (0,06)	934,19 ± (43,15)	0,559 ± (0,064)	5,79 ± (0,59)	5,35 ± (0,60)	6,52 ± (0,38)	15,76 ± (1,98)	9,03 ± (0,79)
7	43,43 ± (5,43)	1,58 ± (0,11)	691,48 ± (76,28)	0,653 ± (0,055)	3,59 ± (0,46)	2,44 ± (0,38)	3,7 (0,54)	29,88 ± (4,40)	8,12 ± (0,90)
8	17,82 ± (3,27)	0,28 ± (0,06)	112,63 ± (27,44)	0,338 ± (0,041)	0,603 ± (0,04)	0,15 ± (0,009)	1,06 ± (0,03)	91,12 ± (11,21)	1,80 ± (0,10)
9	44,68 ± (23,03)	0,82 ± (0,15)	885,89 ± (111,28)	0,359 ± (0,059)	5,66 ± (0,71)	5,25 ± (0,63)	6,10 ± (0,34)	10,31 ± (1,24)	10,19 ± (1,10)
\bar{x}	24,44	1,00	699,37	0,55	4,10	3,45	4,23	34,37	8,31
Me ¹¹	17,09	1,10	781,52	0,58	3,63	2,75	3,37	28,68	8,46
Min ¹²	3,83	0,19	77,10	0,26	0,57	0,15	1,02	6,48	1,73
Max ¹³	65,19	1,86	1204,4	0,93	8,75	8,62	10,2	114,27	13,51

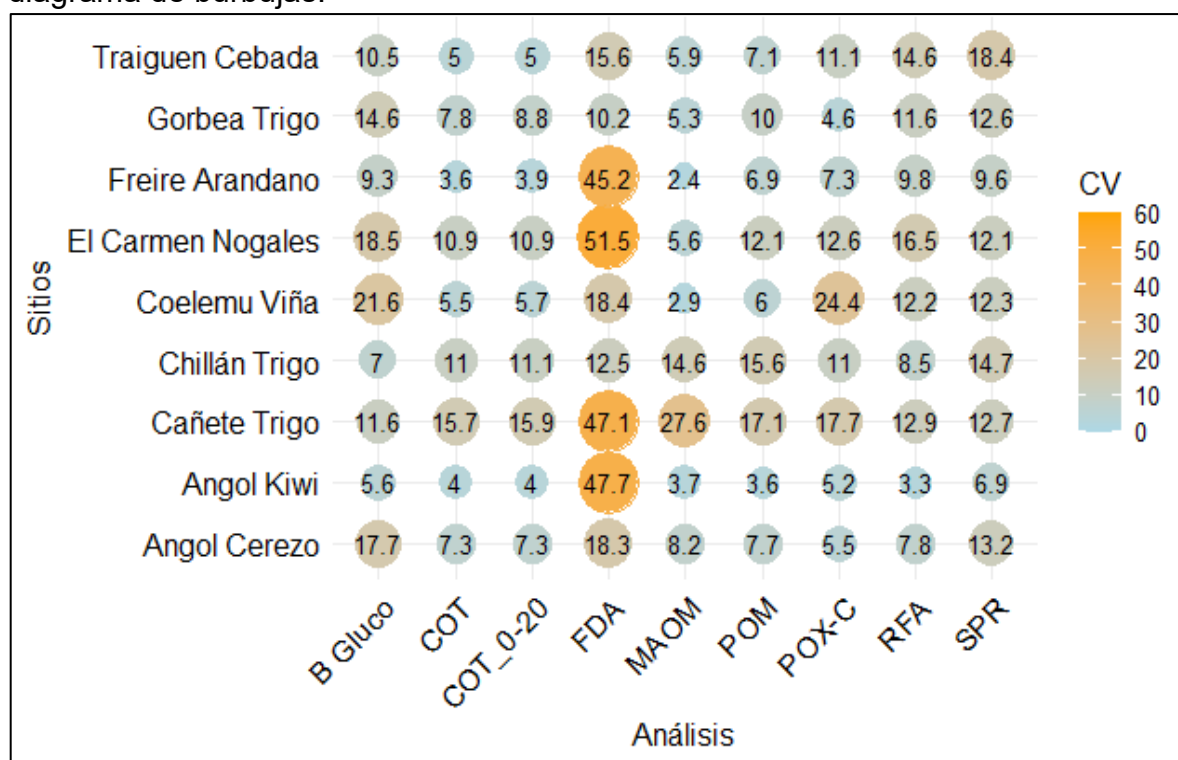
¹ Sitio corresponde a los lugares de muestreo incluidos en el estudio. ² FDA ($\mu\text{g F gss}^{-1}\text{h}^{-1}$), corresponden a la actividad de la biomasa microbiana activa total. ³ β -gluco ($\mu\text{moles PNF gss}^{-1}\text{h}^{-1}$), corresponden a la actividad de enzima β -glucosidasa en el suelo. ⁴ POX-C (mg kg^{-1}), corresponden a la cantidad de carbono lábil oxidado con permanganato de potasio. ⁵ RFA ($\text{mg CO}_2 \text{ gss}^{-1}$)

corresponden a flujos acumulados de CO₂ en una incubación de 7 días. ⁶ COT (%) corresponden a la cantidad de carbono orgánico total, determinado por combustión seca. ⁷ POM (%) corresponden a materia orgánica particulada. ⁸ MAOM (%) corresponden a materia orgánica asociada a minerales. ⁹ SPR (µg C-CO₂ g⁻¹COT h⁻¹) corresponde a respiración potencial específica. ¹⁰ COT 0-20cm (kg m⁻²) representan el contenido de carbono orgánico total en la capa de 0 a 20 cm de suelo. ¹¹ Me corresponde a la mediana. ¹² Min corresponde al valor mínimo obtenido en el total de datos analizados. ¹³ Max corresponde al valor máximo obtenido en el total de datos analizados.

Las tasas de RFA fueron mayores en los sitios 3, 4 y 5 (0,67–0,78 mg CO₂ gss⁻¹), y menores en 2, 8 y 9 (0,33–0,39 mg CO₂ gss⁻¹). La SPR fue mayor en sitios degradados (8, 5 y 4; 40–91 µg CO₂-C g⁻¹ COT h⁻¹) y menor en suelos con más C disponible (2, 9 y 1; 7–18 µg C-CO₂ g⁻¹ h⁻¹). El almacenamiento de C (0 – 20 cm) fue más alto en los sitios 1, 2 y 9 (>10 kg m⁻²), y más bajo en 8, 5 y 3 (< 8 kg m⁻²).

Análisis de variabilidad de las propiedades biológicas del suelo. La Figura 1 muestra la variabilidad de cada análisis mediante un diagrama de burbujas, donde el tamaño y color indican el CV. Este se interpreta según los rangos definidos por Wilding (1985): bajo (< 15 %), moderado (15 – 35 %) y alto (> 35 %).

Figura 1. Precisión analítica mediante CV por método y sitio de muestreo en un diagrama de burbujas.

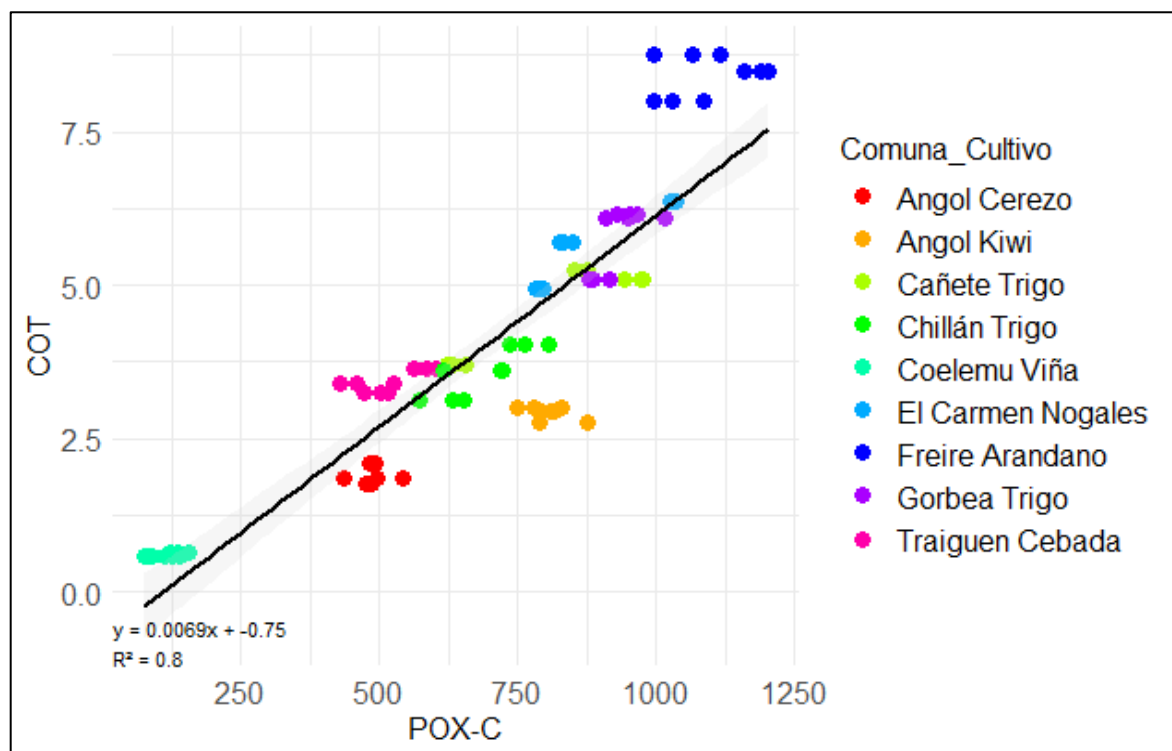


B Gluco= β-glucosidasa; COT= Carbono orgánico total; COT_0-20= Contenido de carbono orgánico total en la capa de suelo de 0-20 cm; FDA= Fluoresceína diacetato; MAOM (de su sigla inglesa) = Materia orgánica asociada a minerales; POM (de su sigla inglesa) = Materia orgánica particulada; POX-C= Carbono lábil oxidado con permanganato de potasio; RFA= Respiración en flujos acumulados de CO₂; SPR= Respiración potencial específica.

La evaluación de CV mostró que FDA fue el método más variable (47–52 %), mientras que MAOM y RFA fueron más estables. POX-C presentó variabilidad baja a moderada, con un 4,6 % en el sitio 6 y un 24,4 % en el sitio 8, el cual según análisis químico (ver Tabla 3) presentó el valor más bajo de CO. En el sitio 1, la variabilidad estuvo entre moderada y alta, posiblemente por su bajo pH (ver Tabla 3) y alto contenido de arcilla (ver Tabla 2), lo que afecta la actividad microbiana (Breugem *et al.*, 2024). La heterogeneidad en MAOM también podría explicarse por diferencias en densidad microbiana y calidad del C (Sokol *et al.*, 2019), lo cual podría ser considerado en estudios posteriores para evaluar la densidad microbiana presente en el suelo y la calidad (composición), del CO que ingresa al suelo.

Relaciones entre POX-C y variables biológicas del suelo. POX-C y COT presentaron una correlación positiva fuerte ($R^2 = 0,80$), indicando que la dinámica del C lábil se asocia con el total (Figura 2).

Figura 2. Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables: POX-C (mg kg^{-1}) y COT (%).



Al relacionar POX-C con β -glucosidasa (Figuras 3 y 4), no se observó correlación general ($R^2 = 0,05$). Sin embargo, esta relación disgregada por tipo de manejo indicó una relación negativa en rotaciones de cultivo ($R^2 = 0,62$) y positiva

en cultivos permanentes ($R^2 = 0,74$), como se observa a continuación.

Figura 3. Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables POX-C (mg kg^{-1}) y β -glucosidasa ($\mu\text{moles de p-nitrofenol gss}^{-1} \text{h}^{-1}$), considerando los sitios con rotaciones de cultivos.

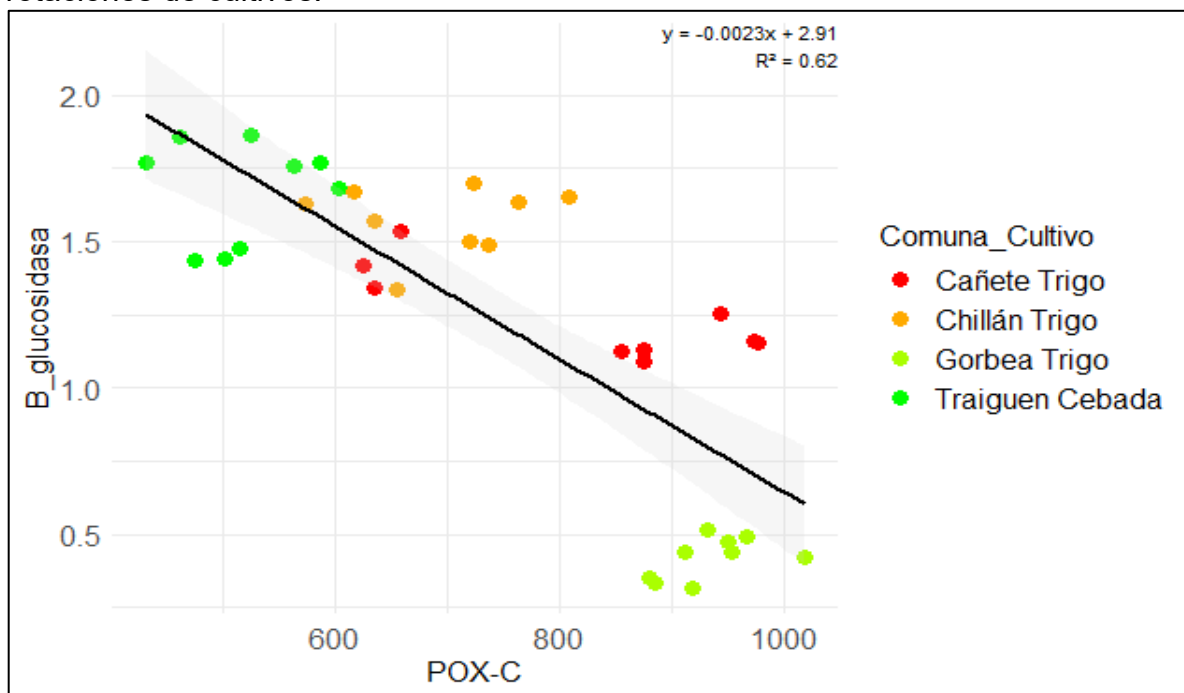
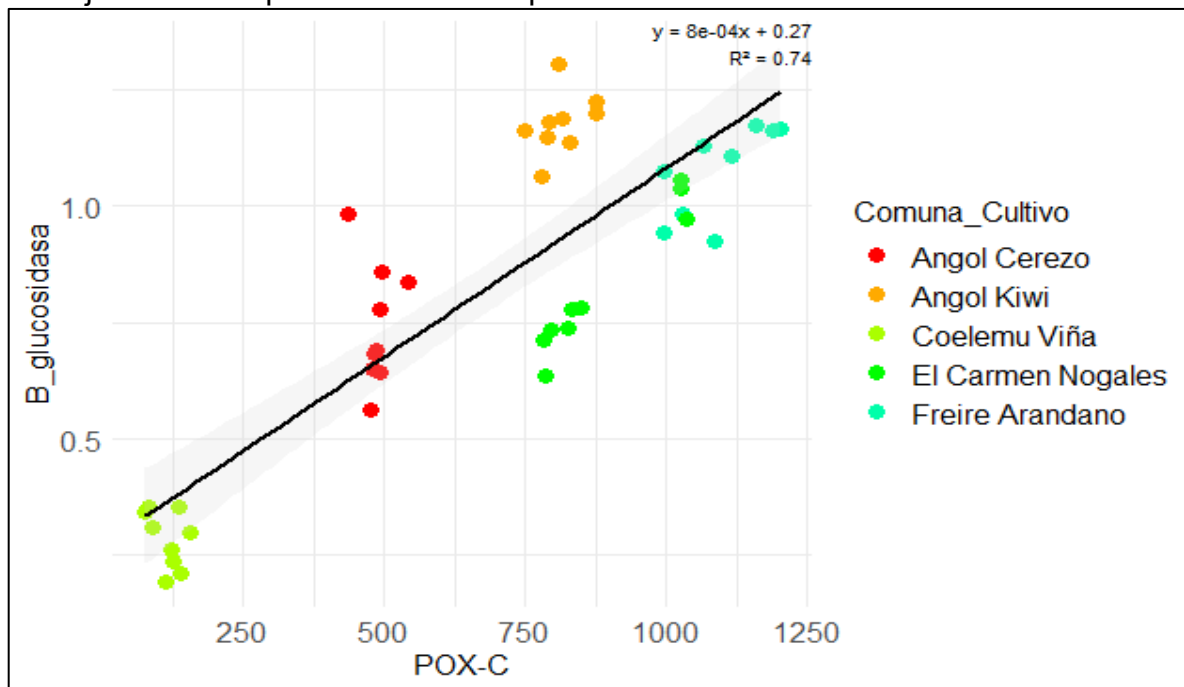


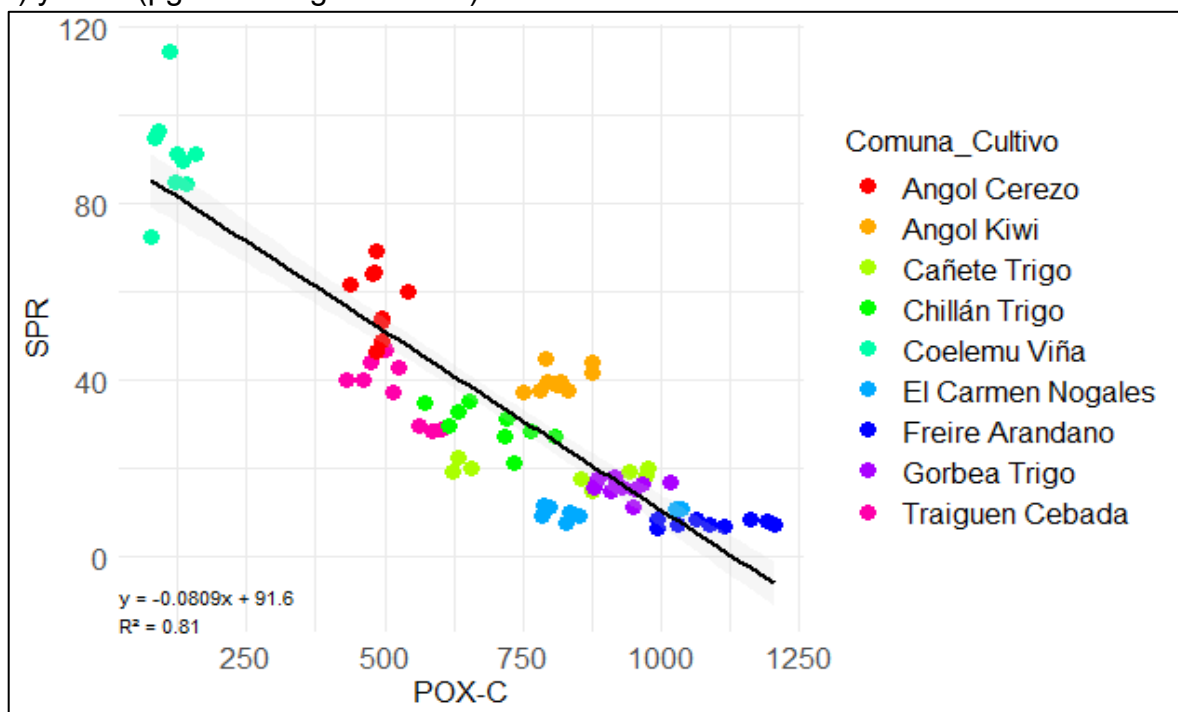
Figura 4. Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables: POX-C (mg kg^{-1}) y β -glucosidasa ($\mu\text{moles de p-nitrofenol gss}^{-1} \text{h}^{-1}$), considerando los sitios manejados con especies de manera permanente.



Este patrón sugiere un mayor ingreso de azúcares simples al suelo en sistemas de rotación de cultivos, donde la MOS presenta una tasa de recambio rápida, mientras que en sistemas de cultivos permanentes no reciben aportes significativos de MOS más procesado, debido a sus raíces y restos vegetales ricos en lignina (De Almeida *et al.*, 2015). En los sistemas con rotaciones de cultivo, el contenido de celulosa es mayor debido a la variabilidad y cantidad de residuos, por lo tanto, favorece la producción de enzimas degradadoras en el suelo (Ortiz, 2009), aunque se ha demostrado una afinidad entre el KMnO_4 en suelos de humedales con alto contenido de celulosa (Chambers *et al.*, 2024).

Respecto a RFA, no se observó correlación con POX-C ($R^2 = 0$), por lo que se evaluó SPR, variable utilizada para entender la dinámica del C, sus procesos de estabilización y variaciones en el almacenamiento de C del suelo asociadas al clima (Doetterl *et al.*, 2015), encontrándose una correlación negativa fuerte ($R^2 = 0,81$), como se observa en la Figura 5. Esto sugiere que suelos con más C lábil liberan proporcionalmente menos CO_2 , posiblemente por protección físico - química.

Figura 5. Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables: POX-C (mg kg^{-1}) y SPR ($\mu\text{g C- CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ COT h}^{-1}$).



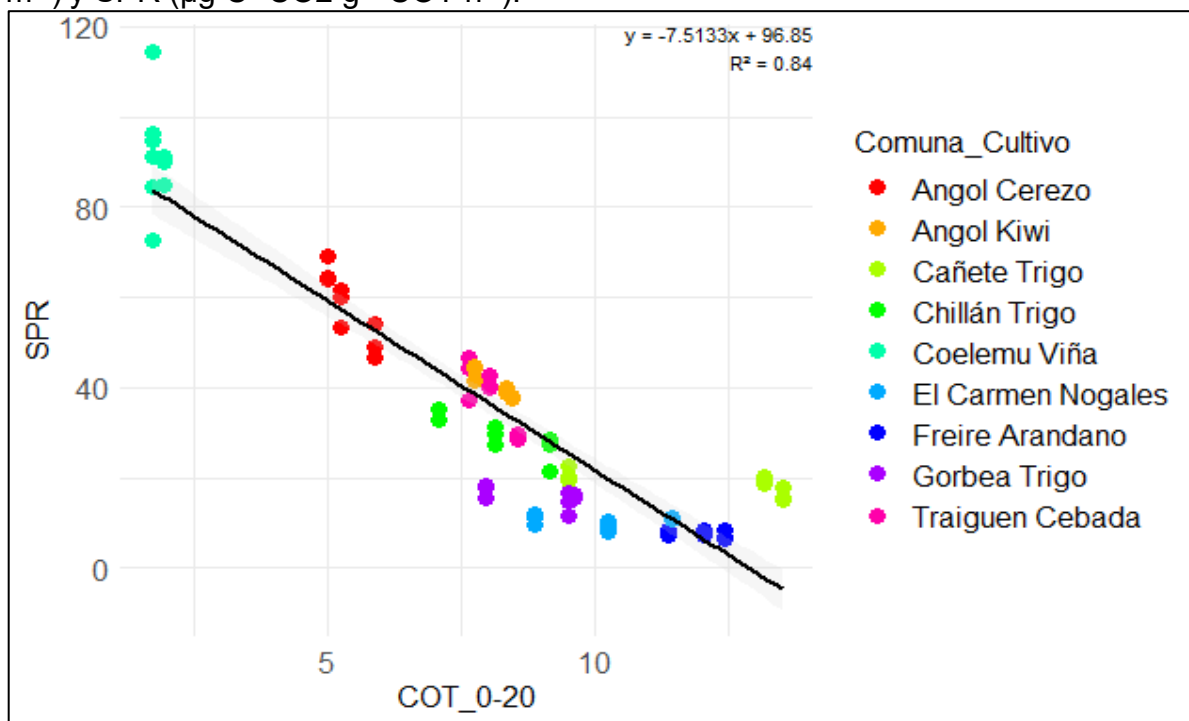
En el sitio 8, el bajo POX-C se asoció con bajos niveles de COT_{0-20} y una textura gruesa, a causa del origen granítico (Alfisol), degradación del suelo y el clima

mediterráneo marino y periodos secos prolongados (Pozo y Canto, 1999).

Los valores altos de POX-C pueden ser asociados con una mayor estabilidad o secuestro del C (ver Figuras 3 y 8), lo cual conforma una herramienta de monitoreo favorable para monitorear y atenuar los procesos degradativos del suelo.

En la Figura 6 también se observa una relación negativa ($R^2 = 0,84$) entre COT_0-20 y SPR, coincidiendo con lo planteado por Doetterl *et al.* (2015) y Davidson (2015), quienes destacaron un mayor almacenamiento de C con menor tasa de respiración por unidad de C y la estabilización del C por minerales secundarios ricos en sílice, respectivamente. La Figura 6 evidencia un orden ascendente de degradación del suelo, relacionada con menores contenidos de CO y regímenes de temperatura mayores (ver Tabla 1).

Figura 6. Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables: COT_0-20 (kg m^{-2}) y SPR ($\mu\text{g C- CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ COT h}^{-1}$).

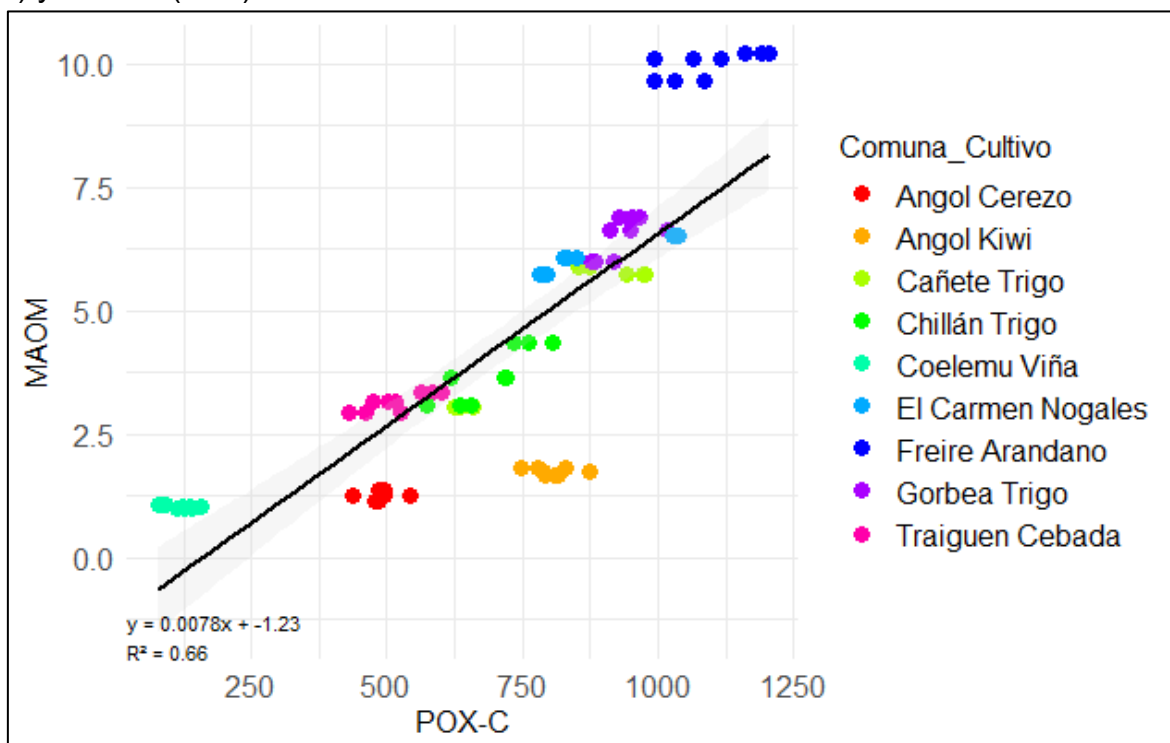


La correlación entre POX-C y FDA fue débil ($R^2 = 0,15$), en línea con su alta variabilidad (Figura 1). En cambio, POX-C y MAOM se relacionaron positivamente ($R^2 = 0,66$), tal como se observa en Figura 7, sugiriendo un vínculo funcional entre C lábil y C protegido (Wang *et al.*, 2019; Sherrod *et al.*, 2019). Esto apoya la hipótesis acoplada de origen vegetal y microbiano en la formación de POM y MAOM, salvo

en el sitio 8, donde se evidenció un desacoplamiento (Yu *et al.*, 2022).

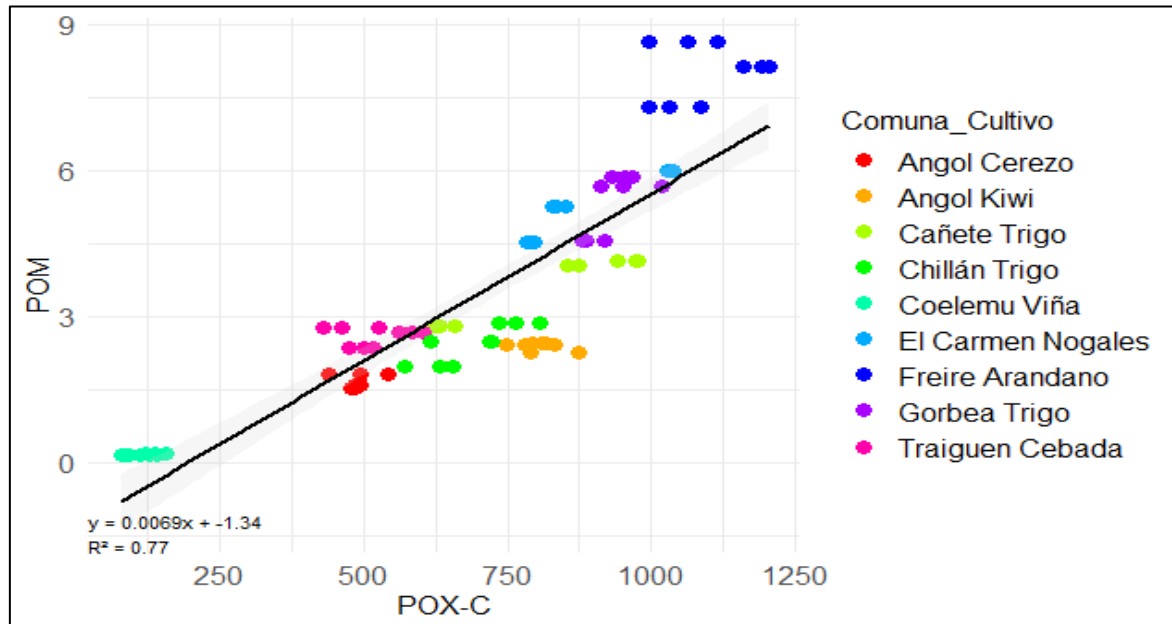
Esta interpretación se ve reforzada por las relaciones C/N similares observadas en la mayoría de los sitios analizados, con la excepción del sitio 8, donde se registra una notable diferencia (C/N POM = 48, C/N MAOM = 12) posiblemente dadas por la compactación de suelo, ingreso de material vegetal de estructura compleja y baja actividad microbiana debido a textura con un bajo contenido de arcillas y CO menos protegido (ver Tablas 3 y 4).

Figura 7. Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables: POX-C (mg kg^{-1}) y MAOM (% C).



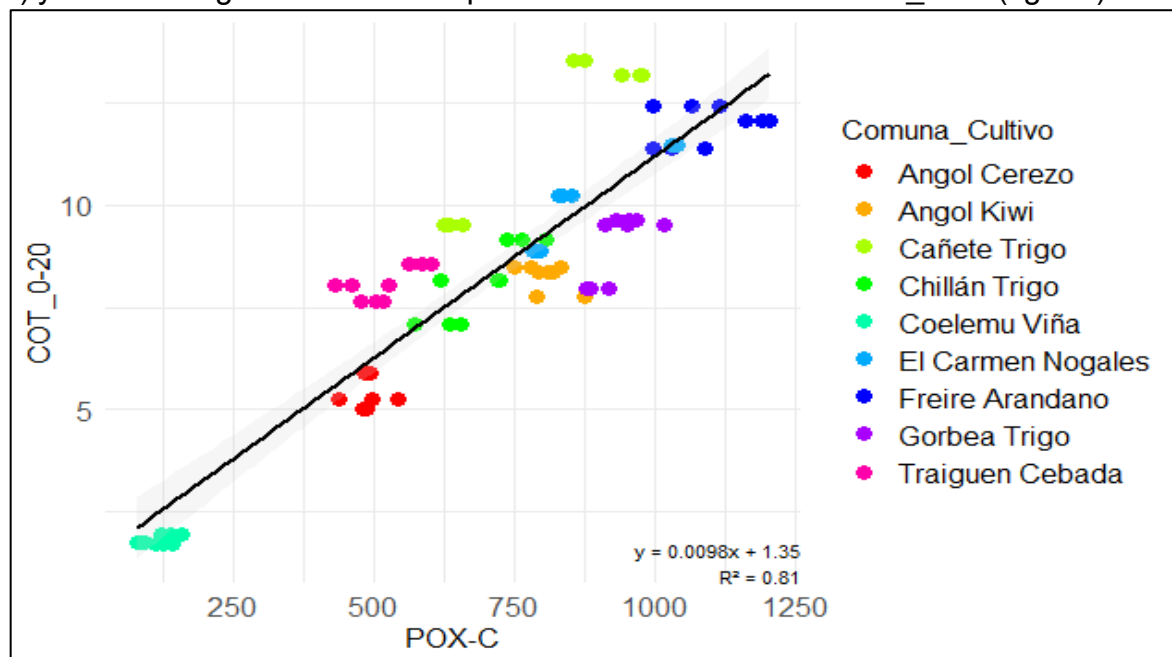
La relación entre POX-C y POM fue más fuerte aún ($R^2 = 0,77$), indicando una mayor afinidad de POX-C con la fracción de C más fácilmente degradable (Culman *et al.*, 2012) como se puede ver a continuación en la Figura 8.

Figura 8. Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables: POX-C (mg kg^{-1}) y POM (% C).



De forma similar, POX-C y COT_0-20 se correlacionaron positivamente ($R^2 = 0,81$), lo que resalta el potencial de POX-C como indicador de acumulación de C en el suelo como se muestra a continuación en la Figura 9.

Figura 9. Dispersión con ajuste de regresión lineal de las variables: POX-C (mg kg^{-1}) y carbono orgánico total en la profundidad de 0 a 20 cm COT_0-20 (kg m^{-2}).

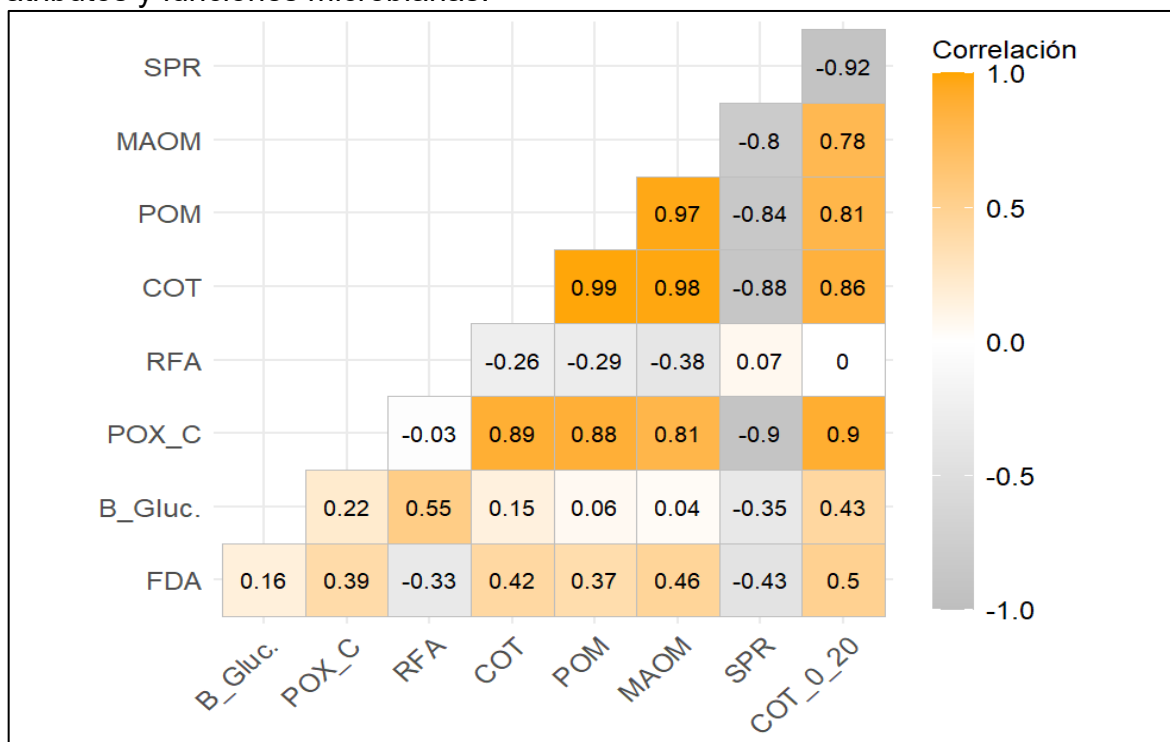


Análisis de correlación

En la Figura 10 se observa el resultado del análisis de correlación entre los parámetros estudiados, a partir del índice de correlación r de Pearson.

POX-C mostró correlaciones positivas significativas con COT ($r = 0,89$), POM ($r = 0,88$), MAOM ($r = 0,81$) y COT_0-20 ($r = 0,90$), y una correlación negativa con SPR ($r = -0,90$). POM también se correlacionó fuertemente con COT ($r = 0,99$), MAOM ($r = 0,97$) y el almacenamiento de C ($r = 0,81$), y negativamente con SPR ($r = -0,84$). La β -glucosidasa se relacionó positivamente con RFA ($r = 0,55$) y almacenamiento de C ($r = 0,43$). FDA mostró correlaciones más débiles, aunque positivas, con COT, MAOM y almacenamiento de C, y negativa con SPR.

Figura 10. Análisis de correlación (r) entre (POX_C), propiedades del suelo, atributos y funciones microbianas.



POX_C: Carbono oxidable con permanganato; B_Gluc: enzima β -glucosidasa; RFA: respiración de flujos acumulados de CO_2 ; COT: C orgánico total; POM (de su sigla inglesa): Materia orgánica particulada; MAOM (de su sigla inglesa): Materia orgánica asociada a la matriz mineral; SPR (de su sigla inglesa): Respiración potencial específica; COT_0_20 almacenamiento de C de 0-20 cm de profundidad. La intensidad del color y los valores indican la fortaleza de las relaciones (r , coeficiente de correlación de Pearson).

Debido a su alto nivel de correlación con fracciones clave del C del suelo, POX-C se considera un método eficaz para estudiar el almacenamiento de C en la materia orgánica del suelo (MOS) como afirma Chambers *et al.*, (2024), y la dinámica de

sus fracciones; esto validado especialmente bajo manejos intensivos como rotaciones de cultivo o frutales permanentes en este estudio. Se debe señalar que estudios previos (Ramírez *et al.*, 2020; Aravena *et al.*, 2025) respaldan su sensibilidad a condiciones climáticas y de manejo, especialmente en suelos volcánicos.

Además, POX-C puede utilizarse para evaluar la gestión de la MO como es requerido según Cotrufo y Lavallee (2022), la productividad de cultivos y la salud del suelo, tanto en suelos volcánicos como no volcánicos, mediante índices de calidad, como proponen Lucas y Weil (2012) y Moebius-Clune *et al.* (2016).

CONCLUSIONES

1. POX-C es un parámetro sensible al tipo de manejo del suelo, particularmente en rotaciones de cultivo y cultivos permanentes (frutales).
2. No existe una relación clara de POX-C, en este estudio, con algunas de las metodologías de actividad microbiana, porque POX-C evalúa parcialmente la fracción lábil en la MAOM (C más estable).
3. El POM (fracción lábil) y el COT (0-20 cm) se correlacionaron positivamente con POX-C, el cual presenta una mayor eficiencia analítica y menor tiempo de procesamiento en laboratorio.

REFERENCIAS

1. Arévalo, G. E., Sánchez-Amaya, J. M., & Guillen-Marquina, I. (2022). Estudio del contenido materia orgánica por dos métodos analíticos en suelos de Honduras. *Revista de Ciencias Ambientales*, 57(1), 1–13. <https://doi.org/10.15359/rca.57-1.11>
2. Adam, G., & Duncan, H. (2001). Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil biology and biochemistry*, 33(7-8), 943-951. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00244-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00244-3)
3. Adhikari, K., & Hartemink, A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services—A global review. *Geoderma*, 262, 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>

4. Agostini, M. D. L. Á., Monterubbianesi, M. G., Studdert, G. A., & Maurette, S. (2014). Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. *Ciencia del suelo*, 32(2), 171-176.
5. Alef, K. (1995). Estimation of the hydrolysis of fluorescein diacetate. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*, 19, 232-238.
6. Aravena, C., Valle, S. R., Vergara, R., González Chang, M., Martínez, O., Clunes, J., Caurapán, B., & Asenjo, J. (2025). Effect of agricultural management intensity on the organic carbon fractions and biological properties of a volcanic-ash-derived soil. *Sustainability*, 17(6), 2704. <https://doi.org/10.3390/su17062704>
7. Bongiorno, G., Bünemann, E. K., Oguejiofor, C. U., Meier, J., Gort, G., Comans, R., ... & de Goede, R. (2019). Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators*, 99, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.008>
8. Breugem, A. J., Kros, J., & de Vries, W. (2024). *Impacts of pH on mechanisms and rates of carbon and nitrogen mineralisation: A review* (Wageningen Environmental Research Report No. 3342). Wageningen University & Research. <https://doi.org/10.18174/653235>
9. Blair, G. J., Lefroy, R. D., & Lisle, L. (1995). Soil Carbon Fractions Based on their Degree of Oxidation, and the Development of a Carbon Management Index for Agricultural Systems. *Aust. J. Agric. Res.* 46, 1459-66. <https://doi.org/10.1071/AR9951459>
10. Cambardella, C. A., & Elliott, E. T. (1992). Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil science society of America journal*, 56(3), 777-783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>
11. Chambers, L. G., Mirabito, A. J., Brew, S., Nitsch, C. K., Bhadha, J. H., Hurst, N. R., & Berkowitz, J. F. (2024). Evaluating permanganate oxidizable carbon (POXC)'s potential for differentiating carbon pools in wetland soils. *Ecological Indicators*, 167, 112624. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112624>
12. CIREN. (2014). *Estudio agrológico Región del Biobío, Descripción de suelos, materiales y símbolos* (Publicación CIREN N° 181). Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/c32fd792-ff02-4880-abb1-a6c40b63288f>

13. CIREN. (2002). *Descripciones de suelos, materiales y símbolos*. En *Estudio Agrológico IX Región* (Vol. 1, p. 287). Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN).
14. Cotrufo, M. F., Ranalli, M. G., Haddix, M. L., Six, J., & Lugato, E. (2019). Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, 12(12), 989–994. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>
15. Cotrufo, M. F., & Lavellee, J. M. (2022). Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. *Advances in Agronomy*, 172, 1–68. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002>
16. Craine, J. M., Fierer, N., & McLauchlan, K. K. (2010). Widespread coupling between the rate and temperature sensitivity of organic matter decay. *Nature Geoscience*, 3(12), 854-857. <https://doi.org/10.1038/ngeo1009>
17. Culman, S. W., Snapp, S. S., Freeman, M. A., Schipanski, M. E., Beniston, J., Lal, R., Drinkwater, L. E., Franzluebbers, A. J., Glover, J. D., Grandy, A. S., Lee, J., Six, J., Maul, J. E., Mirsky, S. B., Spargo, J. T., & Wander, M. M. (2012). Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. *Soil Science Society of America Journal*, 76(2), 494–504. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0286>
18. Culman, S. W., Hurisso, T. T., & Wade, J. (2021). Permanganate oxidizable carbon: An indicator of biologically active soil carbon. In *Laboratory methods for soil health analysis* (Soil Health Series, Volume 2, p. 152). <https://doi.org/10.1002/9780891189831.ch9>
19. Davidson, E. A. (2015). Soil carbon in a beer can. *Nature Geoscience*, 8(10), 748–749. <https://doi.org/10.1038/ngeo2544>
20. De Nijs, E. A., & Cammeraat, E. L. (2020). The stability and fate of soil organic carbon during the transport phase of soil erosion. *Earth-Science Reviews*, 201, 103067. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103067>
21. Dörner, J., Dec, D., Peng, X., & Horn, R. (2010). Effect of land use change on the dynamic behaviour of structural properties of an Andisol in southern Chile under saturated and unsaturated hydraulic conditions. *Geoderma*, 159(1-2), 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.07.011>

22. Doetterl, S., Stevens, A., Six, J., Merckx, R., Van Oost, K., Casanova Pinto, M., Casanova-Katny, A., Muñoz, C., Boudin, M., Zagal Venegas, E., & Boeckx, P. (2015). Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate. *Nature Geoscience*, 8(10), 780–783. <https://doi.org/10.1038/ngeo2516>
23. Eyherabide, M., Saínz Rozas, H., Barbieri, P., & Echeverría, H. E. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del Suelo*, 32(1), 13–19. <https://ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/112>
24. FAO. (2017). *Carbono orgánico del suelo: El potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/i6937s/i6937s.pdf>
25. Ginebra Aguilar, M., Rodríguez Alfaro, M., Calero Martín, B., Ponce de León, D., & Font Vila, L. (2015). Carbono lábil como un indicador de cambios en dos suelos bajo diferentes usos. *Cultivos Tropicales*, 36(3), 64-70. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193242312010>
26. Hughes, H. M., Koolen, S., Kuhnert, M., Baggs, E. M., Maund, S., Mullier, G. W., & Hillier, J. (2023). Towards a farmer-feasible soil health assessment that is globally applicable. *Journal of Environmental Management*, 345, 118582. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118582>
27. Kopittke, P. M., Minasny, B., Pendall, E., Rumpel, C., & McKenna, B. A. (2024). Healthy soil for healthy humans and a healthy planet. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 54(3), 210-221. <https://doi.org/10.1080/10643389.2023.2228651>
28. Lal, R., Negassa, W., & Lorenz, K. (2015). Carbon sequestration in soil. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 15, 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.09.002>
29. Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4), 212-222. <https://doi.org/10.1002/fes3.96>
30. Lavallee, J. M., Soong, J. L., & Cotrufo, M. F. (2020). Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global change biology*, 26(1), 261-273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>

31. Linn, D. M., & Doran, J. W. (1984). Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, 48(6), 1267-1272. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800060013x>
32. Lucas, S. T., & Weil, R. R. (2012). Can a labile carbon test be used to predict crop responses to improve soil organic matter management?. *Agronomy Journal*, 104(4), 1160-1170. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0415>
33. Luzio, L., & Casanova Pinto, M. A. (2006). *Avances en el conocimiento de los suelos de Chile*. Universidad de Chile. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/25409>
34. Moebius-Clune, B. N., Moebius-Clune, D. J., Gugino, B. K., Idowu, O. J., Schindelbeck, R. R., Ristow, A. J., van Es, H. M., Thies, J. E., Shayler, H. A., McBride, M. B., Kurtz, K. S. M., Wolfe, D. W., & Abawi, G. S. (2016). *Comprehensive assessment of soil health – The Cornell framework manual* (3rd ed.). Cornell University.
35. Ortiz, M. L. (2009). Aproximaciones a la comprensión de la degradación de la lignina. *Orinoquia*, 13(2), 137-144. <https://doi.org/10.22579/20112629.208>
36. O'Rourke, S., Angers, D., Holden, N., & McBratney, A. (2015). Soil organic carbon across scales. *Global Change Biology*, 21, 12959 <https://doi.org/10.1111/gcb.12959>
37. Ondrasek, G., Begić, H. B., Zovko, M., Filipović, L., Meriño-Gergichevich, C., Savić, R., & Rengel, Z. (2019). Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. *Science of the total environment*, 658, 1559-1573. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.243>
38. Pozo, L., & Canto, S. (1999). *Áreas agroclimáticas y sistemas productivos de la VII y VIII regiones: Datos de estaciones meteorológicas*. INIA Quilamapu. <http://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/123456789/39013>
39. R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
40. Ramírez, P. B., Calderón, F. J., Fonte, S. J., Santibáñez, F., & Bonilla, C. A. (2020). Spectral responses to labile organic carbon fractions as useful soil quality indicators across a climatic gradient. *Ecological Indicators*, 111, 106042. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106042>

41. Rodrigues, C. I. D., Brito, L. M., & Nunes, L. J. (2023). Soil carbon sequestration in the context of climate change mitigation: A review. *Soil Systems*, 7(3), 64. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7030064>
42. Sadzawka, A., & Carrasco, A. (1985). *Adsorción por suelos alofánicos*. En E. Besoin (Ed.), *Suelos volcánicos de Chile* (pp. 373-405).
43. Sadzawka, A. (2006). *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile: Revisión 2006*. Instituto de investigaciones Agropecuarias (INIA).
44. Sandoval, M., Dörner, J., Seguel, O., Cuevas, J., & Rivera, D. (2012). *Métodos de análisis físico de suelos* (80 p.). Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Recursos Naturales.
45. Sherrod, L. A., Vigil, M. F., & Stewart, C. E. (2019). Do fulvic, humic, and humin carbon fractions represent meaningful biological, physical, and chemical carbon pools? *Journal of Environmental Quality*, 48(6), 1587–1593. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.03.0124>
46. Sokol, N. W., Sanderman, J., & Bradford, M. A. (2019). Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry. *Global Change Biology*, 25(1), 12–24. <https://doi.org/10.1111/gcb.14482>
47. Vial, M. (2020). *Caracterización física de los suelos del secano interior de Malleco* [en línea]. Temuco: Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Boletín INIA, no. 421. <https://web.inia.cl/personal/vial-alarcon-manuel/>
48. Xia, Y., & Wander, M. (2021). Responses of β -glucosidase, permanganate oxidizable carbon, and fluorescein diacetate hydrolysis to conservation practices. *Soil Science Society of America Journal*, 85(5), 1649-1662. <https://doi.org/10.1002/saj2.20261>
49. Yu, W., Huang, W., Weintraub-Leff, S. R., & Hall, S. J. (2022). Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils?. *Soil Biology and Biochemistry*, 172, 108756. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108756>
50. Wang, X., Toner, B. M., & Yoo, K. (2019). Mineral vs. organic matter supply as a limiting factor for the formation of mineral-associated organic matter in *forest*

and agricultural soils. Science of the Total Environment, 692, 344-353.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.017>

51. Wachira, P., Kimenju, J., Okoth, S., & Kiarie, J. (2014). Conservation and Sustainable Management of Soil Biodiversity for Agricultural Productivity. *Sustainable Living with Environmental Risks*, 27-34.
https://doi.org/10.1007/978-4-431-54804-1_3
52. Weil, R., K.R. Islam, M.A. Stine, J.B. Gruver, S.E. Samson-Liebig. 2003. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simple method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, 18(1):3-17. <https://doi.org/10.1079/AJAA2003003>
53. Wilding, L. P. (1985). *Spatial variability*: Its documentation, accommodation and implication to soil surveys. In D. R. Nielsen & J. Bouma (Eds.), *Soil spatial variability* (pp. 166–194). Pudoc. <https://edepot.wur.nl/318530>