

Impacto del desmonte sobre la calidad de suelo en el sudeste santiaguense: el balance de carbono



Impact of deforestation over soil quality in south east Santiago del Estero: the carbon balance

De Servi, Marcelo

Facultad de Agronomía, Universidad

De Buenos Aires, Argentina

desiervi@agro.uba.ar

 /0000-0003-4781-627X

Georgiadis Rolandi, Patricio Alexis

Facultad de Agronomía, Universidad

De Buenos Aires, Argentina

pato_geor@hotmail.com

 /0009-0001-7596-8900

Arreghini, Silvana

Facultad de Agronomía, Universidad

De Buenos Aires, Argentina

sarreghi@agro.uba.ar

 /0000-0001-6000-9208

Revista FAVE
Sección Ciencias
Agrarias

núm. 24, e0048, 2025

Universidad Nacional del Litoral, Argentina

ISSN: 2346-9129

ISSN-E: 2346-9129

Periodicidad: Continua

revistafave@fca.unl.edu.ar

Recepción: 21 noviembre 2024

Aprobación: 28 julio 2025

DOI: <https://doi.org/10.14409/fa.2025.24.e0048>

Resumen: La ampliación de la frontera agropecuaria es un proceso que se viene desarrollando en la Argentina a expensas del territorio cubierto por pastizales y montes nativos. Santiago del Estero es una de las provincias del país más afectadas por los cambios en el uso de la tierra durante las últimas dos décadas. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del desmonte total en lotes destinados a la producción agrícola y ganadera en el sudeste de Santiago del Estero sobre algunos indicadores de calidad del suelo y el balance de Carbono. El muestreo se realizó en forma superficial (0-30 cm) sobre suelos pertenecientes a tres ambientes distintos según el tiempo que llevaban de desmonte, denominados Lote Viejo (LV) 30 años, Lote Nuevo (LN) 15 años y Monte (M) sin desmontar. Los sitios LV y LN se explotaron durante ese lapso de tiempo mediante un aprovechamiento agrícola bajo siembra directa. Se analizaron las muestras para determinar pH, CE, P Bray, Nitrógeno, materia orgánica y textura. Los resultados obtenidos muestran el impacto negativo de las prácticas de desmonte y posterior uso agrícola sobre diferentes indicadores de calidad del suelo. El contenido superficial de limo sumado a la marcada estacionalidad de las lluvias limitaría las posibilidades de su utilización agrícola. El Balance de Carbono nos permitiría afirmar que el impacto del desmonte sobre el CO en los primeros años es determinante y se deberían implementar prácticas tendientes a recuperar los niveles originales de fertilidad física y química.

Palabras clave: desmonte, agricultura, balance de carbono.

Abstract: *The expansion of the agricultural frontier is a process that has been developing in Argentina at the expense of the territory covered by native grasslands and forests. Santiago del Estero is one of the provinces of the country most affected by changes in land use during the last two decades. The objective of this work was to evaluate the effect of total deforestation in lots under agricultural and livestock production in the southeast of Santiago del Estero on some soil quality indicators and the carbon balance. Soil sampling was carried out superficially (0 - 30 cm) on soils belonging to three different environments according to the time of deforestation, Lote Viejo (LV) 30 years, Lote Nuevo (LN) 15 years and Monte (M) without deforestation. The LV and LN sites were under agricultural use under direct sowing during this period of time. The samples were analyzed to determine pH, EC, P Bray, Nitrogen, organic matter and texture. The results obtained show the negative impact of total deforestation practices and subsequent agricultural use over different soil quality indicators. The high silt content of the superficial horizon added to the marked seasonality*

of the rains would limit the possibilities of its agricultural use. The Carbon Balance would allow us to affirm that the impact of deforestation on CO in the first years is decisive and practices should be implemented to recover the original levels of physical and chemical fertility.

Keywords: deforestation, agriculture, carbon balance.

Introducción

En las últimas décadas, la región norte de la Argentina ha sido sometida nuevamente a fuertes cambios en el uso de la tierra (Anriquez et al., 2005), con tasas de deforestación que se encuentran entre las más altas del mundo (Vallejos et al., 2015). La región noroeste (NOA) ha sido la más afectada por el desmonte, superando los promedios continentales y globales (Volante et al., 2016). En la Argentina durante el periodo 2000-2007 se deforestaron 1.757.600 ha para destinarlas a agricultura o ganadería, lo cual equivale a una tasa anual de deforestación del 1,15% (Volante et al., 2012). Santiago del Estero es considerada como una de las provincias del país más afectadas por los cambios en el uso de la tierra durante las últimas dos décadas (Paruelo et al., 2005; Volante et al., 2016). Entre los problemas asociados al desmonte se destacan la falta de controles y de cumplimiento de la legislación nacional y provincial vigentes, las decisiones empresariales forzadas, o no, por el precio de los bienes producidos, por la alta carga impositiva, por la falta de previsibilidad a largo plazo y por la escasa infraestructura básica y su insuficiente mantenimiento que poco favorece a la productividad del sector en general. Todo esto, entre otros factores, dificulta cuantificar adecuadamente sus consecuencias ambientales, como la ausencia de criterios agronómicos en la selección de tierras para incorporar a los procesos productivos. Es frecuente que, ante la generalización del desmonte, se extienda sobre los ecosistemas frágiles incrementando los riesgos de erosión, lo cual afecta la evolución proyectada de los rendimientos agronómicos (Soil Survey Staff- USDA, 2010). De esta forma, la ausencia de sustentabilidad ambiental puede ser vista como la principal causa de la falta de sostenibilidad económica asociada a esta práctica de manejo. Por otra parte, la pérdida del estrato leñoso y perenne modifica la dinámica hídrica zonal y produce la fluctuación de los niveles freáticos que afectan la concentración de sales en el suelo y compromete directamente a las actividades agrícolas y ganaderas (Taboada & Lavado, 2009; Puchulu et al., 2008). Este problema presenta una relevancia especial en la región de estudio, ya que las actividades primarias constituyen el principal sostén de la economía en el sudeste santiaguense. Durante los períodos de excesos hídricos el ambiente de monte contribuye a mantener la napa por debajo de niveles críticos, evitando de esta forma los anegamientos parciales y la salinización de suelos generada por el ascenso de agua freática salobre (Giraut et al., 2001). El avance y la intensificación de la actividad agropecuaria sobre estas áreas condujo a la habilitación de tierras relacionadas fundamentalmente con el monte y los pastizales naturales. En este contexto, la intensa actividad extractiva de las especies forestales ha llevado progresivamente a la degradación del bosque natural y a su reemplazo por especies arbustivas (Anriquez et al., 2005; Pérez-Carrera et al., 2008). Los desmontes parciales o totales en la región, han modificado profundamente las propiedades biológicas, físicas y químicas de los suelos, generando una alteración en los niveles de materia orgánica y nutrientes de los horizontes superficiales y afectando su estructura (Pérez-Carrera et al., 2008). Debe destacarse que uno de los principales efectos de la transformación de bosques y montes en superficies cultivables se vincula con la pérdida de carbono (C) y nitrógeno (N) orgánico. Si bien esta pérdida puede atribuirse en parte a la oxidación de la biomasa vegetal preexistente, el principal aporte está representado por procesos que ocurren a nivel del suelo, en particular en regiones donde la humedad y temperatura conducen a una alta tasa de mineralización. Otro de los efectos importantes del desmonte que llevan a un deterioro del ambiente es la pérdida del ingreso constante de N al suelo por fijación simbiótica de las leguminosas leñosas (*Prosopis* spp. y otras), dado que éstas representan la mayor proporción de los individuos leñosos en el monte (Verga et al., 2009). En la sistematización, es decir la habilitación de tierras para producciones agronómicas, es de suma importancia determinar a priori la calidad del suelo y sus limitantes naturales y agroecológicas, considerando las alternativas de uso a disposición. Los suelos poco desarrollados (perfiles edáficos escasamente diferenciados), con escasa cobertura vegetal y en posiciones topográficas determinadas, son más susceptibles a la erosión, ya que en general presentan texturas gruesas y bajos porcentajes de materia orgánica que limitan su estructuración. Como consecuencia, la actividad agrícola de estas tierras de baja aptitud conduce a una inevitable pérdida de su fertilidad (Georgiadis Rolandi et al., 2012). La cantidad y calidad de la materia orgánica, el contenido de nitrógeno, y la densidad aparente son algunas de las propiedades del suelo que condicionan su calidad (Harris & Bezdicek, 1994).

El empleo de prácticas de manejo del suelo modifica el ambiente edáfico, regulando los procesos y mecanismos que allí se producen (Power, 1994). De esta manera, las prácticas de manejo marcan la dirección y el grado de los cambios en la salud del suelo, y constituyen uno de los factores más importantes para contribuir al desarrollo de sistemas productivos sustentables (Lal, 2010).

La MO del suelo determina en gran medida las funciones del suelo, así como su integridad y perdurabilidad. Según Álvarez (1999) el balance de carbono puede obtenerse a partir de la estimación de la mineralización de la MO humificada, de los aportes de carbono que son transformados en humus del suelo, conjuntamente con las pérdidas por respiración radical y microbiana. Sobre estas estimaciones Álvarez (1999) estableció que la MO de los primeros 30 cm de los suelos es responsable del 83% del total de carbono respirado y estimó un coeficiente de mineralización medio del humus del 5,7% anual.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del desmonte total en lotes destinados a la producción agrícola y ganadera en el sudeste de Santiago del Estero sobre algunos indicadores de calidad del suelo y el balance de Carbono.

Materiales y Métodos

Área de estudio: El trabajo se desarrolló en un establecimiento agropecuario de 900 ha, con actividad mixta (agricultura y ganadería), ubicado en la localidad de Guardia Escolta, Partido de Bandera, Departamento General Belgrano en la Provincia de Santiago del Estero (29° 9'37.38"S; 62°11'22.53"O) (Figura 1). El área de estudio se encuentra comprendida dentro de la provincia fitogeográfica Subregión Chaco Húmedo. Esta subregión abarca los sectores del este de las provincias de Formosa y Chaco, el norte de Santa Fe y un pequeño sector del sudeste de Santiago del Estero (Morello y Adámoli, 1974; Cabrera y Wilink, 1980). El INTA denomina a esta zona como Chaco Subhúmedo (Cabrera, 1976). Las precipitaciones promedio anuales son de 850 mm y con marcada estacionalidad en primavera, verano y principios de otoño (régimen Monzónico), con inviernos secos que dependen del agua acumulada en el perfil del suelo durante el otoño. La temperatura promedio anual varía entre 18 y 23°C, las temperaturas medias de invierno y verano son 12 °C y 25°C, respectivamente. La temperatura máxima puede superar los 45 °C en verano y la mínima de -5°C en invierno, con un período libre de heladas de 270 días. La ocurrencia de heladas, teniendo en consideración eventos poco frecuentes, va desde fines de abril a mediados de octubre (Figura 2). La región se caracteriza por tener buenos sistemas de drenajes naturales. Los ríos Paraguay y Paraná son los que reciben la mayor parte del agua de escurrimiento, la combinación de clima húmedo y bien drenado da lugar a un paisaje con tierras altas que acompañan el curso de los ríos y se alternan con esteros y cañadas.

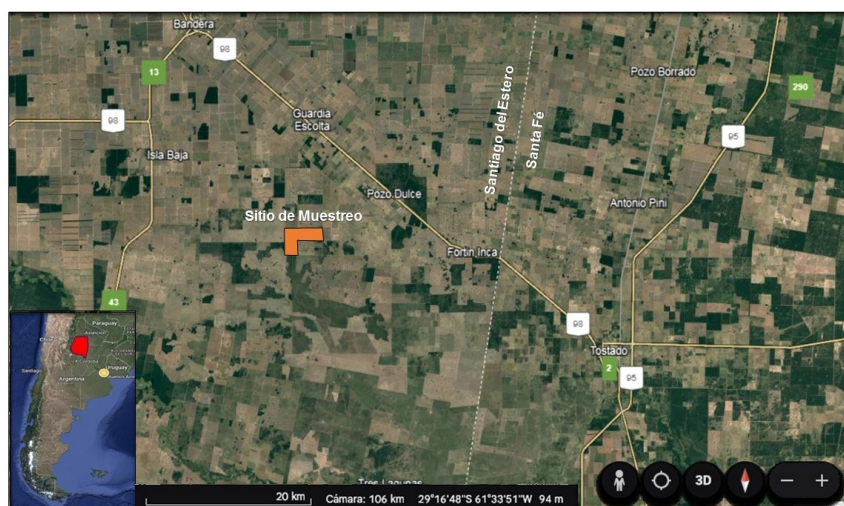


FIGURA 1 / FIGURE 1

Figura 1. Ubicación geográfica del sitio bajo estudio (Fuente Google Earth) /
 Figure 1. Geographic location of the studied site

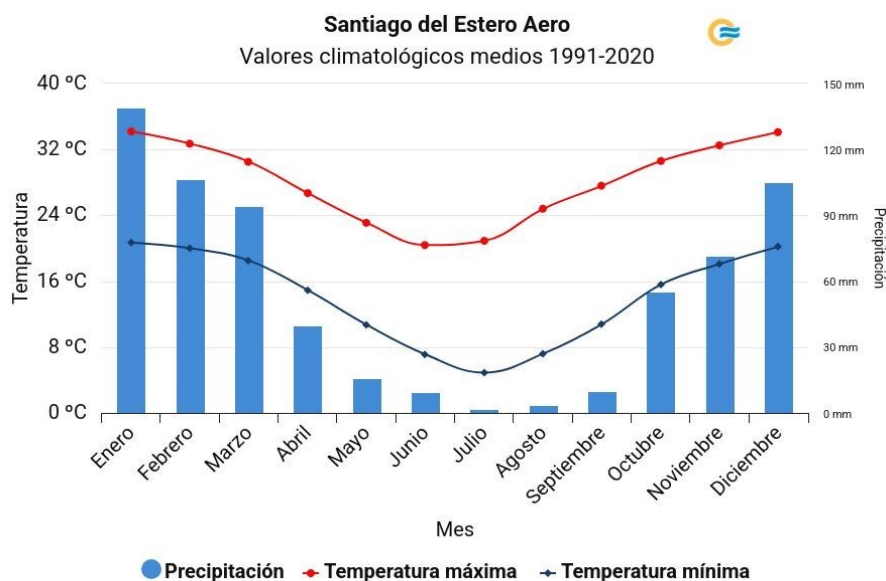


FIGURA 2 / FIGURE 2

Figura 2. Variación anual de Temperaturas y Precipitaciones para la zona de estudio. (Fuente: SMN) /
Figure 2. Annual variation of temperature and precipitation in the site under study.

Vegetación natural: La vegetación natural dominante es Bosque Chaqueño con inclusión de áreas de pastizal, la cual guarda estrecha relación con el paisaje. Se encuentran paisajes diferenciados en las planicies, planicies planocóncavas y los antiguos planos aluviales. En las planicies, la vegetación se caracteriza por un bosque abierto de mediana altura, compuesto por tres estratos de cobertura vegetal:

- El **estrato superior**, en forma natural está formado por especies leñosas como el Quebracho Blanco (*Aspidosperma quebracho blanco*), Algarrobo negro (*Prosopis nigra*), Brea (*Cercidium australe*), Mistol (*Zisophus mistol*), Sombra de toro (*Jodina rhombifolia*), predominantemente.
- El **estrato intermedio**, en condiciones naturales están presentes las leñosas como la Tusca (*Acacia aroma*), la Jarilla (*Larrea divaricata*), el Garabato (*Acacia* sp.), Atamisqui (*Atamisquia emarginata*), Piquillín (*Condalia microphylla*), Itín (*Prosopis kuntzei*), mayoritariamente.
- El **estrato inferior**, bajo condiciones sin disturbar está compuesto por especies herbáceas como *Trichloris crinata*, *Pappophorum mucronulatum*, *Digitaria californica*, entre otras de menor presencia.

Características productivas zonales: En la zona de estudio un alto porcentaje de las tierras se utiliza para agricultura extensiva de secano Soja (*Glycine max* L. MERR), Maíz (*Zea mays* L. sp.), Sorgo (*Sorghum vulgare*. MOENCH), Algodón (*Gossypium* L. sp.), Trigo (*Triticum aestivum*) con rendimientos promedio de 3 tn ha⁻¹ para soja, 8 tn ha⁻¹ para maíz, 4,8 tn ha⁻¹ para sorgo, 2,2 tn ha⁻¹ para girasol y 2,8 tn ha⁻¹ para trigo. La actividad ganadera predominante es la cría en ambientes de pastizales naturales, monte y parque. Asimismo, se puede realizar recría a base de pasturas implantadas con *Panicum maximum* Jacq. (Gatton Panic) y *Melilotus albus* (Trébol de olor blanco); además se pueden realizar verdeos de verano de *Sorghum vulgare* (Sorgo Forrajero) y silajes de planta entera de *Sorghum vulgare* (Sorgo Forrajero) y de planta entera de *Zea mays* (Maíz).

Estado de conservación del sistema: en el establecimiento en estudio, la sistematización de tierras para las actividades productivas se realizó a expensas del desmonte, fachinales y pajonales. El mismo se practicó manualmente de forma total para la agricultura y de manera selectiva, para ganadería. El sector ganadero no se utilizó por más de 10 años, permitiendo que el ambiente evolucione libremente. El mismo fue afectado por fuegos accidentales y de limpieza en 3 ocasiones. En los sectores que hemos delimitado y denominado silvo pastoriles se encuentra un bosque degradado en regeneración y las especies maderables que están presentes hoy en día son el algarrobo negro y el algarrobo blanco (*Neltuma nigra* y *Neltuma alba* GRISEB.), el quebracho blanco (*A. quebracho-blanco*) y con escasa presencia, quebracho colorado (*Schinopsis* sp.); todas estas especies están asociadas a un estrato arbustivo muy denso y a pasturas consociadas abandonadas de *P. maximum* Jacq. (Gatton Panic), *M. albus* y a pastizal natural en las zonas con menor densidad de árboles. El antiguo manejo ganadero de los lotes con presencia de monte no consideraba la dinámica de regeneración de las especies maderables de los individuos existentes, mayoritariamente algarrobos. La utilización de fuego como práctica de manejo forrajero, el pastoreo continuo y sumado al efecto del desmonte selectivo, generó el envejecimiento del bosque remanente, dando como resultado baja densidad de árboles por hectárea y presencia casi absoluta de individuos adultos. En el establecimiento el desmonte llevó a un número de 1 a 10 árboles/ha con un diámetro a altura de pecho mayor a 10 cm.

Marco legal: según el mapa de Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos de la provincia de Santiago del Estero, el establecimiento en estudio está ubicado en una zona que pertenece a un área en color blanco que, como proclama la Ley Nacional N° 26.331 (Ley de presupuestos mínimos de protección ambiental y de bosques nativos), corresponde a Áreas de no Bosques. Esta categoría no tiene restricciones en cuanto al uso de la tierra por su alto nivel de modificación, presentando escasa cantidad de recursos con interés de conservación. Según esta ley, se considera como “no bosques” a las zonas desmontadas, de uso agrícola, salinas, suelos salinizados, áreas de bañados, áreas urbanas y zonas que presentan una cobertura leñosa escasa y esparcida (Decreto N° 1830/08). **Suelos:** Los suelos predominantes son muy fértiles y productivos (Argiustoles típicos) con limitantes climáticas y leves limitaciones por drenaje (Carta de suelos del departamento Gral. Belgrano y Taboada, Santiago del Estero, INTA).

Como puede observarse en la Figura 3, los suelos predominantes en la zona pertenecen a la Unidad Fisiográfica Mktc-15 (Fuente: Visor GEOINTA), conformada por las series Tostado (60%) y Guardia Escolta (40%); corresponden a la Clasificación Taxonómica de Argiustol típico (posición explanadas) y Argiustol ustalfico (posición cubetas); familia arcillosa fina, illítica, térmica, con Capacidad de Uso correspondiente a la clase IIIc (Soil Survey Staff-USDA, 2010). Los suelos de la parte oriental de la planicie santiagueña, originados a partir de loess y sedimentos aluviales, presentan moderado desarrollo, con horizontes orgánicos relativamente espesos. Dentro de los sistemas fluviales de los ríos Salado y Dulce se observa una gama de suelos que va desde minerales hasta hidromórficos. A continuación, se describen las Series a las que pertenecen los sitios muestreados.

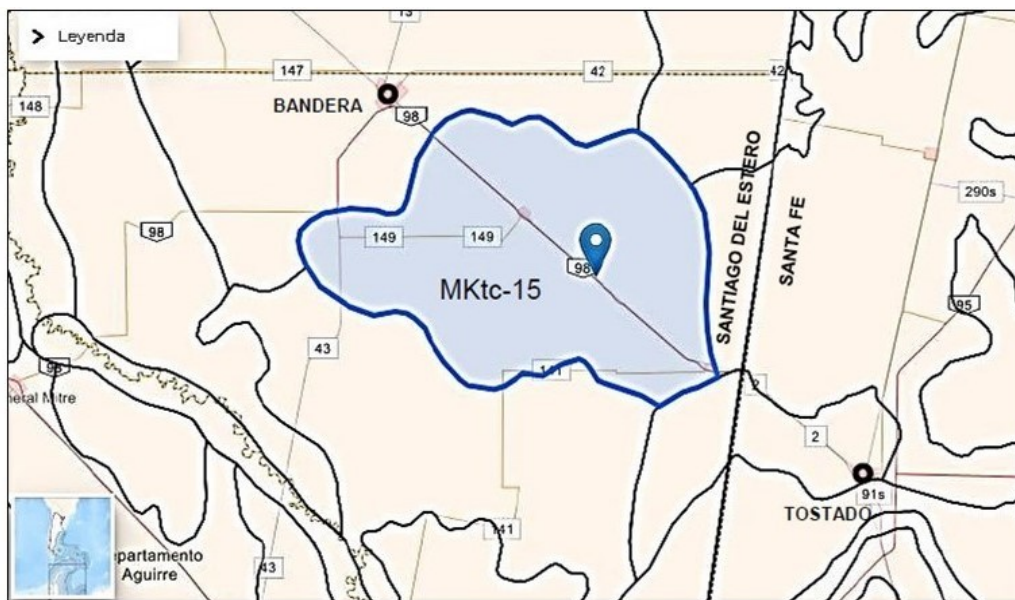


FIGURA 3 / FIGURE 3

Figura 3. Ubicación de la Unidad Cartográfica designada por INTA
(<https://geo-backend.inta.gob.ar/catalogue/#/dataset/230>) /

Figure 3. Geographic location of the Cartographic Unit designed by INTA.

Descripción del perfil típico de la Serie Tostado: Estos suelos ocupan los llanos periféricos al límite provincial de Santiago del Estero y Santa Fe; en estas planicies pueden aparecer perfiles mejor expresados, por lo que entendiendo a una consideración de carácter regional se ha propuesto el nombre Tostado, por la cercanía a dicha ciudad. Se clasifican como Argiustoles típicos de la familia arcillosa fina, mixta, térmica (Tabla 1). La pendiente es de 0 a 0,5 %. Se desarrolla sobre sedimentos holocenos y ocupa micro depresiones casi imperceptibles. Cuando forma complejos con la Serie Guardia Escolta, siempre está presente en las concavidades. La capa arable presenta color pardo oscuro, bien provisto de materia orgánica, de 20 a 45 cm de espesor, seguido de un endopedón argílico (B_t) de 90 cm de textura arcillosa. Es un suelo moderadamente bien drenado, aunque puede estar saturado en períodos cortos. Posee escurrimiento Grado 2 (Lento), y permeabilidad moderadamente lenta. No es un suelo salino ni alcalino.

TABLA 1 / TABLE 1

Tabla 1. Datos analíticos del perfil típico de cada una de las Series a las que corresponden los suelos del establecimiento. (Fuente: Carta de suelos de los Departamentos de Belgrano y Taboada, 1978). / **Table 1.** Analytical data of the typical profile of each of the Series to which the soils of the establishment correspond. (Source: Soil map of the Departments of Belgrano and Taboada, 1978).

HORIZONTES	Serie Tostado						Serie Guardia Escolta			
	Ap	A	Bt ₁	Bt ₂	Bt ₃	BC	Ap	A ₁	Bt ₁	Bt ₂
Profundidad (cm)	0-20	20-45	45-66	66-88	88-112	112-135	0-18	18-25	25-35	40-62
Materia orgánica (%)	4,44	3,05	1,03	0,68	0,62	-	2,67	2,05	1,43	0,68
Carbono Orgánico (%)	2,58	1,77	0,6	0,4	0,36	-	1,55	1,19	0,83	0,41
Nitrógeno total (%)	0,192	0,116	0,059	0,042	0,042	-	0,136	0,125	0,105	0,054
Relación C/N	13	15	10	10	9	-	11	10	8	7
Arcillas: > 2 µm (%)	35,1	32,1	40,4	41,1	41,6	38,8	32,4	34,5	38,1	35,3
Limos: 2 a 50 µm (%)	57,9	57,6	53,6	50,9	49,5	52,2	55,0	55,6	53,1	55,5
Arenas: 50 a 2000 µm (%)	7,0	10,3	6,0	8,0	8,9	9,0	12,6	9,9	8,8	9,2
Equivalente Humedad (%)	30,5	30,3	28,5	28,2	28,5	28,7	25,4	25,4	27,8	26,9
pH (1:2,5)	6,8	7,2	7,2	7,2	7,3	7,4	5,9	6,0	6,1	6,2
Calcio (meq/100 g suelo)	16,5	14,6	10,3	14,1	14,8	16,5	12,6	13,5	15,4	12,9
Magnesio (meq/100 g suelo)	4,4	5	5,3	6,4	5,5	3,7	4,2	4,0	4,1	4,7
Sodio (meq/100 g suelo)	0,4	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5	0,7	1,2
Potasio (meq/100 g suelo)	3,5	2,8	2,2	3,1	2,6	3,2	2,9	2,2	2,3	2,2
H ⁺ (meq/100g suelo)	6,6	5,5	4,8	3,2	2,8	2,8	5,8	4,6	4,6	3,4
S (meq/100 g suelo)	24,8	22,7	18,2	24	23,4	23,9	20,1	20,2	22,5	21,1
CIC (meq/100 g suelo) T	25,7	24,8	19,3	25,1	25,1	26,0	20,8	21,4	23,6	19,7

Descripción del perfil típico de la Serie Guardia Escolta: Estos suelos acompañan a los de la serie Tostado, formando asociaciones que no conforman áreas puras. Están ubicados en llanuras periféricas al límite provincial de Santiago del Estero y Santa Fe. La pendiente es cercana a 0 %, existiendo micro depresiones asociadas a la serie Tostado y micro elevaciones donde se encuentran estos suelos. Fueron clasificados según la Soil Survey Staff- USDA (2010) como Argiustoles ustálficos, familia arcillosa, fina, mixta, térmica. Poseen un horizonte superficial pardo grisáceo en húmedo, bien provisto de materia orgánica (Tabla 1). La capa próxima inferior se encuentra lavada, algo porosa y blanquecina entre los 25 y 30 cm de profundidad. A mayor profundidad se encuentra un horizonte arcilloso bien estructurado que, cercano al metro de profundidad suele estar endurecido y se pueden encontrar nódulos cementados de hierro y manganeso. Es un suelo moderadamente bien drenado, con escurrimiento Lento (Grado 2) y permeabilidad moderadamente lenta. No es un suelo salino ni alcalino. El horizonte arcilloso Bt₂ puede presentar estructura columnar. El horizonte BC de transición puede estar cementado. El horizonte eluvial (E), puede presentar espesores de hasta 10 cm.

Muestreo: Se realizó una subdivisión del establecimiento en ambientes según el uso del suelo que se denominaron Lote Viejo (LV), Lote Nuevo (LN) y Monte (M). El sitio LV corresponde a una sección donde se ha desmontado a mano hace más de 30 años y donde se realizó durante quince años un aprovechamiento agrícola utilizando la tecnología de siembra directa (trigo, girasol, sorgo, algodón, maíz y soja). El sitio LN fue desmontado hace quince años de la misma manera, se sembró sorgo mediante siembra convencional el primer año y luego se continuó con siembra directa. Por último, y para evaluar una situación testigo se comparó con el monte nativo en pie (sitio M). Se realizaron calicatas en cada uno de los ambientes estudiados para caracterizar el perfil típico (2 en LV, 3 en LN y 3 en M) (Figura 4).



FIGURA 4 / FIGURE 4

Figura 4. Imagen satelital del establecimiento con la ubicación de los lotes muestreados (<https://visor.inta.gob.ar/es#12.03/-29.12649/-62.13972/-176>) (Fuente: VISOR INTA GEO) / **Figure 4.** Satellite image of the studied establishment with the location of the sampled lots (Source: VISOR INTA GEO)

Se midieron las superficies de los distintos ambientes definidos, arrojando los siguientes valores: LV 216,7 ha., LN 253,3 ha. y M 430 ha. En cada uno de los ambientes, se planteó un muestreo a lo largo de transectas, donde se tomaron muestras compuestas de suelo superficial (0 a 30 cm) cada 100 m. Las muestras fueron secadas al aire y tamizadas con malla de 2 mm.

Caracterización físico química de las muestras: Se determinó Densidad aparente (Dap) utilizando el método del cilindro (Forsythe, 1975); porcentaje de Materia Orgánica (% MO) mediante el método de Walkley y Black (Page et al., 1982); nitrógeno Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1982); fósforo extractable (Kurtz y Bray, 1945); pH por método potenciométrico (relación 1:2,5) (Page et al., 1982); conductividad eléctrica en pasta (Page et al., 1982); capacidad de intercambio catiónico (Richter et al., 1982); sodio y potasio intercambiables por fotometría de llama; calcio y magnesio por extracción con $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$ 1N pH 7.0 y determinación por espectrofotometría de absorción atómica, y textura por método del densímetro (Bouyoucos, 1962).

Cálculo del Balance de Carbono: Álvarez (1999) estableció que el 83% del carbono respirado era aportado por la MO de los primeros 30 cm del suelo, estimando un coeficiente de mineralización medio del humus del 5,7% anual. Considerando los rendimientos promedio en la zona de los cultivos característicos informados en la Tabla 2 y los coeficientes determinados por Álvarez (1999), se calculó el aporte de Carbono Orgánico al suelo.

TABLA 2 / TABLE 2

Tabla 2. Rendimiento promedio obtenido las últimas campañas de los principales cultivos ($Tn\ ha^{-1}\ año^{-1}$), Coeficiente de aporte y Aporte de Carbono Orgánico ($Tn\ ha^{-1}\ año^{-1}$). / **Table 2.** Average yield in the last agricultural campaigns of the main crops ($Tn\ ha^{-1}\ year^{-1}$), Input coefficient and Organic Carbon Input ($Tn\ ha^{-1}\ year^{-1}$).

Cultivo	Rendimiento $Tn\ ha^{-1}\ año^{-1}$	Coeficiente.	CO $Tn\ ha^{-1}\ año^{-1}$
Maíz	$5,897 \pm 1,587$	0,21	1,287
Soja	$1,587 \pm 0,554$	0,37	0,587
Trigo	$1,876 \pm 0,652$	0,41	0,769
Sorgo	$3,983 \pm 1,023$	0,31	1,235
Girasol	$1,478 \pm 0,487$	0,41	0,606

Asimismo, se estimaron las pérdidas de C-CO₂ producidas por respiración radical y microbiana relacionadas directamente con los niveles de fertilidad de cada lote. Para ello se aplicó el Método de Carbono Simplificado (Álvarez, 2005), el cuál facilitó el cálculo de balance de carbono por cultivo y lote ($Tn.\ ha^{-1}.\ año^{-1}$). Los cálculos se realizaron utilizando la Ecuación 1:

$$\text{Ecuación 1. Balance de C (Tn. ha.}^{-1}\text{ año}^{-1}\text{)} = R \cdot CAH - CO \cdot CM$$

donde R indica el rendimiento del cultivo ($Tn.,\ ha^{-1}\ año^{-1}\ 14\ \%$ agua), CAH representa el Coeficiente de aporte, CO es el Carbono orgánico del suelo de 0 a 20 cm ($Tn.\ C.\ ha^{-1}$), y CM indica el Coeficiente de mineralización de la materia orgánica (0,057).

Análisis estadístico: las variables físicas y químicas determinadas en el suelo fueron comparadas mediante un Análisis de la Varianza (ANOVA) de un factor (sitio). En todos los casos se probó Normalidad por el test de Lilliefors y Homocedacea por el test de Levene. Los análisis estadísticos se realizaron usando StatSoft Inc. (2004). Se consideraron diferencias significativas $p < 0,05$.

Resultados y Discusión

El suelo del monte mostró un pH ligeramente ácido, mientras que los suelos de los lotes LN y LV presentaron valores de pH neutro (Tabla 3). El desmonte conduce a una pérdida de materia orgánica del suelo y con ello limita su capacidad para amortiguar los cambios de pH. Por otro lado, el cambio del uso del suelo a cultivo también incrementa el drenaje y favorece el ascenso de la napa freática con elevado contenido de sales. Estos factores en conjunto pueden llevar al aumento del pH respecto al suelo original. La conductividad eléctrica no difirió significativamente entre sitios, aunque en el sitio LN se encontró el mayor valor de CE media. Esto podría deberse a la alta heterogeneidad del paisaje en este sitio y a la presencia de micro depresiones que generan manchones salinos por acumulación de agua de drenaje proveniente de la escorrentía originada en posiciones más elevadas del paisaje. En este sentido, Giménez et al. (2017) trabajando en una zona cercana al sitio de este estudio, sostienen que en la zona la alta carga de sales en el perfil del suelo, la presencia de una napa freática salina relativamente cercana a la superficie y un relieve extremadamente plano son los principales factores que contribuyen a incrementar el riesgo de salinización. Además, la densidad aparente del estrato superficial del LV ($1,165\ g\ cm^{-3}$) fue significativamente superior ($p < 0,10$) a la de LN ($1,03\ g\ cm^{-3}$) (con pocos años de desmonte manual) y M ($1,027\ g\ cm^{-3}$) (sin intervenciones antrópicas de ningún tipo) (Tabla 3). La menor densidad aparente hallada en el sitio M, podría ser el resultado del mayor contenido de materia orgánica (un 48% mayor que los sitios disturbados) y a la menor perturbación y compactación del suelo por el manejo respecto a los sitios

LN y LV. Tomsic y Albanesi (2003) informaron que sitios de pastizal sometidos a desmonte selectivo manual y manejo silvopastoril, como en el sitio LN, no mostraban diferencias significativas de la Dap con respecto al monte natural. Por el contrario, Urinovsky Irigoyen et al. (2021), trabajando sobre el impacto del desmonte en sistemas análogos al de este trabajo, indicó que el desmonte y posterior uso agrícola bajo SD, provocaba cambios desfavorables como densificación, disminución de la capacidad del suelo para retener agua para los cultivos y disminución de la estabilidad de los agregados, impactando negativamente sobre la calidad física. Coincidiendo con este último, Ramsperger (1992), para suelos Entisoles con menos de 10 % de arcilla, informó un aumento significativo de la Dap en sitios sometidos a desmonte total y posterior uso agrícola convencional, como lo ocurrido en LV. Sin embargo, en todos los sitios estudiados, los valores de Dap resultaron inferiores al umbral ($1,2-1,6 \text{ g cm}^{-3}$) que representa un impedimento para el crecimiento radicular para suelos limosos (Reynolds et al., 2002). En los tres sitios la textura es franco-limosa con valores de arena entre 9 y 12%, de limo entre 71 y 74% y arcilla de 15 a 19%. La textura franco-limosa de estos suelos presenta algunas limitaciones en cuanto a su aprovechamiento agrícola que, sumado a la marcada estacionalidad de la lluvia, los hace muy vulnerables a procesos de degradación fisicoquímica (erosión eólica, erosión hídrica, etc.) frente a la eliminación de la cubierta vegetal. Un indicador que se utiliza a menudo para medir indirectamente la erosión del suelo es la estabilidad de los agregados, que mide la resistencia de los agregados del suelo (formados por materia orgánica, raíces e hifas micorríticas) a las fuerzas disruptivas (es decir, la erosión hídrica/eólica, la labranza y el riego). Los suelos con alta estabilidad de los agregados presentan menor vulnerabilidad frente a procesos erosivos y un mayor contenido de materia orgánica, infiltración, desarrollo radicular y emergencia de plántulas; sin embargo, este indicador es sensible a las prácticas de manejo agrícola (Yost et al., 2024). Estos autores informan que un elevado porcentaje de limo en los suelos produce una baja estabilidad estructural de los agregados. Según Kunst et al. (2003) la cobertura y estructura de esta vegetación reducen significativamente la oferta y la accesibilidad al forraje de origen herbáceo, por lo que el horizonte superficial del suelo puede estar compactado y/o cubierto de costras que impiden la infiltración del agua de lluvia y favorecen la escorrentía. Estos aspectos causan una reducción en la receptividad ganadera e influyen en forma negativa sobre la sustentabilidad ecológica y económica del sistema productivo.

TABLA 3 / TABLE

Tabla 3. Caracterización físico-química del horizonte superficial de los distintos sitios de muestreo (M: Monte; LN: Lote Nuevo; LV: Lote Viejo). Letras diferentes denotan diferencias significativas entre sitios. Letras diferentes denotan diferencias significativas ($p < 0,05$) / **Table 3.** Physicochemical characterization of the surface horizon of the different sampling sites. Different letters denote significant differences between sites. ($p < 0.05$)

PARAMETRO	Monte	Lote Nuevo	Lote Viejo
pH	6,3 ($\pm 0,2$) b	6,8 ($\pm 0,2$) a	7,3 ($\pm 0,2$) a
CE (dS m ⁻¹)	1,40 ($\pm 0,59$) a	2,73 ($\pm 1,26$) a	1,66 ($\pm 1,30$) a
Dap (g cm ⁻³)	1,027 ($\pm 0,067$) a	1,030 ($\pm 0,056$) a	1,165 ($\pm 0,007$) a
Materia Orgánica (%)	4,58 ($\pm 0,40$) a	2,34 ($\pm 0,14$) b	2,42 ($\pm 0,13$) b
Nitrógeno Kj (%)	0,138 ($\pm 0,015$) a	0,107 ($\pm 0,004$) b	0,110 ($\pm 0,008$) b
Carbono:Nitrógeno	19,7 ($\pm 0,4$) a	12,8 ($\pm 0,5$) b	13,1 ($\pm 1,3$) b
Fósforo Bray (ppm)	78,82 ($\pm 61,45$) a	46,06 ($\pm 4,27$) a	47,27 ($\pm 11,07$) a
Calcio (meq/100 g suelo)	11,35 ($\pm 2,78$) a	11,46 ($\pm 2,88$) a	12,28 ($\pm 0,22$) a
Magnesio (meq/100 g suelo)	1,67 ($\pm 0,45$) a	1,22 ($\pm 0,21$) a	0,78 ($\pm 0,22$) b
Sodio (meq/100 g suelo)	1,59 ($\pm 1,41$) a	0,94 ($\pm 0,17$) b	2,12 ($\pm 0,99$) a
Potasio (meq/100 g suelo)	2,44 ($\pm 1,94$) a	3,42 ($\pm 1,03$) a	2,98 ($\pm 1,22$) a
Acidez interc. (meq/100g suelo)	7,12 ($\pm 1,67$) b	12,6 ($\pm 2,41$) a	3,8 ($\pm 1,8$) c
Σ de Bases (meq/100g)	17,1 ($\pm 3,2$) a	17,0 ($\pm 2,15$) a	18,2 ($\pm 3,7$) a
Saturación con bases (%)	70,8 ($\pm 9,0$) b	56,7 ($\pm 3,0$) c	82,7 ($\pm 5,1$) a
CIC (meq/100g)	24,2 ($\pm 1,4$) a	29,6 ($\pm 7,7$) a	22,0 ($\pm 1,5$) a

Los niveles de materia orgánica de los sitios LN y LV resultaron significativamente inferiores a los del sitio Monte ($p < 0,01$), representando una pérdida de hasta el 49,3% del carbono fácilmente oxidable que poseían los suelos originalmente en esos sitios (Tabla 3). Los valores de % MO de los sitios LN y LV fueron moderadamente bajos en comparación a los contenidos del sitio prístino. Los valores determinados en los sitios disturbados son característicos de los suelos típicos de la zona, y levemente superiores a los datos reportados en la región centro-oeste de la provincia de Santa Fe (Revelli et al., 2010).

Lee et al. (2009) presentaron el método de masa de suelo equivalente (MSE) para corregir los cambios en la densidad aparente al estimar las reservas o la densidad de carbono del suelo. El método MSE de Ellert y Bethany (1995) intenta corregir las diferencias en la densidad aparente de diferentes fechas de muestreo calculando la masa de carbono del suelo en una masa equivalente de suelo por unidad de área. Esto se logra designando primero la masa de la capa de suelo más pesada como masa equivalente. La densidad de carbono de los muestreos posteriores se calcula estimando el espesor de la capa de suelo más profunda necesaria para alcanzar la masa equivalente. Lee et al. (2009) presentaron varios cálculos del método MES, para la contabilización del C, basamos la densidad de C en la masa del material mineral del suelo. Primero, calculamos la masa mineral de cada capa de muestreo a partir de la densidad aparente p_b (en kg m³), la fracción mineral f_{min} (kg kg⁻¹) y el espesor z (m) de la capa (Ecuación 2):

$$\text{Ecuación 2. } m = z \rho b f_{\min}$$

La fracción mineral puede estimarse a partir de la fracción del suelo que no constituye materia orgánica, se puede medir mediante el método de ignición, pero si no se cuenta con esta información, podemos utilizar el factor de van Bemmelen ($f_{\min} = 1 - [\text{CO} \times 1,724]$). Luego calculamos la masa acumulada (Ecuación 3) de cada capa M (en kg m^{-2}):

$$\text{Ecuación 3 } M_i = \sum_{l=1}^i M_l$$

Para el caso en estudio, los valores de la masa mineral promedio para cada sitio alcanzaron: 293,62, 301,68 y 340,34 kg m^{-2} promedio para el sitio M, LN y LV, respectivamente.

Mcbratney y Minasny (2010) consideran que el método de coordenadas del material es más fácil de aplicar que el método MSE. El método de coordenadas de masa es un método más formal y se ha utilizado para corregir cambios en el contenido de agua en suelos expandidos. Suponiendo, por supuesto, que los cambios de densidad son isótropos, el carbono se "mueve" junto con el material mineral, y de que no hay pérdida o ganancia de material en la superficie.

El stock de C (tn ha^{-1}) en los sitios LV (50,27 tn ha^{-1}) y LN (42,54 tn ha^{-1}) representó una disminución de entre el 40 y 49% con respecto a la situación de M (83,15 tn ha^{-1}) sin disturbar.

En suelos del noreste de Santiago del Estero, Koritko et al. (2019) encontraron que el cambio de uso del suelo de monte nativo caducifolio a sistemas agrícolas de labranza cero reducía el stock de carbono y aumentaba la tasa de mineralización debido a que tras el desmonte la cobertura es considerablemente menor y de mayor labilidad, lo que favorece la fotodegradación y estimula la oxidación de la materia orgánica. La reducida cobertura vegetal no protege al suelo del excesivo calentamiento, estimulando la mineralización del carbono y la formación de compuestos de mayor labilidad y más susceptibles a la degradación microbiana (Albanesi et al., 2003). De la misma manera, Heredia et al. (2006) hallaron importantes disminuciones en el contenido de carbono en suelos dedicados a la agricultura y estas diferencias fueron más marcadas en los primeros años de agricultura convencional. Vázquez Amabile et al. (2014) informaron que los lotes con cambio de uso de la tierra a agrícola o ganadero habían reducido aproximadamente en un 50% el contenido de MO superficial (0 - 25 cm) respecto de la situación inicial de monte nativo dentro de los primeros 10 años, a pesar de que esta situación parecía estabilizarse en ese nivel durante los años siguientes. En nuestro estudio, los niveles de MO superficial también parecieron estabilizarse después de 15 años de agricultura bajo siembra directa. Al realizar el análisis de stock de C la variabilidad de las determinaciones de Dap en los distintos sitios podrían estar enmascarando la evolución de la materia orgánica edáfica en el suelo. Efectivamente, Lee et al. (2009) trabajando sobre la determinación de stock de C de suelos ganaderos disturbados por la agricultura, determinaron que las estimaciones del stock de C del suelo a una profundidad fija son susceptibles a la variación espacial y temporal de la Dap. Finalmente, ante un evento de cambio en el uso del suelo de lotes con cobertura arbórea hacia una actividad puramente agrícola, incluso bajo siembra directa, producirá un incremento en la Dap, que incrementaría el valor del stock de C, conjuntamente con una disminución sustancial del contenido de C total que produciría un efecto contrario.

Los niveles medios de nitrógeno resultaron muy deficitarios en los tres sitios (Tabla 3). Estos resultados son comunes en los suelos de la región, lo cual resalta la importancia estratégica de fertilizar con nitrógeno con el objetivo de mejorar los rendimientos de los principales cultivos agrícolas (Pilatti y De Orellana, 2011). Los contenidos de nitrógeno de M resultaron levemente superiores ($p < 0,05$) a los hallados en LN y LV. Sin embargo, la relación C:N obtenida en M fue muy superior a la de los sitios LN y LV (Tabla 2), resaltando la drástica disminución del contenido de carbono total en relación al nitrógeno. Marelli et al. (2007) mencionan que los valores de la relación C:N por encima de 10:1 o 12:1, provocarían liberaciones muy escasas de nitrógeno. La tasa

de descomposición de los residuos y la cantidad de nutrientes liberados al suelo están, en parte, reguladas por la relación C:N de los mismos.

Los microorganismos celulolíticos y nitrificadores del suelo están asociados al ciclado del C y N, ya que actúan sobre la celulosa descomponiéndola en sustancias menos complejas. Esta actividad metabólica cobra importancia en la descomposición de los residuos aportados al suelo, debido a que están compuestos por celulosa, lignina y otros polifenoles. Por otra parte, los nitrificadores cumplen un rol muy importante en el ciclado del N, obteniendo energía a partir de la oxidación del amonio (Gregorutti y Caviglia, 2021). Según Carranza et al. (2012) la acumulación constante de restos de leñosas, como se observa en el sitio M, se descomponen más lentamente que los residuos agrícolas por su elevado contenido de fibras y compuestos fenólicos lo que favorece la formación de sustancias húmicas en el suelo.

El P extractable (P Bray), en el sitio M mostró el mayor valor promedio, y resultó significativamente mayor al de los restantes sitios de muestreo (Tabla 3). Según Vázquez Amabile et al. (2014), comparando lotes que habían sufrido un cambio en el uso del suelo, los valores de P extractable mostrarían una correlación con la MO, presentando niveles inferiores en la situación de uso agrícola pos desmonte (LN y LV), lo cual se explicaría por la extracción de P de los cultivos y la disminución del contenido de la MO del suelo respecto a la situación prístina original.

A pesar de la disminución en el contenido de materia orgánica de los suelos de los sitios LN y LV respecto de M, la CIC no mostró diferencias significativas (Tabla 3). La materia orgánica fresca que ingresa al suelo puede sufrir dos tipos diferentes de transformación. Por una parte, la mineralización hacia elementos simples como CO₂ y nutrientes minerales, y por otro lado la humificación hacia compuestos orgánicos de mayor complejidad (compuestos húmicos). Esta humificación afecta la CIC al aumentar la densidad de grupos funcionales por unidad de biomasa. La materia orgánica humificada favorece la estructuración del suelo, mejora la infiltración y percolación del agua de precipitación.

Según Koritko et al. (2019), el cambio de uso de suelo de M a SD produce disminuciones significativas de carbono orgánico como consecuencia del incremento en la tasa de mineralización. Los mismos resultados fueron reportados por Abril et al. (2013) en sistemas con SD y por Albanesi et al. (2003) para los mismos ambientes de este estudio y con agricultura convencional. En estos ambientes, el cambio de uso de suelo de monte nativo polifítico caducifolio a sistemas agrícolas de labranza cero reduce el stock de C y las formas de mayor labilidad, ya que el desmonte total provoca que los procesos de mineralización del carbono del suelo aumenten debido a las diferencias en cantidad y calidad de residuos de hojarasca que ingresan al suelo, siendo los residuos de cultivos de menor cuantía y mayor labilidad. Ello constituye un riesgo importante para la conservación de los ecosistemas del Chaco semiárido, con énfasis en el recurso suelo como sustento de la productividad primaria y confirma la susceptibilidad de estos ecosistemas ante disturbios como la deforestación.

La relación MO/ (arcilla + limo) expone la importancia relativa de la pérdida de MO en función de la textura, es decir que cuanto mayor sea este cociente, mejores serán las condiciones de crecimiento para las plantas. Los valores de P extractable mostraron una correlación positiva ($R^2 = 0,5138$; $p < 0,01$) con el cociente MO/(arcilla + limo) (Figura 5a), presentando niveles inferiores en la situación de uso agrícola post desmonte, por la extracción de P de los cultivos y la disminución del contenido de la MO del suelo respecto a la situación de Monte Nativo. También se estableció una correlación positiva ($R^2 = 0,8846$; $p < 0,01$) entre la concentración de N Kjeldahl y la relación MO/ (arcilla + limo) (Figura 5b). Vázquez Amabile et al. (2014) quienes trabajaron en una zona cercana bajo el mismo manejo, encontraron una tendencia muy similar a la de nuestro trabajo. Quiroga et al. (2006) establecieron que el rendimiento de la cebada cervecera y la eficiencia en el uso del agua estaban fuertemente afectados por la relación MO/ (arcilla + limo), ya que este indicador no sólo refleja la disponibilidad de nutrientes, sino que permite integrar las condiciones físicas del suelo relacionadas con el agua del cultivo, y por lo tanto lo consideraron un mejor predictor del rendimiento en la región pampeana semiárida que la disponibilidad de nutrientes o el %MO por sí solo.

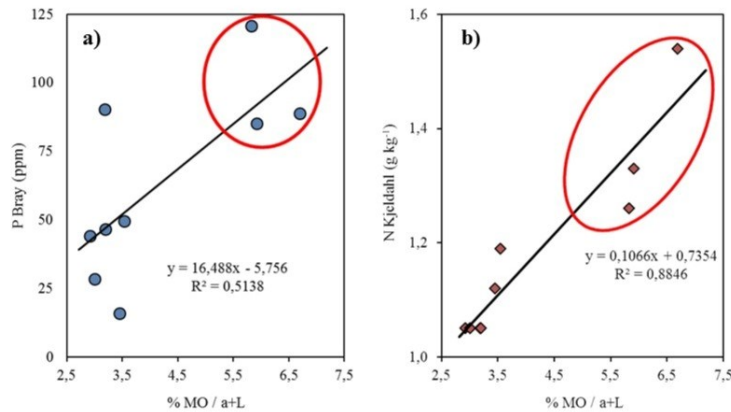


FIGURA 5 / FIGURE 5

Figura 5. a) Regresión lineal entre % MO/ (a +L) y el P Bray y **b)** % MO/ a +L y el N Kjeldahl. (Marcadores rojos corresponden al sitio M) / **Figure 5. a)** Linear regression between % OM / (c+S) and P Bray, and **b)** % OM / (c+S) and Kjeldahl N. (Red marks correspond to M sites)

Balance de Carbono: El impacto de las prácticas de desmonte total sobre la calidad del suelo en ambientes homólogos a los de este estudio ha sido estudiada repetidas veces. La aplicación de prácticas de manejo en el suelo modifica el ambiente edáfico, así como también conduce a la regulación, orientación, inhibición, o estimulación de los procesos y mecanismos que en él ocurren (De Siervi et al., 2023). En este sentido, las prácticas de manejo marcan principalmente la dirección y el grado de los cambios, en el tiempo y en el espacio, de la salud del suelo, constituyendo uno de los factores más importantes que contribuye al desarrollo de los sistemas productivos sustentables (Lal, 2010). El contenido de materia orgánica edáfica condiciona gran parte de las funciones del suelo y su integridad y perdurabilidad. La estimación del balance de carbono se obtiene a partir de la tasa de mineralización de la MO humificada, de los aportes de carbono que son transformados en humus (Álvarez, 1999), conjuntamente con las pérdidas por respiración radical y microbiana.

Los resultados obtenidos en el balance de carbono (Figura 6), muestran claramente el efecto del desmonte y el posterior cambio en el uso del suelo. Los balances de carbono estimados para el primer año con posterioridad al desmonte prácticamente duplican las pérdidas por respiración (considerando el aporte realizado por los distintos cultivos analizados) de los lotes con mayor historia agrícola. A mayor fertilidad edáfica mayor productividad primaria neta que debe generar el sistema para sostener mayores volúmenes de biomasa microbiana y mantener el balance de carbono de cada suelo estabilizado mientras se encuentre bajo producción, evitando la caída de la productividad por degradación del recurso edáfico. Altieri (1987) sostiene que la productividad se relaciona directamente con la magnitud del flujo, la movilización y la conservación de los nutrientes del suelo, que, a su vez, depende de la provisión continua de materia orgánica y de la promoción de la actividad biológica del suelo.

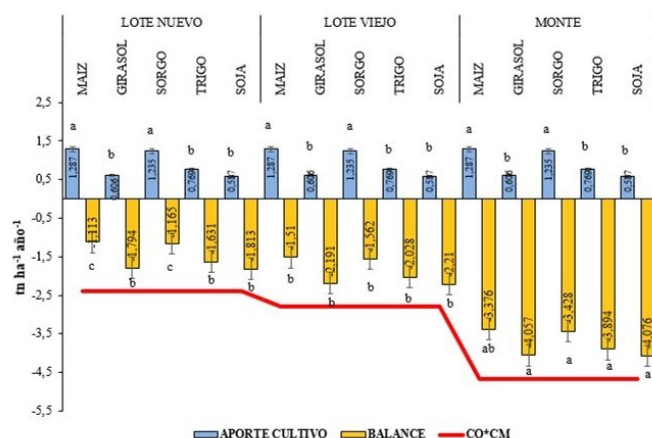


FIGURA 6 / FIGURE 6

Figura 6. Comparación de los aportes de carbono ($Tn\ ha^{-1}a\tilde{no}^{-1}$) de distintos cultivos (SOJA, TRIGO, SORGO, GIRASOL Y MAIZ) con el CO Mineralizado anualmente (CO.CM), y los Balances calculados para cada ambiente y para cada cultivo, basado en el Balance de Carbono Simplificado (Álvarez, et al., 2013). Letras iguales indican que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$). / **Figure 6.** Organic Carbon Input Comparison ($Tn\ ha^{-1}year^{-1}$) of the main crops (SOYBEAN, WHEAT, SORGHUM, SUNFLOWER SEED AND CORN) with the annually mineralized OC (CO.CM), and the calculated Balances for each lot and crop, based in the Simplified Carbon Balance (Álvarez, et al., 2013). Same letter means no significant difference ($p > 0,05$).

Las prácticas de manejo permitirían ajustar no sólo la cantidad de C que debe devolverse al suelo y el momento más conveniente, sino que además facilitarían el control de diferentes aspectos que afectan la magnitud de los mecanismos de salida por su incidencia sobre la actividad biológica en el suelo y su exposición a los procesos de degradación (ej. erosión) (Quiroga y Studdert, 2015). Este último autor informó que la SD presenta importantes ventajas para mejorar el uso de agua por parte de los cultivos, relacionadas principalmente con los niveles de cobertura influenciados por el cultivo antecesor, el sistema de labranza y el uso de los residuos por la ganadería. Según Urinovsky Irigoyen et al. (2021), el desmonte y posterior uso agrícola bajo SD provoca cambios desfavorables como densificación, disminución de la capacidad del suelo para retener agua para los cultivos y disminución de la estabilidad de los agregados, impactando negativamente sobre su calidad física. Para los lotes evaluados en este establecimiento, y en referencia a los rendimientos esperables y el aporte de residuos de cosecha, el maíz y el sorgo representarían las opciones menos perniciosas por su mayor aporte de biomasa de todos los cultivos involucrados (Figura 6). Las estimaciones realizadas teniendo en cuenta las pérdidas de C en base a la concentración de MO actual de los lotes y las ganancias en base a los aportes de C tomando en cuenta los promedios de rendimientos de cada cultivo y sus coeficientes de aporte, supondrían un control total del crecimiento de la vegetación espontánea (herbácea y renovales leñosos). Pero los recursos utilizados por las malezas para producir tal biomasa (agua, nutrientes y radiación solar), son sustraídos a los cultivos de renta (cultivos de grano y forraje), genéticamente más eficientes para utilizarlos. La regulación de las ganancias y pérdidas de C del sistema suelo es quizás la herramienta más importante para regular los niveles de MO del mismo. De Siervi et al. (2023), utilizando el mismo balance en un establecimiento del SE cordobés, establecieron que el manejo de la dinámica de la MO del suelo debería basarse en tomar decisiones tendientes a regular los mecanismos que determinan los flujos de entrada y salida de C, sobre todo luego de un desmonte y posterior sistematización del terreno para su incorporación a la actividad agrícola.

Según Alvarez (1999), el coeficiente de aporte de C del maíz correspondería a 0,21, y siendo el rendimiento promedio del establecimiento de $5.897\ kg\ ha^{-1}$ para este cultivo, el aporte alcanzaría a $1,23\ tn\ ha^{-1}\ año^{-1}$. El balance de C para este cultivo en el sitio M representaría una pérdida de casi $3,4\ tn\ ha^{-1}\ año^{-1}$, en el caso hipotético de la



incorporación de una superficie de Monte a la rotación agrícola. Comparativamente, LN y LV se encontrarían soportando una pérdida de 1,13 y 1,51 $\text{tn ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ para el mismo cultivo. Para el caso del sorgo, las pérdidas serían muy similares, representando 1,165, 1,562 y 3,428 $\text{tn ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ respectivamente. El resto de los cultivos (soja, girasol y trigo), al no aportar tanta biomasa en raíces y rastrojos, muestran un Balance de C mucho más negativo. Según Abril et al. (2013), la alta variación de la pérdida de C podría deberse al estado de la vegetación de los campos desmontados y a la cantidad de años bajo siembra directa. Por ejemplo, algunos datos corresponden a desmontes de sitios altamente degradados por sobrepastoreo, mientras que otros son desmontes de bosques sin perturbar. Asimismo, los casos analizados varían entre 1 y 10 años de agricultura con siembra directa. Los casos con menores pérdidas de C corresponden a sitios de bosque original recientemente desmontados, debido a la permanencia de gran cantidad de restos de leñosos de mayor calidad de humificación que los rastrojos de los cultivos (Abril et al., 2005).

Los suelos bajo estudio poseen ventajas comparativas para la agricultura en lo referente a una muy buena retención hídrica y una alta fertilidad química potencial. Sin embargo, entre las desventajas relativas podemos incluir características determinantes como la cobertura arbórea original (son suelos predominantemente forestales), el régimen de humedad de los suelos, la presencia de pseudomicelios cálcicos a poca profundidad (que denotan un drenaje imperfecto), entre otros. El régimen de humedad de estos suelos es ústico, lo cual implicaría que la sección de control se encuentra húmeda menos de 180 días acumulativos al año y seca (por debajo del Punto de Marchitez Permanente) más de 90 días acumulativos al año, principalmente durante el fin del otoño e invierno. Los pseudomicelios cálcicos se forman a lo largo de los canales de lombrices de tierra solo en los molisoles evolucionados en tiempos modernos (Kovda et al., 2009). La formación de estas estructuras implica procesos complejos de disolución (meteorización), translocación y precipitación. El carbonato litogénico se disuelve en condiciones de humedad ambiental y una presión parcial de CO_2 en el suelo relativamente alta, y los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} y CO_3^{2-} disueltos se desplazan hacia abajo con el agua del suelo que se filtra. A medida que disminuye el contenido de humedad, la calcita precipita. La disponibilidad de agua junto con la vegetación, que crea una mayor respiración del suelo y proporciona una acidez adicional, controlan la disolución/precipitación del carbonato de calcio en los suelos (Khormali et al., 2006). Estas estructuras encontradas en los perfiles de los suelos muestreados podrían estar mostrando la elevada variabilidad de la oferta de humedad en el suelo para los cultivos. En efecto, Conti et al. (2014) encontraron en suelos de una zona cercana, que por debajo de los 100 cm de profundidad, el carbono inorgánico del suelo supera cuatro veces al carbono orgánico. Este aumento en el contenido de carbonatos con la profundidad sería un patrón común en los ecosistemas áridos y semiáridos a nivel mundial. Si bien este depósito inorgánico del suelo se considera comúnmente un compartimento relativamente estable, estos autores indican que la conversión del uso del suelo redujo significativamente el contenido de carbonato de calcio de los suelos, principalmente en la capa de suelo de 30 a 200 cm. El cambio en el uso del suelo afecta la dinámica hídrica, al disminuir el consumo de agua debido a la remoción de biomasa, lo que podría incrementar la lixiviación y disolución de carbonatos en el suelo.

Por último, y no menos importante, el elevado contenido de limo de estos suelos requiere una cuidada planificación de la rotación de cultivos, la inclusión de cultivos de servicio para garantizar la cobertura permanente del suelo, evitando el inicio de procesos de erosión hídrica y/o eólica. En este sentido, Khormali et al. (2009) establecieron que la reducción de la MO tras la deforestación influye en la respiración microbiana del suelo, el cual es un importante indicador de su calidad biológica, ya que la actividad microbiana en suelos bajo bosques naturales se relaciona con mayores niveles de C orgánico disponible. Por lo tanto, el cambio de uso del suelo influye considerablemente en muchos atributos de la calidad del suelo, principalmente a través de su efecto sobre la materia orgánica. La estabilidad estructural de los suelos se ve afectada por el uso del suelo, que a su vez se asocia positivamente con el contenido total de C orgánico. De esta manera, la pérdida severa de C sumado a elevados contenidos de limo, la disminución de la actividad microbiana y el uso de maquinaria pesada fueron los principales factores responsables de la disminución del diámetro promedio ponderado de los agregados después de la deforestación.

Conclusiones: Los resultados obtenidos concuerdan con investigaciones realizadas en sitios similares, encontrándose un efecto en las prácticas de desmonte y posterior uso agrícola. El contenido superficial de limo sumado a la marcada estacionalidad de las lluvias limitaría las posibilidades de su utilización agrícola. La relación %MO/ (arcilla + limo) integra las condiciones físicas del suelo relacionadas con la disponibilidad de agua y nutrientes para los cultivos. Al calcular el stock de C presente en cada suelo a una profundidad de 0-30 cm, se corroboró una disminución considerable en los sitios LV (50,27 tn ha⁻¹), LN (42,54 tn ha⁻¹), con respecto a la situación prístina de M (83,15 tn ha⁻¹), sin disturbar. Esto representa una disminución de un 49% en el caso de LN y de un 40% en el LV.

El método utilizado para estimar el Balance de Carbono nos permitiría afirmar que el impacto del desmonte sobre el CO en los primeros años es determinante y se deben implementar prácticas tendientes a recuperar, en la medida de lo posible, los niveles originales de fertilidad física y química. Se espera generar información valiosa sobre la utilización de áreas desmontadas pertenecientes al Chaco Semiárido con fines agrícolas, a expensas de ambientes con suelos predominantemente forestales y poca aptitud agrícola.

Referencias

- Albanesi A., Anriquez A., Polo Sanchez A. (2003). Efectos de la agricultura convencional sobre algunas formas del C en una toposecuencia de la Región Chaqueña, Argentina. *Agriscientia* 20: 9-17.
- Abril A., P. Salas, E. Lovera, S. Kopp y N. Casado-Murillo (2005) Efecto acumulativo de la siembra directa sobre las características del suelo en la región semiárida central de Argentina. *Ciencia del Suelo*, 23: 179-188.
- Abril, A. Merlo C., Noe, L. (2013) Realistic soil C sink estimate in dry forests of western Argentina based on humic substance content, *Journal of Arid Environments*, Volume 91, Pages 113-118, ISSN 0140-1963, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.12.009>.
- Altieri, M.A. (1987) *Agroecology, the scientific basis of alternative agriculture*. Westview Pass, Boulder. 227pp.
- Alvarez, R. (1999) *Uso de modelos de balance para determinar los requerimientos de fertilizantes nitrogenado de trigo y maíz*. EUDEBA. 58 pp.
- Álvarez, R. (2005) Balance de carbono en suelos de la pampa ondulada: efecto de la rotación de cultivos y fertilización nitrogenada. *Actas Simposio Fertilidad 2005, Argentina*. 61-70 pp.
- Alvarez R. (2013) Cambios en los stocks de carbono de los suelos pampeanos por el uso. En: Tercera Jornada del Instituto de Investigaciones en Biociencias Agrícolas y Ambientales. Eds. M Díaz Zorita, O. Correa, M. Fernandez Caniglia y R. Lavado. Editorial FAUBA, pág. 29-38.
- Anriquez A, Albanesi A, Kunst C, Ledesma R, López C, Rodríguez Torres A, Godoy J. (2005). Rolado de fachinales y calidad de suelos en el Chaco Occidental, Argentina. *CI SUELO (Argentina)* 23(2): 145-157.
- Bouyoucos GJ (1962) Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron J* 54: 464-465.
- Bremner JM, Mulvaney CS (1982) *Methods of soil analysis, part 2 chemical and microbiological properties*, 595-624.
- Cabrera AL. (1976) *Regiones Fitogeográficas Argentinas*. Fascículo I, Tomo II. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Editorial ACME SACI, Buenos Aires. 85 pp.
- Cabrera AL, Willink A. (1980) *Biogeografía de América Latina*. 1-4: 1- 120, f. 1-25. Serie Biol Monogr 132, OEA, Washington, D.C.
- Carranza, C., Noe, L. Merlo, C. & Ledesma, M., Abril, A. (2012). Efecto del tipo de desmonte sobre la descomposición de pastos nativos e introducidos en el Chaco Árido de la Argentina. *RIA: Revista Investigaciones Agropecuarias*. 38.

- Conti, G., Pérez-Harguindeguy, N., Quétier, F., Gorné, L., Jaureguiberry, P., Bertone, G., Enrico, L., Cuchietti, A., Diaz, S. (2014). Large changes in carbon storage under different land-use regimes in subtropical seasonally dry forests of southern South America. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 197. 68-76. 10.1016/j.agee.2014.07.025.
- De Servi, M. S., Grandoli, I., Fabrizio de Iorio, A. (2023). Estudio del impacto de la producción orgánica en planteos mixtos (agrícola-ganaderos) sobre algunos indicadores de calidad del suelo. *FAVE Sección Ciencias Agrarias*, 22, e0001. <https://doi.org/10.14409/fa.2023.22.e0001>
- Ellert, B.H., Bethany, J.R., (1995). Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science* 75, 529–538.
- Forsythe W. (1975) *Manual de Laboratorio de física de suelos*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José de Costa Rica. Pp 39-45.
- Georgiadis Rolandi P, Arreghini S, De Servi M, Serafini R, Fabrizio de Iorio A. (2012) Caracterización de suelos de desmonte del sudeste santiagueño. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo “Latinoamérica unida protegiendo sus suelos”. Mar del Plata, Argentina. 16 al 20 de abril de 2012.
- Giménez R., Mercau, J., Nosetto M., Páez R., Marchesini V., Jobbágy E. (2017) Indicios de salinización secundaria en el sudeste santiagueño: ¿la punta de un iceberg para la sustentabilidad de la agricultura en el chaco semiárido?; V Reunión de la Red Argentina de Salinidad; Villa Mercedes; Argentina; 2017; 226-231
- Giraut M, Laboranti E, Rey C, Fioriti M, Ludueña S. (2001) Cuenca Propia de los Bajos Submeridionales. Creación de una unidad hídrica independiente. En: Seminario Argentino-Holandés. Gestión Sostenible del Agua y Control de Inundaciones. Área Pampeana Central y Bajos Submeridionales. 24 y 25 de abril de 2001. Buenos Aires, Argentina. https://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/pdf/22_nueva.pdf.
- Gregorutti V., Caviglia O. (2021) Aportes de residuos de cultivos de cobertura y enmiendas orgánicas: efecto sobre nitrificadores y celulolíticos; Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo; *Ciencia del Suelo*; 39; 1; 7-2021; 39-62
- Harris R, Bezdicek D. (1994) Descriptive aspects of soil quality/health. In: Doran JW; DC Coleman; DF Bezdicek & BA Stewart (eds). *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSa Special Publication Number 5. Madison, Wisconsin, USA. Pp 23-35.
- Heredia, O; L Giuffre; F Gorleri & ME Conti (2006) Calidad de los suelos del norte de Santa Fe: Efecto de la geomorfología y uso de la tierra. *Ciencia del suelo* 24(2): 109-114.
- Koritko, L.M., Suárez, R.A., Anriquez, A.L., Pece, M., & Albanesi, A.S. (2019) Efecto de la siembra directa en la estabilización del carbono orgánico del suelo a escala de sitio en Santiago del Estero, Argentina. *Revista agronómica del noroeste argentino*, 39(1), 9-18.
- Khormali F., Abtahi A., Stoops G. (2006) Micromorphology of calcitic features in highly calcareous soils of Fars Province, Southern Iran, *Geoderma*, Volume 132, Issues 1–2, 2006, Pages 31-46, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.04.024>.
- Khormali F., Ajami M., Ayoubi S., Srinivasarao Ch., Wani S.P., (2009) Role of deforestation and hillslope position on soil quality attributes of loess-derived soils in Golestan province, Iran, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 134, Issues 3–4, 2009, Pages 178-189, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.06.017>.
- Kovda, I., Sycheva, S., Lebedeva, M. & Inozemtzev, S. (2009). Variability of carbonate pedofeatures in a loess-paleosol sequence and their use for paleoreconstructions. *Journal of Mountain Science*. 6. 155-161. 10.1007/s11629-009-1032-4.
- Kunst, Carlos & Bravo, Sandra (2003) *Ecología y régimen de fuego en la región chaqueña argentina*. In book: *Fuego en Ecosistemas Argentinos - Ediciones INTA Capítulo 10*

- Kurtz LT, Bray RH (1945) Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci* 59: 39-45.
- Lal, Rattan (2010) Managing Soils and Ecosystems for Mitigating Anthropogenic Carbon Emissions and Advancing Global Food Security. *BioScience* 10.1525/bio.2010.60.9.8/ pp. 708-721. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.8>
- Lee, J.; Hopmans, J.; Rolston, D., Baer, S., Six, J. (2009). Determining soil carbon stock changes: Simple bulk density corrections fail (vol 134, pg 251, 2009). *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 134. 251-256. 10.1016/j.agee.2009.07.006.
- Marelli, H., J. Arce, B. Masiero, C. Lorenzón, P. Marelli. 2007. Relación entre variables químicas del suelo y del sedimento erosionado. Informe de investigación, EEA Marcos Juárez-Córdoba, INTA.
- Mcbratney, A. , Minasny, B. (2010). Comment on Determining soil carbon stock changes: Simple bulk density corrections fail [Agric. Ecosyst. Environ. 134 (2009) 251-256]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 136. 185-186. 10.1016/j.agee.2009.12.010.
- Morello J, Adámoli J. (1974) Las Grandes Unidades de vegetación y ambiente del Chaco argentino. Segunda parte. Vegetación y Ambiente de la Provincia del Chaco. La vegetación de la República Argentina, Serie Fitogeográfica 13, 130 p.
- Page AL, Miller DH, Keeney DR (eds) (1982) *Methods of Soil Analysis, Part 2*. ASA SSSA, Madison, Wi. USA.
- Paruelo JM, Guerschman JP, Verón SR (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy* 15(87): 14-23.
- Pérez-Carrera A, Moscuza CH, Fernández-Cirelli A. (2008) Efectos socioeconómicos y ambientales de la expansión agropecuaria. Estudio de caso: Santiago del Estero, Argentina. *Ecosistemas* 17(1): 5-15.
- Pilatti, Miguel & DE Orellana, Jorge (2011) Suelos Ideales para Agricultura Sostenible. FAVE Sección Ciencias Agrarias. 11. 10.14409/fa.v11i1.4146.
- Power, J. (1994) Understanding the nutrient cycling process. *J. Soil Sci.* 15:205-241 pp. Page, A., (1982) *Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. Second Edition. American Society of agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Wisconsin, USA. 1143 pp. Puchulu ME, Hidalgo M del V (2009) Dinámica anual de la freática y su relación con la salinidad. Tucumán. Primer Congreso de la Red Argentina de Salinidad, Córdoba, 11 al 13 de marzo.
- Puchulu, M. E.; C. Moreno y M. Hidalgo (2008) Zonificación espacial de la composición química del agua freática en el sudeste de la provincia de Tucumán. *Actas XXVII Congreso Argentino de Química*. “Dr. Pedro José Aymonino”, Tucumán (Argentina), 17 a 19 de septiembre de 2008
- Quiroga A., Funaro D., Noellemeyer E. and Peinemann N. (2006) Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*. Vol. 90 number 1 Pag. 63-68. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.08.019>
- Quiroga, A. & Studdert, A. (2015) Manejo del suelo e intensificación Agrícola: agua y material orgánica. En: Echeverría, h. & García, F. (eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. 73-100 pp.
- Ramsperger, B. (1992) Alteraciones de la condición del suelo debido a un cambio en el uso agrícola. Caso particular: Regosoles en el Chaco seco, Argentina. Tesis de Grado. Convenio UNSE-GTZ. Univ. de Hohenheim, Alemania. Stuttgart-Hohenheim, Alemania. 112 p.
- Revelli, G., Gagliardi, R., Sbodio, O., Tercero, E. (2010) Propiedades fisicoquímicas en suelos predominantes del noroeste de Santa Fe y sur de Santiago del Estero, Argentina. *Ciencia del suelo*. 28. 123-130.

- Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Drury, C.F., Tan, C.S., Lu, X. (2002) Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110, 131–146 (21) (PDF) Use of indicators of pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality.
- Richter M, Conti M, Maccarini G. (1982) Mejoras en la determinación de Cationes intercambiables, ácidos intercambiables y capacidad de intercambio catiónico en suelos. *Rev Facultad de Agronomía* 3(2): 145-155.
- Soil Survey Staff (2003) *Keys to Soil Taxonomy*. 19th edition, USDA, Natural Resources Service. 332 pp.
- StatSoft Inc. (2004) *STATISTICA* (data analysis software system), version 7. <http://www.statsoft.com>
- Soil Survey Staff-USDA (2010) *Keys to Soil Taxonomy*, Eleventh Edition. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC. 345 p. (En español). ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/Soil_Taxonomy/keys/2010_Keys_to_Soil_Taxonomy.pdf
- Taboada MA, Lavado RS. (2009) Los problemas de la salinización de suelos en la Pampa Húmeda y su manejo: Diferenciación de aptitud de uso de los suelos salino-sódicos. Primer Congreso de la Red Argentina de Salinidad, Córdoba, 11 al 13 de marzo.
- Tomsic, P. y Albanesi A. (2003) Relación del balance de N con las variables meteorológicas y edáficas en un sistema silvopastoril. IX Reunión Nac. de Biol. de Suelos, Argentina. Publicado en CD. ISBN 987-99083-5-8 (21) (PDF) Rolado de fachinales y calidad de suelos en el Chaco occidental.
- Urinovsky Irigoyen, K.M., Toledo, D.M., Arzuaga, S.A., Acosta, M.G.L., Contreras Leiva, S.M. (2021) Indicadores de calidad física en suelos del Chaco semiárido bajo distintos sistemas. *Agrotecnia* 31: 5-13
- Vallejos M, Volante JN, Mosciaro MJ, Vale LM, Bustamante ML, Paruelo JM (2015) Transformation dynamics of the natural cover in the Dry Chaco ecoregion: A plot level geo-database from 1976 to 2012 *Journal of Arid Environments* 123: 3-11.
- Vazquez Amabile, G. Feiguin, F. Ortiz de Zarate, M. Aznar, R. Carabaca, L. Gregoret, M. (2014) Impacto de la agricultura sobre algunas propiedades edáficas en tierras de desmonte del norte argentino. Conference: 1er Congreso Uruguayo de Suelos VI Encuentro de la SUCS At: <http://www.suelos.com.uy/index.php/trabajos/posters>
- Verga A, López Lauenstein D, López C, Navall M, Joseau J, Gómez C, Royo O, Degano W, Marcó M. (2009) Caracterización morfológica de los algarrobos (*Prosopis* spp.) en las regiones fitogeográficas Chaqueña y Espinal norte de Argentina. *Quebracho* Vol.17(1,2) (31-40)
- Volante JN, Alcaraz-Segura D, Mosciaro MJ, Viglizzo EF, Paruelo JM (2012) Ecosystem functional changes associated with land clearing in NW Argentina Agriculture. *Ecosystems and Environment* 154: 12– 22.
- Volante JN, Mosciaro MJ, Gavier-Pizarro GI, Paruelo JM (2016) Agricultural expansion in the Semiarid Chaco: Poorly selective contagious advance. *Land Use Policy* 55: 154–165.
- Yost, Jenifer & Kruger, Kevin & Bjorneberg, David & Dungan, Robert & Leytem, April & Moore, Amber & Schott, Linda. (2024). Assessment of Soil Aggregate Stability Methodologies in Calcareous Silt Loams. *Journal of the ASABE*. 67. 879-887. 10.13031/ja.15650.

AmeliCA

AmeliCA
Ciencia Abierta para el Bien Común

De Servi, Marcelo; Georgiadis Rolandi, Patricio Alexis;
Arreghini, Silvana

Impacto del desmonte sobre la calidad de suelo en el sudeste
santiaguense: el balance de carbono

*Impact of deforestation over soil quality in south east Santiago del Estero:
the carbon balance*

Revista FAVE Sección Ciencias Agrarias
núm. 24, e0048, 2025
Universidad Nacional del Litoral, Argentina
revistafave@fca.unl.edu.ar

ISSN: 2346-9129
ISSN-E: 2346-9129

DOI: <https://doi.org/10.14409/fa.2025.24.e0048>