



Trabajo de Investigación

Ingeniería Agronómica

“Análisis del patrón de restauración de la vegetación natural mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y su relación con propiedades edáficas en una pastura implantada tras diez años de agricultura bajo distintos sistemas de labranza”

Varela, Tatiana María

Director/a: Ing. Agr. Mg. De Grazia, Javier

Codirector/a: Ing. Agr. Rodríguez Frers, Eric Pablo

Lomas de Zamora, mayo de 2025

Trabajo Final de Grado

“Análisis del patrón de restauración de la vegetación natural mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y su relación con propiedades edáficas en una pastura implantada tras diez años de agricultura bajo distintos sistemas de labranza”

Identificación del proyecto

Carrera: Ingeniería Agronómica

Unidades ejecutoras: Facultad de Ciencias Agrarias de la UNLZ

Director

Apellido y Nombre: De Grazia, Javier

Cargo: Profesor Asociado

Co-Director

Apellido y Nombre: Rodríguez Frers, Eric Pablo

Cargo: Jefe de Trabajos Prácticos

Fecha de iniciación del proyecto: 07/2023

“Las opiniones expresadas por el autor de este Trabajo no representan necesariamente los criterios de la Carrera deIngeniería Agronómica de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora”.

RESUMEN

La investigación se centró en el uso de la teledetección aplicada al ámbito agropecuario, sobre un ensayo ubicado en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) en la sede de Ezeiza, sobre un suelo Argiacuol vértico. Este ensayo fue iniciado en 2005, con una rotación de cultivos bajo diferentes sistemas de labranza hasta 2014. En el año 2015 se sembró una pastura polifítica, permitiendo estudiar su transición hacia un pastizal natural en el periodo 2015-2021.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el patrón de restauración de la vegetación natural mediante el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), considerando los antecedentes de manejo, Labranza Convencional (LC) y Siembra Directa (SD). Se analizaron también propiedades edáficas: densidad aparente (DAP), carbono orgánico total (COT) y nitrógeno total (NT), a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm). El diseño experimental fue completamente aleatorizado e incluyó tres tratamientos: siembra directa, labranza convencional y testigo, con cuatro repeticiones.

Las imágenes satelitales se obtuvieron mediante la herramienta AppEEARS, que utiliza datos del producto Harmonized Landsat-Sentinel-2 (HLS). Si bien esta herramienta permitió mejorar la resolución temporal, la resolución espacial (30 m) resultó insuficiente para detectar variaciones sutiles a escala de parcela, debido al tamaño del píxel.

Los resultados muestran una correlación positiva significativa entre el COT y el NT, especialmente en los primeros centímetros del suelo, aunque no se encontró correlación significativa entre estos indicadores edáficos y el NDVI. Esto sugiere que el índice refleja la

cobertura vegetal general, pero no permite inferir directamente propiedades del suelo. El análisis temporal del NDVI graficado permitió identificar un patrón progresivo de restauración de la vegetación a lo largo del período de estudio. Se recomienda en futuras investigaciones, utilizar imágenes de mayor resolución espacial para una mejor detección de variaciones si se trabaja a pequeña escala.

PALABRAS CLAVES

Teledetección en la agricultura, sistemas de labranza, prácticas de manejo del suelo, análisis de datos

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	16
Objetivos:	16
Hipótesis:	16
MATERIALES Y MÉTODOS	17
Caracterización del área de estudio:	17
Rasgos climáticos y edáficos	19
Ubicación del ensayo	21
Diseño experimental y tratamientos	22
Propiedades del suelo estudiadas y metodología empleada	24
Carbono Orgánico Total (COT):	25
Nitrógeno Total (NT):	26
Densidad Aparente (DAP):	28
Determinaciones con NDVI:	30
Análisis estadístico	34
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
Carbono Orgánico Total (COT)	34
Nitrógeno Total (NT)	39
Determinaciones con NDVI	42
Relación Carbono Orgánico Total-Nitrógeno Total-NDVI	48
CONCLUSIONES	50
BIBLIOGRAFÍA	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Regiones naturales de la provincia de Buenos Aires. Fuente: MAA (2007).	18
Fig. 2: Registros meteorológicos extraídos de la Estación Meteorológica CNEA-EZEIZA del año 2015 (Año de implantación de la pastura polifítica). Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. (s.f). https://www.smn.gob.ar/estadisticas .	20
Fig. 3: Registros meteorológicos extraídos de la Estación Meteorológica CNEA-EZEIZA del año 2021 (Año de toma de muestras y mediciones).Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. (s.f). https://www.smn.gob.ar/estadisticas .	21
Fig. 4: Ubicación de la Comisión Nacional de Energía Atómica y las parcelas del ensayo. Imagen QGis 3.28. Fuente: Elaboración propia.	22
Fig. 5. Parcelas representadas mediante el programa QGIS. Elaboración propia.	31
Fig. 6. Captura de pantalla de la plataforma web utilizada para descargar las imágenes satelitales. Nótese que permite obtener imágenes para un rango de años.	32
Fig. 7. Valores de Carbono Orgánico Total para el año de inicio (2015) según diferentes tratamientos. SD: Siembra Directa. LC: Labranza Convencional. Letras diferentes muestran diferencias significativas entre los tratamientos según DGC ($p<0,05$). Las líneas verticales por encima y por debajo de cada barra representan el desvío estándar de la media.	35
Fig. 8. Valores de Carbono Orgánico Total para el año final (2021) según diferentes tratamientos. SD: Siembra Directa. LC: Labranza Convencional. Letras diferentes muestran diferencias significativas entre los tratamientos según DGC ($p<0,05$). Las líneas verticales por encima de cada barra representan el desvío estándar de la media.	35
Fig. 9. Valores de Nitrógeno Total para el año de inicio (2015) según diferentes tratamientos. SD: Siembra Directa. LC: Labranza Convencional. Letras diferentes muestran diferencias significativas entre los tratamientos según DGC ($p<0,05$). Las líneas verticales por encima de cada barra representan el desvío estándar de la media.	39
Fig. 10. Valores de Nitrógeno Total para el año final (2021) según diferentes tratamientos. SD: Siembra Directa. LC: Labranza Convencional. Letras diferentes muestran diferencias significativas entre los tratamientos según DGC ($p<0,05$). Las líneas verticales por encima de cada barra representan el desvío estándar de la media.	40
Fig. 11. Análisis Temporal del NDVI en una pastura con antecedentes de siembra directa y labranza convencional (2015-2021). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para una misma época según DGC ($p<0,05$).	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I: Secuencia de cultivos desde 2005 hasta 2021.	23
Tabla II. Imágenes descargadas de la página Earth Data según el año y la época establecida.	33
Tabla III. Comparación del promedio general de COT para 2015 y 2021 con respecto a la profundidad de 0-10 cm y para todos los tratamientos. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).	36
Tabla IV. Comparación del promedio general de COT para 2015 y 2021 con respecto a la profundidad de 10-20 cm y para todos los tratamientos. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).	36
Tabla V. Comparación de los promedios generales de NT correspondientes a todos los tratamientos para los años 2015 y 2021, en la profundidad de 0–10 cm. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).	40
Tabla VI. Comparación de los promedios generales de NT correspondientes a todos los tratamientos para los años 2015 y 2021, en la profundidad de 10–20 cm. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).	41
Tabla VII. Resultados del NDVI por tratamiento y época para el año 2015.	42
Tabla VIII. Resultados del NDVI por tratamiento y época para el año 2021.	43
Tabla IX. Correlación de Pearson según las variables estudiadas.	48

TABLA DE ABREVIATURA

AppEEARS	Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples
CAD	Computer Aided Design
CNEA	Comisión Nacional de Energía Atómica
CSV	Delimitados por comas
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
GPX	Formatos de intercambio GPS
HLS	Harmonized Landsat Sentinel-2
IR	Luz Infrarroja
IV	Índices de Vegetación
LC	Labranza Convencional
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
NIR	Infrarrojo próximo
PRV	Pastoreo Racional Voisín
Red	Luz Roja
SD	Siembra directa
SHP	Shape file
SIG	Sistema de Información Geográfica
SWIR	Infrarrojo medio
TIR	Infrarrojo térmico
USGS	Servicio Geológico de Estados Unidos
UTM	Universal Transverse Mercator
VIS	Visible
XLS	Hoja de cálculo de Excel

INTRODUCCIÓN

La investigación se centró en el área de estudio de la teledetección con relación al ámbito agropecuario. La degradación del suelo es consecuencia de un proceso físico, químico, biológico o mecánico inducido por el hombre, que produce pérdida de sus características o propiedades y conduce a una disminución de su capacidad productiva a lo largo del tiempo (Barrios *et al.*, 2008).

La agricultura siempre modifica el funcionamiento natural del suelo, debido a la alteración de los ciclos de nutrientes, la reducción del retorno de la materia orgánica y el continuo estrés físico que le imponen los laboreos (Conti & Giuffré, 2014). A través de las distintas prácticas de manejo se pueden modificar tanto las propiedades físicas como químicas de un suelo. Según Álvarez *et al.* (2015) distintos sectores de la Región Pampeana se encuentran afectados por procesos de degradación física y química y por erosión hídrica o eólica.

Es ampliamente conocido, que la adopción de la siembra directa (SD) o bien prácticas conservacionistas, han disminuido el impacto de los procesos de degradación mencionados, principalmente por la cobertura que dejan estos sistemas. Gómez-Calderón *et al.* (2018) afirman que la labranza conservacionista, al utilizar implementos que rompen el suelo en forma vertical sin voltearlo, facilita la infiltración. Por otro lado, cabe señalar que uno de los mayores inconvenientes ocasionados por la SD es la compactación superficial del suelo debido al tránsito de maquinarias y/o al pisoteo de los animales, principalmente cuando el suelo se encuentra muy húmedo (Barrios *et al.*, 2008).

En los últimos años, para aliviar el fenómeno de la degradación de los suelos, se va imponiendo la llamada “agricultura sustentable”, cuya estrategia de manejo consiste en conservar la materia orgánica edáfica, minimizar la erosión, utilizar recursos degradables, manteniendo un delicado balance entre la producción y contaminación (Conti & Giuffré, 2014).

En la actualidad se emplean diversas herramientas y tecnologías para identificar la variabilidad del cultivo y del suelo a escala del lote, en pos de mejorar las prácticas de manejo y optimizar el empleo de los insumos agropecuarios (Ovando *et al.*, 2021). La teledetección es la técnica que permite obtener imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en el espacio (Chuvienco, 1991). En agricultura de precisión es muy utilizada para monitorear y analizar diferentes aspectos de los cultivos y el suelo.

Los elementos involucrados en la teledetección son los siguientes: sensores, una fuente de energía, una estación de recepción de los datos y una unidad de análisis y procesamiento. Los sensores pasivos, en general de libre acceso, utilizan la radiación solar como fuente de energía. El caso más habitual consiste en que esa fuente sea el Sol. La radiación solar emitida interactúa con la atmósfera. Una vez que alcanza la superficie terrestre interactúa con los objetos que en ella se encuentran. La radiación reflejada dependerá de las características de esos objetos, permitiendo distinguir a unos de otros, denominándose la firma espectral de los objetos (Labrador-García *et al.*, 2012).

La adquisición remota puede dividirse en dos etapas: adquisición de datos (detección y registro por medio de sensores) y análisis de datos (procesamiento de datos e interpretación)

(Mantovani *et al.*, 2014). Existen herramientas tecnológicas que permiten consultar, analizar y modelizar datos espaciales, las cuales se denominan Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estos sistemas integran datos geográficos (mapas, imágenes satelitales, etc.) con datos tabulares (información sobre clima, coordenadas geográficas, etc.).

Los SIG son *software* compuestos por varios módulos dedicados al almacenamiento y procesamiento de datos con localización geográfica conocida (geoprocesamiento) que posibilita el análisis de patrones, integración y modelos espaciales, monitoreo, simulación de precisiones y presentación de gran cantidad de información en forma de mapas, gráficos, figuras y sistemas multimedia (Jones, 1997; Landau, 2003, como se citó en Mantovani *et al.*, 2014). Lo característico de estos sistemas es que la información se organiza en capas, se procesa por separado, pero se puede analizar en conjunto por medio de un mapa. Se busca entonces, estudiar la interacción entre las diversas capas (relaciones espaciales).

Como definición clásica, un SIG es un conjunto de *software* y *hardware* diseñado para la adquisición, mantenimiento y uso de datos cartográficos, aunque actualmente otros componentes como los datos, el método y las personas también juegan un rol principal en la idea global de un SIG (Olaya, 2014). Los modelos de representación o modelos de datos permiten reducir las propiedades y atributos de los modelos geográficos a un conjunto finito de elementos. El modelo ráster divide a la zona de estudio en celdas. La disposición ordenada de las celdas, resultado de una segmentación sistemática, establece una relación adicional entre ellas (Olaya, 2014).

Otro parámetro relevante en los modelos ráster es el tamaño de la celda o tamaño del píxel, cuyo tamaño define su resolución espacial. Cuanto más pequeño es el tamaño del píxel mayor es la resolución espacial y mayor detalle presenta la imagen. “En cualquier archivo matricial o raster data set, como imágenes satelitales, fotografías aéreas digitalizadas, mapas escaneados a partir del papel y fotografías digitales comunes de personas, objetos o paisajes, el píxel puede ser considerado la menor celda de direccionamiento de coordenadas geográficas y de un atributo (...)” (Mantovani *et al.*, 2014).

El otro modelo es el vectorial donde no existen unidades fundamentales que dividen la zona recogida, sino que se recoge la variabilidad y características de esta mediante entidades geométricas, para cada una de las cuales dichas características son constantes (Olaya, 2014). El formato vectorial presenta una estructura más simple, en comparación con el formato ráster, ésta puede ser a partir de puntos (definidos por un par de coordenadas), líneas (formadas por dos o más puntos) o polígonos (una agrupación cerrada de líneas) (Olaya, 2014). Los datos vectoriales se presentan en formatos diversos: CAD (Computer Aided Design), SHP (shape file), GPX (formatos de intercambio GPS), CSV (delimitados por comas), XLS (Excel) y otros (González-Bonorino, comunicación personal, 17 de abril 2024).

Las imágenes satelitales constituyen un tipo particular de dato y uno de los componentes más importantes del uso habitual de un SIG. Su almacenamiento se realiza en formato ráster (Olaya, 2014). Las características de los sensores pueden ser agrupadas en distintas resoluciones. Entre ellas encontramos: espacial, espectral, radiométrica y temporal. La resolución espacial determina el objeto más pequeño que puede captar el sensor, equivalente al tamaño del píxel.

La resolución espectral indica el número y ancho de las bandas espectrales. La resolución radiométrica refleja la capacidad del sensor para detectar diferencias en energía, expresada en bits y la resolución temporal se refiere a la frecuencia con la que el sensor captura imágenes del mismo lugar (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2004).

Los sensores montados a bordo de los satélites son capaces de detectar y grabar radiaciones de las regiones no visibles del espectro electromagnético, desde el ultravioleta hasta las microondas (Labrador-García *et al.*, 2012). Existen sensores pasivos y activos. Los sensores pasivos aprovechan la fuente de radiación solar y se limitan a capturarla radiación de dichas fuentes reflejada por los elementos del medio, o la que estos elementos emiten por sí mismos. En cambio, los sensores activos pueden funcionar en cualquier instante y no dependen de las condiciones atmosféricas o el momento del día (Olaya, 2014). Algunos sensores de libre acceso, se clasifican según su número de bandas en pancromáticos, multiespectrales o hiperespectrales (Instituto Geográfico Nacional, 2018).

Las bandas comúnmente utilizadas en imágenes satelitales incluyen, las bandas del espectro visible (RGB), la banda infrarroja cercana (NIR) y las bandas infrarrojas de onda corta (SWIR). El visible (VIS) es una pequeña región del espectro electromagnético que apenas abarca desde los 0,4 μm hasta los 0,7 μm . La porción del azul vadesde 0,4 hasta 0,5 μm , el verde desde 0,5 μm hasta 0,6 μm y el rojo de 0,6 μm a 0,7 μm (Labrador-García *et al.*, 2012). Por encima del rojo se sitúa la región infrarroja (IR), que a su vez está dividida en tres categorías: IR próximo (NIR) (0,7 – 1,3 μm), IR medio (SWIR) (1,3 – 3 μm) e IR térmico (TIR) (3– 100 μm) (Labrador-García *et al.*, 2012).

Las imágenes satelitales suelen someterse a varias correcciones para mejorar su calidad y precisión. Las principales correcciones ejecutadas sobre las imágenes son: la radiométrica, la atmosférica y la geométrica (Mantovani *et al.*, 2014). Las partículas en la atmósfera pueden afectar la calidad de la imagen al absorber, dispersar o atenuar la luz que llega al sensor. La corrección atmosférica elimina o reduce estos efectos para obtener una representación más precisa de la superficie terrestre.

Las imágenes satelitales en el ámbito agropecuario son muy utilizadas para la elaboración de índices de vegetación (IV) (Mantovani *et al.*, 2014). Las imágenes satelitales ofrecen varias alternativas para evaluar la vitalidad de un cultivo, o conjunto de cultivos, mediante el empleo de firmas espectrales (Serrano-Fábrega *et al.*, 2018). Entre la gran diversidad de IV que se han desarrollado en los últimos años, el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) probablemente sea el que alcanzó mayor difusión en estudios sobre la vegetación (Rouse *et al.*, 1973, como se citó en Ovando *et al.*, 2021). El NDVI se calcula como la diferencia entre la reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) y la reflectancia en la banda roja (Red), dividida por la suma de ambas.

El NDVI es sensible a la condición fisiológica de las plantas de manera que cuanto mayor sea el “vigor” que presenta la vegetación, mayor será el contraste entre los valores de reflectancia captados en ambas bandas (Alonso *et al.*, 1999). En la región del espectro visible, los pigmentos absorben la mayor parte de la luz, mientras que en el infrarrojo cercano estas sustancias son transparentes. Por esta razón, la vegetación sana ofrece baja reflectividad en la banda roja del espectro y alta en el infrarrojo próximo (Alonso *et al.*, 1999).

Conforme con lo que afirma Chuvieco (1991), la principal ventaja del NDVI es su fácil interpretabilidad, por obtenerse los resultados con valores entre ± 1 , con un umbral crítico para cubiertas vegetales en 0,2. Otros autores, han utilizado NDVI para comparar sistema de pastoreo racional Voisín (PRV) y agricultura en SD, observando sus variaciones estacionales y estableciendo relaciones con algunos parámetros edáficos (Monti *et al.*, 2018).

Uno de los Sistemas de Información Geográfica, de libre acceso, más utilizado es el Software QGIS (QGIS Development Team, s.f.). Es una herramienta de código abierto y gratuito que permite la visualización, edición y análisis de datos geoespaciales. QGIS es útil para calcular el NDVI y realizar análisis adicionales en los datos. Se pueden calcular estadísticas en los píxeles de las imágenes y demás funciones necesarias para trabajar en agricultura de precisión.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el patrón de restauración de la vegetación natural mediante el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) durante un período de seis años, desde la implantación de una pastura hasta su transición completa a pastizal natural, considerando los antecedentes de los lotes, que fueron distintos sistemas de labranza aplicados.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivos:

- 1) Estudiar la influencia de los diferentes sistemas de labranza sobre algunas propiedades químicas del suelo (Carbono Orgánico Total y Nitrógeno Total) luego de seis años de implantada una pastura polifítica.
- 2) Caracterizar el patrón de restauración de la vegetación natural mediante el NDVI, sobre una pastura implantada en suelos provenientes de 10 años de agricultura continua con diferentes sistemas de labranza.
- 3) Determinar la relación existente entre algunas propiedades químicas del suelo y el patrón de restauración de la vegetación natural analizada mediante el NDVI, en una pastura implantada.

Hipótesis:

- 1) Los diferentes sistemas de labranza utilizados en una rotación de cultivos agrícolas afectan de manera diferenciada las propiedades químicas del suelo aún después de seis años de implantada una pastura polifítica. Se considera que, en suelos bajo SD, la menor alteración edáfica favorezca la conservación de nutrientes, promoviendo así condiciones más favorables para la restauración de la vegetación natural en comparación con suelos bajo LC.
- 2) El sistema de labranza utilizado en una rotación de cultivos agrícolas durante 10 años influye en el patrón de restauración de la vegetación natural sobre una pastura implantada, generando cambios diferenciales detectables mediante NDVI. Se espera que,

bajo SD, la menor alteración físico-química del suelo y la mayor actividad biológica favorezcan una restauración más rápida de la vegetación natural, en comparación con suelos manejados bajo LC.

- 3) Existe una relación entre las propiedades químicas del suelo y el patrón de restauración de la vegetación natural sobre una pastura implantada, luego de rotación agrícola con diferentes sistemas de labranza. Los suelos manejados con SD, favorecen una restauración más rápida de la cobertura vegetal natural, debido a mejores condiciones físico-químicas lo cual se refleja también en valores más altos de NDVI, en comparación con los suelos sometidos a LC.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del área de estudio:

La región pampeana es una extensa llanura ubicada al Este de la República Argentina, entre los 31° y 39° de Latitud Sur. Dentro de esta región es posible trazar una clara separación entre la denominada "Pampa Húmeda" o "Pampa Oriental" y "Pampa Seca" o "Pampa Occidental" (Politis & Barros, 2006). Pampa Ondulada, perteneciente a Pampa Húmeda, se desarrolla en el norte y noreste de la provincia de Buenos Aires y un pequeño sector del sudeste de Santa Fe (Pereyra & Ragas, 2021). La siguiente figura permite distinguir las subregiones de la Pampa Húmeda dentro de la Provincia de Buenos Aires.

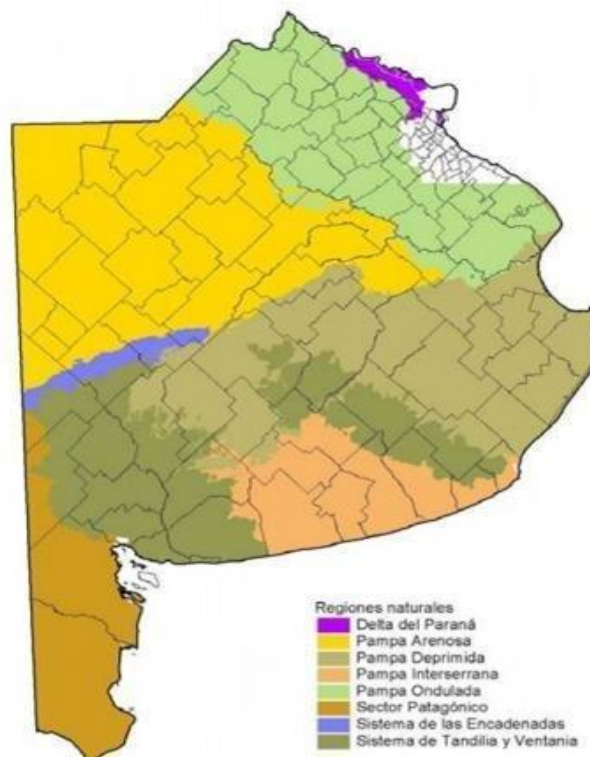


Fig. 1: Regiones naturales de la provincia de Buenos Aires. Fuente: MAA (2007).

El ensayo se sitúa en Pampa Ondulada (Figura 1), ubicada en la franja litoral comprendida entre los ríos Paraná, de La Plata, Salado (curso superior), Matanza, Riachuelo y Arroyo del Medio. Presenta suaves ondulaciones, se distinguen barrancas, terrazas fluviales y los bajos inundables. Posee un clima templado húmedo con precipitaciones superiores a los 900 mm anuales. Suelos muy ricos en materia orgánica, con aptitud para la agricultura y ganadería. Sobre la costa del Río de La Plata se observan amplios bañados. Es el área que sufrió la mayor modificación y artificialización del ambiente porque en ella se sitúa el centro económico y político del país (Giuseppucci & Ortino, 2015).

Rasgos climáticos y edáficos

Pampa Ondulada se caracteriza por el relieve suavemente ondulado que domina el paisaje. El sistema hídrico es marcadamente exorreico, sin lagunas y con numerosos ríos y arroyos que surcan la llanura. Las precipitaciones oscilan entre los 1100 al Este a 750 mm al Oeste. Los suelos son francos, profundos, con buenos niveles de materia orgánica (MO) no anegables. Son considerados de los mejores suelos agrícolas del país. La vegetación natural es una pradera muy alterada por la agricultura (Rossi *et al.*, 2015).

La geomorfología del área corresponde a una amplia planicie con áreas bajas y deprimidas. Pueden distinguirse una zona alta y una zona más baja. Los suelos de la zona alta, en su mayor parte son Argiudoles, presentando buen desarrollo pedogenético, alto contenido de materia orgánica total y sin limitaciones para el laboreo. Los suelos de la zona baja, son el resultado de los diversos ambientes sedimentológicos creados como consecuencia de la acumulación de limos, arenas y arcillas post-pampeanas y se caracterizan por presentar una capa de arcilla que dificulta el drenaje y favorece las condiciones de anegamiento. Las zonas más altas están ocupadas por asociaciones de Argiudoles y Argialboles, las zonas intermedias, se presentan asociaciones de Argialbol argiácuico, Natracualf mólico, Argiudol ácuico y Argialbol típico y en las zonas aledañas a los cursos de agua existen suelos no diferenciados y alcalinos (Timm & Serruya, 2009, como se citó en Sokolowski, 2019).

El área de estudio se encuentra ubicada en el predio de la CONEA, situado en el partido de Ezeiza, Gran Buenos Aires (GBA). El clima es templado húmedo, las características de este tipo climático inciden en la evolución de los suelos y en la recarga y excesos de agua en el perfil. La

temperatura media anual promedio es de 16,7 °C, variando entre 23,9 °C y 9,6 °C, siendo los meses de diciembre, enero y febrero los más cálidos y los meses de junio, julio y agosto los más fríos. La temperatura máxima anual promedio es de 22,5 °C con un rango de 14,9 a 30,2 °C y la temperatura mínima anual promedio es de 11,2 °C con un rango entre 4,9 a 17,7 °C según el mes. El régimen de precipitaciones es isohigro, siendo la precipitación media anual de 1019,8 mm. La pluviometría mensual está comprendida entre 47,3 mm y 114,4 mm, donde los valores más bajos se registran entre los meses de junio hasta septiembre inclusive y los más altos entre los meses de octubre a marzo. Los vientos surcan la región en dirección sudoeste-noreste con una velocidad promedio de 12,3 km h⁻¹ (Servicio Meteorológico Nacional, s.f.). En las Figuras 2 y 3 se presentan los registros meteorológicos correspondientes al año de inicio y al año de finalización del ensayo.

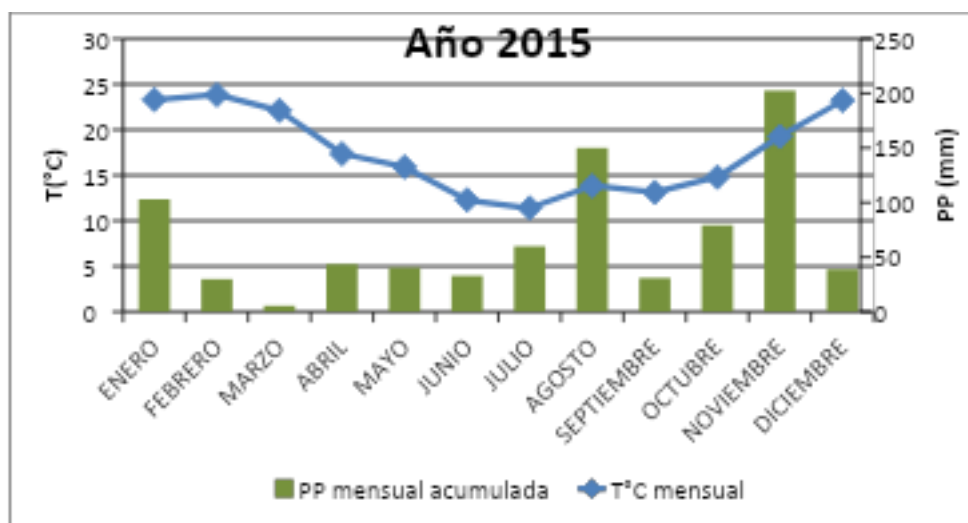


Fig. 2: Registros meteorológicos extraídos de la Estación Meteorológica CNEA-EZEIZA del año 2015 (Año de implantación de la pastura polifítica). Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. (s.f).

<https://www.smn.gob.ar/estadisticas>.

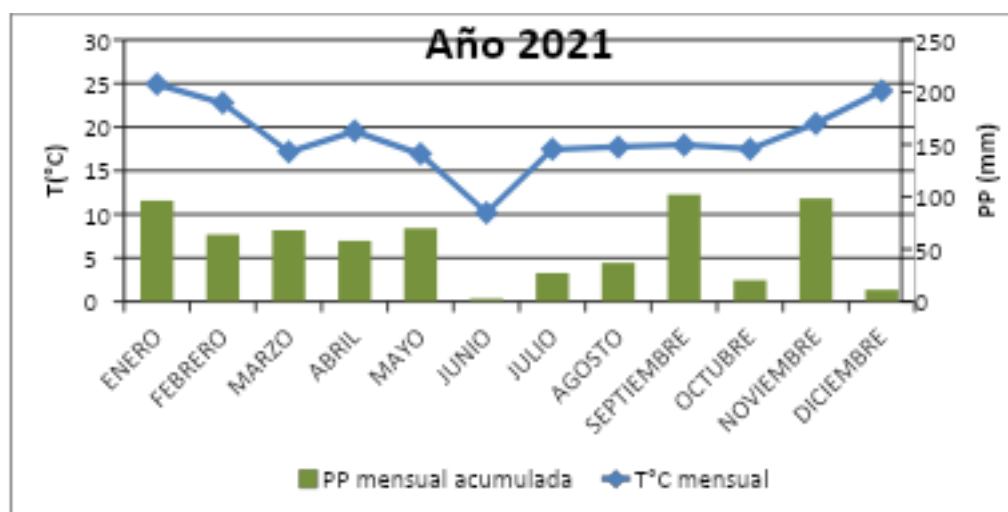


Fig. 3: Registros meteorológicos extraídos de la Estación Meteorológica CNEA-EZEIZA del año 2021 (Año de toma de muestras y mediciones). Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. (s.f).

<https://www.smn.gob.ar/estadisticas>.

El área del ensayo está ocupada por un suelo Argiacuol vértico (Soil Survey Staff, 1999), moderadamente bien drenado, con relieve normal y una pendiente media de 1%. Las parcelas presentan una superficie de 250 m², con dimensiones de 10 metros por 25 metros. El perfil presenta la siguiente secuencia de horizonte: Ap de 0-13 cm, A2 de 13-24 cm, BA de 24 a 34 cm, Bt1 de 34-53 cm, Bt2 de 53-75 cm, BC de 75-95 cm y C de 75 cm en adelante. La reacción en todo el perfil es de neutra a ligeramente ácida. El contenido de materia orgánica de 0 a 20 cm de profundidad es de 3,01%. El contenido de fósforo y nitrógeno es moderado. Presenta rasgos de hidromorfismo (moteados de Fe y Mn) a partir del horizonte BA.

Ubicación del ensayo

El ensayo (Figura 4), se encuentra ubicado en el Campo Experimental de Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Partido de Ezeiza, Buenos Aires (34° 49' 00'' Latitud Sur, 58° 34' 17''

Longitud Oeste), realizado en el marco del Convenio de Vinculación entre dicha institución y la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNLZ.



Fig. 4: Ubicación de la Comisión Nacional de Energía Atómica y las parcelas del ensayo. Imagen QGis 3.28.

Fuente: Elaboración propia.

Diseño experimental y tratamientos

En el presente estudio, se analizaron datos recolectados durante un periodo de seis siete años (2015-2021), cuando se implantó una pastura polifítica compuesta por trébol rojo (*Trifolium pratense*), festuca alta (*Festuca arundinacea*) y cebadilla criolla (*Bromus catharticus*), en parcelas previamente manejadas con distintos sistemas de labranza.

El contexto experimental comenzó en 2005, estableciéndose una rotación de cultivos agrícolas bajo diferentes tratamientos de labranza hasta el año 2014. En 2015, al implantar la pastura, se mantuvo la delimitación original de las parcelas según los tratamientos previos. La secuencia de cultivos utilizada puede observarse en la Tabla I.

Tabla I: Secuencia de cultivos desde 2005 hasta 2021.	
Campaña	Cultivo
2005-2006	Soja 1°
2006-2007	Trigo/Soja 2°
2007-2008	Maíz
2008-2009	Soja 1°
2009-2010	Trigo
2010-2011	Maíz
2011-2012	Soja 1°
2012-2013	Soja 1°
2013-2014	Maíz
2014-2015	Trigo
2015-2016	Pastura
2016-2017	Pastura
2017-2018	Pastura
2018-2019	Transición a pastizal natural
2019-2020	Transición a pastizal natural
2020-2021	Transición a pastizal natural

Los tratamientos de labranza aplicados durante los cultivos agrícolas fueron:

1) Labranza Convencional (LC), que consistió en una pasada de arado de reja y vertedera más dos pasadas de rastra de discos.

2) Siembra Directa (SD), con la aplicación de $2,5 \text{ Lha}^{-1}$ de Glifosato para la realización del barbecho químico.

3) Testigo, sector aledaño al área del ensayo donde no se realizaron labranzas ni se sembraron cultivos agrícolas ni pasturas. La cobertura vegetal del testigo estaba compuesta mayoritariamente por bosque de acacia blanca (*Robinia pseudoacacia* L.) con respecto a especies del pastizal se encontró: chilca (*Baccharis glutinosa*), festuca (*Festuca arundinacea*), sorgo de Alepo (*Sorghum halepense*), rama negra (*Conyza bonariensis*), cortadera (*Cortaderia selloana*), Afata (*Sida rhombifolia* L.), cardo negro (*Carduus saccanthoides*), gramón (*Cynodon dactylon*).

Las mediciones se realizaron sobre muestras compuestas de suelo tomadas de 0-10 y 10-20 cm de profundidad al momento de la siembra de la pastura y luego de seis años de su implantación.

El diseño experimental consistió en un Diseño Completamente Aleatorizado (DCA) con los dos tratamientos mencionados anteriormente y cuatro repeticiones. Cada unidad experimental constó de 250 m^2 de área.

Propiedades del suelo estudiadas y metodología empleada

Sobre muestras compuestas de suelo, a partir de 10 submuestras extraídas de cada unidad experimental y a una profundidad de 0-10 y 10-20 cm se determinaron las siguientes propiedades: contenido de Carbono Orgánico Total (COT), contenido de Nitrógeno Total (NT) y

Densidad Aparente (DAP). Todas las determinaciones se realizaron por duplicado y se llevaron a cabo en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNLZ.

Carbono Orgánico Total (COT):

Para determinar el Carbono Orgánico Total (COT) en las muestras de suelo, se utilizó el método de Walkley & Black (Jackson, 1976) caracterizado por la digestión húmeda de la materia orgánica.

Reactivos:

- Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 1,0 N
- Ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentración: 98%, N
- Sulfato ferroso o Sal de Mohr 0,3N
- Indicador Ferroína

Procedimiento: Se pesó entre 100-120 mg de suelo seco y tamizado por 0,5 mm en tubos de ensayo. Se añadió 1,5 mL de dicromato de potasio y se agitó. Se añadió 3 mL de ácido sulfúrico y se agitó durante 1 minuto, se dejó reposar 20 minutos o hasta que se haya enfriado.

Se agregó agua destilada hasta la mitad de los tubos de ensayo, se agitó y dejó enfriar en la heladera durante 20 minutos para detener la reacción.

Previo a la titulación se colocaron 3 gotas del indicador y se prosiguió con la titulación utilizando sulfato ferroso. Debió mantenerse en agitación hasta el viraje de color (rojo). En simultáneo se realizaron los ensayos en blanco (todos los reactivos sin añadir suelo) obteniendo el valor de B.

Cálculos: Para el cálculo del carbono orgánico total se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$COT (\%) = \frac{(B-M)*0,3*300}{PM*0,82}$$

Siendo:

B= volumen (mL) de sal consumido por el Blanco

M= volumen (mL) de sal consumido por la Muestra

PM= peso de la Muestra (mg)

0,3= normalidad de la sal

300= corresponde a la transformación de meq de C a mg y por 100 mg de suelo

0,82= factor de corrección por oxidación (82%).

Nitrógeno Total (NT):

El Nitrógeno Total del suelo (NT) se determinó por Kjeldahl según metodología descripta por SAMLA (2004). La determinación del N-orgánico y N-amoniacal, por el método Kjeldhal, involucra dos etapas fundamentales, digestión y destilación.

Reactivos:

- Ácido sulfúrico (H_2SO_4)

- Mezcla catalizadora de sales
- Hidróxido de sodio ($NaOH$)
- Ácido bórico (H_3BO_3)
- Indicador mixto de verde de bromocresol-rojo de metilo

Procedimiento: Se pesaron 25 mg de la muestra de suelo seca y tamizada por 500 μm . Se añade 1 gramo de mezcla catalítica de sales a cada balón, 2 mL de agua destilada, 3 mL de ácido sulfúrico y se agita manualmente.

Se prosiguió a la digestión a una temperatura media alta hasta que el digesto se tornó claro. Por una hora se mantuvo en ebullición. Luego la temperatura se reguló para que los vapores del ácido se condensen en el tercio inferior del cuello del matraz. En este momento finalizó la etapa de digestión.

En la segunda etapa, destilación, se trasvasó el digesto a un matraz de 50 mL, llevándolo a volumen con agua destilada. Se tomó una alícuota de 10 mL y se colocó en el destilador micro-Kjeldahl, agregando 5 mL de hidróxido de sodio ($NaOH$) para neutralizar y luego 10 mL de agua destilada.

El destilado se recibió en un Erlenmeyer de 50 mL conteniendo 5 mL de la mezcla ácido bórico-indicador. La solución pasó de color rojo vinoso a verde brillante. Se tituló con ácido sulfúrico hasta obtener un color levemente rosado.

Cálculos: Para el cálculo del nitrógeno total se utilizó la siguiente fórmula:

$$NT(\%) = \frac{(Vm-Vb)*35}{P}$$

Siendo:

Vm= volumen (mL) de solución 0,005 N de ác. Sulfúrico empleado en la titulación de la muestra.

Vb= volumen (mL) de solución 0,005 N de ác. Sulfúrico empleado en la titulación del blanco.

P= peso (mg) de la muestra de suelo.

35= factor, resultado del siguiente cálculo:

$$factor = \frac{0,005*14*50*100}{10}$$

0,005= normalidad del ácido sulfúrico.

14= peso en mili equivalentes del nitrógeno.

50= volumen de la totalidad de la muestra.

10= volumen de la alícuota destilada.

100= para expresar el resultado en porcentaje con respecto al suelo.

Densidad Aparente (DAP):

Se midió la densidad aparente utilizando el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986) que representa la relación entre la masa de suelo seco (sólidos) y su volumen total, incluyendo el espacio poroso.

A continuación, se detalla la fórmula utilizada para expresar el COT (%) y el NT (%) en unidades de masa.

$$COT (MgHa^{-1}) = \frac{Dap*10000*CO(\%)*Prof (m)}{100}$$

Siendo:

Dap= densidad aparente (g cm⁻³)

10000= superficie de 1 hectárea

Prof: profundidad de la muestra expresada en metros

CO (%)= porcentaje de carbono orgánico en el suelo

100= convierte el porcentaje de carbono orgánico (CO) a una fracción decimal

$$NT (MgHa^{-1}) = \frac{Dap*10000 *N(\%)*Prof (m)}{100}$$

Siendo:

Dap= densidad aparente (g cm⁻³)

10000= superficie de 1 hectárea

Prof: profundidad de la muestra expresada en metros

N (%)= porcentaje de nitrógeno en el suelo

100= convierte el porcentaje de nitrógeno a una fracción decimal

Determinaciones con NDVI:

El proceso comenzó con la adquisición de imágenes satelitales Sentinel (Ovando *et al.*, 2021; Uribeetxebarria *et al.*, 2022) de diferentes fuentes disponibles (Copernicus, USGS, 2022); según disponibilidad de imágenes vigentes desde el año 2015 al 2021 (Pino-Vargas *et al.*, 2022). Se

descargaron cuatro imágenes por año, una por cada estación: verano, otoño, invierno y primavera. La resolución espacial es de 30 metros y con un porcentaje de nubosidad del 30%.

Se crearon polígonos en formato vectorial a través del software de código abierto QGIS Versión (3.28), correspondientes a cada parcela, cuatro para el tratamiento SD, cuatro para LC, y cuatro correspondiente un área no trabajada externa al ensayo, considerada como testigo. Luego, con esos polígonos se recortan las imágenes satelitales descargadas, obteniendo doce imágenes del tamaño de la unidad experimental, que fueron procesadas individualmente, para obtener el NDVI en cada una (Huang *et al.*, 2021).

El complemento que brinda el software, “Quick Map Services”, permitió obtener un mapa base facilitando su dibujo. Para realizar el dibujo fue necesario activar las herramientas de digitalización, “digitalización avanzada” y “la barra de autoensamblado”. Se editó su simbología y etiquetado. La “Herramienta de vértices” de QGIS, se utilizó para ajustar los vértices de los polígonos y mejorar la precisión en la delimitación, obteniendo una representación más apropiada (QGIS Development Team, s.f.).

La Figura 5 muestra las parcelas dibujadas a base de polígonos utilizando QGIS. Aquellas que presentan en su identificación “s/análisis” corresponden al tratamiento labranza mínima, que no se incluyeron en el presente análisis. En la Figura 6 se visualiza el área de estudio con el cual se descargaron las imágenes de la página web.



Fig. 5. Parcelas representadas mediante el programa QGIS. Elaboración propia.

Las imágenes se obtuvieron de la siguiente página web: Earth Data: Nasa, E. S. D. S. (2024, 30 abril). *EarthData* / *EarthData*. Earthdata. <https://www.earthdata.nasa.gov/>

AppEEARS ("Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples") es una herramienta desarrollada por la NASA de extracción y muestreo de datos fácil de usar, que reduce la cantidad de tiempo y esfuerzo tradicionalmente necesarios para realizar subconjuntos espaciales y temporales (*Analyzing Earth Data with NASA's App EEARS Tool to Improve Research Efficiency*. (s. f.). NASA/ADS).

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018AGUFMIN53C0619N/abstract>)

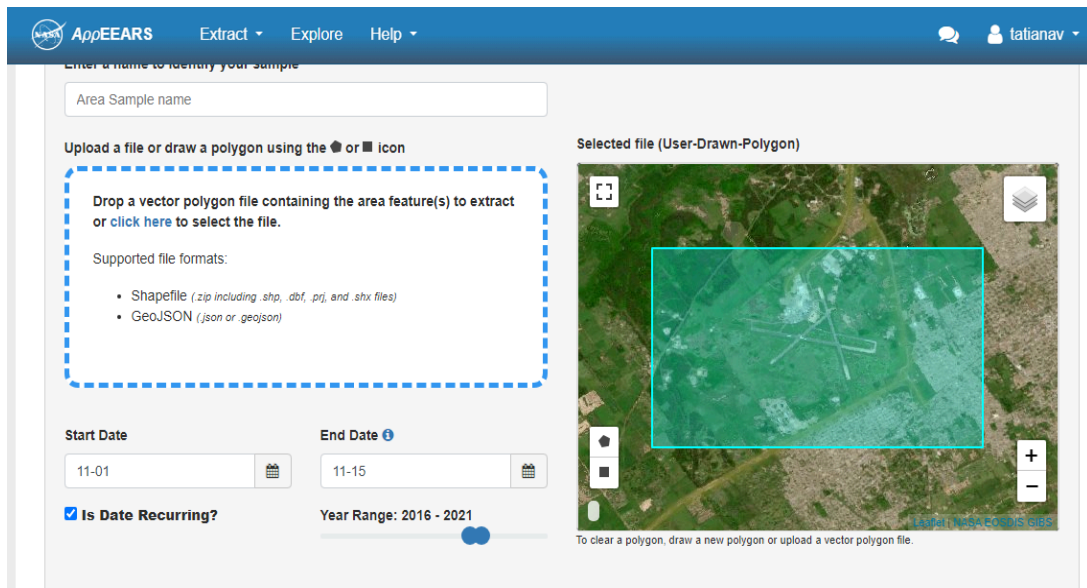


Fig. 6. Captura de pantalla de la plataforma web utilizada para descargar las imágenes satelitales. Nótese que permite obtener imágenes para un rango de años.

La NASA ofrece un producto nuevo denominado Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS). Este producto tiene reflectancia en superficie combinando sensores Landsat 8/9 y Sentinel-2A/B. Presenta corrección atmosférica, máscara de nubes y sombras, co-registro geográfico y otros procesamientos. Además, ofrece cobertura casi global con una resolución espacial de 30 m, una resolución temporal de 2-3 días, y se entrega en proyección UTM. El inicio de las fechas de adquisición depende del producto integrante: 2013 (L8) a 2021 (L9) (Earthdata, 2024; NASA, 2024). Con imágenes que provengan de satélites posteriores a Landsat-5 no es necesario realizar corrección atmosférica. De lo contrario se puede corregir con el complemento SCP6 que brinda QGIS. La Fig. 6 ofrece ver el diseño web de la plataforma.

A continuación, se presentan las fechas de las imágenes descargadas, diferenciadas según la época del año (Tabla II). El producto descargado fue HarmonizedLandsat Sentinel-2 (HLS). Para el año 2015 se utilizó el producto (HLS) vigente desde 2013-04-01, donde la banda roja corresponde a la nomenclatura B04 y el NIR a B05. Para los años posteriores se empleó (HLS) vigente desde 2015-12-01 en el cual el único que cambia es la nomenclatura del NIR a B8A.

Tabla II. Imágenes descargadas de la página Earth Data según el año y la época establecida.				
AÑO	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
2015	04-01	28-05	16-08	04-11
2016	09-02	09-05	07-08	15-11
2017	23-02	04-05	17-08	15-11
2018	03-02	03-06	02-08	15-11
2019	08-02	14-05	07-08	15-11
2020	03-02	03-05	01-08	04-11
2021	07-02	08-05	06-08	14-11

El NDVI se calculó mediante la herramienta “calculadora raster” en QGIS por medio de la siguiente fórmula: $(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$, donde el NIR y el Red son mediciones de reflectancia espectral registradas con sensores en las regiones del espectro electromagnético del infrarrojo cercano (NIR) y el rojo (Red) respectivamente (Naser *et al.*, 2020).

Con la herramienta de QGIS (*estadísticas de zona*) se analizaron los resultados de una clasificación temática. Esta herramienta permite calcular varios valores de los píxeles de una capa ráster con la ayuda de una capa vectorial poligonal. Al elegir una banda de color, el complemento genera columnas de salida en la capa vectorial con un prefijo definido por el usuario y calcula para cada polígono, estadísticas sobre los píxeles que se encuentran dentro (QGIS, sf). Se trabajó con la estadística *Media*, para obtener valores de píxeles que representen valores medios de NDVI de cada tratamiento y parcela.

Análisis estadístico

El efecto de las variables analizadas a lo largo de las diferentes fechas, se evaluó mediante modelos lineales generales y mixtos. Se modeló sobre la Heteroscedasticidad y Correlación a fin de buscar un modelo con el mejor ajuste para AIC y BIC, utilizando la interfaz R del software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2020). Las diferencias entre los tratamientos se evaluaron mediante análisis de varianza y las medias se compararon utilizando el test de DGC con un nivel de probabilidad de 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Carbono Orgánico Total (COT)

Tanto al inicio como al final del periodo de estudio, el contenido de Carbono Orgánico Total (Mg ha⁻¹) en siembra directa y en el testigo se diferenció significativamente del de labranza convencional en la capa superficial del suelo (0-10 cm). En la capa más profunda (10-20 cm) las diferencias no fueron significativas en ninguno de los años evaluados. A continuación, las Figuras 7 y 8, representan lo expresado anteriormente.

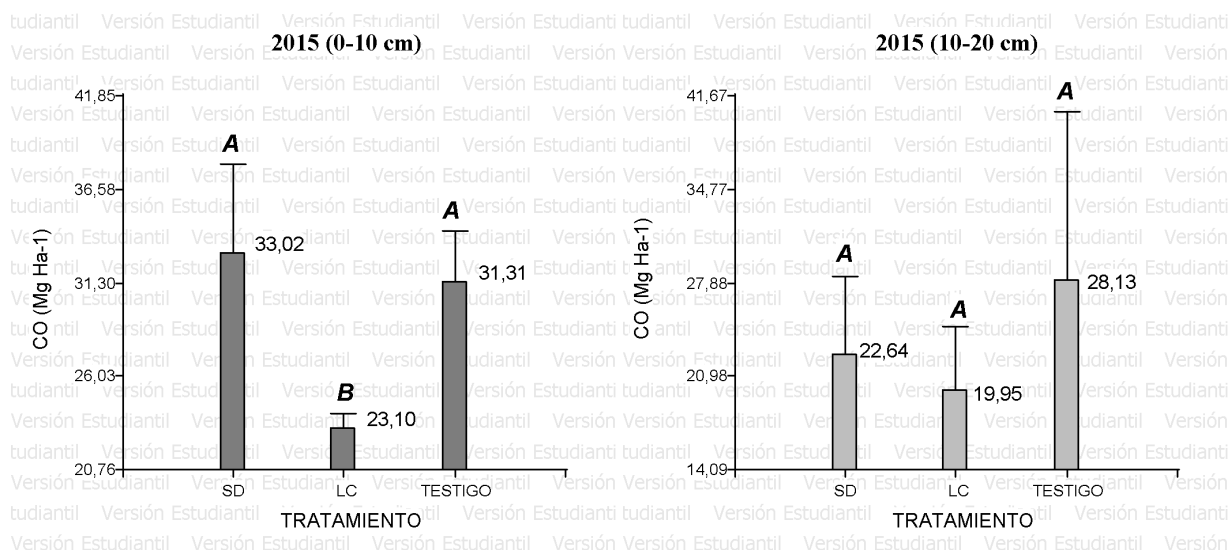


Fig. 7. Valores de Carbono Orgánico Total (Mg ha⁻¹) para el año de inicio (2015) según diferentes tratamientos. SD: Siembra Directa. LC: Labranza Convencional. Letras diferentes muestran diferencias significativas entre los tratamientos según DGC ($p < 0,05$). Las líneas verticales por encima y por debajo de cada barra representan el desvío estándar de la media.

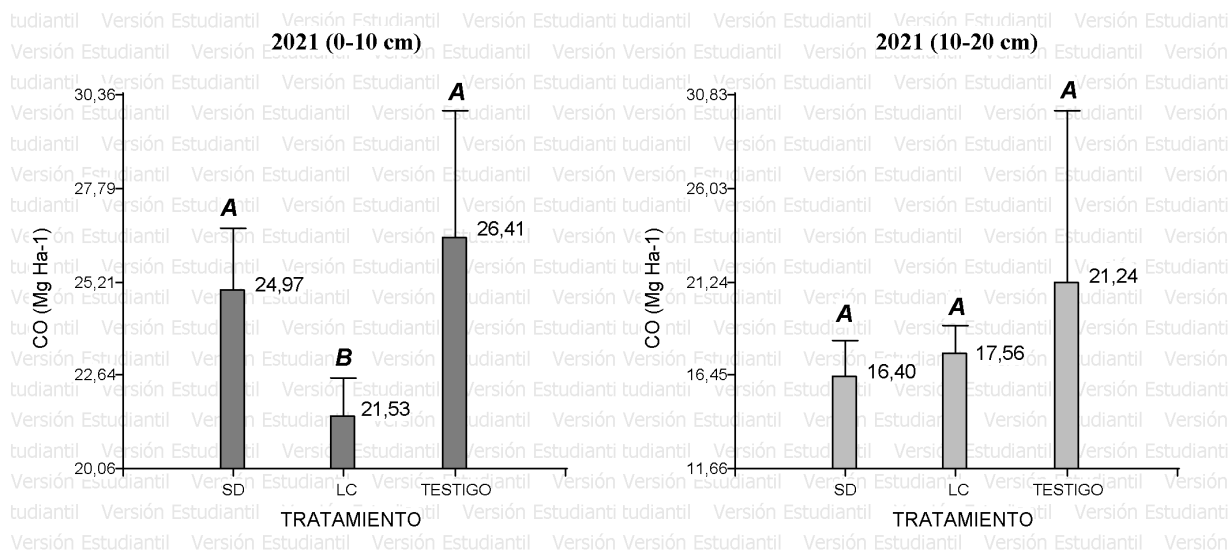


Fig. 8. Valores de Carbono Orgánico Total (Mg ha⁻¹) para el año final (2021) según diferentes tratamientos. SD: Siembra Directa. LC: Labranza Convencional. Letras diferentes muestran diferencias

significativas entre los tratamientos según DGC ($p < 0,05$). Las líneas verticales por encima de cada barra representan el desvío estándar de la media.

Las diferencias encontradas en los primeros 10 cm de suelo, pueden ser atribuidas a que, en SD, al no removerse el suelo, se produce una mayor acumulación de residuos en superficie contribuyendo a una mayor transformación de carbono orgánico en los primeros centímetros del suelo (Apezteguía & Sereno, 2002). Berhongaray & Álvarez (2020) y Eiza *et al.* (2005), afirman que las prácticas conservacionistas, como siembra directa, son más eficaz si se mantienen las condiciones que favorecen el aporte continuo de carbono.

Barbero (2010), comparó un monte prístino de la zona Pampeana y Chaco Seco con una rotación de cultivos agrícolas bajo SD, utilizando lotes con distintos historiales y rotaciones de cultivos. En lotes con más años de SD, el carbono orgánico disminuyó en la profundidad de 0-20 cm respecto al monte. Los suelos que obtuvieron mayores ganancias respecto al monte (0-20 cm y de 20-50 cm) son los que poseían más porcentaje de gramíneas, pastoreo y sólo dos años de agricultura continua, manifestando el efecto estabilizador de no remover el suelo. En nuestro caso, también encontramos diferencias entre las parcelas tratadas y el testigo, aunque limitados a los primeros 10 cm del suelo siendo el testigo el de mayor acumulación.

Según Roldán (2012), en suelos con mayor estabilidad estructural, como los que se desarrollan bajo SD, la acumulación inicial de carbono puede ser mayor, pero también lo es la actividad microbiana, lo que favorece una mayor tasa de descomposición. En este sentido, la reducción de aportes de residuos de cultivos anuales, sumada a un posible cambio en la distribución del

carbono aportado por la pastura, podría haber intensificado el descenso del COT en SD (Koritko *et al.*, 2019).

Tabla III. Comparación entre el promedio general de Carbono Orgánico Total (Mg ha^{-1}) de los años 2015 y 2021, para la profundidad de 0-10 cm de todos los tratamientos. Medias seguidas de letras diferentes indican diferencias significativas según DGC ($p < 0,05$).

Año	Media COT
2015	29,14 a
2021	24,30 b

Tabla IV. Comparación entre el promedio general de Carbono Orgánico Total (Mg ha^{-1}) de los años 2015 y 2021, para la profundidad de 10-20 cm de todos los tratamientos. Medias seguidas de letras diferentes indican diferencias significativas según DGC ($p < 0,05$).

Año	Media COT
2015	23,58 a
2021	18,40 b

Al analizar los valores promedio de COT correspondiente a los años 2015 y 2021 (Tablas III y IV), se observa una disminución significativa en ambos estratos evaluados (0-10 cm y 10-20 cm). Esta tendencia sugiere un cambio general en las condiciones del suelo asociado a una pérdida de carbono orgánico a lo largo del tiempo, independientemente del sistema de labranza y su historial.

El cambio de agricultura continua a una pastura y su posterior transición a pastizal natural, puede conducir a una disminución en los valores de COT. Según Berhongaray & Álvarez (2020) se

encontró que en las pasturas sólo se logran grandes aportes de carbono al finalizar el ciclo de vida y producirse la senescencia de la masa de raíces. Si se considera que la pastura se dio por finalizada en 2018, es posible que, durante los años siguientes, la producción de biomasa aérea y subterránea haya disminuido progresivamente, reduciendo así el aporte de residuos orgánicos al suelo.

El avance del pastizal natural, implicó un cambio en la composición y dinámica del ecosistema. Este proceso de transición pudo haber modificado tanto la calidad como la cantidad de los aportes orgánicos al suelo, dado que las especies naturales poseen diferentes tasas de crecimiento y descomposición respecto a las especies cultivadas. Por esta razón, probablemente, la acumulación de carbono fue alterada más significativamente en lotes con antecedentes de SD. Estas diferencias pueden deberse a la acumulación de materiales orgánicos lábiles parcialmente descompuestos o en las distintas tasas de descomposición. (Janzen *et al.*, 1998, mencionado en Eiza *et al.*, (2020)).

En el testigo también se produjo una disminución del COT en el suelo. La velocidad de descomposición y acumulación del carbono en ecosistemas naturales está más influenciada por las variaciones en la temperatura y lluvias de lo que ocurre con ecosistemas intervenidos (Caviglia, 2016, mencionado en Burbano-Orjuela, 2018).

Nitrógeno Total (NT)

En 2015, no se observaron diferencias significativas en los valores de nitrógeno entre tratamientos, excepto en la profundidad de 10-20 cm, donde el testigo presentó una variación (Figura 9). Sin embargo, en 2021 se evidenciaron cambios: el tratamiento LC mostró valores

similares al testigo en ambas profundidades, mientras que SD presentó los valores más bajos de nitrógeno (Figura 10).

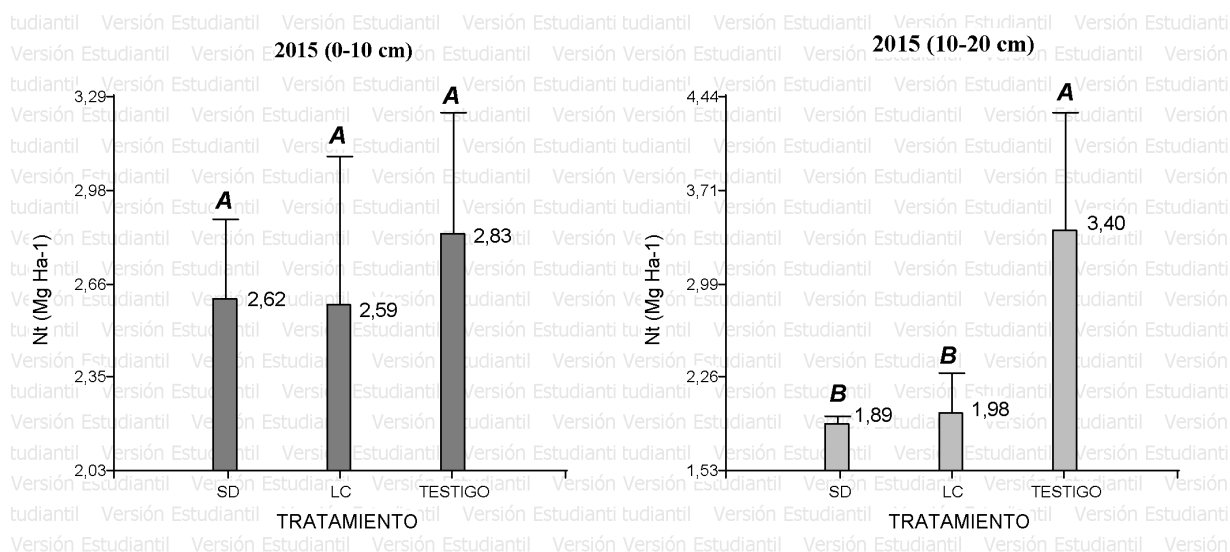


Fig. 9. Valores de Nitrógeno Total (Mg ha⁻¹) para el año de inicio (2015) según diferentes tratamientos. SD: Siembra Directa. LC: Labranza Convencional. Letras diferentes muestran diferencias significativas entre los tratamientos según DGC ($p < 0,05$). Las líneas verticales por encima de cada barra representan el desvío estándar de la media.

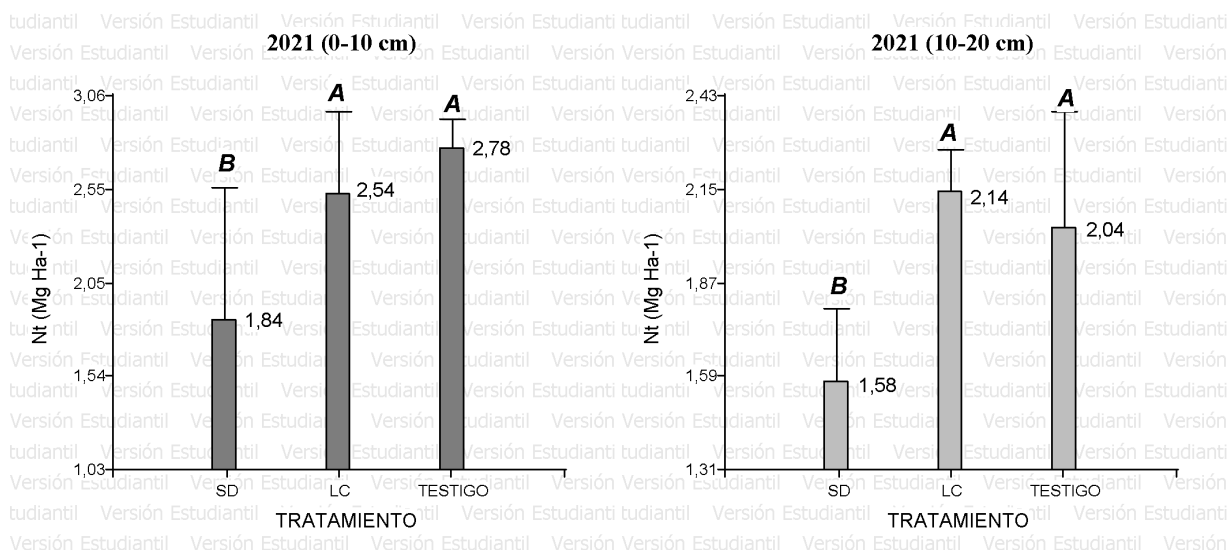


Fig. 10. Valores de Nitrógeno Total (Mg ha^{-1}) para el año final (2021) según diferentes tratamientos. SD: Siembra Directa. LC: Labranza Convencional. Letras diferentes muestran diferencias significativas entre los tratamientos según DGC ($p < 0,05$). Las líneas verticales por encima de cada barra representan el desvío estándar de la media.

La cantidad y calidad del residuo aportado en cada sistema presenta una influencia directa sobre el COT y el NT (Di Gerónimo *et al.*, 2018). Studdert (2006), en su ensayo de larga duración de rotaciones y labranzas afirmó que en los casos donde la relación C/N era baja, se producían mayores caídas de la materia orgánica y de la capacidad del suelo para mineralizar N. Por otra parte, como explican Steinbach & Álvarez (2007), la siembra directa incrementa la densidad aparente y la dureza del suelo, reduciendo también la porosidad. Estos cambios físicos pueden afectar la disponibilidad de nutrientes.

En los casos con antecedentes de labranza convencional, la remoción del suelo puede disminuir la actividad biológica a largo plazo y limitar la acumulación de nitrógeno y carbono en formas lábiles (Koritko *et al.*, 2019).

Respecto a la comparación de las medias generales entre los años 2015 y 2021, tampoco se encontraron diferencias significativas (Tablas V y VI).

Tabla V. Comparación de los promedios generales de Nitrógeno Total (Mg ha^{-1}) correspondientes a todos los tratamientos para los años 2015 y 2021, en la profundidad de 0–10 cm. Medias seguidas de letras diferentes indican diferencias significativas según DGC ($p < 0,05$).

Año	Media NT
2015	11,03 a
2021	11,22 a

Tabla VI. Comparación de los promedios generales de Nitrógeno Total (Mg ha^{-1}) correspondientes a todos los tratamientos para los años 2015 y 2021, en la profundidad de 10–20 cm. Medias seguidas de letras diferentes indican diferencias significativas según DGC ($p < 0,05$).

Año	Media NT
2015	10,13 a
2021	10,09 a

En la Región Pampeana los aportes de residuos de los cultivos anuales oscilan entre 30 y 70 % de los atribuidos a los pastizales naturales conduciendo a la disminución de los niveles de COT y NT de los suelos cultivados en comparación con los no cultivados (Álvarez & Steinbach, 2012 mencionado en Di Gerónimo *et al.*, 2018). En este sentido, dado que para el año 2021 el ensayo

se encontraba en una etapa de transición hacia un sistema de pastizal natural, es aceptable que los niveles de nitrógeno total aún no se encuentren estabilizados.

Determinaciones con NDVI

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en los años analizados. Sin embargo, se observa que hasta el año 2018 el NDVI de las parcelas con SD y LC presenta un comportamiento distinto en comparación con las parcelas testigo, evidenciando diferencias en la cobertura vegetal. A partir de 2018, estas diferencias comienzan a reducirse, mostrando un comportamiento del NDVI en SD y LC cada vez más similar al del Testigo. Esto sugiere una tendencia hacia un patrón de restauración de la vegetación natural (Figura 11).

A continuación, se presentan las tablas VII y VIII, con los resultados obtenidos para los años 2015 y 2021, seleccionados dentro de la secuencia temporal comprendida entre 2015 y 2021 para el análisis. Se seleccionaron dichos años con el objetivo de representar el inicio y el final del periodo de estudio. Sin embargo, en la Figura 11 se visualizan todos los datos representados de los años en cuestión.

Tabla VII. Resultados del NDVI por tratamiento y época para el año 2015.	
Tratamiento	Media NDVI
VERANO	
SD	0,70 b

LC	0,69 b
Testigo	0,77 a
OTOÑO	
SD	0,60 a
LC	0,60 a
Testigo	0,56 b
INVIERNO	
SD	0,68 a
LC	0,69 a
Testigo	0,61 b
PRIMAVERA	
SD	0,73 b
LC	0,72 b
Testigo	0,79 a

SD = Siembra Directa. LC = Labranza Convencional. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para una misma época según DGC($p < 0,05$).

Tabla VIII. Resultados del NDVI por tratamiento y época para el año 2021.	
Tratamiento	Media NDVI
VERANO	
SD	0,66 b
LC	0,66 b
Testigo	0,79 a
OTOÑO	
SD	0,60 a
LC	0,59 a
Testigo	0,55 a
INVIERNO	
SD	0,44 a
LC	0,44 a

Testigo	0,44 a
PRIMAVERA	
SD	0,80 b
LC	0,78 b
Testigo	0,87 a

SD = Siembra Directa. LC = Labranza Convencional. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para una misma época según DGC($p < 0,05$).

A continuación, se presenta la Figura 11 que muestra la evolución de los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) desde el año 2015 hasta 2021 para las parcelas bajo siembra directa (SD) y labranza convencional (LC), comparadas con el testigo (pastizal natural).

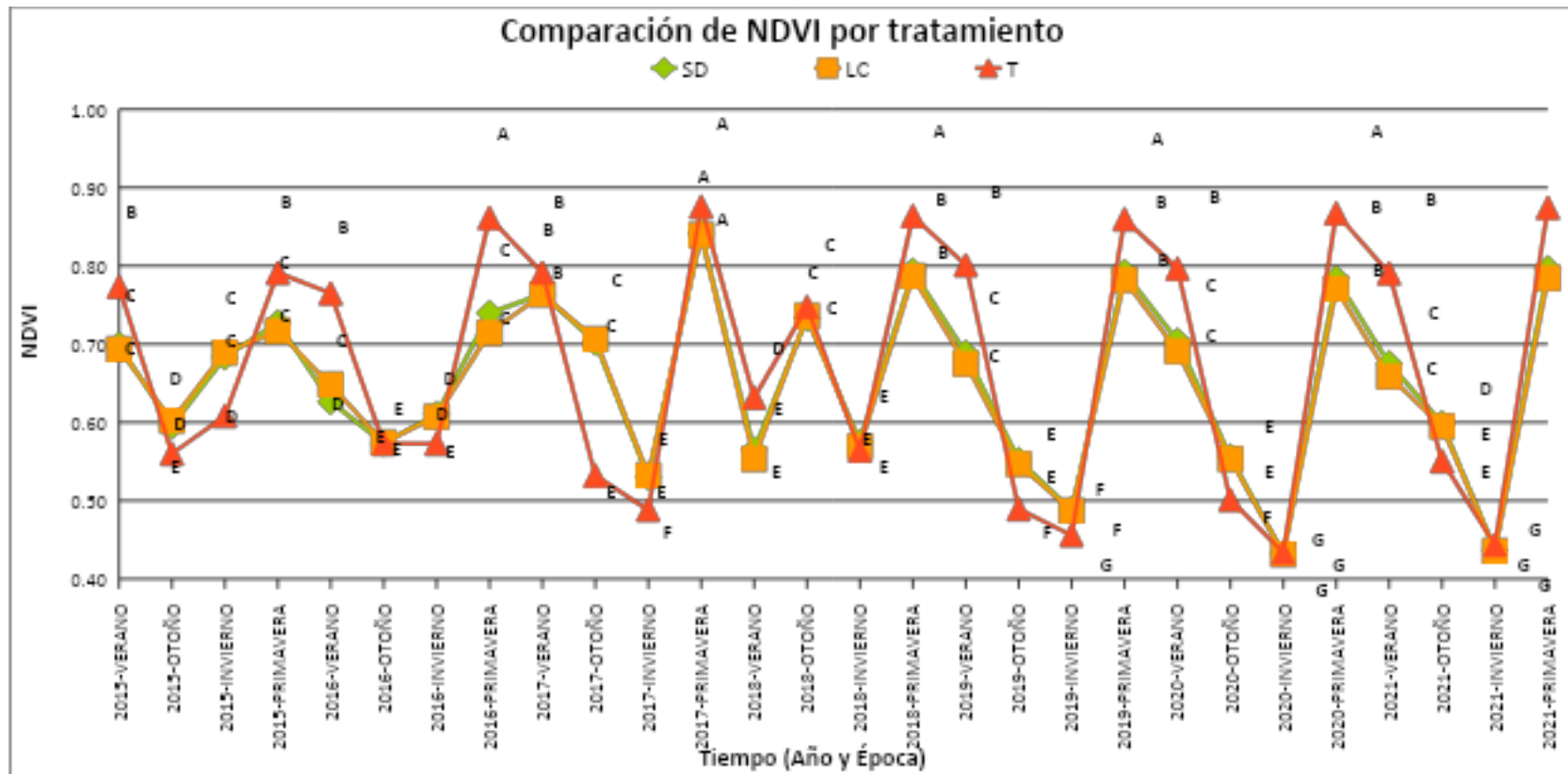


Fig. 11. Análisis Temporal del NDVI en una pastura con antecedentes de siembra directa y labranza convencional (2015-2021). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para una misma época según DGC ($p < 0,05$).

De la Figura 11, se desprende que las parcelas con pastura, tanto en SD como en LC, muestran menores fluctuaciones entre épocas que el testigo. Sin embargo, a partir de 2018 esas fluctuaciones comienzan a incrementarse asemejándose al testigo. Este cambio sugiere que podría haberse iniciado un proceso de restauración de la vegetación natural, lo que se refleja en la mayor similitud con el patrón del pastizal natural.

Las observaciones estudiadas por Lara & Gandini (2016) explican que las variaciones estacionales del NDVI en el comportamiento de las coberturas vegetales están influenciadas en mayor medida por factores climáticos o de suelo. Los pastizales naturales mostraron mayores fluctuaciones estacionales comparadas con pasturas. El comportamiento de los pastizales naturales, según Zerda & Tiedemann (2010), en la región de Chaco Seco, también mostraron una alta variabilidad en los valores de NDVI debido no solo a su diversidad de especies sino a la respuesta a factores climáticos.

Si bien el estudio de Gaitán *et al.* (2013) se centra en pastizales patagónicos, ubicados en una región distinta en comparación a este trabajo, resulta un ejemplo para comprender cómo los factores climáticos pueden explicar las fluctuaciones observadas. La cobertura vegetal está fuertemente determinada por la frecuencia y estacionalidad de las precipitaciones, lo que genera fluctuaciones en la densidad y distribución de las plantas. Además, señalan que los pastizales naturales presentan una mayor sensibilidad a las variaciones climáticas, lo cual podría ayudar a interpretar las oscilaciones observadas en el testigo del presente estudio.

Al emplear la herramienta de la NASA, Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS), se identificó una limitación significativa relacionada con la resolución espacial de 30 m. Las parcelas experimentales en este trabajo fueron de tamaño inferior al del píxel. Esta situación generó una mezcla espectral que afectó la precisión de los valores obtenidos. En las parcelas testigo, al estar agrupadas de manera contigua, este efecto de mezcla es menor, lo que facilita la discriminación entre áreas tratadas (SD y LC) y no tratadas (testigos). En este sentido, Guevara-Ochoa *et al.* (2018) destacan que el uso de imágenes de media resolución espacial, 30 metros por píxel, puede generar el denominado efecto de píxel mixto en áreas donde la cobertura no es homogénea. La metodología que utilizaron para caracterizar coberturas y usos del suelo en el área de estudio, fue por medio de series temporales de NDVI-MODIS y Landsat-8 con una menor resolución para las áreas mezcladas.

Se optó por elegir esta herramienta ya que al momento de la descarga de las imágenes no se encontraban imágenes Sentinel-2 mediante el programa Copernicus Open Access Hub(s.f.), con imágenes de resolución de 10 metros. El programa Copernicus Open Access Hub, fue totalmente reemplazado por Copernicus Data Space Ecosystem con funcionalidad completa para inicios del año 2024 (INTA, 2023). Este nuevo programa ofrece una interfaz mejorada y mayores capacidades de procesamiento e imágenes disponibles.

Chen *et al.* (2021), en su estudio sobre las perturbaciones forestales en los sitios de Tanzania y Brasil, señalan que, si bien el producto HLS ofrece una ventaja en términos de resolución temporal, implica una pérdida en la resolución espacial de las imágenes Sentinel-2 lo que las hace inadecuadas para superficies más pequeñas. Aunque sugieren que las investigaciones

futuras podrían analizar las compensaciones que ofrece el HLS entre la ganancia en resolución temporal y la pérdida de resolución espacial.

El uso de imágenes satelitales y el análisis de índices como el NDVI a lo largo del tiempo constituyen herramientas útiles para interpretar la dinámica de la cobertura vegetal, especialmente en contextos de transición como lo que ocurre en este trabajo. Tal como lo señalan Vázquez *et al.* (2013), el análisis de series temporales del NDVI permite identificar patrones compatibles con los cambios en la cobertura y el uso del suelo, tal como lo hicieron los autores para la provincia de La Pampa.

Relación Carbono Orgánico Total-Nitrógeno Total-NDVI

Los resultados indican que existe una correlación positiva significativa entre el COT y el NT en el suelo (Tabla IX). No se encontró correlación significativa entre dichas variables y el NDVI.

Tabla IX. Correlación de Pearson según las variables estudiadas.

Variable 1	Variable 2	n	Pearson	p-valor
NDVI	NT	96	0,11	0,3070
NDVI	COT	96	0,13	0,1960
NT	COT	96	0,26	0,0115

La correlación positiva entre el COT y el NT es coherente con lo aportado por Di Gerónimo *et al.*, 2018, quienes explican que ambos tienden a acumularse en forma conjunta, esta relación de carbono-nitrógeno es fundamental para la descomposición de los rastrojos, la cobertura del suelo y el ciclo de nutrientes en el suelo.

En cambio, no se encontró correlación significativa entre estas variables edáficas y el NDVI, lo cual puede explicarse por el hecho de que el NDVI es un buen estimador de la cobertura vegetal pero no refleja de forma directa procesos de acumulación o pérdida de nutrientes en el suelo (Gaitán, 2002). Además, como se mencionó anteriormente conforme con Chen *et al.* (2021), el uso de datos con una resolución espacial de 30 m, podría resultar insuficiente para capturar variaciones a escala de parcela.

Sin embargo, la investigación de Castiglioni *et al.* (2021), aporta información para justificar el uso de la teledetección y su relación con propiedades edáficas. Estos autores, encontraron correlaciones significativas principalmente en propiedades como el pH, las ligadas al carbono y a la estabilidad estructural del suelo utilizando índice de Intensificación en la Secuencia de Cultivos (ISI), cuantificado mediante el uso de imágenes satelitales Landsat y MODIS. No obstante, es importante señalar que dicho trabajo se realizó a una escala de microcuenca, lo que implica un contexto espacial y de análisis diferente al de este estudio. Por el contrario, en esta investigación la escala es de parcela y el hecho de trabajar con superficies menores al tamaño de píxel de las imágenes, puede haber generado un efecto de píxel mixto y dificultado la detección de relaciones significativas entre el NDVI y las propiedades edáficas (Guevara-Ochoa *et al.*, 2018).

Los valores de NDVI (Fig.11) reflejan una recuperación progresiva de la vegetación, asemejándose al patrón observado en el área no tratada (testigos). Este patrón sugiere que, a lo largo del tiempo, suelos sometidos a agricultura continua pueden restablecerse con características tanto vegetativas como edáficas similares a las de ecosistemas no perturbados. Los sistemas de labranza juegan un papel fundamental en la dinámica del carbono en el suelo.

(Berhongaray & Álvarez, 2020). La siembra directa, al presentar una menor perturbación del suelo, que permite que con el paso del tiempo los valores de carbono orgánico y densidad aparente se asemejan a los de suelos no perturbados (Álvarez, 2013). Vázquez *et al.* (2014) también examinaron cómo el Índice Verde Normalizado (IVN) se asocia con diferentes comunidades de pastizales y características edáficas en la provincia de Buenos Aires, obteniendo así distintos patrones anuales (PA) de IVN. Estos autores concluyeron que los PA más asociados a las propiedades del suelo fueron en áreas muy sometidas a la agricultura y luego abandonados.

CONCLUSIONES

Esta investigación permite analizar la evolución del COT, NT y el NDVI en un sistema de transición hacia un pastizal natural, teniendo como antecedente 10 años de agricultura continúa bajo distintos tratamientos de labranza y la implantación de una pastura. Los resultados indican una correlación positiva entre el COT y NT, lo cual es consistente con estudios previos. Sin embargo, no se observó una correlación significativa entre estas variables y el NDVI.

La falta de correlación puede atribuirse, en parte, a la resolución espacial de la herramienta satelital empleada. El uso de Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) de la NASA, si bien facilitó el acceso a datos con mayor periodicidad, implicó trabajar con imágenes de 30 metros de resolución espacial. Dado que las parcelas del ensayo eran de menor tamaño al píxel, pudo haberse generado una mezcla de coberturas dentro de cada píxel afectando la capacidad de detección de cambios. Sin embargo, el análisis temporal del NDVI graficado permitió identificar un patrón progresivo de restauración de la vegetación a lo largo del período de estudio. Las

propiedades edáficas, al ser evaluadas mediante muestreos puntuales con un nivel de detalle mayor, permitieron detectar las diferencias significativas entre tratamientos.

Como recomendación para futuras investigaciones, se sugiere emplear imágenes satelitales con mayor resolución espacial, como las provistas por Sentinel-2. Sería pertinente complementar los análisis de NDVI con índices adicionales que permitan una mejor diferenciación de las coberturas a pequeña escala.

BIBLIOGRAFÍA

Alonso, C., Moreno, V. & Rodríguez, E. (1999). Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación. Una sencilla práctica de introducción a la teledetección. En VIII Congreso Nacional de Teledetección: Teledetección. Avances y Aplicaciones (pp. 429-435). Albacete, España. Recuperado de: <https://www.aet.org.es/congresos/viii/alb99.pdf>

Álvarez, C. (2013). Condición física de los suelos limosos bajo siembra directa: Caracterización, génesis y manejo. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica.

Álvarez, R., Steinbach, H. E. & De Paepe, J. (2015). Fertilidad de suelos y fertilización en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

Apezteguía, H. & Sereno, R. (2002). Influencia de los sistemas de labranza sobre la cantidad y calidad del carbono orgánico del suelo. Agricultura Técnica, 62(3), 418–426. Extraído de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0365-28072002000300007

Barbero, M. F. (2010). Evolución del carbono en suelos provenientes de monte bajo siembra directa del área subhúmeda templada y subtropical de Argentina (Tesis doctoral, Universidad Católica de Córdoba). Universidad Católica de Córdoba. Extraído de https://pa.bibdigital.ucc.edu.ar/2/1/TD_Barbero.pdf

Barrios, M. B., Buján, A., Bozzo, A. A., Debelis, S. P., De Grazia, J., López, S. & Fernández, F. (2008). Variables físicas bajo diferentes sistemas de labranza. En Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.

Berhongaray, G. & Álvarez, R. (2020). Aportes de carbono sub-superficiales de distintos cultivos y rotaciones. En Actas del XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Sociedad Argentina de Ciencia del Suelo.

Blake, G. R. & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. En A. Klute (Ed.), Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods (2da ed.). Madison, WI: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.

Burbano-Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. Revista de Ciencias Agrícolas, 35(1), 82-96.

Castiglioni, M., Espínola, A., Gusmerotti, L., Havrylenko, S. & Spinazzola, E. (2021). Primeros aportes en la predicción de propiedades edáficas usando imágenes satelitales. En Actas del XIII Congreso de AgroInformática (CAI 2021) - JAIIO 50.

Chen, N., Tsendbazar, N. E., Hamunyela, E., Verbesselt, J. & Herold, M. (2021). Sub-annual tropical forest disturbance monitoring using harmonized Landsat and Sentinel-2 data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.

Chuvieco, E. (1991). Fundamentos de teledetección espacial. Estudios Geográficos.

Conti, M. E. & Giuffré, L. (2014). Edafología, bases y aplicaciones ambientales argentinas. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

Copernicus Open Access Hub. (s.f.). Copernicus Open Access Hub. <https://scihub.copernicus.eu/>

Copernicus (2022). Centro de acceso abierto, productos de usuario de Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 y Sentinel-5P. Recuperado de <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

Di Gerónimo, P. F., Videla, C. D. C. & Laclau, P. (2018). Distribución de carbono y nitrógeno orgánico en fracciones granulométricas de suelos bajo pastizales, agricultura y forestaciones. Ciencia del suelo, 36 (1), 11-22. Recuperado de:

https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672018000100002&script=sci_abstract

Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M. & Robledo, C. W. (2020). InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Eiza, M. J., Fioriti, N., Studdert, G. A. & Echeverría, H. E. (2005). Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y fertilización nitrogenada. Ciencia del suelo, 23(1), 59-67. Extraído de:

https://www.researchgate.net/publication/262704465_Fracciones_de_carbono_organico_en_la_capa_arable_efecto_de_los_sistemas_de_cultivo_y_fertilizacion_nitrogenada

Gaitán, J. J. (2002). Atributos estructurales y funcionales de los ecosistemas áridos y semiáridos de la Patagonia y su relación con factores abióticos y el uso antrópico (Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires).

Giuseppucci, J. & Ortino, J. (2015). La geografía. En P. Zubiaurre (Ed.), Ayacucho: una historia (1ra ed.).

Gómez-Calderón, N., Villagra-Mendoza, K. & Solorzano-Quintana, M. (2018). La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria). Revista Tecnología en Marcha, 31(1), 167-177. Recuperado de <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v31n1/0379-3982-tem-31-01-167.pdf>

Guevara-Ochoa, C., Lara, B. D., Vives, L. S., Zimmermann, E. D. & Gandini, M. L. (2018). Una metodología para la caracterización del uso del suelo mediante imágenes de media resolución espacial.

Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y. & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. Journal of Forest Research, 32, 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>

Instituto Geográfico Nacional. (2018). Fundamentos de teledetección aplicada. Copernicus User Uptake. Recuperado de:

https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/2_Fundamentos_teledeteccion_aplicada.pdf

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). (2023). Copernicus Data Space Ecosystem: el nuevo portal de acceso a los datos Sentinel. INTA Blogs. https://www.inta.es/INTA/gl/blogs/copernicus/BlogEntry_1677223555089

Jackson, M. L. (1976). Soil chemical analysis: Advanced course. Madison, WI: Soil Science Society of America.

Jones, C. B. Geographical Information Systems and Computer Cartography. Harlow, Longland. 319 p. 1997.

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. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/336412427_Efecto_de_la_siembra_directa_en_la_estabilizacion_del_carbono_organico_del_suelo_a_escalade_sitio_en_Santiago_del_Estero_Argentina/fulltext/640e14b666f8522c38999d98/Efecto-de-la-siembra-directa-en-la-estabilizacion-de-l-carbono-organico-del-suelo-a-escala-de-sitio-en-Santiago-del-Estero-Argentina.pdf?origin=scientificContributions

Labrador-García, M., Évora-Brondo, J. A. & Arbelo-Pérez, M. (2012). Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias.

Lara, B. D. & Gandini, M. L. (2016). Caracterización del comportamiento fenológico de las coberturas vegetales en un sector de la Pampa Deprimida (Argentina): una aproximación utilizando series temporales de NDVI. Revista de la Facultad de Agronomía, 36(1), 47-58. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/59325>

Ministerio de Asuntos Agrarios (MAA). (2007). Regiones naturales de la provincia de Buenos Aires. [Fuente: Ministerio de Asuntos Agrarios de la provincia de Buenos Aires].

Mantovani, E. C., Magdalena, C. & Magdalena, C. (2014). Manual de agricultura de precisión.

Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (2004). Manual de teledetección. Gobierno de Argentina. Recuperado de:

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/manual_de_teledeteccion.pdf

Monti, M., Marcuzzi, G. & Destefano, M. (2018). Análisis Comparativo de parámetros edáficos y NDVI entre un sistema de Pastoreo Racional Voisín y Agricultura en Siembra Directa. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/329070218>

NASA (2024). Harmonized Landsat and Sentinel-2 (HLS) Product Fact Sheet. National Aeronautics and Space Administration. Disponible en <https://www.earthdata.nasa.gov>

NASA Earthdata. Disponible en Earthdata. (2024). Harmonized Landsat and Sentinel-2 (HLS) Overview <https://www.earthdata.nasa.gov>

Naser, M. A., Khosla, R., Longchamps, L. & Dahal, S. (2020). Using NDVI to differentiate wheat genotypes productivity under dryland and irrigated conditions. Remote Sensing, 12(5), 824. <https://doi.org/10.3390/rs12050824>

Olaya, V. (2014). Sistemas de Información Geográfica. Recuperado de https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf

Ovando, G., de la Casa, A., Díaz, G., Díaz, P., Bressanini, L. & Miranda, C. (2021). Desempeño de diferentes índices de vegetación de Sentinel-2A para estimar el rendimiento de soja en agricultura de precisión. Agriscientia, 38(2), 1-12.

Pereyra, F. X. & Ragas, D. B. (2021). Los suelos de La Pampa ondulada. Características, clasificación, distribución y génesis. Provincia de Buenos Aires-Argentina.

Pino-Vargas, E. & Huayna, G. (2022). Evolución espacial y temporal de cultivo del olivo por efecto del ataque de plagas, utilizando sensoramiento remoto y procesamiento de imágenes.

Politis, G. & Barros, P. (2006). La región pampeana como unidad espacial de análisis en la arqueología contemporánea. Folia Histórica del Nordeste, (16), 51-73.

QGIS User Guide (Versión 3.28). Recuperado de: <https://docs.qgis.org/latest/es/>

QGIS. (s.f.). Zonal Statistics Plugin. En QGIS Documentation. Recuperado de https://docs.qgis.org/2.18/es/docs/user_manual/plugins/plugins_zonal_statistics.html

Roldán, M. F. (2012). Distribución del carbono orgánico particulado por tamaño de agregados bajo distintos sistemas de labranza (Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata). Recuperado de https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/6928/INTA_CRChaco-Formosa_EEASaenzPe%c3%b1a_Roldan_MF_Distribucion_del_carbono_organico_particulado_por_tama%c3%b1o.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rossi, C. A., González, G. L., De Magistris, A. & Tangir, D. (2015). Ecología, regiones fitogeográficas argentinas y su interrelación con la producción agropecuaria: Parte I. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

SAMLA. (2004). Sistema de apoyo metodológico a los laboratorios de suelo, agua, vegetales y enmiendas orgánicas. 1ª ed. Bs As. Dirección de Agricultura. CD Rom. ISBN 987-9184-40-8.

Serrano-Fábrega, J., Quirós, E., Sánchez-Galán, J. & Jiménez, J. U. (2018). Análisis prospectivo de la detección hiperspectral de cultivos de arroz (*Oryza sativa* L.). KnEEngineering, (3), 69-79.

Recuperado de:

https://www.researchgate.net/publication/323503264_Analisis_Prospectivo_de_la_Deteccion_Hiperspectral_de_Cultivos_de_Arroz_Oryza_Sativa_L

Servicio Meteorológico Nacional. (s.f). <https://www.smn.gob.ar/estadisticas>

Soil Service Staff. (1999). Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. USDA, Soil Conservation Service. Washington D.C. 869 pp.

Sokolowski, A. C. (2019). Efecto de dos sistemas de labranza en una rotación típica de Pampa Ondulada, sobre la calidad del suelo y la productividad y calidad industrial del cultivo de maíz “*Zea mays*” y trigo “*Triticumaestivum*” (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Lomas de Zamora).

Steinbach, H. S. & Álvarez, R. (2007). ¿Afecta el sistema de labranza las propiedades físicas de los suelos de la Región Pampeana? Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Pampa, 35(1), 91-99. Recuperado de [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/A599CFAB43EB65978525799500785D16/\\$FILE/Steinbach.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/A599CFAB43EB65978525799500785D16/$FILE/Steinbach.pdf)

Studdert, G. A. (2006). Ensayos de larga duración de rotaciones y labranzas: La experiencia de la Unidad Integrada Balcarce. Taller "Sustentabilidad Agrícola: El Rol de los Ensayos de Larga Duración", 30, 21-22. Recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/228353991_Ensayos_de_larga_duracion_de_rotaciones_y_labranzas_la_experiencia_de_la_Unidad_Integrada_Balcarce

Uribeetxebarria, A., Castellón, A. & Aizpurua, A. A. (2022). First approach to determine if it is possible to delineate in-season N fertilization maps for wheat using NDVI derived from Sentinel-2. Remote Sensing, 14(12), 2872. <https://doi.org/10.3390/rs14122872>

Vázquez, P., Adema, E. & Fernández, B. (2013). Dinámica de la fenología de la vegetación a partir de series temporales de NDVI de largo plazo en la provincia de La Pampa. Ecología austral, 23(2), 77-86. Recuperado de:

https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1667-782X2013000200001&script=sci_arttext

Vázquez, P., Calandroni, M., Cabria, F., Agnusdei, M. & Rojas, M. D. C. (2014). Patrones de índice verde normalizado (IVN) en pastizales de la provincia de Buenos Aires: su asociación con comunidades vegetales y suelos. Ecología austral, 24(3), 276-285. Recuperado de https://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/4/5

Zerda, H. R. & Tiedemann, J. L. (2010). Dinámica temporal del NDVI del bosque y pastizal natural en el Chaco de la Provincia de Santiago del Estero, Argentina. Ambiência, 6(1), 13-24. Recuperado de <https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/971/971>