

INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO EN SISTEMAS TABACALEROS DE JUJUY: IMPACTO DE LAS PRÁCTICAS DE MANEJO

Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos
Aires,
Área Ciencias del Suelo

Armando Raúl Colque
Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de Jujuy - 2007

Lugar de trabajo: Cátedra de Química Gral. e Inorgánica y Laboratorio de Análisis
de suelo y agua. FCA – UNJU.



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Mario Guillermo Castiglioni

Ingeniero Agrónomo – Universidad de Buenos Aires

Magister en Ciencias del Suelo – Universidad de Buenos Aires

Dr. en Ingeniería – Universidad Nacional de Rosario

Co-director

Romina Ingrid Romaniuk

Ingeniero Agrónomo – Universidad de Buenos Aires

Dr. en Ciencias Agropecuarias (FAUBA)

Consejero de Estudios

Patricia Mónica Arias

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de Jujuy

Magister en Ciencias del Suelo – Universidad de Buenos Aires

DEDICATORIA

A mis padres, hermanos y en especial a mi mujer Mariel e hijo Esteban.

AGRADECIMIENTOS

- Al llegar a esta instancia me acuerdo cuando se empezó a gestar la realización de una tesis de postgrado, lo veía muy lejos.....hasta casi imposible, digo por la distancia y el costo económico que ello implica, en el transcurso del proceso de este trabajo he encontrado muchas personas que supieron ayudarme en cada instancia del desarrollo de la misma, quiero agradecer:
- A los productores tabacaleros del Valle templado de Perico – Jujuy
- A mis consejeros: Mario Castiglioni, Romina Romaniuk y Patricia Arias por su valioso tiempo y conocimiento.
- Al ex Decano de FCA – UNJU. Mario Bonillo por confiar en mí y su constante apoyo logístico.
- A los alumnos José Mendoza, Joaquín Quispe, Pablo Torres e Iván Jerez por su colaboración durante el muestreo de suelo.
- A Marta Leaño y Lauro Cazón (Catedra de Bioestadística FCA-UNJu.) por su valiosa colaboración en el análisis estadístico.
- A Ester quien fuera la abuelita del novio de mi sobrina en aquel tiempo entonces, ella me hospedo en su casa sin conocerme cuando fui a realizar mi primer curso de postgrado a la gran ciudad de Buenos Aires.
- A la Facultad de Ciencias Agrarias – UNJU. Por su contribución en proveerme de vehículo durante la campaña de campo.
- Al Laboratorio de Análisis de suelo y Agua de FCA – UNJU por permitirme a realizar los análisis de suelo propuesto.
- A la Escuela para Graduados Alberto Soriano de FAUBA por esperarme en la presentación del escrito final.
- A mi familia por acompañarme y apoyarme durante este período.
- A mi esposa e hijo por apoyarme y ayudarme a que siga desarrollándome profesionalmente, por aguantarme mi ausencia desde 1 hasta 3 semanas durante la realización de los cursos de postgrado.

A todos ellos muchas gracias!

INDICE GENERAL

CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.2 EL CULTIVO DE TABACO.....	7
1.2.1. Su importancia en la Argentina.....	7
1.2.2. Características del cultivo de tabaco	8
Almácigo	9
Cultivo a campo	11
Trasplante.....	11
Fertilización.....	12
Aporque.....	12
Floración – Desflore.....	13
Maduración - Cosecha.....	13
Rendimientos e índice de cosecha.....	13
Curado.....	14
1.3. TIPOS DE MANEJO DEL CULTIVO DE TABACO EN EL VALLE LOS PERICOS.....	14
1.3.1. Monocultivo de tabaco bajo labranza convencional sin incorporación de abono	14
1.3.2. Monocultivo de tabaco bajo labranza convencional con incorporación de abono verde	15
1.5. ÍNDICES DE CALIDAD DEL SUELO	23
1.5.1. Indicadores físicos de calidad del suelo	27
1.5.2. Indicadores químicos de calidad de suelo	29
1.5.3. Indicadores biológicos de calidad del suelo.....	32
1.6. OBJETIVOS	36
1.7. MATERIALES Y MÉTODOS	37
1.7.1. Área de trabajo	37
1.7.1.1. Localización	37
1.7.1.2. Clima.....	38
1.7.1.3. Suelos.....	39
1.7.2. Tratamientos analizados.....	41

1.7.3. Análisis granulométrico	43
1.7.3.1. Serie de suelos Perico.....	43
1.7.3.2. Serie de suelos Monterrico	44
1.8. Muestreo.....	45
1.9. Determinaciones realizadas.....	45
1.9.1. Físicas.....	45
1.9.2. Químicas	48
1.9.3. Biológicas.....	50
1.10. Análisis estadísticos	51
1.11. Método sistemático para la construcción de un índice de calidad de suelo	51
1.11.1. Selección de un Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI)	51
1.11.2. Selección final de los indicadores.....	52
1.11.3. Normalización de los indicadores.....	53
1.11.4. Integración de los indicadores dentro de un índice de calidad de suelos	53
CAPITULO 2.....	55
RESPUESTA DE DISTINTAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS y BIOLÓGICAS ANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE DIFERENTES ROTACIONES EN EL CULTIVO DE TABACO	55
2.1. HIPÓTESIS.....	55
2.2. OBJETIVOS	55
2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
2.3.1. SERIE PERICO	56
2.3.1.2. Propiedades físicas	57
2.3.1.3. Propiedades químicas.....	70
2.3.1.4. Propiedades biológicas.....	86
2.3.1.5. Indicadores seleccionados.....	95
2.3.2. SERIE MONTEERRICO	95
2.3.2.2. Propiedades físicas	96
2.3.2.3. Propiedades químicas.....	101
2.3.2.4. Propiedades biológicas.....	110
2.3.2.5 Indicadores seleccionados.....	113
2.4. CONCLUSIONES	114
2.4.1 Serie Perico	114
2.4.2 Serie Monterrico.....	115

CAPITULO 3.....	117
ELABORACIÓN DE DISTINTOS ÍNDICES DE CALIDAD PARA CADA UNA DE LAS SERIES DE SUELO Y SU COMPARACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS USOS DE LA TIERRA ANALIZADOS	117
3.1. INTRODUCCIÓN	117
3.2. HIPÓTESIS.....	117
3.3. OBJETIVOS	118
3.4. Construcción de los índices.....	119
3.4.1. Serie de suelos Perico.....	120
3.4.1.1. Índice aditivo ponderado considerando todas las variables conjuntamente (ICSP A)	121
3.4.1.2. Índice aditivo ponderado considerando a las variables físicas, químicas y biológicas en forma separada (ICSP B)	121
3.4.2 Serie de suelos Monterrico.....	123
3.4.2.1. Índice aditivo ponderado considerando todas las variables conjuntamente (ICSM A).....	123
3.4.2.2. Índice aditivo ponderado considerando a las variables físicas, químicas y biológicas en forma separada (ICSM B).....	124
3.4.3. Análisis de los resultados obtenidos	125
3.5. Comparación de los índices de calidad de suelo entre los distintos usos de la tierra	126
3.5.1. Serie de suelo Perico	126
3.5.2. Serie de suelo Monterrico	132
3.6 CONCLUSIONES	135
3.6.1. Serie Perico	135
3.6.2. Serie Monterrico.....	136
CAPITULO 4.....	138
CONSIDERACIONES FINALES	138
CAPITULO 5.....	143
BIBLIOGRAFÍA.....	143
CAPÍTULO 6.....	167
ANEXOS.....	167

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Cronograma del cultivo de tabaco en el valle los pericos (provincia de Jujuy).....	11
Tabla 1.2. Cronograma para la utilización del abono verde.....	15
Tabla 1.3. Cultivo de tabaco con labranza convencional bajo rotación tabaco/gramíneas.....	16
Tabla 1.4. Detalle de los tratamientos analizados en ambas series de suelo.....	42
Tabla 1.5. Valores medios, mínimos y máximos de las distintas fracciones granulométricas, correspondientes a los suelos analizados.....	43
Tabla 1.6. Valores de medios, mínimos y máximos de las distintas fracciones granulométricas, correspondientes a los suelos de los diferentes tratamientos....	44
Tabla 1.7. Clases de estabilidad y riesgo de encostramiento según los valores de DMP _p (Le Bissonnais, 1996).....	47
Tabla 2.1. Análisis de normalidad de los resultados de las variables químicas, físicas y biológicas para las profundidades de: 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2).....	57
Tabla 2.2. Análisis de varianza de las propiedades físicas para las profundidades de 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2). se presentan el grado de ajuste (R^2), coeficiente de variación (cv) y valor de probabilidad (p).....	58
Tabla 2.3. Coeficientes de correlación entre la resistencia a la penetración obtenida para ambos estratos con otras propiedades edáficas.....	59
Tabla 2.4. Valores promedio y desvío estándar para aquellas variables físicas que presentaron diferencias significativas en la serie perico.....	62
Tabla 2.5. Clases de estabilidad estructural de acuerdo a los resultados del DMP _p (Le Bissonnais, 1996), para los distintos tratamientos y profundidades evaluadas.....	67
Tabla 2.6. Análisis de varianza de las propiedades químicas para las profundidades de 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2). se presentan el grado de ajuste (R^2), coeficiente de variación (cv) y valor de probabilidad (p).....	71
Tabla 2.7. Valores promedio y desvío estándar para aquellas variables químicas que presentaron diferencias significativas entre tratamientos en la serie perico.....	72

Tabla 2.8. Coeficientes de correlación determinados entre los resultados de distintas fracciones del carbono con el contenido de arcilla y de arcilla más limo de ambas profundidades de los suelos evaluados.....	81
tabla 2.9. Análisis de varianza de las propiedades biológicas para las profundidades de 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2). se presentan el grado de ajuste (R^2), coeficiente de variación (cv) y valor de probabilidad (p).....	87
Tabla 2.10. Valores promedio y desvío estándar para aquellas variables biológicas que presentaron diferencias significativas entre tratamientos para la serie perico.....	89
Tabla 2.11. Conjunto mínimo de indicadores seleccionados para la serie perico.....	95
Tabla 2.12. análisis de normalidad de las variables químicas, físicas y biológicas para las profundidades de: 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2).....	96
Tabla 2.13. Análisis de varianza de las propiedades físicas para las profundidades de 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2) cm. se presentan el grado de ajuste (R^2), coeficiente de variación (cv) y valor de probabilidad (p).....	97
Tabla 2.14. Coeficientes de correlación entre la resistencia a la penetración obtenida para ambos estratos con otras propiedades edáficas.....	97
Tabla 2.15. Valores promedio y desvío estándar para aquellas variables físicas que presentaron diferencias significativas entre tratamientos en la serie monterrico.	98
Tabla 2.16. Clases de estabilidad estructural de acuerdo a los resultados del DMP _p (Le Bissonnais, 1996), para los distintos tratamientos y profundidades evaluadas.....	101
Tabla 2.17. Análisis de varianza de las propiedades químicas para las profundidades de 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2). se presentan el grado de ajuste (R^2), coeficiente de variabilidad (cv) y valor de probabilidad (p).....	102
Tabla 2.18. Valores promedio y desvío estándar para aquellas variables químicas que presentaron diferencias significativas entre tratamientos en la serie monterrico.....	104
Tabla 2.19. Coeficientes de correlación determinados entre los resultados de las distintas fracciones del carbono con el contenido de arcilla y de arcilla más limo de ambas profundidades de los suelos evaluados.....	110
Tabla 2.20. Análisis de varianza de las propiedades biológicas para las profundidades de 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2). se presentan el grado de ajuste (R^2), coeficiente de variabilidad (cv) y valor de probabilidad (p).....	111

Tabla 2.21. Valores promedio y desvío estándar para aquellas variables biológicas que presentaron diferencias significativas entre tratamientos para la serie monterrico.....	112
Tabla 2.22. Conjunto mínimo de indicadores seleccionados para la serie monterrico.....	114
Tabla 3.1. Autovalores para las cps seleccionadas en cada caso y autovalores para las variables físicas, químicas y biológicas en la serie de suelo perico. proporción: proporción de la variabilidad explicada por cada CP.....	120
Tabla 3.2. Autovalores para las cps seleccionadas en cada caso y autovalores para las variables físicas, químicas y biológicas en la serie de suelo monterrico. proporción: proporción de la variabilidad explicada por cada CP.....	123
Tabla 3.3. Resultados del análisis de varianza de los índices de calidad de suelo contruidos para la serie de suelo perico, presentando el grado de ajuste (R^2), el coeficiente de variabilidad (cv) y el nivel de significancia (p).....	132
Tabla 3.4. Resultados del análisis de varianza de los índices de calidad de suelo contruidos para la serie de suelo monterrico, presentando el grado de ajuste (R^2), el coeficiente de variabilidad (cv) y el nivel de significancia (p).....	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Cultivo de tabaco tipo virginia en valles templados de jujuy.....	8
Figura 1.2. Períodos de crecimiento del tabaco (Doorembos & Kassam, 1979).....	9
Figura1.3. Almacigo sistema flotante y convencional (Fernández, 2006).....	10
Figura 1.4. Localización del área tabacalera en el mapa de división política y administración de la provincia de jujuy (INDEC, 2004).....	37
figura 1.5. Precipitación media mensual (Pp) y temperatura máxima (TMax), mínima (TMin) y media (TMedia) mensual correspondiente al área estudiada. valores promedio de la serie años 1998 – 2017 (Cátedra Climatología FCA – UNJU).....	38
Figura 1.6. Mapa de suelos. zona de influencia del dique las maderas – valle los pericos –Jujuy. (Cátedra Topografía de FCA – UNJU).....	41
Figura 3.1. Comparación de resultados entre los índices de calidad de suelo (serie perico) obtenidos para las distintas situaciones bajo estudio. (a) ICSP A, (b) ICSP B. COT: Carbono orgánico total, CBM: Carbono de la biomasa microbiana, CBM/COT: Coeficiente microbiano. DMP _p : Diámetro medio ponderado promedio. T: Situación testigo, TM: Monocultivo de tabaco, TV: Incorporación de verdes dentro del cultivo de tabaco, TG: Cultivo de tabaco con rotación de gramíneas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (p<0.05). 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm.....	129
Figura 3.2. Comparación de resultados del icsm a, entre las distintas situaciones bajo estudio. COT: Carbono orgánico total, CBM: Carbono de biomasa microbiana, T: Situación testigo, TM: Monocultivo de tabaco, TV: Incorporación de verdes dentro del cultivo de tabaco, TG: Cultivo de tabaco con rotación de gramíneas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (p<0.05). 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm.....	133
Figura 3.3. Comparación de resultados del ICSM B, entre las distintas situaciones bajo estudio. COT: Carbono orgánico total, CBM: Carbono de biomasa microbiana, DMP _p : Diámetro medio ponderado promedio. T: situación testigo, TM: Monocultivo de tabaco, TV: Incorporación de verdes dentro del cultivo de tabaco, TG: Cultivo de tabaco con rotación de gramíneas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (p<0.05). 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm.....	134

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

ABREVIATURAS

% a: porcentaje de arcilla

% L: porcentaje de limo

% A: porcentaje de arena

DMP: diámetro medio ponderado

Da: densidad aparente

Vinf.: velocidad de infiltración

RP: resistencia a la penetración

COT: carbono orgánico total

NT: nitrógeno total

PE: fósforo extractable

CE: conductividad eléctrica

COP: carbono orgánico particulado

COPG: carbono orgánico particulado grueso

COPF: carbono orgánico particulado fino

COA: carbono orgánico asociado a la fracción mineral

CBM: carbono de biomasa microbiana

qCO₂: cociente metabólico

CBM/COT: cociente microbiano

RESUMEN

INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO EN SISTEMAS TABACALEROS DE JUJUY: IMPACTO DE LAS PRÁCTICAS DE MANEJO

El cultivo de tabaco requiere numerosas labores para su implantación, lo que sumado al poco volumen de rastros que deja sobre la superficie del suelo, provoca un deterioro físico, químico y biológico del suelo. El objetivo del presente trabajo fue evaluar en dos series de suelo características del Valle los Pericos (Provincia de Jujuy), el efecto que ejercen sobre la calidad edáfica diferentes prácticas de manejo realizadas en el cultivo de tabaco: monocultivo (TM), rotación con gramíneas (TG), incorporación de abonos verdes (TV), contrastando a su vez dichos resultados con los de una situación con bajo disturbio (T), seleccionando además aquellas variables con mayor capacidad de respuesta a estos cambios en el manejo, para la elaboración de un índice de calidad del suelo (ICS). Se estudió la respuesta de distintas propiedades físicas, químicas y biológicas edáficas a los usos de la tierra mencionados a dos profundidades (0-20 y 20-40 cm), considerando lotes de productores con mas de treinta años con producción de tabaco bajo labranza convencional y riego. En ambas series de suelo, el efecto sobre las propiedades físicas fue debido únicamente al generado por la incorporación de la agricultura. En los suelos cultivados se observó un descenso en los niveles de carbono en todas sus fracciones y un aumento en algunas variables químicas debido al efecto del riego y de la fertilización. En solo una de las series de suelo evaluadas, se comprobó el efecto positivo de la diversificación de cultivos sobre el contenido de carbono total, asociado y del stock de carbono. Las propiedades biológicas en ambas series de suelo, fueron las que mayor respuesta presentaron a los distintos tratamientos evaluados. En una de las series de suelo analizadas, el tipo de técnica utilizada para elaborar el ICS no influyó sobre los resultados, presentando TG la mejor condición edáfica respecto a los restantes tratamientos. En la otra serie de suelos, uno de los índices desarrollados le otorgó mayor calidad a TV y TG respecto a TM.

Palabras clave: monocultivo de tabaco –diversificación de cultivos - índice de calidad de suelo – labranza convencional.

ABSTRACT

SOIL QUALITY INDICATORS IN JUJUY TOBACCO SYSTEMS: IMPACT OF MANAGEMENT PRACTICES

Tobacco cultivation requires numerous tillage practices for its production, causing as a consequence physical, chemical and biological soil deterioration. The objective of this work was to evaluate in two characteristic soils of Los Pericos Valley (Jujuy Province), the effect on soil quality of different management practices carried out in tobacco production: monoculture (TM), rotation with grasses (TG) and a green manure incorporation (TV), contrasting in turn these results with those of a low disturbance situation (T), selecting those variables with greater response to these management changes, for develop a soil quality index (ICS). The response of different physical, chemical and biological edaphic properties to the aforementioned land uses was studied at two depths (0-20 and 20-40 cm), considering producers plots with more than thirty years with tobacco production under conventional tillage and irrigation. In both soil series, the effect on physical properties was due solely to that generated by the agriculture incorporation. In cultivated soils, a decrease in carbon levels was observed in all its fractions and an increase in some chemical variables due to the effect of irrigation and fertilization. In only one of the soil series evaluated, the positive effect of crop diversification on the total and associated carbon content in addition to the carbon stock was verified. The biological properties in both soil series were those that presented the greatest response to the different treatments evaluated. In one of the soil series analyzed, the type of technique used to develop the ICS did not influence the results, bearing TG the best soil condition compared to the other treatments. In the other soil serie, one of the ICS showed higher quality in TV and TG compared to TM.

Keywords: tobacco monoculture - crop diversity - soil quality index - conventional tillage.

1. INTRODUCCIÓN

1. 1. Justificación del trabajo

El suelo es un recurso limitado, no renovable y de gran importancia ambiental, ya que otorga una serie de bienes y servicios eco-sistémicos (Zhao *et al.*, 2013). A su vez, es el medio natural a través del cual se genera la producción de alimentos y de materias primas, de los cuales depende la sociedad (CONABIO, 2016; OBIO, 2016). La acción humana ha determinado cambios significativos en la vegetación natural a partir del uso de la tierra y del desarrollo de sistemas productivos mas sofisticados (Nosetto *et al.*, 2012), perdiendo el suelo su condición original (Ochoa *et al.*, 2016) y ocasionando diferentes procesos de degradación de las tierras con distinto grado de intensidad (FAO, 2015; Casas & Albarracín, 2015)

Lal (2015) citando a Bini (2009), mencionó que el 33 % de la superficie de la tierra está afectada por algún proceso de degradación. Por su parte, Gardi *et al.* (2014), comentaron que más del 50 % de las hectáreas cultivables de América Latina, el 74 % de las ubicadas en Mesoamérica y el 45 % de las correspondientes a Sudamérica, son afectadas por estos procesos. Según dichos autores, la aplicación de técnicas de labranza inadecuadas, cambios en el uso del suelo, la sobre explotación del recurso y el cambio climático, son las principales causas del deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas edáficas.

A su vez, se ha determinado mediante algunas estimaciones, que los procesos de degradación de las tierras ocurridos entre 1950 y 2010 generaron una disminución del 60 % de los servicios ecosistémicos brindados por dicho recurso (Lal, 2015), que

además de provocar consecuencias negativas sobre la producción agrícola (Bossio *et al.*, 2010; Palm *et al.*, 2014), afectan el crecimiento económico, sobre todo en aquellos países en desarrollo en los cuales la agricultura es una de las principales fuentes de recursos (Lal, 2015).

En un documento de FAO (2015), se menciona que los suelos ricos en materia orgánica de la Pradera Pampeana, han reducido su contenido de carbono como resultado de su mineralización por la actividad agrícola y consecuentemente se están volviendo menos productivos y limitados en sus servicios ecosistémicos (Lavado & Taboada, 2009; Viglizzo & Jobbagy, 2010; Gardi *et al.*, 2014). En dicho estudio también se señalan los problemas de salinización que ocurren en aquellos suelos de Argentina con napas salinas cercanas a la superficie, las cuales debido al desmonte o al sobrepastoreo ascienden quedando cargados de sales los primeros centímetros del suelo (Taboada *et al.*, 2011; Bandera, 2013; Di Bella *et al.*, 2015). En el trabajo mencionado, también se señala que debido a la prevalencia del monocultivo de soja en la región Chaco-Pampeana, se han desarrollado procesos de compactación, provocando mermas en la tasa de infiltración (Álvarez & Steinbach, 2009; Álvarez *et al.*, 2009) y en los rendimientos del cultivo de soja (Bacigaluppo *et al.*, 2011).

El uso del suelo en Argentina, ha mostrado una reducción general en el contenido de materia orgánica y en la estabilidad de agregados, además de un incremento en la densidad aparente (Wingeyer *et al.*, 2015). La tasa de cambio en los resultados de estas propiedades, depende de la cantidad de años que los suelos han estado bajo agricultura. En este sentido, se ha señalado que la materia orgánica edáfica puede alcanzar valores entre un 83% y un 64 % de su contenido original, si el período agrícola es menor a los 10 años o si los suelos se encuentran en producción entre 10 y 20 años, respectivamente (Wingeyer *et al.*, 2015). Al mismo tiempo, la estabilidad

estructural se reduciría a un 62 % o 48 % de su condición original, al considerar los mismos períodos bajo agricultura señalados previamente, mientras que la densidad aparente aumentaría entre un 106 % y un 116% respecto a su situación inicial (Wingeyer *et al.*, 2015). Otros trabajos realizados en Argentina, también han mostrado distintos grados de deterioro de los suelos como consecuencia del diferente uso de la tierra (Alvarez & Steinbach, 2009; Alvarez *et al.*, 2009; Novelli *et al.*, 2011; Duval *et al.*, 2013; Sasal *et al.*, 2017; Alvarez *et al.*, 2017), lo cual puede a su vez afectar el rendimiento de los cultivos (Alvarez & Steinbach, 2009; Noellemeyer *et al.*, 2013; Castiglioni *et al.*, 2016; Alvarez *et al.*, 2017) e incidir también en los procesos de escurrimiento y erosión (Castiglioni *et al.*, 2006; Chagas *et al.*, 2008; Sasal *et al.*, 2010; Sasal *et al.*, 2017).

Mediante una evaluación realizada sobre el estado de degradación de las tierras secas, correspondientes a las zonas subhúmedas, semiáridas y áridas de Argentina (FAO, 2010), se diagnosticó que el 81 % de las mismas presentaba algún proceso de degradación. A su vez, el 50 % de ellas estaba afectada por procesos de degradación biológica, el 15 % presentaba síntomas de degradación física, en el 40 % ocurrían procesos de erosión hídrica, mientras que en igual porcentaje se daban situaciones con erosión eólica.

En la provincia de Jujuy y a partir de distintas acciones del hombre sobre el suelo, también se han acelerado los procesos de degradación de las tierras (Torres *et al.*, 2019). Entre ellas se destacan el mal manejo de la cubierta vegetal por sobrepastoreo o quema y la realización de un excesivo número de labranzas en las áreas agrícolas (Torres *et al.*, 2019). La erosión hídrica grave y severa en dicha provincia abarca en la actualidad 152.500 ha, siendo las regiones de los Valles Templados y Ramal dos áreas relevantes donde se manifiestan dichos procesos (Torres *et al.*, 2019). De esta manera,

según Torres *et al.* (2019) “la sustentabilidad de los sistemas agrícolas de la Provincia de Jujuy se ve seriamente comprometida en el corto y mediano plazo”.

Los Valles Templados constituye dentro de esta provincia, la región donde se produce el tabaco. Arzeno *et al.* (2017) mencionaron para los Valles Templados de Salta y Jujuy, que las condiciones bajo las cuales se da la producción tabacalera (exceso de labranzas, falta de rotaciones, aplicación de riego en lotes con elevadas pendientes asociado a la ausencia de sistematización), han desencadenado importantes procesos de degradación física, química y biológica de las tierras, siendo los mas frecuentes la erosión hídrica y la mineralización acelerada de la materia orgánica. En este sentido, a partir de experiencias realizadas en Salta (Arzeno *et al.*, 2012), se ha observado en los primeros 20 cm de suelo una caída del 74 % en la estabilidad estructural respecto a los suelos sin disturbar, como consecuencia de las excesivas labranzas aplicadas al cultivo de tabaco. En el mismo trabajo (Arzeno *et al.*, 2012), se mencionan reducciones del contenido de materia orgánica del 39 % y del 40 % nitrógeno, respecto a los suelos no alterados. Similares resultados a los del trabajo antes mencionado se han observado en estudios realizados en Perico (Provincia de Jujuy) y en la EEA INTA Salta (Martínez Castillo *et al.*, 2010).

El cultivo de tabaco y su manufactura representan una importante actividad en términos productivos, económicos y sociales para las distintas economías regionales de la Argentina (MAGPN, 2011). La industria tabacalera está caracterizada por ser de mano de obra intensiva, siendo la principal actividad agropecuaria demandante de mano de obra por unidad de superficie del sector. Ocupa entre 70 y 120 jornales por hectárea según zonas, formas de producción y tipo de tabaco, diferenciándose de otros cultivos extensivos (soja, trigo y maíz) en los cuales dichas cifras descienden a los 0,44 jornales por hectárea (MAGPN, 2011).

El tabaco es el cultivo con mayor rentabilidad en explotaciones pequeñas y en zonas donde otras especies no resultan viables ni tan rentables. A nivel nacional, el sector tabacalero habría aportado el 0,2 % al producto bruto nacional correspondiente al año 2009. A su vez, el valor bruto de la producción en la etapa primaria del tabaco habría alcanzando un equivalente al 0,9 % del obtenido por la agricultura, ganadería, caza y silvicultura, mientras que el valor bruto generado a partir de su industrialización representaría el 0,7 % del valor bruto de lo producido por la industria nacional durante 2009 (MAGPN, 2011).

Su producción desarrolló 49.518 puestos de trabajo durante la campaña 2009/10, que equivale al 15 % de la mano de obra generada a nivel nacional por la agricultura, silvicultura y pesca durante 2010, al 2,2 % de los puestos de trabajo desarrollados por el sector privado y al 1,9 % de la ocupación total para ese mismo año. Tomando en cuenta toda la cadena productiva del tabaco a nivel nacional, se estimó para el año 2010 un total de 170.754 trabajadores involucrados en su producción, comercialización y/o industrialización, lo que representó el 1 % de la población ocupada en dicho momento (MAGPN, 2011).

Durante el año 2010, las exportaciones de tabaco totalizaron U\$S 306.510.437, cifra que significó el 0,45 % de las exportaciones totales de la Argentina registradas en dicho año. Si bien los cigarros y cigarrillos tienen una incidencia negativa sobre la salud humana, no debe dejarse de lado que su consumo constituye una importante fuente de ingresos fiscales. En este sentido y en todo concepto, se ha estimado que el sector aportó a los recursos fiscales para el período 2006/2010, un monto promedio anual de U\$S 1.650 millones. Este nivel de recaudación fue en el año 2010, equivalente a lo recaudado en concepto de impuestos a las naftas y muy superior a lo ingresado en concepto de impuestos a los bienes personales (MAGPN, 2011).

Desde el punto de vista geográfico, la producción tabacalera está concentrada en la región noroeste y noreste de Argentina. Aumentó su producción hasta la campaña 20004/2005 con un total de 161.000 toneladas, descendiendo luego hasta 2009/2010, con 133.000 toneladas. Según datos de esta última campaña, la Provincia de Jujuy aportó el 37,2 % del total producido en el país y el 25,1 % del total de la superficie afectada (MAGPN, 2011).

Esta provincia del norte de Argentina, en el año 2010 tenía 915 productores tabacaleros, de los cuales el mayor porcentaje se encontraba en el departamento El Carmen (90 %). Para el período 2001-2010 hubo un incremento del 31% en la cantidad de productores registrados. De manera diferente al resto de las provincias productoras de tabaco de Argentina, en Jujuy sólo se cultiva la variedad Virginia, generando la actividad tabacalera de esta provincia en el año 2010, U\$S 69,1 millones en concepto de exportaciones, siendo el tabaco el segundo producto exportado por Jujuy (19,2 %), luego de los minerales de la plata (25,9 %) (MAGPN, 2011).

Una gran proporción de los suelos de la Provincia de Jujuy dedicados a esta producción, están bajo monocultivo desde hace más de treinta años. El cultivo de tabaco es intensivo en cuanto al uso de insumos y de mano de obra, realizándose también un gran número de labores mecánicas.

Como consecuencia de lo mencionado, se ha provocado el deterioro físico, químico y biológico de los suelos, que se manifiesta en la pérdida de estabilidad de los agregados, aumento en la densidad aparente, disminución del contenido de materia orgánica y una constante pérdida de la capa superficial del suelo. Dichos procesos se encuentran presentes en forma generalizada en toda la región, generando además del deterioro en la condición del recurso suelo, mermas en la productividad de las tierras (Torres & Fernández, 1996).

Por los motivos mencionados, es importante la evaluación de la calidad del suelo, para lo cual se debería identificar y seleccionar un número mínimo de propiedades físicas, químicas y biológicas, que sirvan como indicadores para conocer su estado de degradación y también para monitorear su evolución, con el fin de poder valorar el efecto de diferentes prácticas de manejo (Navarrete Segueda *et al.*, 2011). A partir de la generación de esa información, se podría visualizar la importancia de los distintos procesos de degradación generados de acuerdo a diferentes formas de producción del tabaco, delineando como consecuencia pautas de manejo que tiendan a mitigarlos o revertirlos. También se generaría un conocimiento local, que serviría para lograr una producción tabacalera sostenible.

1.2 EL CULTIVO DE TABACO

1.2.1. Su importancia en la Argentina

El tabaco (*Nicotiana tabacum L.*) tuvo su origen en América Central y ya se consumía con anterioridad a la era cristiana. La mayor producción se concentra entre los 45° N y 30° S. Es el cultivo industrial no alimentario líder en el mundo, debido a su gran adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas y edáficas. Por ello, se cultiva en más de cien países distribuidos en todos los continentes (González Martín, 2001). La Argentina ocupa el octavo lugar entre los países productores. El 92 % de la producción nacional corresponde a los tipos Burley y Virginia, siendo este último cultivado casi exclusivamente en las provincias de Salta y Jujuy (Rodríguez, 2008). Su producción se concentra en siete provincias: Salta (23,9%), Jujuy (22,1%), Misiones (35,0%), Chaco (1,8%), Corrientes (5,5%), Catamarca (0,7%) y Tucumán (10,8%). Las dos primeras se dedican básicamente a la producción de tabaco tipo Virginia y las restantes

concentradas en la producción de los tabacos tipo Burley y Criollo (Corradini *et al.*, 2005).

1.2.2. Características del cultivo de tabaco

El tabaco crece normalmente como una planta anual. Posee un tallo delgado, algo leñoso, que puede desarrollar desde 0,8 a 3 m de altura, con largos entrenudos variables según los tipos y variedades. Las hojas están asentadas en cada nudo a lo largo del tallo en una espina ascendente, con una filotaxia de 3/8. En general, las hojas inferiores están asentadas en un ángulo muy abierto, quedando casi horizontales, mientras que las superiores se insertan con ángulos más cerrados (Figura 1.1) (Fernández de Ulivarri, 1990).



Figura 1.1. Cultivo de tabaco tipo Virginia en Valles templados de Jujuy

El cultivo de tabaco puede ser dividido en dos fases: 1) la de almácigo para la producción de plantines y 2) la de crecimiento en el campo (Ceotto & Castelli, 2002) (Figura 1.2).

Como puede observarse en la Figura 1.2, la fase de crecimiento en el campo puede subdividirse en distintos períodos (Moustakas & Ntzanis, 2005):

Adaptación: 30 a 35 días

Altura de rodilla: 10 a 15 días

Rápido crecimiento y elongación: 10 a 15 días

Floración y desflore: 35 a 35 días

Maduración: 20 a 25 días

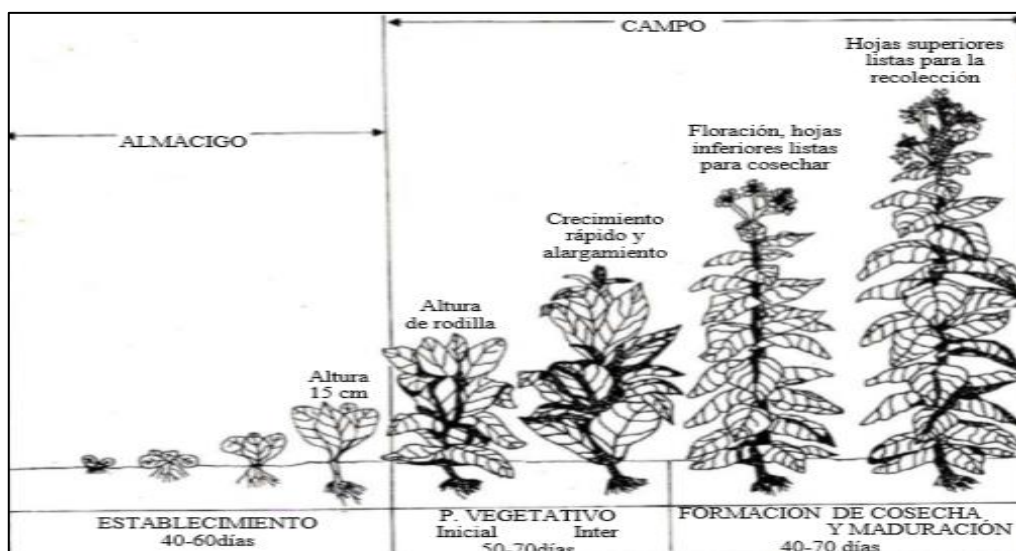


Figura 1.2. Períodos de crecimiento del tabaco (Doorembos & Kassam, 1979)

Almácigo

La siembra de tabaco se realiza en almácigo y luego las plántulas son trasladadas al campo (Tso, 1990). Las pequeñas dimensiones de la semilla no permiten realizarla directamente en el campo, ya que un gramo contiene 8.000 a 10.000 semillas (Fernández de Ulivarri, 1990). Los almácigos de tabaco pueden ser convencionales o flotantes (Figura 1.3), utilizando la mayoría de los pequeños productores tabacaleros almácigos convencionales (Nadir *et al.*, 2004). Los almácigos convencionales presentan un ciclo de producción de 60 a 75 días, y utilizan como desinfectante del suelo el Vapam (Fernández, 2006). Este sistema de almácigo requiere de buena disponibilidad de nutrientes y adecuadas condiciones físicas del suelo (aireación y permeabilidad) (Fernández de Ullivarri, 1990). Los almácigos flotantes se realizan en estructuras de macro o micro túneles, y entre sus principales ventajas se pueden mencionar la menor

duración del ciclo, la obtención de plantas útiles en un porcentaje igual o superior al 90% y la menor cantidad de mano de obra utilizada en las diferentes etapas de producción de plantines (Galli, 2010).



Figura1.3. Almacigo sistema flotante y convencional (Fernández, 2006).

El trazado y preparación de los “cajones” o almacigueras se realiza a principios de mayo. Consiste en la construcción de canteros de 1 metro de ancho por 10 a 20 metros de largo. De esa manera se facilita el uso de las coberturas: plástico o filtrón, el riego y las prácticas de control de plagas y enfermedades. La fecha de siembra para tabaco Virginia, particularmente en el valle templado de Jujuy, no debe ser muy temprana debido al riesgo de heladas tardías. En general, se inicia en la segunda quincena de mayo y algunas veces se realiza escalonada para optimizar el uso de las estufas. La provisión de semillas híbridas por parte de las acopiadoras, permite disponer de plantas resistentes a diferentes virus y enfermedades (Nadir *et al.*, 2004).

Cultivo a campo

El período de cultivo se inicia a mediados del mes de agosto y se extiende hasta diciembre-enero. En el mismo se realizan prácticas de fertilización, riego, aporques, deshierbes y controles químicos de plagas y enfermedades.

Tabla 1.1. Cronograma del cultivo de tabaco en el Valle los Pericos (Provincia de Jujuy)

Etapas	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Almacigo y labranza del suelo												
Trasplante												
Desflore												
Cosecha/curado												
Acopio												

Trasplante

Cumplida la etapa de almacigo, los plantines son trasladados al terreno destinado para la plantación, el cual fue previamente preparado en otoño – invierno. En el Valle templado de Jujuy, el trasplante se inicia a partir de los primeros días de agosto hasta septiembre, siendo la plantación principalmente manual. Para el tabaco Virginia la distancia entre filas es de 1,2 m, mientras que entre plantas varía de 0,4 a 0,5m (Fernández, 2006).

La respuesta del tabaco a la fecha de plantación es altamente dependiente de las características ambientales del período de crecimiento. Por ejemplo, en plantaciones tardías de tabaco comparadas con plantaciones tempranas, se ha observado que el aumento de la temperatura y la radiación fotosintéticamente activa, causan un crecimiento más rápido, aceleran la iniciación floral, producen hojas más finas, posiblemente aceleran la senescencia y reducen el rendimiento (Wilkinson *et al.*, 2007/2008).

Desde el trasplante hasta la finalización de la cosecha, el cultivo de tabaco necesita aproximadamente 125 días libres de heladas, ya que una vez trasplantado se muestra sensible a temperaturas inferiores a 0 °C. Una vez que las plantas se han establecido (7 a 10 días), se inician los trabajos de cultivo. Con el fin de controlar malezas y producir aireación en el suelo y para favorecer el desarrollo de las raíces secundarias, se realizan a razón 2 o 3 carpidas durante el ciclo, logrando así un mayor anclaje y un aumento en la eficiencia de absorción de agua y nutrientes (Fernández de Ulivarri, 1990).

Fertilización

La práctica de fertilización puede realizarse en una sola aplicación con dosis completa, o bien se divide en dos aplicaciones. La primera se denomina fertilización de base, en la cual generalmente se aplica el 60% de la dosis total, mientras que la segunda se realiza a los 30 días. La práctica más corriente es aquella en que se realiza la división de la dosis total. Para la zona tabacalera del Valle templado de Jujuy, la dosis aplicada en promedio es de 800–1100 kg ha⁻¹ de un fertilizante granulado compuesto por N-P-K (13 -11-27), provisto a los productores por la Cooperativa de Tabacaleros de Jujuy.

Aporque

Cuando la planta alcanza 40 – 50 cm de altura (aproximadamente a los 50 días después del trasplante), se efectúa el último movimiento de suelo (el aporque). Este consiste en mover tierra sobre la base de la planta, formando un camellón de aproximadamente 35 cm de alto y 20 cm de ancho en el extremo superior. El objetivo del aporque es lograr un mejor afianzamiento de la planta en el suelo, permitir la generación de una mayor ramificación de raíces y mantener el suelo más aireado para evitar problemas de anaerobiosis en situaciones de excesivas lluvias (Fernández de Ulivarri, 1990).

Floración – Desflore

El tabaco se encuentra entre los cultivos donde las hojas representan la porción de importancia económica de la planta, en lugar de los órganos reproductivos (Wilkinson *et al.*, 2007/2008). Si no se desflora, disminuyen diariamente entre 25 a 30 kg ha⁻¹ de tabaco de buena calidad (Arias, 1984). La yema terminal de la planta de tabaco inhibe el desarrollo de los rebrotes, ya que al ser extraída se desarrollan los tres o cuatro rebrotes superiores. Si se quitan estos rebrotes, otros se desarrollarán más abajo en el tallo, y saldrán otros rebrotes secundarios en las axilas de las hojas superiores. Una planta de tabaco potencialmente puede producir tres rebrotes en la axila de cada hoja (Hawks & Collins, 1986). La producción de brotes afecta las características de las hojas, el rendimiento y la calidad de la cosecha (Tso, 1990). Es por ello, que el desflore debe ser acompañado por un control químico de los brotes (Ceotto & Castelli, 2002).

Maduración - Cosecha

El tabaco flue-cured comienza a madurar cuando las hojas verdes pierden color y se transforman en amarillo-verdosas. A medida que las hojas maduran son cosechadas en lotes de 3 a 5 hojas por planta por cosecha. Normalmente la maduración se da en intervalos semanales de 4 a 5 días, requiriéndose de 4 a 6 semanas para cosechar el cultivo en forma completa (Tso, 1990). La cosecha es una labor que debe realizarse respetando la oportunidad para obtener una buena calidad de producto. Implica un elevado costo en mano de obra, empleándose 26 jornales por hectárea, por lo que generalmente se debe contratar mano de obra extra-predial (Nadir *et al.*, 2004).

Rendimientos e índice de cosecha

El rendimiento promedio para el cultivo de tabaco en las provincias de Salta y Jujuy es de 2300 Kg ha⁻¹ (MAGPN, 2011), aunque los mismos pueden alcanzar los

3000 Kg ha⁻¹ (comunicación personal de productores). El índice de cosecha es de 0,6, por lo cual quedan en el campo entre 1500 Kg ha⁻¹ y 2000 Kg ha⁻¹ de restos vegetales.

Curado

Una vez cosechada la hoja se inicia el proceso de curado, que tiene dos objetivos principales. Por un lado crear condiciones de temperatura y humedad para ayudar a que se produzcan en la hoja los cambios químicos y biológicos deseados. Segundo, conseguir que la hoja por medio de un secado adecuado, pueda mantener su calidad potencial. Curar es algo más que un simple secado, implican cambios químicos y físicos, que son necesarios para obtener tabaco de alta calidad (Hawks & Collins, 1986). Para la comercialización de las hojas de tabaco, estas deben estar clasificadas de acuerdo a patrones de tipificación, que consideran su posición en la planta, color, integridad, manchas, picaduras y características físicas tales como elasticidad, cuerpo y textura (Fernández, 2006).

1.3. TIPOS DE MANEJO DEL CULTIVO DE TABACO EN EL VALLE LOS PERICOS

1.3.1. Monocultivo de tabaco bajo labranza convencional sin incorporación de abono

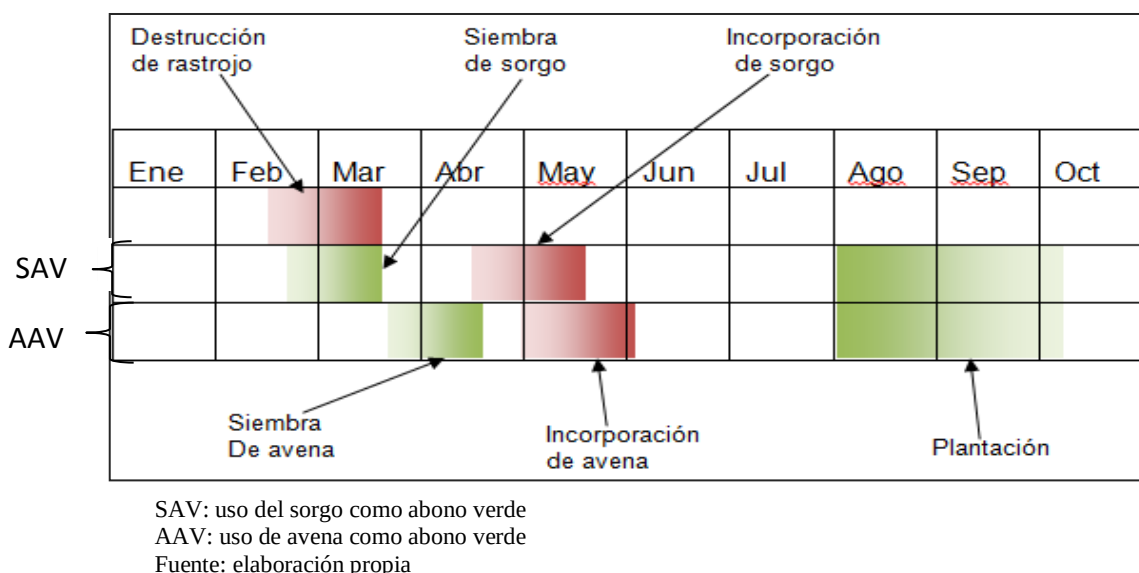
El productor realiza el cultivo anualmente. Al finalizar la campaña incorpora inmediatamente el rastrojo restante e inicia la labranza del suelo a principio de junio. La destrucción del rastrojo de tabaco es la primera labor a realizar y debe hacerse lo antes posible, ni bien se termine la cosecha, generalmente con una rastra. La preparación del suelo para la campaña siguiente comienza a mediados de junio y prosigue hasta julio. Consiste en la utilización del cincel (1 a 2 pasadas), arado de disco (1 pasada), rastra cruzada (5 a 6 pasadas) y rayado (1 pasada). Algunos productores procuran rayar

cortando la pendiente, pero en general no hay trabajos de nivelación ni los campos están sistematizados como para hacer el cultivo en curvas de nivel (Nadir *et al.*, 2004).

1.3.2. Monocultivo de tabaco bajo labranza convencional con incorporación de abono verde

El productor finaliza la campaña de tabaco durante los meses de febrero – marzo, sembrando posteriormente un abono verde (avena, trigo, centeno o sorgo), que luego de un determinado desarrollo son incorporados (Tabla 1.2). En el caso del sorgo, la incorporación se realiza hasta mediados de mayo, mientras que la de los demás cultivos se hace hasta inicio del mes de junio, antes de la formación del grano. A partir de ese momento, se inicia nuevamente con las labranzas ya descritas en el punto anterior.

Tabla 1.2. Cronograma para la utilización del abono verde



1.3.3. Cultivo de tabaco con labranza convencional bajo rotación tabaco/gramíneas

El productor al finalizar la campaña de tabaco, siembra una gramínea bajo labranza convencional (trigo, cebada o sorgo) hasta la siguiente campaña, donde nuevamente inicia la preparación del suelo para el trasplante del tabaco (Tabla 1.3).

Tabla 1.3. Cultivo de tabaco con labranza convencional bajo rotación tabaco/gramíneas

LOTE	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3
1	TABACO	SORGO o TRIGO o CEBADA	TABACO
2	SORGO o TRIGO o CEBADA	TABACO	SORGO o TRIGO o CEBADA
3	TABACO	SORGO o TRIGO o CEBADA	TABACO

1.4. EFECTO DE LOS CULTIVOS SOBRE LAS PROPIEDADES EDÁFICAS

Las prácticas agrícolas, como las labranzas y la rotación de cultivos, tienen una incidencia directa sobre la cantidad, calidad y tasa de descomposición de los residuos de cosecha que quedan en el campo (Zuber *et al.*, 2015), lo que a su vez está directamente relacionado con la dinámica de la materia orgánica edáfica, que es uno de los indicadores de calidad de suelo más utilizados (Shukla *et al.*, 2006; Fuentes *et al.*, 2009; Lal, 2015; Duval *et al.*, 2016). Blanco Canqui *et al.* (2010) mencionaron que el impacto de la rotación de cultivos sobre las propiedades edáficas es más lento que los generados por las labranzas, debido a que los cultivos no realizan una disrupción en el suelo tan abrupta como lo hace la maquinaria agrícola (Benjamín *et al.*, 2007). De esta manera, estos autores señalaron la importancia de realizar investigaciones a largo plazo, para verificar el efecto de distintas secuencias de cultivos sobre las propiedades del suelo.

El volumen de residuos de cosecha ha sido estrechamente relacionado con la cantidad de materia orgánica del suelo (Benjamin *et al.*, 2010), influyendo por su parte sobre los niveles de nitrógeno y fósforo (Lal, 2015). La tasa de descomposición de los residuos varía entre cultivos, fundamentalmente por diferencias en su calidad y la composición bioquímica de sus tejidos (Martens, 2000). En un Molisol bajo labranza convencional, se observó que el contenido de carbono y el tamaño de agregados era mayor con residuos de maíz que con los de soja, comportamiento atribuido a la mayor

cantidad de fenoles, carbohidratos y proteínas presentes en los tejidos de la primera especie mencionada (Martens, 2000). La relación carbono/nitrógeno de los residuos de los cultivos influye en su velocidad de descomposición, como también en la formación y estabilización de los agregados del suelo. Si bien los residuos con alta relación carbono/nitrógeno como los del maíz se descomponen mas lentamente, los agregados del suelo formados son mas estables (Blanco-Canqui & Lal, 2004). Es por eso que la utilización de gramíneas como cultivos de cobertura, es una práctica más eficiente para incrementar los niveles de carbono edáfico respecto al uso de legumbres, debido a la mayor lentitud en la tasa de descomposición de los residuos de las especies en primer término mencionadas (Blanco Canqui *et al.*, 2015). Sin embargo, otros estudios han mostrado que el uso de leguminosas en la rotación incrementa la cantidad de carbono y nitrógeno del suelo (Jarecki & Lal, 2003; Grandy & Robertson, 2007; Carranca *et al.*, 2009), como consecuencia de la mejor calidad de sus residuos que promueven el crecimiento microbiano y la agregación del suelo (Bradford *et al.*, 2013; Cotrufo *et al.*, 2013; Frey *et al.*, 2013). A su vez, trabajos realizados con cultivos de cobertura, han mostrado la importancia de las mezclas de leguminosas y no leguminosas (Fageria *et al.*, 2005, Villamil *et al.*, 2006).

Congreves *et al.* (2015) mencionaron a partir de un ensayo realizado con distintas rotaciones de cultivos, que si bien en el largo plazo la salud del suelo se ve mejorada con secuencias que incluyen mayor diversificación de especies, el efecto de cada cultivo en particular es también importante. En este sentido, Blanco Canqui *et al.* (2010) señalaron que distintas especies como el trigo y el sorgo, pueden afectar las propiedades del suelo de diferente manera debido a su desigual patrón de crecimiento de raíces y hojas, el dispar espaciamiento y fecha a que se siembran ambos cultivos y a diferencias en la cantidad y calidad del material que deja cada uno como rastrojo, el que

influye a su vez en varios procesos como la formación de sellos superficiales, tasa de infiltración, distribución de poros, concentración de carbono, etc. (Benjamín *et al.*, 2007). Gaudin *et al.* (2015) afirmaron que la inclusión del cultivo de trigo en la rotación, incrementaba los rendimientos de soja y maíz, como también la eficiencia de esta última especie en el uso del nitrógeno. Distintos autores determinaron a su vez, que en suelos con mayor frecuencia del cultivo de soja, existía un aumento en la densidad aparente del suelo, debido a su menor producción de biomasa (Coulter *et al.*, 2009; Zuber *et al.*, 2015). En un estudio reciente (Wang *et al.*, 2017), se demostró que los exudados de las raíces del cultivo de maíz generaban una comunidad microbiológica rizosférica mas diversa, respecto a la desarrollada por las raíces del cultivo de soja. También existen evidencias, de que los exudados de las raíces de la cebada promueven la dispersión del suelo a su alrededor, mientras que en el maíz sucede lo contrario, promoviendo la estructuración del suelo (Naveed *et al.*, 2017). Las diferentes especies varían también en sus requerimientos de nutrientes y en la tasa de remoción de los mismos. Por lo tanto, un monocultivo dejará una concentración de macro y micronutrientes determinada, distinta a la dejada por una rotación con mayor diversidad de cultivos (Zuber *et al.*, 2017).

Lo beneficios obtenidos en el suelo debidos al aumento en la diversidad de cultivos en la rotación, como por ejemplo el incremento de la materia orgánica, ha sido ampliamente documentado (West & Post, 2002; Mc Daniel *et al.*, 2014a; Tiemann *et al.*, 2015). Este crecimiento en la diversidad de especies, contribuye a su vez a generar cambios en la comunidad microbiana del suelo (Van der Putten *et al.*, 2009), afectando su tamaño, estructura y funcionamiento (Waldrop *et al.*, 2004; Allison *et al.*, 2009; Strickland *et al.*, 2009; Tiemann & Billings, 2011; Wickings *et al.*, 2012). En un meta análisis de 122 estudios realizado por McDaniel *et al.* (2014b), se mostró como

consecuencia de la rotación de cultivos, un desarrollo superior de la biomasa microbiana del suelo en un 21 %. Pérez Brandan *et al.* (2010) también visualizaron el efecto positivo generado por diferentes secuencias de cultivos, sobre la diversidad y cantidad de poblaciones bacterianas y fúngicas del suelo. Dacunto *et al.* (2018) trabajando con un ensayo de distintas rotaciones, resaltaron que aquella que presentó mayor diversidad de especies, fue la que mostró mayor biomasa vegetal en pie, mas cantidad de restos vegetales sobre el suelo, mayor pH y mas actividad y diversidad en el metabolismo microbiano. Un análisis realizado por Venter *et al.* (2016), mostró que la rotación de cultivos respecto a los monocultivos, incrementaba la diversidad de microorganismos en el orden del 3,5 %, lo que es coincidente con el patrón documentado para pasturas (Lange *et al.*, 2015).

La mayor diversidad en la comunidad de plantas genera un uso mas eficiente y complementario de los recursos, tanto en el espacio como en el tiempo (Tilman *et al.*, 2001), y consecuentemente se produce mayor cantidad y variedad de restos vegetales y de exudados de raíces (Dacunto *et al.*, 2018). Dacunto *et al.* (2018) señalaron que el agregado de uno o mas cultivos en rotación respecto a un monocultivo, incrementa la agregación del suelo, el carbono orgánico, el nitrógeno total, la actividad microbiana y su biomasa (Mc Daniel *et al.*, 2014a, 2014 b; Tiemann *et al.*, 2015). Mc Daniel *et al.* (2014a) señalaron que aún una rotación simple con dos cultivos, puede incrementar el secuestro de carbono respecto al monocultivo en 50,6 mg de carbono/(g de suelo) en un año. Este aumento en la heterogeneidad de la comunidad de microorganismos debido al incremento en la diversidad de cultivos (Bunemann *et al.*, 2004; Gonzalez Chavez *et al.*, 2010; Suzuki *et al.*, 2012), es importante ya que este comportamiento se relaciona con la resiliencia funcional o resistencia del suelo ante la ocurrencia de distintos disturbios (Griffiths *et al.*, 2000).

McDaniel *et al.* (2014a) plantearon que la diversidad de especies influye en un amplio espectro de los procesos que se dan en los ecosistemas, incluyendo la productividad primaria, la eliminación de plagas, el ciclado de nutrientes y la dinámica del contenido de la materia orgánica del suelo (Hooper *et al.* 2000; Tilman *et al.*, 2002; Zak *et al.*, 2003; Orwin & Wardle, 2005). Por su parte, Tiemann *et al.* (2015) mencionaron que ante la presencia de diversas especies coexistiendo al mismo tiempo, hay un uso mas eficiente de los recursos, lo mismo que los ecosistemas presentan mayor estabilidad (Hooper *et al.*, 2005; Tilman *et al.*, 2006). Es por eso que McDaniel *et al.* (2014b) señalaron que los productores utilizan la rotación de cultivos para obtener algunos de los beneficios que aporta la diversidad de especies, siendo en este caso la variabilidad empleada en un sentido temporal y no espacial.

Mc Daniel *et al.* (2014b) mencionaron también la existencia de estudios que se contradicen en sus resultados respecto al efecto de las rotaciones de cultivos sobre el contenido de materia orgánica, habiendo algunos que han determinado incrementos en esta propiedad (Russell *et al.*, 2006; Varvel, 2006; Murphy *et al.*, 2011), otros que han observado mermas (Wang *et al.*, 2006; Coulter *et al.*, 2009; Benjamin *et al.*, 2010), al mismo tiempo que hay reportes en los que no se ha podido demostrar un efecto de la rotación de cultivos sobre la concentración de la materia orgánica (Gijssman *et al.*, 1997; Soon *et al.*, 2007; Snapp *et al.*, 2010). Mc Daniel *et al.* (2014a) señalaron que si bien no son conocidas las causas de esta respuesta variable, es probable que se deba a la influencia de los diferentes manejos y/o a las distintas condiciones edáficas y climáticas de los ensayos realizados (Wardle, 1992; Jobbagy & Jackson, 2000; Amundson *et al.*, 2003; Muller & Hoper, 2004; Fierer *et al.*, 2009).

Luo *et al.* (2010) a partir de una recopilación de estudios provenientes de Australia, distinguieron el efecto de la diversificación de cultivos, de su frecuencia y de

su permanencia sobre el carbono edáfico. Estos autores concluyeron que el aumento en la diversidad de especies incrementaba dicho elemento en un 5,3 %, su mayor frecuencia (pasando de un cultivo a dos por año) lo hacía en un 10,1 %, mientras que ante la introducción de pasturas perennes, el carbono orgánico aumentaba un 17,8 %. Luo *et al.* (2010) también plantearon que la incorporación de legumbres en la rotación no influía sobre la acumulación de carbono, a no ser que estas fueran perennes como la alfalfa.

La ausencia de cultivos durante una parte del año implica una pérdida potencial de recursos (agua y radiación solar), que no son aprovechados para producir granos y biomasa (Alvarez, 2014; Andrade *et al.*, 2015, 2017; Caviglia *et al.*, 2004, 2013, 2019; Monzón *et al.*, 2014). Por lo tanto, la intensificación en la secuencia de cultivos genera un mayor y más eficiente uso de los recursos, a partir de la presencia de cobertura vegetal viva durante un intervalo de tiempo superior (Caviglia *et al.*, 2011; Novelli, 2013). La mayor frecuencia en el agregado de residuos de cosecha al aumentar el número de cultivos en el año, favorece el mantenimiento de una elevada actividad microbiana por un mayor período de tiempo, produciendo diferentes sustancias cementantes que proporcionan una mayor estabilidad en la estructura del suelo y un incremento en el almacenaje del carbono orgánico edáfico (Six *et al.*, 2006).

Se ha señalado que las secuencias de cultivos que reducen los períodos de barbecho, maximizan la cantidad de carbono y nitrógeno secuestrados en el suelo (Sherrod *et al.*, 2003; Higashi *et al.*, 2014; Mukherjee & Lal, 2015; Posse *et al.*, 2018; Restovich *et al.*, 2019), producen mejoras en el estado estructural (Álvaro-Fuentes *et al.*, 2008; López-Fando & Pardo, 2011; Novelli *et al.*, 2011, 2013), aumentan la infiltración (Shaver *et al.*, 2003) y disminuyen la tasa de escurrimiento (Sasal *et al.*, 2010).

La intensificación y diversificación en la secuencia de cultivos promueve la salud del suelo (Castiglioni *et al.*, 2013; Kraemer *et al.*, 2013; Chavarría *et al.*, 2016; Duval *et al.*, 2016; D'Acunto *et al.*, 2018; Restovich *et al.*, 2019). Por lo contrario, cuando la producción agrícola es menos intensificada y menos diversa, declina la calidad edáfica aún bajo siembra directa (Novelli *et al.*, 2013; Novelli *et al.*, 2017; Sasal *et al.*, 2017; Kraemer *et al.*, 2019)

Algunos estudios (Wagger & Denton, 1989; Villamil *et al.*, 2006) no han mostrado un efecto significativo de esta práctica sobre la densidad aparente, porosidad y conductividad hidráulica. En este sentido, Carof *et al.* (2005) sugirieron que la cobertura del suelo generada por la presencia de restos vegetales de los cultivos de cobertura, puede resultar en una menor conductividad hidráulica debido a una menor presencia de fisuras en la superficie del suelo. También puede ocurrir una disminución temporal en la tasa de infiltración, como resultado de la obturación de poros por las raíces provenientes del cultivo de cobertura (Swardji & Eberbach, 1998; Bodner *et al.*, 2008).

Alfonso (1987), Collinet & Casariego (1996) y Cabrera (1995), al estudiar el proceso de degradación de los suelos cultivados con tabaco, recomendaron la rotación de cultivos para evitar el deterioro de su fertilidad. Por su parte, Llanes (2000), Porras & Alfonso (1996) y Porras *et al.* (2003) sugirieron el uso de abonos verdes en dicho cultivo, mientras que León González *et al.* (2007), Cabrera Carcedo *et al.* (2013) y Llanes *et al.* (2013), demostraron que la incorporación de abonos verdes y abonos orgánicos en el cultivo de tabaco pueden mejorar las propiedades químicas, físico – químicas y el balance nutricional del suelo. Por su parte, Yang *et al.* (2016) también evaluaron los efectos de la incorporación de abonos verdes (centeno, arveja y colza) en suelos bajo producción de tabaco en China, demostrando que el abono verde tuvo un impacto significativo en las propiedades del suelo al aumentar su contenido de carbono,

nitrógeno y calcio y las comunidades microbianas, mejorando además la calidad del cultivo.

1.5. ÍNDICES DE CALIDAD DEL SUELO

La evaluación de los efectos del uso de la tierra sobre las propiedades edáficas es una tarea compleja, dado que son varios los atributos que deben ser considerados. Por lo tanto, los programas de monitoreo de la calidad edáfica deben seleccionar aquellas propiedades que reflejen el estado del suelo y la evolución de distintos procesos de degradación (Benintende *et al.*, 2017). A pesar de la gran cantidad de trabajos realizados sobre la calidad del suelo, los conceptos y las herramientas en el campo de la investigación todavía están en desarrollo (Stefanoski *et al.*, 2016).

El concepto de calidad de suelo ha evolucionado y dejado de estar vinculado exclusivamente con la productividad (Bautista *et al.*, 2004), integrando otros aspectos como la sostenibilidad y la calidad ambiental (González, 2006; Jamioy, 2015), además de estar relacionado a un determinado uso de la tierra: agrícola, forestal, urbano o industrial (Gil-Sotres *et al.*, 2005; Duval *et al.*, 2013).

La determinación del grado de calidad para un determinado tipo de suelo, depende de sus características intrínsecas, de su uso y de los objetivos del manejo (Andrews *et al.*, 2004). McBratney *et al.* (2014) introdujeron el concepto más complejo de “seguridad del suelo”, que trata de la conservación y mejora de dicho recurso para producir alimentos, fibra, agua dulce, energía y para ayudar a mantener la sostenibilidad del clima y la biodiversidad.

La calidad del suelo no se puede medir directamente en el campo o en el laboratorio. Sin embargo, esta puede inferirse indirectamente a través del uso de indicadores (Zornoza *et al.*, 2015; Salome *et al.*, 2016), considerados como aquellas propiedades del suelo medibles que presentan mayor sensibilidad ante cambios en el

funcionamiento del suelo y en los servicios ecosistémicos que este presta (Karlen *et al.*, 1997, Arshad & Martin, 2002). Los indicadores de calidad de suelo deberían abarcar procesos ecosistémicos, integrar propiedades del suelo, ser accesibles a múltiples usuarios y ser sensibles a distintas prácticas culturales y al clima. Los indicadores de calidad de suelo y sus valores umbral marcan las características que presenta un normal funcionamiento del suelo, y por lo tanto sirven para monitorear cambios e identificar tendencias en su funcionamiento (Rojas *et al.*, 2016). Si se utilizan muchas variables para realizar dicho monitoreo, se puede presentar un problema de duplicación de la información cuando dichas propiedades están correlacionadas entre sí, resultando por lo tanto un trabajo extra de laboratorio (Qi *et al.*, 2009).

Por lo tanto, a pesar que se puede considerar una amplia gama de indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo, por un problema de costos no es factible considerarlos a todos (Cardoso *et al.*, 2013; Zornoza *et al.*, 2015). Al respecto, se ha sugerido identificar un número adecuado de propiedades edáficas que determinen y representen los principales procesos y funciones que ocurren en el suelo, lo que se conoce como conjunto mínimo de datos (CMD). De esta manera, además de ahorrar tiempo y dinero, se obtiene una estimación confiable y precisa de la calidad edáfica en los agroecosistemas (Zhang *et al.*, 2016). El foco de la investigación al día de hoy es seleccionar, ponderar e interpretar un conjunto consensuado de indicadores para evaluar la calidad del suelo (Alves de Castro Lopes *et al.*, 2013).

El conjunto de indicadores seleccionados dependerá de su objeto de aplicación. Si este es analizar el impacto ambiental de una determinada actividad, los indicadores utilizados serán distintos de aquellos utilizados si la finalidad es maximizar la productividad del suelo. A su vez, si lo que se pretende evaluar es el efecto de distintas rotaciones de cultivos, los indicadores variarán respecto a aquellos utilizados para

contrastar diferentes sistemas de labranza (Zuber *et al.*, 2017). Además, en dicha selección se deberán considerar las prácticas de manejo, el clima, el tipo de suelo y otras variables ambientales, ya que un indicador individual no presenta siempre la misma sensibilidad o respuesta en todas las situaciones (Cardoso *et al.*, 2013). Es por eso que los indicadores deben seleccionarse de acuerdo al ambiente y al suelo de la región donde se realizará el estudio (Cantú *et al.*, 2007; Rojas *et al.*, 2016), lo mismo que debe verificarse su utilidad para cada agroecosistema donde se evaluarán las prácticas de manejo (Dalurzo, 2002; Rojas *et al.*, 2016).

No obstante, algunos parámetros han sido frecuentemente seleccionados para evaluar los agroecosistemas (Zuber *et al.*, 2017). En este sentido, el carbono orgánico es una propiedad frecuentemente utilizada, ya que la misma está fuertemente vinculada con otras como por ejemplo la estructura, la disponibilidad de nutrientes y la resistencia a la erosión (Islam & Weil, 2000; West & Post, 2002), al mismo tiempo que también influye sobre la actividad biológica (Schimel & Schaeffer, 2012). Otras propiedades químicas comunmente seleccionadas son el pH, la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de nutrientes, como elementos del suelo que influyen en el desarrollo favorable de los cultivos (Bastida *et al.*, 2008; Cardoso *et al.*, 2013). A su vez, la densidad aparente, porosidad y estabilidad estructural son propiedades físicas normalmente tenidas en cuenta, ya que su determinación es simple, de bajo costo y están relacionadas con la aireación del suelo, su capacidad de infiltración y con su habilidad para resistir la erosión (Schoenholtz *et al.*, 2000).

Karlen *et al.* (2006) en la elaboración de un índice de calidad de suelo para evaluar el efecto de distintas rotaciones en Iowa y Wisconsin (Estados Unidos), usaron la densidad aparente, pH, estabilidad de agregados, carbono orgánico, nitrógeno total, carbono de la biomasa microbiana, fósforo y potasio extractable y la resistencia a la

penetración. Jokela *et al.* (2011) en un proceso de evaluación del efecto de distintos sistemas de uso de la tierra (producción de granos y pasturas), consideraron a la estabilidad estructural, densidad aparente, carbono orgánico, nitrógeno potencialmente mineralizable, carbono de la biomasa microbiana, pH y fósforo. Por su parte, Aziz *et al.* (2013) para comparar distintas rotaciones de cultivo bajo siembra directa y labranza convencional, incorporaron al carbono de la biomasa microbiana, respiración basal, cociente metabólico, carbono orgánico, nitrógeno total, carbono activo, estabilidad estructural, porosidad y al carbono orgánico particulado.

Los primeros criterios utilizados para seleccionar el CMD se basaron en el juicio de los expertos (Doran & Parkin, 1994; Andrews *et al.*, 2002; Sánchez-Navarro *et al.*, 2015). Posteriormente y con el objetivo de valorar el impacto de los distintos sistemas de producción agrícola, se empleó una variedad de métodos estadísticos multivariados para elegir los indicadores de calidad, e integrarlos en índices de calidad del suelo (ICS) (Masto *et al.*, 2007; Muñoz-Rojas, 2018).

Algunos índices de calidad de suelos pueden ser tan simples como la relación carbono – nitrógeno (C/N) (Mataix-Solera *et al.*, 2009), pero emplear pocos indicadores no proporcionará toda la información necesaria sobre los procesos y el funcionamiento del suelo. En este sentido, la creación de un índice de calidad de suelo basado en sólo uno o un pequeño conjunto de indicadores puede no ser fiable. Por esa razón, se necesita de un CMD que represente la complejidad y funcionalidad del suelo para evaluar su calidad (Cardoso *et al.*, 2013).

Una evaluación consistente de la calidad edáfica, requiere de una metodología sistemática para seleccionar, interpretar e integrar las propiedades del suelo que sean útiles como indicadoras de su calidad (Romaniuk *et al.*, 2012). Para ello, resulta necesario contar con información científica que permita seleccionar indicadores

adecuados, con la finalidad de desarrollar índices para evaluar correctamente la calidad de los suelos (Duval *et al.*, 2013). Uno de los enfoques está relacionado con el uso de índices complejos, generados con el conocimiento actual de las propiedades edáficas, obtenidos de una combinación de distintas variables basadas en valores umbral (Blanco & Lal, 2008). Estos índices de calidad permiten la cuantificación del impacto del uso de la tierra (Fernandes *et al.*, 2011) y de las distintas especies vegetales (Zhang *et al.*, 2015) sobre las funciones del suelo.

Según Rojas *et al.* (2016), en Argentina se han seleccionado diversos indicadores de calidad edáfica en diferentes regiones y con distintos propósitos (Albanesi *et al.*, 2003; Noellemeyer *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2008; Zen *et al.*, 2009; Campitelli *et al.*, 2010). De esta manera se ha medido un gran número de propiedades, con distintas metodologías, instrumental, utilizando a su vez diversos tipos de análisis estadísticos. No obstante y según Rojas *et al.* (2016), en general no se ha hecho una evaluación integrada de dichas variables.

1.5.1. Indicadores físicos de calidad del suelo

Las prácticas de manejo provocan alteraciones en los atributos físicos, químicos y biológicos del suelo, con consecuencias sobre su calidad, afectando la sostenibilidad ambiental y económica de la actividad agrícola (Niero *et al.*, 2010). Cualquier alteración en el suelo puede modificar directamente su estructura y actividad biológica y consecuentemente su fertilidad, pudiendo promover perjuicios en la calidad de los agroecosistemas y en la productividad de los cultivos (Carbone Carneiro *et al.*, 2009).

Los suelos agrícolas con una adecuada calidad física se caracterizan por ser lo suficientemente resistentes como para mantener una buena estructura y sostener a los cultivos en posición vertical, pero también lo suficientemente sueltos como para permitir la proliferación óptima de raíces, flora y fauna del suelo (Reynolds *et al.*,

2002). En la actualidad existe un gran número de trabajos donde se ha tratado de establecer un conjunto coherente y formal de indicadores de calidad física de suelos (Álvarez *et al.*, 2008; Wilson *et al.*, 2013; Mota *et al.*, 2014). Sin embargo, los valores críticos o rangos de indicadores de calidad física de suelos a escala global aún no se conocen (Arshad & Martin, 2002).

El grado de calidad física del suelo se puede manifestar de varias formas. Una calidad física pobre resulta cuando el suelo presenta uno o algunos de los siguientes síntomas: baja tasa de infiltración, pérdida neta de partículas por escorrentía, compactación, colmatación de poros del suelo y una aireación deficiente (Jaramillo, 2002). El suelo puede presentar varios de estos problemas simultáneamente, pudiendo responder el conjunto de ellos a una causa común, como por ejemplo a la presencia de agregados poco estables (Dexter, 2004). Al respecto, la estabilidad de agregados es considerada por varios autores como la variable que refleja mejor y más rápidamente las alteraciones producidas por los cambios implementados por el uso de la tierra (Bastida *et al.*, 2008; Campitelli *et al.*, 2010; Echeverría *et al.*, 2012). Sin embargo, esta respuesta es dependiente del tipo de suelo considerado y de sus características (Aparicio & Costa, 2007; Castiglioni *et al.*, 2013), como por ejemplo del tipo y cantidad de arcilla presente, del contenido de carbono orgánico (Fernández, 1995; Pulido Moncada *et al.*, 2013) y en particular de sus fracciones lábiles (Six *et al.*, 2004; Agostini *et al.*, 2012).

Existe una amplia variedad de indicadores físicos de calidad de suelo, variando estos en importancia de acuerdo a las características predominantes del ambiente bajo estudio. García *et al.* (2012) establecieron seis indicadores como los necesarios para la evaluación de la calidad física del suelo: estructura, densidad aparente, estabilidad de los agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial y conductividad hidráulica. En el mismo sentido, Nortcliff (2002) sugirió a la textura, porosidad, densidad aparente

y profundidad del suelo como parámetros a tomar en cuenta para determinar la calidad física edáfica. Por su parte, Reynolds *et al.* (2009) mencionaron que para los suelos agrícolas rígidos o poco expansivos, los indicadores de calidad física de suelos mas importantes serían la capacidad de campo relativa, el agua disponible para los cultivos, la capacidad de aire, el porcentaje de macroporos, la densidad aparente y la estabilidad estructural, dado que estos parámetros reflejan la capacidad del suelo para almacenar y proveer aire y agua a los cultivos. Dichos autores a su vez, establecieron rangos de valor y una interpretación cualitativa para cada una de dichas variables. Lal (2015) planteó que entre los indicadores físicos relevantes de calidad de suelo se encuentran la estabilidad de agregados, la susceptibilidad del suelo a encostrarse y a compactarse, la geometría y continuidad del sistema poroso, la tasa de infiltración y la cantidad de agua infiltrada, la retención de agua y el agua disponible para las plantas, la aereación y el intercambio gaseoso, la profundidad efectiva de las raíces y el régimen de temperatura del suelo.

En Argentina, Giuffré *et al.* (2006) encontraron en un sistema productivo hortícola, que los indicadores físicos eran más sensibles que los indicadores microbiológicos. Asimismo, Romaniuk *et al.* (2014) concluyeron para situaciones bajo el mismo sistema de producción, que los índices de calidad edáfica que no incluían indicadores físicos, presentaban escasa sensibilidad para evidenciar el proceso de degradación de los suelos.

1.5.2. Indicadores químicos de calidad de suelo

Entre las propiedades químicas propuestas como indicadoras, se señalan aquellas que inciden en la relación suelo-planta, como por ejemplo la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Etchevers *et al.*, 2009). García *et al.* (2012) señalaron que los indicadores químicos

más usados son la disponibilidad de nutrientes, el carbono orgánico total, el carbono orgánico lábil, el pH, la conductividad eléctrica, la capacidad de absorción de fosfatos, la capacidad de intercambio catiónico, los cambios en la materia orgánica, el nitrógeno total y el nitrógeno mineralizable. Por su parte, Lal (2015) mencionó a los siguientes indicadores de calidad química como importantes: pH, capacidad de intercambio catiónico, disponibilidad de nutrientes y la falta de toxicidad o de deficiencia de algún elemento.

El carbono orgánico juega un papel clave en los procesos del suelo, ya que está estrechamente asociado con una amplia variedad de propiedades químicas, físicas y biológicas edáficas (Smith *et al.*, 2000). En este sentido, Lal (2015) mencionó que el carbono edáfico es el indicador más fiable para monitorear la degradación de los suelos. Por su parte, Beltrán *et al.* (2018) plantearon que la materia orgánica es el más importante reservorio de nutrientes (Rani Sarker *et al.*, 2018), y que tiene efectos sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, con consecuencias directas sobre su calidad y productividad.

Esta propiedad está muy asociada a los cambios en el uso de la tierra. Duval *et al.* (2016) mencionaron que un tercio de la pérdida del carbono edáfico de la región Pampeana, se debió al efecto de prácticas agrícolas inadecuadas (Alvarez, 2005). Por su parte, Beltrán *et al.* (2018) plantearon que los suelos sometidos a un intenso uso agrícola del sudeste de la provincia de Buenos Aires, han reducido como consecuencia su contenido de carbono, principalmente el de sus fracciones más lábiles (Sainz Rozas *et al.*, 2011). El carbono presente en el suelo resulta de un balance entre aportes y salidas. En ese sentido, bajo sistemas de producción agrícolas con monocultivo de soja, que es un cultivo con bajos aportes de residuos de cosecha, se genera un empobrecimiento

mayor de este elemento en el suelo, respecto a otras situaciones con una mayor proporción de gramíneas (Mazzilli *et al.*, 2014)

El carbono orgánico del suelo comprende diversas fracciones con diferentes propiedades químicas y físicas y con distintos grados de estabilización (Duval *et al.*, 2016). Estas fracciones están también definidas por su tiempo de ciclado, que puede abarcar desde cortos períodos hasta muchos años (Allison & Jastrow, 2006; Bol *et al.*, 2009). Aquellas fracciones que están asociadas a las partículas del suelo mayores a los 53 micrones, como el carbono orgánico particulado, se encuentran fácilmente disponibles para los microorganismos, siendo por lo tanto más propensas a ser degradadas. Estas fracciones lábiles del carbono son más sensibles a los cambios producidos por las prácticas agrícolas, y como consecuencia evidencian pérdidas en la calidad del suelo en el corto plazo (Galantini *et al.*, 2002; Eiza *et al.*, 2005; Ouédraogo *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2012; Duval *et al.*, 2013, 2016; Galantini *et al.*, 2014; Muñoz-Romero *et al.*, 2017). Por su parte, los efectos a largo plazo sobre la calidad edáfica generados por los cambios en las prácticas agrícolas, están asociados a cambios en el carbono total del suelo (Franzluebbers *et al.*, 1995; Roldán *et al.*, 2005).

El carbono orgánico particulado está constituido fundamentalmente por residuos orgánicos que no han sido totalmente procesados por los microorganismos (Beltrán *et al.*, 2018). Galantini & Rosell (1997) propusieron una subdivisión de esta fracción en dos: el carbono orgánico particulado grueso, que representa a la fracción más activa y con un tiempo de ciclado de 1 a 5 años (Anderson & Ingram, 1989), y el carbono orgánico particulado fino que es la fracción mas estable y que presenta un tiempo de ciclado de 10 a 20 años (Galantini & Suñer, 2008). Por su parte, la fracción de carbono inferior a los 53 micrones es aquella mas estable de la materia orgánica y que está asociada a las

arcillas, siendo en parte sus constituyentes las huminas y los ácidos fúlvicos (Beltrán *et al.*, 2018).

El carbono orgánico se incrementa bajo prácticas conservacionistas, relacionándose positivamente con la mejora en la estructura de los suelos, el ciclo de nutrientes y el secuestro de carbono, mientras que con prácticas agrícolas intensivas se promueve la liberación de carbono hacia la atmósfera, la pérdida de nutrientes y la disminución de la fertilidad (Ginebra Aguilar *et al.*, 2015), siendo especialmente la fracción más lábil, la que principalmente se modifica a partir de los cambios sufridos por el uso de la tierra (Álvarez *et al.*, 2012).

1.5.3. Indicadores biológicos de calidad del suelo

La biología del suelo tiene un papel importante en la determinación de su calidad, reduciendo los riesgos de degradación y de desertificación, presentando a su vez un rol crítico en el desarrollo de las funciones de los ecosistemas (Lal, 2015). La estructura de la actividad microbiana edáfica, la distribución de la biomasa microbiana y la actividad enzimática pueden ser afectadas por diversos factores como las prácticas de manejo, las distintas especies vegetales, el pH, el tipo de suelo, la labranza y la rotación de cultivos (Girvan *et al.*, 2003; Marschner *et al.*, 2004; Hartman *et al.*, 2006; Acosta-Martinez *et al.*, 2008; Yin *et al.*, 2010; Laudicina *et al.*, 2011).

Los indicadores biológicos de calidad edáfica, proveen información sobre los organismos vivos del suelo, midiendo propiedades y procesos que permiten detectar con mayor sensibilidad los cambios en las funciones edáficas (Videla & Picone, 2017). De esta manera, numerosas investigaciones sugieren el uso de indicadores que reflejen la actividad, la abundancia y la diversidad de los microorganismos del suelo (Moscatelli *et al.*, 2007).

Los microorganismos tienen gran influencia en diversos procesos y funciones de los ecosistemas naturales y agrícolas (Ponge, 2015). Los parámetros biológicos y bioquímicos tienden a reaccionar de manera rápida y son sensibles a los cambios producidos por el manejo, constituyendo una señal temprana para estimar la calidad edáfica, incluso antes que las propiedades físicas y químicas (Nannipieri, 1994; Romaniuk *et al.*, 2016). Debido a ello, Zuber *et al.* (2017) mencionaron que en algunos casos, los índices de calidad de suelo se han desarrollado de tal manera para que incluyan solamente componentes biológicos. Sin embargo, los mismos autores señalaron que mientras estas propiedades son mas sensibles a los cambios surgidos por las actividades agrícolas que el carbono orgánico, al mismo tiempo son altamente variables y con altas fluctuaciones temporales y espaciales, lo cual debe ser contemplado cuando estas propiedades son usadas como indicadoras en un índice de calidad de suelos (Bastida *et al.*, 2008; Cardoso *et al.*, 2013; Zuber & Villamil, 2016). Otra de las dificultades para incluir a las propiedades biológicas como indicadoras de calidad de suelos, es que generalmente no se cuenta con valores de referencia (Carvalho Mendes & Reis-Junior, 2004).

La importancia en la evaluación de las propiedades biológicas del suelo, se relaciona estrechamente con el efecto de la actividad biológica sobre la descomposición de los residuos vegetales y animales (Astier-Calderon *et al.*, 2002). La mineralización de la materia orgánica es controlada principalmente por la cantidad y actividad de la biomasa microbiana, la que puede responder a las perturbaciones realizadas en el suelo en una escala de tiempo reducida (Ferrerias *et al.*, 2009). Debido a ello, los parámetros biológicos presentan un interesante potencial como atributos de alta sensibilidad a los cambios provocados por el uso del suelo (Caravaca *et al.*, 2002; Marinari *et al.*, 2006;

Trasar-Cepeda *et al.*, 2008; Benintende *et al.*, 2008; Melero *et al.*, 2009; Kaschuk *et al.*, 2010; Kaschuk *et al.*, 2011).

Las variables biológicas que más frecuentemente integran el conjunto mínimo de indicadores microbianos en los programas de monitoreo europeos son: la biomasa microbiana seguida de la respiración (Nielsen & Winding, 2002). Lal (2015) por su parte, propuso los siguientes parámetros como indicadores de calidad biológica: carbono de la biomasa microbiana, respiración, actividad enzimática, actividad de la deshidrogenasa y de otras hidrolasas (ureasa, proteasa, fosfatasa y B-glucosidasa).

La respiración microbiana, evaluada a través de la producción de CO₂, refleja directamente la actividad microbiana e indirectamente la disponibilidad de sustrato (Noellemeyer *et al.*, 2008; Fernández *et al.*, 2010). En general, una mayor respiración se asocia con un incremento en la actividad microbiana. Sin embargo, las tasas de respiración por encima de un valor límite, podrían representar una pérdida excesiva de carbono para el ecosistema (Cotrufo *et al.*, 2013; Geyer *et al.*, 2016). Según Moreira & Siqueira (2002), la respiración es uno de los parámetros más antiguos para cuantificar la actividad microbiana, siendo altamente variable tanto espacialmente como estacionalmente, estando a su vez fuertemente afectada por condiciones de humedad y temperatura.

En el caso del carbono de la biomasa microbiana, parte de su relevancia radica en que si bien constituye una pequeña fracción del carbono total, es un reservorio de nutrientes para las plantas (Kallenbach *et al.*, 2016), siendo más lábil que la materia orgánica (Costantini *et al.*, 1996). Es un indicador temprano de los cambios en la dinámica del ciclado de nutrientes y de la materia orgánica, ya que tanto el nitrógeno como el carbono de la biomasa microbiana son mas sensibles a las actividades agrícolas que el carbono y nitrógeno total del suelo (Mc Daniel *et al.*, 2014a).

Sin embargo, se plantea que tanto la respiración como el carbono de la biomasa microbiana por sí solos no reflejarían el estado de salud edáfico, ya que un suelo con alto contenido de carbono microbiano no necesariamente respira más y un suelo con mayor tasa de respiración no siempre presenta mayor carbono microbiano (Anderson, 2003).

La relación entre la respiración basal y la biomasa microbiana, conocida como el cociente metabólico (qCO_2) (Anderson & Domsch, 1990), brinda una interpretación más directa de la actividad de los microorganismos en relación a su biomasa (Pascaud *et al.*, 2012). El qCO_2 indica el nivel de stress de la población microbiana. Mientras más alto es su valor, la población microbiana es metabólicamente menos eficiente, ya que libera más C del que incorpora a su biomasa (Anderson, 2003). Esta relación se ha utilizado ampliamente como un buen indicador de las alteraciones que tienen lugar en el suelo, como consecuencia de las prácticas de manejo (Dilly *et al.*, 2003).

Otro indicador biológico propuesto por algunos autores y que es útil para evaluar algunos procesos que ocurren en el suelo, es el cociente microbiano. Representa el contenido porcentual de carbono de biomasa microbiana respecto al carbono orgánico total (CBM/COT), e indica la disponibilidad de sustrato para los microorganismos del suelo. Al presentar valores por debajo del 2%, señala un agotamiento de la materia orgánica (Anderson, 2003). Los cambios en la relación CBM/COT reflejan entradas o pérdidas de materia orgánica de los suelos, la eficiencia de conversión a carbono microbiano y la estabilización del carbono orgánico por parte de la fracción mineral del suelo. Su estudio puede ayudar a la comprensión de los cambios químicos y biológicos que acontecen bajo diferentes manejos del suelo (Anderson & Domsch, 1989, 1990). En este sentido, son varios los autores que han corroborado su sensibilidad ante cambios en

el uso de la tierra (Sparling, 1992; Pankhurst *et al.*, 2002; Anderson, 2003; Melero *et al.*, 2006; Piovanelli *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2007).

1.6. OBJETIVOS

- Evaluar en dos series de suelo características del Valle los Pericos (Valles Templados, Provincia de Jujuy), el efecto que ejercen sobre distintos parámetros edáficos determinados a dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm), diferentes prácticas de manejo realizadas en el cultivo de tabaco: monocultivo, rotación con gramíneas, incorporación de abonos verdes.
- Seleccionar aquellas propiedades con mejor respuesta a los cambios de manejo en el cultivo de tabaco, con la finalidad de elaborar un índice de calidad de suelos.
- Construcción para las dos series de suelos evaluados, de un índice de calidad mediante dos procedimientos de selección de indicadores, que sirva para monitorear en la región bajo estudio el estado de degradación edáfica de distintos planteos productivos del cultivo de tabaco.
- Comparar entre las distintas alternativas de manejo del cultivo de tabaco estudiadas en ambas series de suelo, los índices de calidad de suelo generados, evaluando su capacidad para diferenciar la calidad edáfica generada por los distintos tratamientos evaluados.

1.7. MATERIALES Y MÉTODOS

1.7.1. Área de trabajo

1.7.1.1. Localización

Los departamentos de la Provincia de Jujuy donde se desarrolla la actividad tabacalera son: Dr. Manuel Belgrano, El Carmen, San Antonio y Palpalá (Figura 1.4), los cuales se encuentran dentro de los Valles Templados. El presente estudio se realizó en el departamento El Carmen, un área comprendida dentro del Valle Los Pericos (Figura 1.4). El valle cuenta con una superficie bajo riego de aproximadamente 30000 ha (Braun *et al.*, 2001).

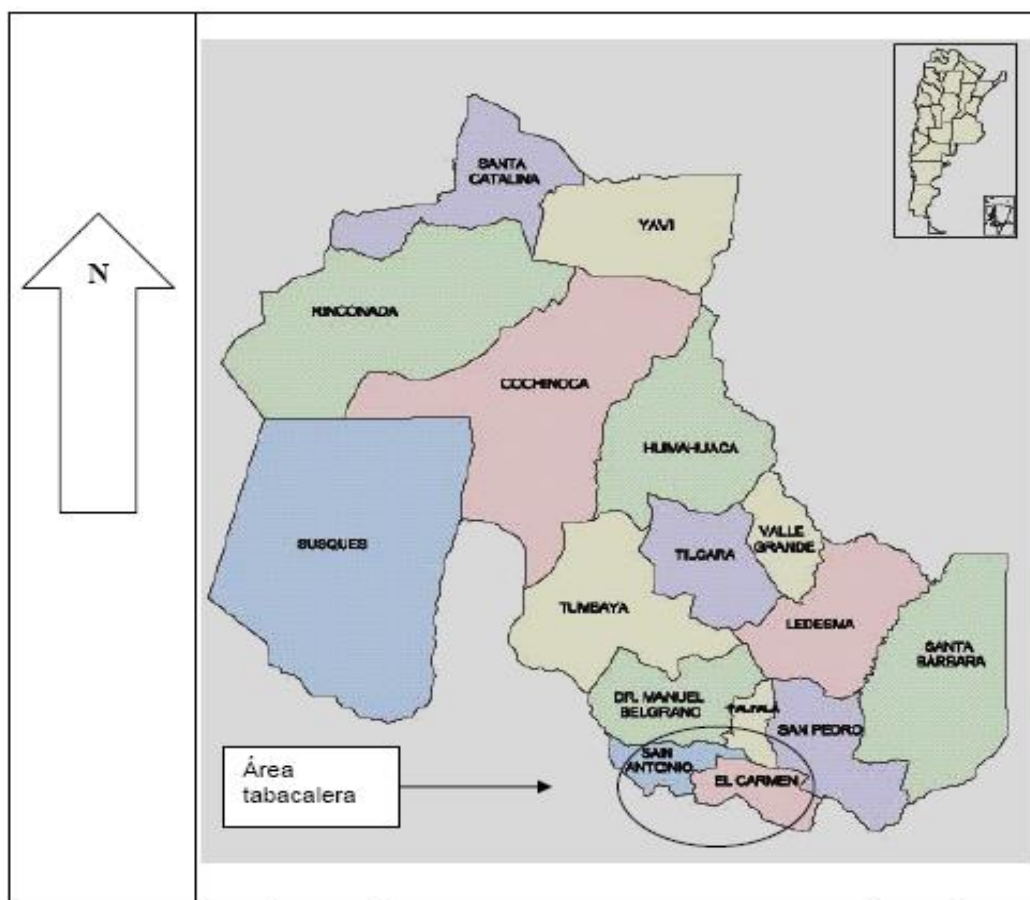


Figura 1.4. Localización del área tabacalera en el mapa de división política y administración de la provincia de Jujuy (INDEC, 2004).

1.7.1.2. Clima

En la Figura 1.5 se detallan los valores de precipitación media mensual y de temperatura máxima, mínima y media mensual para el área bajo estudio. El verano es caluroso y húmedo. En invierno, las temperaturas máximas oscilan alrededor de los 20 °C, fundamentalmente al medio día y en las primeras horas de la tarde, mientras que por las noches se alcanzan registros por debajo de los 0 °C. Las temperaturas medias de los meses más cálidos y más fríos son de 23,5 °C en enero y 12 °C en julio, respectivamente.

En el Valle los Pericos (Pcia. de Jujuy), entre los meses de noviembre y marzo se registran en promedio precipitaciones de 600 mm, lo que representa el 83 % del total anual. El régimen de lluvias es típicamente monzónico. Una característica de la zona es la precipitación en forma de granizo, principalmente entre los meses de noviembre a febrero.

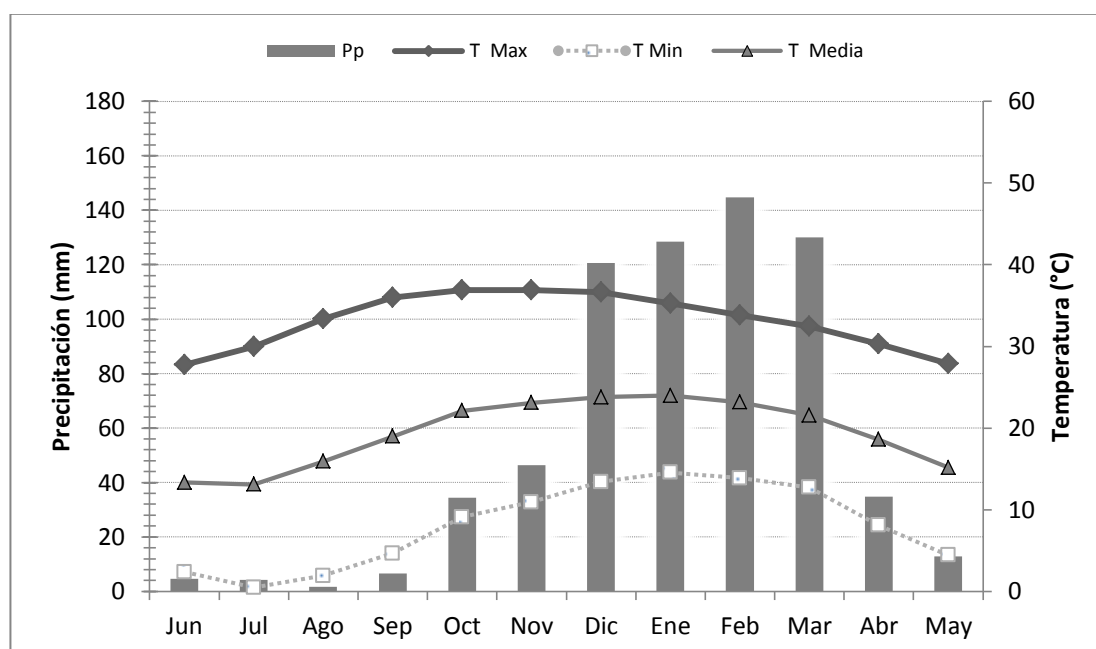


Figura 1.5. Precipitación media mensual (Pp) y temperatura máxima (TMax), mínima (TMin) y media (Tmedia) mensual correspondiente al área estudiada. Valores promedio de la serie años 1998 – 2017 (Cátedra Climatología FCA – UNJu.)

1.7.1.3. Suelos

Se trabajó sobre dos series de suelo: Perico y Monterrico, las que abarcan en gran proporción la zona núcleo de la producción tabacalera (Figura 1.6). Las características de los suelos se describen a continuación:

1.7.1.3.1. Serie Perico (Pe)

Se extiende desde la margen izquierda del río Perico hasta las proximidades de la ruta que une las localidades El Carmen y Los lapachos (Figura 1.6). Corresponde a un Ustifluvente mólico (Nadir & Chafatinos, 1990), siendo su origen a partir de depósitos aluviales derivados de rocas del terciario.

Es un suelo de incipiente desarrollo, con secuencia de horizontes A, C y 2C, de textura media y con gravas a profundidades variables, siempre por debajo de los 60 cm (Tabla 1.4). Bien a moderadamente bien drenado, pH neutro, contenido de materia orgánica bajo, capacidad de intercambio catiónico media, porcentaje de saturación de bases alto, ubicado en pendientes del 0 al 1 %, con riesgo de erosión ligera a moderada (CFI, 1981).

Descripción del perfil modal

A1: 0-24 cm

Pardo (10YR 5/3) en seco y pardo oscuro (10YR 3/2) en húmedo. Franco limoso. Bloques subangulares, medios, moderados. Duro, friable, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo. pH 7,2. Moderadas raíces. Límite claro y suave.

C1: 24-74 cm

Pardo pálido (10YR 6/3) en seco y pardo amarillento (10YR 3/4) en húmedo. Franco (en los primeros 10 cm un lente de textura más gruesa). Ligeramente duro, muy friable, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo. pH 6,9. Escasas raíces. Límite abrupto y ondulado.

2C2: 74-150 cm

Horizonte constituido por más del 90 % de fragmentos gruesos (grava) sub-redondeados. La disposición en el perfil no muestra ninguna orientación. La matriz existente es de textura franco. Litológicamente se trata de cuarcitas y esquistos micáceos finos. pH 7,1.

1.7.1.3.2. Serie Monterrico (Mo)

Comprende una superficie de 4619 ha, extendiéndose desde la ruta provincial 43 hasta la margen izquierda del río Las Pavas. Está presente principalmente en las localidades Perico, El Carmen y Los Lapachos. Es un Haplustol fluventico (Nadir & Chafatinos, 1990), originado a partir de depósitos aluviales derivados de rocas del terciario y se presenta en un relieve plano a suavemente ondulado,

Suelo de incipiente desarrollo, con perfil A, C y 2C, de textura media en superficie y media a medianamente fina en profundidad (Tabla 1.5). Bien a moderadamente bien drenado, pH neutro, contenido de materia orgánica bajo, capacidad de intercambio catiónico moderadamente alta a media, porcentaje de saturación de bases alto, ubicado en pendientes del 1 %, con riesgo de erosión ligera (CFI, 1981).

Descripción del perfil modal

A1: 0-19 cm

Pardo rojizo (5YR 4,5/3) en seco y pardo rojizo oscuro (5YR 2,5/2) en húmedo. Franco. Bloques subangulares, medios, moderados. Duro, friable, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo. pH 6,6. Moderada presencia de raíces. Límite claro y suave.

C1: 19-51 cm

Pardo rojizo (5YR 4/4) en seco y pardo rojizo oscuro (5YR 3/4) en húmedo. Franco con grava de 2 a 4 mm de diámetro que oscila entre el 15 y 60 %. Masivo. Duro a muy duro,

detallan los tratamientos evaluados para ambas series de suelo, siendo la información aportada por el productor de cada sitio bajo estudio.

Tabla 1.4. Detalle de los tratamientos analizados en ambas series de suelo.

Tratamiento	Número de años de producción	Sistema de manejo
T	0	Situación testigo (suelo con bajo disturbio).
TM	>30	Monocultivo de tabaco bajo labranza convencional continua.
TV	>30	Cultivo de tabaco bajo labranza convencional continua, con incorporación de verdeos de invierno en al menos los últimos 10 años de producción.
TG	>30	Cultivo de tabaco bajo labranza convencional continua, bajo rotación tabaco/gramíneas en al menos los últimos 10 años de producción.

Se seleccionaron lotes de productores (3 por cada tratamiento y serie de Suelo), de donde se obtuvieron las muestras, detallándose en el anexo las coordenadas geográficas correspondientes a cada sitio (Tablas 1 y 2 del anexo). El muestreo de la situación testigo se realizó sobre un suelo de características similares al evaluado en cada tratamiento y no alterado desde hace más de 30 años, representando una situación cuasi prístina. En ambas series de suelo, el muestreo se realizó bajo cortinas forestales de *Grevillea robusta* y *Casuarina* sp. El suelo se encontraba cubierto totalmente por especies herbáceas compuestas por *Digitaria sanguinalis* (Pasto cuaresma), *Eleusine indica* (Pie de gallina), *Echinochloa colona* (Equinocioa), *Leptochloa panicea* (Pasto moro), *Portulaca oleracea* (Verdolaga), *Amaranthus* spp (Ataco) y con predominio de *Sorghum halepense* (sorgo de Alepo) y *Cyperus rotundus* (Cebollín).

1.7.3. Análisis granulométrico

Para cada uno de los tratamientos detallados previamente y de cada serie de suelos, se tomaron muestras para caracterizar la textura de ambas profundidades analizadas (0-20 cm y 20-40 cm).

1.7.3.1. Serie de suelos Perico

En la Tabla 1.5 se observa la composición granulométrica superficial y subsuperficial de los suelos evaluados en los distintos tratamientos y el correspondiente al testigo. Estos resultaron ser franco-arenosos para ambas profundidades, excepto en el tratamiento TV que correspondió a un suelo franco-arcillo-arenoso en superficie y franco a mayor profundidad. Esta descripción difirió de la generada para esta región a una escala de menor detalle (CFI, 1981), sobre todo en cuanto al contenido de arena y limo. En este sentido, los suelos relevados en el presente trabajo presentaron en promedio un 62 % más de arena y un 50 % menos de limo respecto a lo determinado en el estudio previo.

Tabla 1.5. Valores medios, mínimos y máximos de las distintas fracciones granulométricas, correspondientes a los suelos analizados.

Tratamientos/ Profundidad		Arcilla 1	Arcilla 2	Limo 1	Limo 2	Arena 1	Arena 2
T	Media	14,2 a	15,0 a	22,5 a	22,5 a	64,2 a	62,5 b
	Min	10,0	10,0	17,5	20,0	60,0	57,5
	Max	17,5	17,5	25,0	25,0	72,5	70,0
TM	Media	18,3 a	15,0 a	23,3 a	22,5 a	58,3 a	62,5 b
	Min	12,5	12,5	20,0	20,0	42,5	57,5
	Max	27,5	17,5	30,0	25,0	67,5	65,0
TV	Media	20,8 a	22,5 a	27,5 a	28,3 a	51,7 a	49,2 a
	Min	17,5	22,5	25,0	27,5	47,5	47,5
	Max	22,5	22,5	30,0	30,0	57,5	50,0
TG	Media	14,2 a	15,0 a	21,7 a	23,3 a	64,7 a	61,7 b
	Min	10,0	15,0	15,0	20,0	57,5	57,5
	Max	17,5	15,0	25,0	25,0	75,0	65,0

T: situación testigo, TM: monocultivo de tabaco, TV: cultivo de tabaco con incorporación de verdeos, TG: cultivo de tabaco en rotación con gramíneas. 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Test DGC ($p < 0,05$).

La distribución de partículas no presentó diferencias estadísticas significativas entre los distintos tratamientos analizados, con la excepción del contenido de arena del estrato más profundo, en donde se observó que el suelo de TV tuvo una proporción de arena significativamente menor.

1.7.3.2. Serie de suelos Monterrico

En la Tabla 1.6 se observa la composición granulométrica de los suelos evaluados en los distintos tratamientos y el correspondiente al testigo. En T y TM fueron clasificados como franco-arenosos para ambas profundidades, mientras que en TV y TG fueron clasificados como franco-arcillo-arenosos. Esta composición granulométrica difirió de la observada en esta región a una escala de menor detalle (CFI, 1981), en la cual se definió a esta serie con textura franca para ambas profundidades. A su vez y de manera diferente a lo ocurrido con la serie Perico, las mayores diferencias se manifestaron en el contenido de arcilla y limo, presentando los suelos relevados en el área de la serie Monterrico, un 43% promedio más de arcilla y un 42% menos de limo, respecto a la descripción realizada para dicha serie (CFI, 1981).

Tabla 1.6. Valores de medios, mínimos y máximos de las distintas fracciones granulométricas, correspondientes a los suelos de los diferentes tratamientos.

Tratamientos		Arcilla	Arcilla	Limo	Limo	Arena	Arena
Profundidad		1	2	1	2	1	2
T	Media	17,5 a	19,2 a	20,0 a	20,0 a	62,5 a	60,8 b
	Min	12,5	17,5	20,0	20,0	60,0	60,0
	Max	20,0	20,0	20,0	20,0	67,5	62,5
TM	Media	20,0 a	20,0 a	21,7 a	20,8 a	58,3 a	59,2 b
	Min	17,5	17,5	17,5	17,5	50,0	52,5
	Max	22,5	22,5	27,5	25,0	65,0	65,0
TV	Media	30,8 b	27,5 a	20,0 a	19,2 a	49,2 a	53,3 a
	Min	30,0	22,5	20,0	17,5	47,5	47,5
	Max	32,5	32,5	20,0	20,0	50,0	60,0
TG	Media	22,5 a	25,0 a	19,2 a	17,5 a	58,3 a	57,5 b
	Min	20,0	20,0	15,0	15,0	52,5	50,0
	Max	25,0	30,0	22,5	20,0	65,0	65,0

T: situación testigo, TM: monocultivo de tabaco, TV: cultivo de tabaco con incorporación de verdeos, TG: cultivo de tabaco en rotación con gramíneas. 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Test DGC ($p < 0,05$).

A su vez, se observa que el tratamiento TV difirió en la distribución de partículas respecto al resto, presentando mayor porcentaje de arcilla en los primeros 20 cm y menor porcentaje de arena de 20 a 40 cm.

Viendo los resultados de las Tablas 1.5 y 1.6, se comprueban diferencias en la distribución de partículas entre ambas series de suelos. En este sentido, los correspondientes a la serie Monterrico presentaron en promedio un 35% más de arcilla, al mismo tiempo que un menor contenido promedio de limo (17%).

1.8. Muestreo

Se realizó a mediados de noviembre de la campaña 2014/15, posteriormente al aporque, que resultan ser 80 días después del trasplante. En cada establecimiento (3 por tratamiento para cada serie de suelo) se tomó una muestra compuesta por 8 submuestras dentro de un área representativa de 2 hectáreas y a dos profundidades (0-20 y 20-40 cm). Para los estudios biológicos estas fueron conservadas en heladera a 4° C hasta el momento de su análisis. Para la mayoría de las determinaciones químicas, estas fueron tamizadas en seco con un tamiz de 2 mm de abertura de malla. Todos los análisis químicos, físicos y biológicos se hicieron por triplicado.

1.9. Determinaciones realizadas

1.9.1. Físicas

Estabilidad estructural

Se siguió el protocolo planteado por Le Bissonnais (1996). La finalidad de este método es describir el comportamiento físico del suelo, básicamente cuando es sometido a la acción de distinto tipo de presiones externas. Para ello propone tres pretratamientos de evaluación: humedecimiento rápido (DMP_r) por inmersión rápida de

los agregados en agua, desagregación mecánica (DMP_m) por agitación de los agregados con re-humectación en etanol y humedecimiento lento (DMP_l) de los agregados por capilaridad. Este método otorga especial importancia a la utilización del etanol, que permite controlar la desagregación y también limita la re-agregación de las partículas durante el secado.

Con la muestra tomada a campo y presentando esta una humedad media, se procedió a la disgregación manual de los agregados respetando sus líneas de fractura. Se removieron raíces, restos vegetales y se secó el suelo a temperatura ambiente. Posteriormente se procedió a su tamizado con tamices con una abertura de malla de 3 y 5 mm, pesando luego para la realización de cada pretratamiento 6 g de suelo seco correspondiente a la fracción de agregados que quedó entre ambos tamices.

Para el pretratamiento DMP_r , los agregados secos fueron inmersos en agua destilada por 10 minutos. Mediante este procedimiento se evaluó la disgregación por compresión del aire ocluido dentro del agregado. Al no permitir la salida de los gases por la entrada rápida del agua, se genera una presión en el agregado que puede provocar su ruptura por estallido. En el pretratamiento DMP_m , los agregados secos fueron inmersos en etanol por 30 minutos. Posteriormente se agregaron 250 ml de agua destilada, previa extracción del etanol, agitando luego el Erlenmeyer 10 veces por medio de giros completos. Este pretratamiento considera la rotura mecánica de los agregados por agitado. De esta manera se evalúa la cohesión mecánica de los agregados. En el pretratamiento DMP_l , los agregados secos se humedecieron por capilaridad durante 60 minutos. Este pretratamiento permite una mejor evaluación de la estabilidad estructural en suelos menos estables.

Luego de los distintos pretratamientos, el suelo remanente fue tamizado sumergido en etanol, utilizando un tamiz con abertura de malla de 50 μm . Aquellos

agregados que quedaron retenidos sobre dicho tamiz, se secaron a estufa a 40 °C durante 48 hs. Finalmente estos se tamizaron en seco en una columna de 6 tamices con las siguientes aberturas de malla: 2000 µm, 1000 µm, 500 µm, 200 µm, 100 µm y 50 µm, procediendo posteriormente a cuantificar por peso cada fracción de agregados retenida entre tamices adyacentes. El diámetro medio ponderado (DMP) de cada pretratamiento se obtuvo con la suma algebraica del producto de la proporción en masa de cada fracción de agregados retenido en cada tamiz, por la abertura media de malla de los tamices adyacentes. Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

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

Las determinaciones de cada pretratamiento se realizaron por triplicado, promediando luego el valor de las tres. A su vez se obtuvo el DMP promedio (DMP_p), que consiste en promediar los resultados de los tres pretratamientos. Para caracterizar cualitativamente el DMP_p de los distintos tratamientos bajo estudio, se utilizó la clasificación establecida por Le Bissonnais (1996) (Tabla 1.7).

Tabla 1.7. Clases de estabilidad y riesgo de encostramiento según los valores de DMP_p (Le Bissonnais, 1996).

Clases	DMP (mm)	Estabilidad	Formación de costras
1	< 0,4	Muy inestable	Formación sistemática de costras
2	0,4 – 0,8	Inestable	Encostramiento frecuente
3	0,8 – 1,3	Medio estable	Encostramiento moderado
4	1,3 – 2,0	Estable	Encostramiento raro
5	>2,0	Muy estable	Sin costras

Densidad aparente (Da)

La Da fue determinada por el método del cilindro (Burke *et al.*, 1986).

Resistencia a la penetración (RP)

Se utilizó un penetrómetro digital (Fieldscout SC900). Este equipo es un penetrómetro moderno de cono con punta de 30° y diámetro basal de 12,8 mm, que permite mediciones de resistencia en kPa a intervalos de profundidad de 2,5 cm hasta los 45 cm.

Las lecturas registradas entre los 0 a 20 cm y 20 a 40 cm de profundidad se promediaron, para así obtener valores de resistencia a la penetración media. Se realizaron cinco repeticiones en cada sitio de muestreo sobre el surco de siembra. Al mismo tiempo, se extrajeron dos muestras de suelo de cada profundidad para determinar la humedad gravimétrica del suelo y de esta manera relacionar los valores de resistencia a la penetración con los de esta otra variable.

Velocidad de infiltración (V_{inf})

Para su medición se empleó un permeámetro de disco, realizando tres repeticiones por cada sitio de muestreo. Por el tipo de riego superficial del cultivo, las determinaciones fueron realizadas solamente en el entresurco. Las lecturas se iniciaron cuando se observó un burbujeo parejo dentro del aparato y cuando la arena dispuesta entre el suelo y el permeámetro se encontraba totalmente saturada. Las mediciones se hicieron cada un minuto durante los primeros 5 minutos, cada 5 minutos hasta los 30 minutos y luego cada 10 minutos hasta la obtención de una tasa de infiltración constante.

1.9.2. Químicas

pH actual (pH): Se efectuó mediante la utilización de un electrodo de vidrio pre calibrado sobre una suspensión suelo: agua de 1:2.5 (Page, 1982)

Conductividad eléctrica (CE): Se determinó potenciométricamente sobre el extracto de saturación de las muestras de suelo (Rhoades, 1982).

Nitrógeno total (NT): Se realizó según el método de Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982).

Fósforo extractable (PE): Se determinó según la metodología propuesta por Bray & Kurtz (1945).

Carbono orgánico total (COT): Se evaluó utilizando el método de oxidación húmeda de Walkley & Black (Nelson & Sommers, 1982), se utilizó el factor 1,22 para convertir el carbono fácilmente oxidable a COT.

Stock de carbono (Stock C): Para cuantificar esta propiedad a cada profundidad, los valores de stock fueron corregidos para una masa de suelo equivalente (Lee *et al.*, 2009). Esto surgió como consecuencia de las diferencias de densidad aparente registradas entre los distintos tratamientos y la situación testigo, mostrando en general esta última el menor valor para dicha propiedad. De esta manera, la masa de suelo equivalente tomada como referencia para la serie Monterrico fue de 2190 Mg ha⁻¹ (0-20 cm) y 2780 Mg ha⁻¹ (20-40 cm), mientras que para la serie Perico esta fue de 2660 Mg ha⁻¹ (0-20 cm) y 2620 Mg ha⁻¹ (20-40 cm).

Cationes intercambiables: Para la extracción de bases: calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na), se utilizó el método del acetato de amonio (NH₄C₂H₃O₂) 1 N a pH 7.0 (Peech *et al.*, 1947). Luego la determinación de Ca y Mg se realizó por complexometría con EDTA, y de K y Na, por fotometría de llama.

Carbono orgánico particulado: Para su cálculo se siguió la metodología propuesta por Cambardella & Elliott (1992). No obstante y dada las características de los suelos analizados, se realizaron previamente ensayos de ajuste de la metodología en cuanto al tiempo de agitado de la muestra, llegando a la conclusión que 12 h a 40 rpm era el

tiempo adecuado. Como resultado de esta técnica se obtuvieron: el carbono orgánico particulado grueso (COPG), el carbono orgánico particulado fino (COPF) y el carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COA).

1.9.3. Biológicas

Previo al análisis del carbono de la biomasa microbiana y respiración basal, se procedió a homogenizar la humedad del suelo, llevando todos a 80 % de la capacidad de campo.

Carbono de la biomasa microbiana (CBM): Fue determinado por el método de fumigación – extracción propuesto por Vance *et al.* (1987). El mismo consistió en la utilización de cloroformo (biocida efectivo) que actúa sobre los lípidos de las membranas, lisando a las células, pero no solubiliza a la materia orgánica del suelo ni la hace más biodegradable. Los contenidos de las células lisadas fueron extraídos con solución salina de sulfato de potasio y posteriormente se determinó el C presente mediante oxidación con dicromato de potasio y ácido sulfúrico, el exeso de dicromato se titula con sal de mor.

Respiración basal (RB): Se incubó 20 gr de suelo fresco en condiciones óptimas de temperatura (25 ° C) y humedad (80%) durante 7 días según lo propuesto por Jenkinson & Powlson (1976). El CO₂ se recogió en trampas de álcali en exceso (NaOH 1 N), y el exceso se tituló a la fenolftaleína con ácido clorhídrico 0,5 N en presencia de cloruro de bario (1,5 N) (Frioni, 1999).

Cociente microbiano (CBM/COT): Se determinó mediante la relación del carbono de la biomasa microbiana y el carbono orgánico total. Este cociente da una medida de la dinámica de la materia orgánica y puede ser usado como indicador de pérdida o acumulación neta de C (Anderson & Domsch, 1989).

Cociente metabólico (qCO₂): Se calculó a partir de la combinación de las mediciones de respiración y biomasa microbiana. Este parámetro expresa la cantidad de CO₂ producida por unidad de biomasa y de tiempo (Anderson & Domsch, 1990).

1.10. Análisis estadísticos

Los resultados de las distintas variables analizadas, correspondientes a los diferentes tratamientos, fueron comparados de manera independiente en cada una de las series de suelos estudiadas y a cada profundidad de muestreo considerada (0-20 y 20-40 cm). Previamente se verificó si los resultados de las variables presentaban distribución normal, utilizando para ello el procedimiento de Shapiro Wilks modificado. Para aquellas variables que no cumplieron con el mencionado supuesto, se procedió a su transformación. En los casos que luego de ser transformados los resultados de las propiedades estos no presentaran igualmente distribución normal, la comparación de medias se realizó a través de un test no paramétrico (Kruskal & Wallis, 1952). Se utilizó el test de DGC para realizar las comparaciones de medias entre los distintos tratamientos. Para estudiar el grado de asociación entre las distintas propiedades se hicieron análisis de correlación (Di Rienzo *et al.*, 2002). Los datos fueron analizados mediante el programa estadístico INFOSTAT 1.1. (Infostat, 2017).

1.11. Método sistemático para la construcción de un índice de calidad de suelo

Para la construcción del índice de calidad de suelo, se aplicó el método sistemático propuesto por Romaniuk *et al.* (2011).

1.11.1. Selección de un Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI)

En primera instancia se realizó un análisis de varianza univariado (ANVA) para todas las propiedades analizadas, ya sean físicas, químicas y biológicas. Luego se efectuó una prueba de comparaciones múltiples (DGC), que es un procedimiento basado en conglomerados (Di Rienzo *et al.*, 2002) que se encuentra disponible en el software

estadístico INFOSTAT. Solamente aquellas variables con valor de $p < 0,05$ y $CV < 40$ % fueron retenidas para su posterior análisis (Wander & Bollero, 1999).

En una segunda instancia se efectuó un análisis multivariado de componentes principales, considerando sólo aquellas propiedades que fueron seleccionadas luego del ANVA. El análisis multivariado de componentes principales (ACP) construye nuevas variables no correlacionadas (CP), basándose en la matriz de correlación, permitiendo analizar la interdependencia de variables. Como resultado se obtienen los autovalores correspondientes a cada CP. Los mismos hacen referencia a la proporción de la variabilidad total explicada por cada componente y a la proporción de la variabilidad total explicada en forma acumulada. También se presentan los autovectores, que son los coeficientes con que cada variable original fue ponderada para conformar el CP. Permiten ver la incidencia que tiene cada variable en la definición de los ejes de los componentes principales. Muestran la correlación de las variables con los CP.

1.11.2. Selección final de los indicadores

Se consideraron sólo las componentes principales (CP) con autovalores mayores a 1 y que explicaran al menos el 10% de la variabilidad del modelo. Esto se debe a que al trabajar con los datos estandarizados, cada variable posee una varianza de 1, y la varianza total es igual al número de variables que entran en el análisis. Cuando una CP posee un valor mayor a 1, significa que explica mayor proporción de la variabilidad de los datos que las variables individuales (Bredja *et al.*, 2000).

Dentro de cada CP seleccionado, se retuvieron las variables que presentaron autovectores con valores absolutos dentro del 10 % del mayor valor.

Cuando más de una variable fue retenida dentro de una CP, se utilizó el coeficiente de correlación para determinar si las variables eran o no redundantes y entonces se eliminó una de ellas del CMI. Para ello se realizó el análisis de correlación

de Pearson y se procedió a realizar la suma de coeficientes de correlación de las variables consideradas. La variable que presentó un mayor valor derivado de la suma de los coeficientes fue seleccionada como la variable de mayor peso. Luego se evaluó la correlación entre las variables seleccionadas con las restantes. Si estas presentaron un coeficiente de correlación menor a 0,7 con la variable seleccionada, se consideró que no estaban correlacionadas y entonces cada una de ellas fue retenida dentro del CMI. Si por el contrario, el coeficiente de correlación fue mayor a 0.7, la variable fue eliminada.

1.11.3. Normalización de los indicadores

Para la normalización de los indicadores se utilizó el modelo lineal. Según este modelo las variables fueron normalizadas según se consideró que respondían al criterio de “cuanto mayor es mejor” (límite superior – LS), o si lo hacían respecto al criterio “cuanto menor es mejor” (límite inferior – LI). En el primer caso se dividió el valor más alto obtenido por la variable por el correspondiente a cada observación. En el segundo se dividió el valor de cada observación por el más bajo obtenido por esa variable. También se puede presentar el caso “óptimo”, como por ejemplo para el pH. Si el pH del suelo presentó un valor entre 6,5 y 7,5, se consideró que estaba dentro de un rango óptimo y se le otorgó un valor de 1. Si el valor del pH era menor a 6,5, se tomó el criterio de “cuanto mayor es mejor”. Si en cambio el valor de pH es mayor a 7,5, este se normalizó según el criterio de “cuanto menor es mejor”.

1.11.4. Integración de los indicadores dentro de un índice de calidad de suelos

a) Índice aditivo ponderado considerando todas las variables conjuntamente

Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$ICS = \sum_{i=0}^n W_i S_i$$

Donde:

ICS = índice de calidad de suelo

Wi = factor de ponderación derivado del ACP

Si = valor normalizado de los indicadores

i= indicador seleccionado

n=número de indicadores seleccionados

- b) Índice aditivo ponderado considerando a las variables físicas (F), químicas (Q) o biológicas (B) de manera separada.

Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$ICS: (\sum WF SF) + (\sum WQSQ) + (\sum WB SB)$$

Donde:

ICS = índice de calidad de suelo

W = factor de ponderación derivado del ACP

S = valor normalizado de los indicadores

Los indicadores físicos (F), químicos (Q) y biológicos (B) que forman parte del índice fueron ponderados utilizando los resultados derivados del ACP. Para ello el porcentaje de la variación de los datos explicados por cada CP fue dividido por el porcentaje total de variación explicado por todas las CP seleccionadas.

Para comparar la sensibilidad de los índices de calidad de suelos obtenidos, se calcularon los valores para cada situación de manejo de suelo estudiada dentro de cada serie de suelo. Con estos resultados se realizó un análisis de varianza y prueba de comparaciones múltiples (DGC), con un nivel de significancia de $p < 0,05$.

RESPUESTA DE DISTINTAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS y BIOLÓGICAS ANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE DIFERENTES ROTACIONES EN EL CULTIVO DE TABACO

2.1. HIPÓTESIS

1. El carbono orgánico particulado y el de la biomasa microbiana, junto con la estabilidad de la estructura, son propiedades edáficas que responden favorablemente a la mayor diversidad o intensificación en la secuencia de cultivos, plasmada en los tratamientos con incorporación de gramíneas (TG) o de abonos verdes (TV) en la rotación.
2. El tratamiento con mayor número de especies por año (TV), presenta los resultados mas favorables en las propiedades analizadas, debido a su mayor aporte de materia seca al suelo.
3. Los parámetros edáficos seleccionados para la elaboración del índice de calidad de suelo, son dependientes del suelo considerado.

2.2. OBJETIVOS

- Comparar en dos suelos característicos correspondientes al Valle los Pericos (Valles Templados, Provincia de Jujuy) y a dos profundidades (0 a 20 cm y 20 a 40 cm), los resultados de distintos parámetros físicos, químicos y biológicos edáficos ante la implementación de diferentes sistemas de manejo del cultivo de tabaco bajo labranza convencional y riego (monocultivo, rotación con gramíneas, incorporación de abonos verdes), contrastando a su vez los mismos con los obtenidos por una situación testigo sin disturbar.

- Estudiar de que manera las distintas prácticas de manejo mencionadas, inciden sobre el comportamiento de las propiedades edáficas analizadas.
- Seleccionar para cada uno de los suelos y profundidades consideradas, aquellos indicadores que presenten una respuesta significativa a los distintos sistemas de uso de la tierra evaluados, para luego ser utilizados en la elaboración de un índice de calidad en cada serie de suelos estudiada.
- Verificar si las dos series de suelo respondieron de igual manera al efecto de los distintos tratamientos sobre las propiedades evaluadas, y en la selección de indicadores de calidad de suelos.

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1. SERIE PERICO

2.3.1.1. Distribución estadística en los resultados para las variables analizadas

A partir de la prueba de normalidad de Shapiro Wilks modificada (Tabla 2.1), se determinó la necesidad de transformar los valores del carbono orgánico particulado total, carbono orgánico particulado de la fracción gruesa y de la fracción fina de los primeros centímetros de suelo (0-20 cm), afectando a los mismos por la raíz cuadrada.

Tabla 2.1. Análisis de normalidad de los resultados de las variables químicas, físicas y biológicas para las profundidades de: 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2)

Variables Químicas	Valor p		Variables Físicas	Valor p		Variables Biológicas	Valor p	
	1	2		1	2		1	2
COPT	0,003	0,579	DMP_p	0,786	0,371	CBM	0,684	0,189
COA	0,413	0,782	DMP_r	0,867	0,065	RB	0,505	0,501
COPG	0,006	0,454	DMP_m	0,525	0,426	qCO₂	0,968	0,527
COPF	0,043	0,438	DMP_l	0,959	0,774	CBM/COT	0,863	0,486
COT	0,079	0,722	Da	0,192	0,921			
Stock C	0,087	0,754	RP	0,318	0,053			
pH	0,083	0,681	Vinf	0,060				
CE	0,792	0,131						
Ca	0,749	0,497						
Mg	0,241	0,922						
Na	0,999	0,708						
K	0,425	0,325						
NT	0,168	0,408						
PE	0,551	0,799						

COPT: carbono orgánico particulado total, COA: carbono orgánico asociado, COPG: carbono orgánico particulado grueso, COPF: carbono orgánico particulado fino, COT: carbono orgánico total, CE: conductividad eléctrica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, K: potasio, NT: nitrógeno total, PE: fósforo extractable, DMP_p: diámetro medio ponderado promedio, DMP_r: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento rápido, DMP_m: diámetro medio ponderado correspondiente a la disgregación mecánica, DMP_l: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento lento, Da: densidad aparente, RP: resistencia a la penetración, Vinf: velocidad de infiltración superficial, CBM: carbono de la biomasa microbiana, RM: respiración basal, CBM/COT: coeficiente microbiano, qCO₂: coeficiente metabólico.

En la Tabla 3 del anexo se detallan los coeficientes de correlación entre los distintos tamaños de partícula (arena, limo y arcilla) y los resultados de las variables físicas, químicas y biológicas, donde se puede observar que no hubo un condicionamiento de los cambios texturales sobre la mayoría de las mismas.

2.3.1.2. Propiedades físicas

Las propiedades físicas resultaron afectadas por el diferente uso de la tierra, con la excepción de la densidad aparente superficial y la resistencia a la penetración correspondiente a ambas profundidades (Tabla 2.2). A su vez, salvo la RP de ambos

estratos y el DMP_m superficial, las restantes variables físicas obtuvieron un coeficiente de variación inferior al 40%.

Tabla 2.2. Análisis de varianza de las propiedades físicas para las profundidades de 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2). Se presentan el grado de ajuste (R²), coeficiente de variación (CV) y valor de probabilidad (p).

Variables Profundidad	R ²		CV (%)		Valor p	
	1	2	1	2	1	2
DMP _p	0,93	0,76	15,25	22,78	0,001	0,008
DMP _r	0,98	0,89	15,83	36,30	<0,001	<0,001
DMP _m	0,66	0,67	41,23	37,58	0,029	0,025
DMP _l	0,85	0,62	16,45	17,37	0,001	0,045
Da	0,51	0,76	2,93	3,67	0,108	0,007
Vinf	0,98	-	16,93	-	<0,001	-
RP	0,21	0,41	57,37	43,14	0,582	0,2167

DMP_p: diámetro medio ponderado promedio, DMP_r: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento rápido, DMP_m: diámetro medio ponderado correspondiente a la disgregación mecánica, DMP_l: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento lento, Da: densidad aparente, Vinf: velocidad de infiltración, RP: resistencia a la penetración.

La resistencia a la penetración de ambos estratos no estuvo condicionada por las diferencias en textura de los suelos, aunque si por su diferente contenido de humedad (Tabla 2.3). Esta propiedad está fuertemente influenciada por el tenor de humedad edáfica, mostrando generalmente un incremento exponencial con el desecamiento del suelo (Vaz *et al.*, 2011; Moraes *et al.*, 2012; Mome Filho *et al.*, 2014), lo cual limita su comparación entre tratamientos cuando los suelos presentan desigual grado de humectación. Para evitar dichos inconvenientes, se ha propuesto corregir los valores de resistencia a la penetración por humedad (Busscher *et al.*, 1997; Vaz *et al.*, 2011), estimando los mismos para un contenido hídrico similar. Algunos autores han mencionado que es conveniente que dichas correcciones se establezcan para una humedad edáfica igual a capacidad de campo (Lowery & Morrison, 2002; Vaz *et al.*, 2011), mientras que otros han afirmado que cuanto mas húmedo se encuentra el suelo existe menor sensibilidad para detectar diferencias en el grado de compactación de los suelos (Bolenius *et al.*, 2018; Catania *et al.*, 2018).

En el presente trabajo y pese a que las determinaciones de RP a campo se realizaron para un rango de humedad edáfica relativamente estrecho (4 % al 13 %), se observó un coeficiente de correlación significativo entre RP 1 y RP 2 con el contenido hídrico de los suelos (Tabla 2.3). Dada esta vinculación, los valores de RP 1 y RP 2 se corrigieron para un mismo contenido de humedad (4%) (Busscher *et al.*, 1997; Moraes *et al.*, 2012). Una vez corregidos, los resultados de esta propiedad en el estrato superficial oscilaron entre 2,1 MPa y 4,5 MPa, mientras que en el más profundo estuvieron entre 3,5 MPa y 5,7 MPa, no existiendo en ambos casos diferencias estadísticas significativas entre los distintos tratamientos analizados.

Tabla 2.3. Coeficientes de correlación entre la resistencia a la penetración obtenida para ambos estratos con otras propiedades edáficas.

Propiedades	RP1	RP 2
Arcilla	-0,14ns	0,07ns
Limo	-0,01ns	0,22ns
Arena	0,07ns	-0,15ns
Humedad edáfica	-0,76**	-0,71**

RP: resistencia a la penetración, 1: profundidad de 0 a 20 cm,
2: profundidad de 20 a 40 cm.

La compactación del suelo limita el desarrollo de las raíces (Bengough *et al.*, 2011; Lipiec *et al.*, 2012; Szatanik-Kloc *et al.*, 2018) debido al aumento de su densidad aparente y de la resistencia a la penetración, además de disminuir el flujo de agua y de aire dentro del suelo (Hamza & Anderson, 2005), lo que resulta en una limitación en el intercambio de gases y en la absorción de agua y nutrientes por parte de las raíces. De acuerdo con lo mencionado por distintos autores (Graecen, 1986; Bengough, 1991; Atwell, 1993; Bengough *et al.*, 2006; Silva & Fernandes, 2014; Da Silva *et al.*, 2015), valores de esta propiedad superiores a los 2 MPa son limitantes para el normal crecimiento de las raíces. Sin embargo, no hay un consenso generalizado sobre este valor umbral, debido a las diferentes respuestas de los distintos cultivos, a los cambios en las condiciones experimentales en que se realizan los ensayos, al diferente efecto

sobre esta propiedad de los distintos manejos del suelo y a la presencia de huecos (fisuras, canales, etc.) que normalmente son encontrados en el suelo, sobretodo en los sistemas de agricultura conservacionista (Tormena *et al.*, 2007; Portugal *et al.*, 2010; Calonego *et al.*, 2017; Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

A nivel superficial (0-20 cm), la RP medida a campo (sin corregir por humedad) presentó resultados medios entre 1,0 y 1,9 MPa para T y TM respectivamente, siendo el contenido de humedad edáfica al momento de realizar la medición del 8 % en TM y del 9 % en T (Tabla 5 del anexo). De acuerdo a lo mencionado precedentemente, dichos valores no afectarían sensiblemente el crecimiento de las raíces del cultivo de tabaco. A mayor profundidad, salvo en la situación tomada como testigo, los tratamientos agrícolas presentaron valores promedio superiores a 2 MPa (entre 2,9 MPa y 3,1 MPa) con contenidos hídricos del suelo similares a los determinados en superficie. Esta mayor densificación subsuperficial obedecería a la formación de un piso de rastra, como consecuencia de las labores efectuadas para la implantación del cultivo de tabaco. Es normal que en los sistemas productivos bajo labranza convencional, inmediatamente por debajo de la profundidad de la labor, se desarrolle un proceso de compactación del suelo, aumentando su densidad aparente debido a la presión que ejercen las herramientas y también como consecuencia de la pulverización del suelo provocada por el paso de las mismas (Yang & Wander, 1999; Dolan *et al.*, 2006). Sin embargo y a pesar de estas acciones, en ninguno de los dos estratos de suelo analizado se comprobaron diferencias en esta propiedad entre los suelos agrícolas y los no labrados.

Alvarez *et al.* (2009) tampoco encontraron diferencias en la RP entre un suelo no disturbado del norte de la región Pampeana y el mismo suelo bajo labranza convencional, atribuyendo esta falta de diferencias al entremado de raíces presentes en los estratos superficiales del suelo en los sitios inalterados, como consecuencia de la

presencia de especies permanentes. Sin embargo, Fernandez (2018) trabajando en la región semiárida Pampeana, determinó diferencias en la RP al comparar resultados de suelos agrícolas bajo labranza con otros similares bajo vegetación natural. Por su parte, Kraemer (2015) al analizar la RP de distintos suelos de la pradera Pampeana bajo siembra directa y en su estado prístino, determinaron diferencias en esta propiedad que dependieron de la profundidad y del suelo considerado. En este sentido, los resultados de RP determinados en un Vertisol no fueron diferentes a ninguna profundidad entre los suelos bajo agricultura y aquellos en su condición natural, mientras que los hallados en dos Argiudoles mostraron en los primeros centímetros de suelo mayor RP en la situación prístina, igualándose los mismos o revirtiéndose dicho comportamiento con la profundidad.

Debido a la alta variabilidad encontrada en esta propiedad y a su falta de eficacia para separar el efecto de los distintos tratamientos, la RP no fue seleccionada para la confección del índice de calidad del suelo.

En la Tabla 2.4 se detallan los valores medios de las variables físicas que presentaron diferencias estadísticas, comprobando que estas solo se dieron entre la situación testigo y el resto de las formas de manejo del cultivo de tabaco, no existiendo sobre las mismas ningún efecto significativo de la diferente alternancia de cultivos.

Tabla 2.4. Valores promedio y desvío estándar para aquellas variables físicas que presentaron diferencias significativas en la serie Perico.

Tratamientos Variables	T	TM	TV	TG
DMP_p1(mm)	2,26 ± 0,23 b	1,14 ± 0,26 a	0,83 ± 0,10 a	0,93 ± 0,16 a
DMP_p2(mm)	2,32 ± 0,28 b	1,51 ± 0,55 a	1,10 ± 0,29 a	1,11 ± 0,11 a
DMP_r 1(mm)	1,44 ± 0,16 b	0,32 ± 0,03 a	0,21 ± 0,02 a	0,31 ± 0,08 a
DMP_r 2(mm)	1,25 ± 0,37 b	0,27 ± 0,05 a	0,24 ± 0,03 a	0,30 ± 0,06 a
DMP_m1(mm)	1,89 ± 0,68 b	0,91 ± 0,51 a	0,68 ± 0,10 a	0,72 ± 0,13 a
DMP_m2(mm)	2,58 ± 0,20 b	1,70 ± 0,98 a	0,82 ± 0,37 a	1,09 ± 0,47 a
DMP_l1(mm)	3,45 ± 0,27 b	2,19 ± 0,25 a	1,60 ± 0,25 a	1,76 ± 0,59 a
DMP_l 2(mm)	3,14 ± 0,27 b	2,57 ± 0,62 a	2,26 ± 0,48 a	1,93 ± 0,20 a
Da2(Mg m⁻³)	1,39 ± 0,09 a	1,61 ± 0,03 b	1,55 ± 0,06 b	1,56 ± 0,04 b
Vinf (cm h⁻¹)	3,73 ± 0,32 b	0,70 ± 0,32 a	0,87 ± 0,13 a	0,37 ± 0,11 a

DMP_p: diámetro medio ponderado promedio, DMP_r: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento rápido, DMP_m: diámetro medio ponderado correspondiente a la disgregación mecánica, DMP_l: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento lento, Da: densidad aparente, Vinf.: velocidad de infiltración superficial. 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm. T: situación testigo, TM: monocultivo de tabaco, TV: cultivo de tabaco con incorporación de verdeos, TG: cultivo de tabaco en rotación con gramíneas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Test DGC (p<0,05).

Como ya se viera en la Tabla 2.2, la densidad aparente superficial no mostró diferencias entre los suelos agrícolas ni entre estos con los de la situación testigo. En diversos trabajos y bajo distintas situaciones, se ha visto en general menores valores para esta propiedad en los suelos inalterados respecto a aquellos bajo agricultura, ya sea que estos últimos se encuentren bajo labranza convencional o en siembra directa (Álvarez *et al.*, 2009; Kraemer, 2015; Zilio, 2015; Fernández, 2018). En el presente estudio, la falta de diferencias en la Da del estrato superficial entre los suelos no disturbados con los cultivados, se debería a que esta propiedad se determinó en forma posterior al aporque realizado en el cultivo de tabaco, remoción del suelo que provoca un aumento en la porosidad y una disminución de la densidad aparente, comportamiento que con el tiempo tiende a revertirse con la consolidación del suelo.

En el estrato subsuperficial (20-40 cm) de la situación de referencia (T), la Da fue en promedio un 16 % inferior a la determinada en los suelos disturbados, mientras que la variación entre estos no fue mayor al 4%. Esta diferente respuesta en este estrato

respecto al superficial, sería como consecuencia del proceso de compactación y reordenamiento de partículas sufrido a esta profundidad por el accionar de las herramientas de labor ya mencionado previamente (Bravo & Andreu, 2011), lo que determinó diferencias de D_a entre el suelo inalterado y aquellos bajo agricultura.

Zuber *et al.* (2015) trabajando en suelos franco limosos de Estados Unidos bajo labranza convencional, encontraron luego de 15 años de ensayo diferencias en la densidad aparente superficial (0-10 cm), en función de las diferentes rotaciones analizadas. En dicho trabajo se determinó una mayor D_a en el monocultivo de soja respecto a otras rotaciones que contemplaban una mayor proporción de maíz, comportamiento que no se reprodujo a mayor profundidad. Similares resultados encontraron Varvel & Wilhelm (2011) en suelos labrados con cincel, aunque estos investigadores no pudieron determinar el efecto de las diferentes sucesiones de cultivo sobre esta propiedad al analizar lo sucedido bajo siembra directa. Hulugalle *et al.* (2007) reportaron que la compactación del suelo se incrementaba en Vertisoles bajo el monocultivo de algodón, la que disminuía con el doble cultivo trigo/algodón. Por su parte Blanco-Canqui & Lal (2007), observaron en un suelo limoso de Estados Unidos, que la incorporación de material vegetal en 10 años consecutivos producía una disminución en la densidad aparente de los primeros 10 cm de suelo, logrando descensos de un 58 % y un 19 % en los tratamientos con mayor y menor cantidad de rastrojos aportados, respectivamente, respecto a la situación sin agregado de rastrojos. En el presente trabajo, y a pesar de que hubo diferencias entre tratamientos en la cantidad de material vegetal aportado al suelo como consecuencia de la distinta rotación de cultivos, esta singularidad no tuvo efecto en la D_a del suelo.

Zimmerman & Kardos (1961) y Griffith *et al.* (1986), propusieron valores de densidad aparente limitantes para el desarrollo de las raíces de 1,75 a 1,80 Mg m⁻³ para

suelos con textura arenosa y de 1,40 a 1,50 Mg m^{-3} en el caso de un mayor contenido de arcilla. A su vez, Reynolds *et al.* (2009) mencionaron para esta propiedad valores óptimos de 0,9 Mg m^{-3} y 1,2 Mg m^{-3} , mientras que cuando estos están por encima de 1,25 Mg m^{-3} a 1,30 Mg m^{-3} podrían ocurrir pérdidas en el rendimiento de los cultivos debido a la falta de aireación. Por su parte, en la región Pampeana se determinaron valores críticos de D_a de 1,37 Mg m^{-3} y 1,44 Mg m^{-3} para Vertisoles y Molisoles, respectivamente, por encima de los cuales se observaron reducciones en el desarrollo radicular del cultivo de trigo (Wilson *et al.*, 2013). Uno de los principales factores a tener en cuenta para definir valores favorables o limitantes de densidad aparente es la textura edáfica (Kaufman *et al.*, 2010), variando los mismos entre los distintos tipos de suelo. Kaufman *et al.* (2010) tomando en cuenta experiencias desarrolladas por distintos investigadores, propusieron una serie de ecuaciones para determinar los valores óptimos y limitantes de densidad aparente para el crecimiento de las raíces, las que consideran únicamente el contenido de limo y arcilla de los suelos. Según las mismas y teniendo en cuenta la distribución de partículas de la serie Perico en ambas profundidades analizadas y en los distintos tratamientos (Tabla 1.7), los valores óptimos de esta propiedad se ubicarían en un rango de 1,37 Mg m^{-3} a 1,43 Mg m^{-3} , mientras que los limitantes serían de 1,62 Mg m^{-3} a 1,70 Mg m^{-3} . De acuerdo con estos comentarios y teniendo en cuenta que en el estrato superficial la D_a osciló entre 1,36 Mg m^{-3} y 1,45 Mg m^{-3} , esta propiedad se ubicaría dentro de los valores óptimos propuestos por Kaufman *et al.* (2010), independientemente del uso de la tierra analizado. A mayor profundidad, los resultados de D_a con la excepción de T que presentó valores óptimos (Tabla 2.4), se encontraron en un rango entre óptimo y limitante (Kaufman *et al.*, 2010), aunque los correspondientes a TM estarían cerca del límite como para ser considerados restrictivos para el desarrollo normal de las raíces.

La velocidad de infiltración de los suelos varió significativamente entre aquellos cultivados y sin cultivar, reportando valores cinco veces superiores en estos últimos. A su vez, los resultados de la tasa de infiltración básica de los tratamientos agrícolas se ubicaron por debajo del umbral mínimo de conductividad hidráulica saturada ($1,8 \text{ cm h}^{-1}$) propuesto por Reynolds *et al.* (2009), mientras que en los suelos sin disturbio V_{inf} estuvo por encima del mencionado umbral.

Las diferencias en infiltración entre suelos cultivados y sin disturbio son proporcionadas por tener estos últimos un balance adecuado entre macro y microporos. A su vez, los poros son más estables en los suelos no disturbados respecto a los cultivados, debido a la presencia de un mayor contenido de materia orgánica (Tabla 2.8) y a la falta de disturbio mecánico (Lal & Vandoren, 1990). Kraemer (2015) trabajando con distintos suelos de la región pampeana bajo siembra directa, también pudo comprobar una mayor tasa de infiltración básica en los suelos no cultivados respecto a los que se encontraban bajo agricultura, independientemente de si estos eran Vertisoles o Molisoles. Karlín *et al.* (2019) determinaron en Molisoles de Córdoba, una infiltración básica entre tres a diez veces mayor bajo bosque nativo respecto a otros suelos similares que presentaban historia agrícola.

La capacidad de infiltración está principalmente regulada por la vegetación viva o muerta presente y por las propiedades físicas de los suelos (Fischer *et al.*, 2014; Leung *et al.*, 2015). El cambio en el uso de la tierra de monte nativo a pastura o agricultura, provoca modificaciones en las propiedades del suelo, causando pérdidas de materia orgánica e incrementos en la densidad aparente (Lepsch *et al.*, 2010), con consecuencias negativas sobre la tasa de infiltración (Mwendera & Saleem, 2010). Por su parte, la rotura de los macroagregados por acción de la lluvia en los suelos descubiertos, ha sido identificada como una de las razones que genera el taponamiento de los poros por

partículas y microagregados, formando sellos superficiales (Le Bissonnais, 1996; Lal & Shukla, 2004). Contrariamente, la presencia de residuos sobre el suelo previene dicha rotura y el humedecimiento rápido de los agregados, disminuyendo la posibilidad de que se formen densificaciones superficiales que impidan el ingreso de agua. En este sentido, De la Vega *et al.* (2004) determinaron en Argiudoles del norte de la Pcia. de Bs.As. bajo siembra directa, que la tasa de infiltración básica determinada con simulador de lluvia era menor en aquellas situaciones con suelo descubierto respecto a los cubiertos. Govaerts *et al.* (2009) observaron una mayor tasa de infiltración en suelos cubiertos de México bajo siembra directa, respecto a otros similares con labranza convencional, mientras que estos últimos superaban en dicha propiedad a aquellos en siembra directa pero sin cobertura.

La labranza convencional para la implantación del cultivo de tabaco deja al suelo descubierto una parte del año, recibiendo durante dicho período el impacto directo de la gota de lluvia. A dicho efecto disruptivo se suma la acción del riego, que provoca el humedecimiento rápido de los agregados, y la acción de las sucesivas labores que pulverizan el suelo favoreciendo la mineralización de la materia orgánica. Estas acciones promueven la formación de sellos superficiales, la rotura en la continuidad de los macroporos y la formación de densificaciones subsuperficiales, contribuyendo todos estos factores a una disminución de la tasa de infiltración del suelo y eliminando las posibles diferencias que se hayan podido generar entre los distintos tratamientos agrícolas analizados.

Según el criterio de clasificación de la estabilidad estructural presentado por Le Bissonnais (1996), las categorías obtenidas (Tabla 2.5) de acuerdo a los resultados del DMP_p (Tabla 2.4), variaron entre medianamente estables y muy estables, obteniendo esta última clase solo la situación testigo.

Tabla 2.5. Clases de estabilidad estructural de acuerdo a los resultados del DMPp (Le Bissonnais, 1996), para los distintos tratamientos y profundidades evaluadas.

Profundidad Tratamiento	Superficial	Subsuperficial
T	Muy estable	Muy estable
TM	Medianamente estable	Estable
TV	Medianamente estable	Medianamente estable
TG	Medianamente estable	Medianamente estable

T: situación testigo, TM: monocultivo de tabaco, TV: incorporación de verdeos dentro del cultivo de tabaco, TG: cultivo de tabaco en rotación con gramíneas.

Como se observa en la Tabla 2.5, esta clasificación no fue adecuada para separar el efecto del monocultivo de tabaco sobre la estructura del suelo, en relación a lo observado en los restantes tratamientos con mayor diversificación de cultivos.

La pérdida de DMP_p para TM respecto a la situación inalterada fue del 50 % y 65 % para el estrato superficial y más profundo, respectivamente, mientras que para los otros dos tratamientos esta fue algo menor (entre el 37 % y 48 %). Arzeno *et al.* (2017) mencionaron que mermas mayores al 40 % resultan muy altas para la región bajo estudio, resaltando que se han encontrado en suelos de Salta caídas en esta propiedad de hasta el 74 %, debido según dichos autores a las excesivas labores realizadas en el cultivo de tabaco. Es posible también que la falta de cobertura del suelo en una parte del año como consecuencia de la labranza convencional, haya también influido sobre estos resultados. En este sentido, Goaverts *et al.* (2007) relacionaron la pérdida de estabilidad de agregados en suelos de México con la cantidad de rastrojos dejados en superficie. Dichos autores encontraron que al disminuir la cobertura del suelo, los resultados de esta propiedad eran menos favorables.

Valores de estabilidad estructural similares a los del presente trabajo fueron encontrados en Argentina para tres órdenes de suelo diferentes (Molisoles, Vertisoles y Alfisoles), con un rango de DMP que osciló entre 2,77 y 0,92 mm (Gabioud *et al.*,

2011). Taboada-Castro *et al.* (2011) determinaron en suelos bajo agricultura con similar textura a los estudiados en esta tesis, valores de DMP_p entre 0,89 y 1,70 mm.

Los diferentes cultivos afectan la agregación del suelo también a partir del distinto efecto que ejercen sus raíces, ya que estas son importantes agentes de agregación a la escala de macroagregados (Six *et al.*, 2004). Lichter *et al.* (2008) encontraron mayor tamaño de macroagregados bajo el cultivo de trigo que después de un maíz, relacionando dichos resultados con la mayor densidad por unidad de superficie del entramado de raíces correspondiente al primer cultivo mencionado. La formación de agregados ha sido vinculada también con las funciones desarrolladas por la comunidad microbiana, como la producción de enzimas extracelulares y de aquellas sustancias que influyen en la formación y estabilización de los agregados (Tiemann & Grandy, 2015). En este sentido, Tieman *et al.* (2015) observaron que al incrementar la diversidad de especies en la rotación de cultivos, se producían cambios en la estructura y actividad de la comunidad microbiana, con efectos positivos sobre la formación de agregados.

Zuber *et al.* (2015) trabajando en suelos franco limosos de Estados Unidos bajo labranza convencional, encontraron luego de 15 años de ensayo que las diferentes rotaciones afectaban la estabilidad estructural superficial, siendo el monocultivo de soja el que peores resultados aportaba para esta propiedad, mientras que a mayor profundidad dichos autores no encontraron efectos de la rotación sobre el estado de agregación del suelo. Navarro Padilla (2017) al trabajar sobre un Argiudol de la Pampa Ondulada bajo siembra directa, detectó mejoras significativas en la estabilidad estructural con solo un año de incorporar distintos cultivos de cobertura en una rotación con solo cultivos de verano. Kraemer (2015) y Novelli (2013) también determinaron aumentos en la estabilidad estructural de distintos suelos de la región Pampeana bajo siembra directa, al aumentar la intensificación y diversidad en la secuencia de cultivos.

Entre los pretratamientos para determinar la estabilidad estructural, el humedecimiento rápido fue el que produjo la mayor ruptura de agregados, generando en todos los casos los menores valores de DMP. Por su parte, el humedecimiento lento fue el menos agresivo, proporcionando los resultados más elevados para este parámetro, siendo intermedios los correspondientes a la disgregación mecánica. Al analizar la estabilidad estructural de diez suelos de California (EE.UU.) y nueve de China, Amézketa *et al.* (1996) y Zhang & Horn (2001), respectivamente, obtuvieron un igual ordenamiento en los resultados del DMP entre los distintos pretratamientos que el obtenido en el presente trabajo. Sin embargo, Novelli (2013) y Kraemer (2015) encontraron en diferentes suelos bajo siembra directa correspondientes a la región Pampeana, que el humedecimiento lento generaba mayor ruptura de agregados que la disgregación mecánica.

Por lo mencionado, el estallido debido al efecto de la compresión del aire entrampado dentro del agregado en los suelos bajo estudio, mostró ser el principal mecanismo de pérdida de estabilidad estructural. El efecto que produce el humedecimiento rápido es comparable al generado por una tormenta de alta intensidad o debido al riego por inundación (Amezketta, 1999), mientras que el correspondiente al humedecimiento lento sería más parecido al producido por una lluvia suave. Estos comentarios cobran relevancia, en la medida que el sistema de riego utilizado en esta región, al generar un rápido humedecimiento del suelo, contribuiría a una rápida y frecuente rotura de los agregados del suelo superficial.

El pretratamiento por humedecimiento lento ha mostrado ser útil para comparar los efectos de distintos tratamientos en suelos con baja estabilidad estructural (Ojeda *et al.*, 2008), mientras que en aquellos que presentan altos contenidos de materia orgánica resultó ser más efectivo el pretratamiento por humedecimiento rápido (Le Bissonnais,

1996). No obstante estas diferencias generadas por los distintos procedimientos del método de Le Bissonnais (1996), ninguno de ellos tuvo la capacidad de detectar posibles cambios en la estabilidad de agregados entre las distintas formas de manejo del cultivo de tabaco. Este comportamiento se debería a que tanto la cantidad de labranzas efectuadas para su implantación, que pulverizan el suelo al mismo tiempo que incrementan la mineralización de la materia orgánica, como el estallido de agregados provocado por el riego y el efecto del impacto de la gota de lluvia durante el período en que el suelo permanece descubierto, serían más determinantes en la degradación de la estructura, respecto al posible efecto positivo generado por la diversificación e intensificación en la secuencia de cultivos.

2.3.1.3. Propiedades químicas

En la Tabla 2.6 se observa que en superficie (0-20 cm), todas las propiedades químicas, salvo el Ca, Mg y K, fueron sensibles a los cambios en el uso de la tierra. A mayor profundidad (20-40 cm), con la excepción del COPT, COPF, COPG, Na y K, las restantes variables también respondieron significativamente a dichas modificaciones. A su vez, todas las propiedades químicas presentaron coeficientes de variación inferiores al 40%.

Los cationes enunciados presentaron valores normales para el requerimiento del cultivo de tabaco, lo que será analizado en detalle más adelante. La falta de diferencias entre tratamientos en el estrato más profundo para el COPT y las fracciones gruesa y fina del carbono orgánico particulado (COPG y COPF), muestra que el efecto de la incorporación de estas tierras a la agricultura, se manifestó para estas propiedades fundamentalmente en el estrato superficial.

Tabla 2.6. Análisis de varianza de las propiedades químicas para las profundidades de 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2). Se presentan el grado de ajuste (R²), coeficiente de variación (CV) y valor de probabilidad (p).

Variables Profundidad	R²		CV		Valor p	
	1	2	1	2	1	2
pH	0,96	0,98	1,27	0,65	<0,001	<0,001
CE	0,86	0,82	11,86	15,01	<0,001	0,002
NT	0,95	0,67	12,13	14,45	<0,001	0,024
COT	0,98	0,76	10,46	14,03	<0,001	0,007
COPT	0,96	0,24	13,39	21,32	<0,001	0,502
COPG	0,97	0,40	12,83	23,47	<0,001	0,233
COPF	0,90	0,30	18,31	21,30	<0,001	0,392
COA	0,85	0,79	15,90	16,25	0,001	0,005
Stock C	0,98	0,76	10,42	14,08	<0,0001	0,007
Ca	0,40	0,64	16,08	8,88	0,233	0,035
Mg	0,50	0,79	18,08	9,69	0,122	0,004
Na	0,63	0,52	25,24	25,55	0,041	0,099
K	0,45	0,14	28,47	32,64	0,164	0,743
PE	0,70	0,81	35,33	32,39	0,018	0,003

CE: conductividad eléctrica, NT: nitrógeno total, PE: fósforo extractable, COT: carbono orgánico total, COPT: carbono orgánico particulado total, COPG: carbono orgánico particulado grueso, COPF: carbono orgánico particulado fino, COA: carbono orgánico asociado, Stock C: stock de carbono, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, K: potasio.

De manera diferente a lo observado con las propiedades físicas, algunas variables químicas mostraron un efecto significativo de la rotación con gramíneas y/o de la incorporación de verdeos respecto al monocultivo de tabaco (Tabla 2.7), siendo este comportamiento observado en el estrato superficial por el COT, Stock C, COA y Na, mientras que en el más profundo por el pH, CE, NT, COT, Stock C, COA, Ca, Mg y PE. En las restantes propiedades químicas: pH1, CE1, NT1, COPT1, COPG1 y COPF1 solo T reportó mejores resultados respecto al resto, mientras que para PE1 los suelos bajo agricultura fueron los que presentaron los mayores valores.

Tabla 2.7. Valores promedio y desvío estándar para aquellas variables químicas que presentaron diferencias significativas entre tratamientos en la serie Perico.

Tratamientos Variables	T	TM	TV	TG
pH 1	7,10 ± 0,05 b	6,35 ± 0,10 a	6,30 ± 0,07 a	6,38 ± 0,10 a
pH 2	7,18 ± 0,03 c	6,57 ± 0,07 a	6,56 ± 0,02 a	6,72 ± 0,04 b
CE 1 (dSm ⁻¹)	0,53 ± 0,07 a	0,99 ± 0,06 b	1,21 ± 0,10 b	1,05 ± 0,18 b
CE 2 (dSm ⁻¹)	0,30 ± 0,07 a	0,62 ± 0,06 b	0,50 ± 0,06 b	0,39 ± 0,09 a
NT 1 (%)	0,23 ± 0,02 b	0,08 ± 0,02 a	0,11 ± 0,01 a	0,11 ± 0,01 a
NT 2 (%)	0,12 ± 0,01 b	0,08 ± 0,02 a	0,11 ± 0,01 b	0,08 ± 0,02 a
COT 1 (%)	3,11 ± 0,23 c	0,82 ± 0,21 a	1,11 ± 0,06 b	1,21 ± 0,08 b
COT 2 (%)	1,25 ± 0,06 b	0,77 ± 0,21 a	1,03 ± 0,02 b	0,80 ± 0,16 a
Stock C1 (Mg ha ⁻¹)	82,67 ± 6,04 c	21,81 ± 5,60 a	29,44 ± 1,70 b	32,25 ± 2,04 b
Stock C2 (Mg ha ⁻¹)	32,84 ± 1,57 b	20,05 ± 5,59 a	27,10 ± 0,58 b	20,99 ± 4,06 a
COPT 1 (%)	1,62 ± 0,43 b	0,20 ± 0,04 a	0,18 ± 0,01 a	0,22 ± 0,00 a
COPG 1 (%)	1,27 ± 0,32 b	0,14 ± 0,02 a	0,13 ± 0,01 a	0,15 ± 0,01 a
COPF 1 (%)	0,35 ± 0,13 b	0,06 ± 0,02 a	0,05 ± 0,01 a	0,07 ± 0,01 a
COA 1 (%)	1,48 ± 0,24 c	0,62 ± 0,19 a	0,93 ± 0,06 b	0,99 ± 0,08 b
COA 2 (%)	1,06 ± 0,06 b	0,57 ± 0,21 a	0,88 ± 0,01 b	0,61 ± 0,13 a
Ca 2 (Cmol ⁺ kg ⁻¹)	10,57± 0,58 b	10,18 ± 0,24 b	11,30 ± 1,43 b	8,62 ± 0,90 a
Mg2 (Cmol ⁺ kg ⁻¹)	6,51 ± 0,40 c	5,12 ± 0,24 b	5,47 ± 0,9 b	4,2 ± 0,21a
Na 1 (Cmol ⁺ kg ⁻¹)	0,39 ± 0,07 a	0,44 ± 0,10 a	0,66 ± 0,19 b	0,34 ± 0,07 a
PE 1 (mg kg ⁻¹)	13 ± 2 a	54 ± 14,11 b	64,67 ± 16,56 b	44,33 ± 22,12 b
PE 2 (mg kg ⁻¹)	9 ± 1 a	61,33 ± 4,73 b	60,33 ± 21,08 b	29 ± 14,18 a

CE: conductividad eléctrica, NT: nitrógeno total, COT: carbono orgánico total, COPT: carbono orgánico particulado total, COPG: carbono orgánico particulado grueso, COPF: carbono orgánico particulado fino, COA: carbono orgánico asociado, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, K: potasio. PE: fósforo extractable. 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm. T: situación testigo, TM: monocultivo de tabaco, TV: cultivo de tabaco con incorporación de verdeos, TG: cultivo de tabaco en rotación con gramíneas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Test DGC (p<0,05).

El pH de los distintos sistemas de manejo de tabaco disminuyó en promedio un 11 % (0,76 unidades) en superficie y un 8 % (0,56 unidades) en profundidad, siendo en ambos casos esta propiedad superior en la situación testigo. No obstante, los valores en los suelos bajo cultivo no serían limitantes para el crecimiento vegetal (Husson *et al.*, 2018). Sainz Rozas *et al.* (2011) también determinaron para una vasta región de la Argentina que incluyó parte de las provincias de Bs.As., Santa Fé, Córdoba y Entre Ríos, valores de pH superficial (0-20 cm) en un rango similar al determinado en el presente trabajo para los suelos bajo agricultura. A su vez, Cantú *et al.* (2007) y Musso

et al. (2006) reportaron para la provincia de Córdoba, disminuciones del pH superficial en los suelos agrícolas respecto a los de situaciones inalteradas.

Los resultados de pH obtenidos en el presente trabajo obedecerían a la fertilización continua de los tratamientos agrícolas, práctica realizada durante más de 30 años. La aplicación frecuente de fertilizantes, principalmente los nitrogenados, disminuye el pH del suelo (Liebig *et al.*, 2002). Los fertilizantes amoniacales aumentan la acidez, especialmente en la zona del suelo cercana a su aplicación, a partir de la oxidación del NH_4^+ . Los H^+ liberados reemplazan en el complejo de intercambio a los cationes (principalmente Ca^{2+} y Mg^{2+}), los que a su vez pasan a la solución del suelo con posibilidad de lixiviarse (Ballari, 2005). En este sentido, Fabrizzi *et al.* (1998) para el sudeste de Buenos Aires, reportaron descensos de hasta 0,3 unidades de pH para aplicaciones anuales de 120 kg N ha^{-1} . También la extracción de bases por parte de los cultivos (principalmente Ca^{2+}), pudo haber contribuido a este proceso de disminución del pH en dichos tratamientos. Sainz Rozas *et al.* (2011) interpretaron que la baja del pH superficial encontrada en los suelos por estos autores determinada, se podía deber tanto al efecto de los fertilizantes como a la extracción de bases por parte de los cultivos. En el presente trabajo, solo la secuencia de cultivos que incorporó gramíneas presentó en profundidad un pH mayor ($p < 0,05$) respecto al de los restantes tratamientos agrícolas, siendo este a su vez menor ($p < 0,05$) al de la situación testigo.

La CE se incrementó significativamente con el uso agrícola del suelo. En relación a la situación sin disturbio, en promedio se registraron incrementos del 103 % y 67 % en el estrato superior e inferior, respectivamente. Este comportamiento es atribuible al sistema de riego superficial implementado en la producción del tabaco en la zona bajo estudio, cuyas aguas presentan una calidad promedio C_2S_1 según Richards (1954). Por lo tanto, si bien son aptas para el riego ya que presentan bajo contenido de

sodio, tienen una salinidad media que a lo largo de los años pudo generar una acumulación de dichos excesos, ocasionando un aumento en la CE. El impacto producido por el uso de fertilizantes también pudo haber colaborado en el desarrollo de este proceso. No obstante, los valores de esta propiedad fueron muy inferiores a 2 dSm, no resultando por lo tanto limitantes para el desarrollo de este cultivo.

Similares resultados a los del presente trabajo reportaron Pérez Brandan & Huidobro (2011), en sistemas de monocultivo de tabaco para suelos del Valle de Lerma (provincia de Salta). Arzeno *et al.* (2017) tampoco detectaron en la producción de tabaco correspondiente a los valles templados de Salta y Jujuy, problemas de degradación de las tierras asociados al uso del agua de riego local. De la misma manera que con el pH, en el estrato mas profundo del tratamiento TG se encontraron valores intermedios de CE respecto a los obtenidos por la condición sin disturbio y los tratamientos TM y TV.

En los suelos agrícolas se observó una reducción promedio del COT y NT superficiales, en relación al suelo de referencia, del 66% y 57%, respectivamente. A esta misma profundidad, se comprobó que no hubo diferencias en NT entre los tratamientos agrícolas, mientras que el COT, COA y Stock C fueron menores en el monocultivo de tabaco respecto a cuando se incluyeron gramíneas o abonos verdes en la sucesión de cultivos. A mayor profundidad, NT, COT, COA y Stock C fueron mayores en el testigo y en el tratamiento con abonos verdes, respecto a TM y TG.

Los tenores de estos elementos determinados en el presente trabajo para los suelos bajo cultivo, coinciden con los hallados para el Valle de Lerma (provincia de Salta), en donde se conoce que los suelos son generalmente pobres en materia orgánica y nitrógeno de acuerdo a las escalas de calificación agronómica (Ortega, 2009; Diez, 2011).

La materia orgánica es un importante indicador de la calidad del suelo (Adetunji *et al.*, 2020). Entre otros beneficios, su incremento favorece el ciclado de nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico, la capacidad buffer del suelo y el rendimiento de los cultivos (Lehman *et al.*, 2015). En los agroecosistemas, el aporte de carbono por parte de la producción primaria neta es a menudo inferior a la tasa de pérdida de dicho elemento por la descomposición microbiana (Pittelkow *et al.*, 2015). En este sentido, Domínguez *et al.* (2009) y Lal (2014) afirmaron que la disminución de este elemento es inversamente proporcional a la cantidad de carbono aportado y directamente proporcional a la agresividad del sistema de labranza implementado. La producción agrícola puede generar pérdidas de carbono entre el 30 % y 40 % respecto a los sistemas naturales o seminaturales (Don *et al.*, 2011; Poeplau *et al.*, 2011). Wiesmeier *et al.* (2013) en un estudio regional calcularon una saturación de carbono del 53 % en suelos cultivados de Bavaria. Luo *et al.* (2010) mencionaron pérdidas de carbono superficial del 51%, debido al cultivo de los suelos. Elberling *et al.* (2003) y Zach *et al.* (2006) insinuaron una disminución en el carbono del 35 al 56 %, como consecuencia de la introducción de labranzas y de cultivos en diferentes regiones semiáridas, siendo las mismas del 10 al 55 % en regiones húmedas (Fernandez, 2018). Pérez Brandan *et al.* (2010) al evaluar el contenido de carbono correspondiente a suelos de textura media, pertenecientes a numerosos lotes bajo monocultivo de tabaco del Valle de Lerma (Provincia de Salta), registraron disminuciones en este elemento del 49 % en relación a situaciones con bajo disturbio. Estos últimos autores atribuyeron estas fuertes caídas, al excesivo laboreo que realizan los productores para la implantación del cultivo del tabaco, pudiendo estas llegar a ser entre 15 y 20 por ciclo agrícola. En otras regiones del país, también se han reportado caídas entre el 35 % y 73% del carbono orgánico original

(Miglierina *et al.*, 2000; Krüger *et al.*, 2004), requiriendo estos cambios muchos años para retornar a la condición inicial (Desjardins *et al.*, 2006).

Para lograr el aumento de la materia orgánica y la mejora en la calidad del suelo, se ha recomendado intercalar cultivos de servicio entre aquellos destinados a la producción de granos, denominados también cultivos de cobertura (Dabney *et al.*, 2010). Estas son especies vegetales que se utilizan para cubrir el suelo en el intervalo de tiempo que queda entre dos cultivos comerciales, generando mejoras en las propiedades edáficas (Benedict *et al.*, 2014). Su cobertura viva o muerta puede quedar sobre la superficie del suelo, o sus restos vegetales pueden ser incorporados mediante labranzas, como sucede con los abonos verdes (Benedict *et al.*, 2014; Finney *et al.*, 2017). Adetunji *et al.* (2020) mencionaron que existen numerosos estudios realizados bajo distintas condiciones climáticas, que han mostrado que esta práctica incrementa el contenido de materia orgánica respecto aquellos sistemas de producción que no la implementan (Dabney *et al.*, 2001; Sainju *et al.*, 2002; Olson *et al.*, 2014). Una gran parte del carbono proveniente de esta práctica es aportado por el sistema radicular, que a su vez contribuye en mayor proporción al carbono estable del suelo que el generado por la parte aérea (Kätterer *et al.*, 2011). Blanco-Canqui *et al.* (2015) indicaron que la cantidad de carbono secuestrado mediante los cultivos de cobertura es dependiente del sitio estudiado, variando dicho incremento según las características de la especie utilizada, el contenido inicial de materia orgánica, el tipo de suelo presente, el sistema de labranza implementado y el clima. En este sentido, a mayor contenido de arcilla se favorece la acumulación y protección de la materia orgánica del suelo (Blanco-Canqui *et al.*, 2015). Por su parte, bajo labranza cero los beneficios son más rápidamente identificados debido a la menor tasa de descomposición de los residuos, respecto a lo que sucede bajo labranza convencional (Blanco-Canqui *et al.*, 2015). En este sentido,

Olson *et al.* (2014) determinaron que la inclusión de cultivos de cobertura generaba incrementos en el carbono del suelo de acuerdo al siguiente orden: labranza cero>labranza con cinceles>labranza convencional.

Por su parte, diversos estudios han sugerido que al incrementar la complejidad de la rotación, se puede aumentar el carbono en los suelos agrícolas (Follett, 2001; West & Post, 2002; Jarecki & Lal, 2003; Bremer *et al.*, 2008). Estos cambios pueden ser desde pasar de un monocultivo o una rotación cultivo-barbecho, a una sucesión continua de especies para producción, incrementando a su vez su diversidad durante la rotación (West & Post, 2002). A partir de un análisis de varios ensayos de larga duración, West & Post (2002) concluyeron que incrementando la diversidad de cultivos o excluyendo los largos períodos de barbecho se lograba una significativa acumulación en el carbono edáfico, llegando a un nuevo equilibrio después de 40 a 60 años. A su vez, mediante una recopilación y análisis de trabajos realizados en Australia, Luo *et al.* (2010) determinaron que incrementando la diversidad de especies se lograba un aumento promedio en el contenido de carbono del 5,3 %, extendiendo la cantidad de cultivos de uno a dos por año la mejora era del 10,1 %, mientras que al introducir variedades perennes el aumento en dicho elemento era del 17,8 %. Dichos autores también pudieron experimentar, que estas modificaciones variaban de acuerdo al tipo de suelo utilizado.

McDaniel *et al.* (2014a) señalaron trabajos en los cuales se han mostrado incrementos del contenido de carbono (Russell *et al.*, 2006; Varvel, 2006; Murphy *et al.*, 2011), pérdidas en dicho elemento (Wang *et al.*, 2006; Coulter *et al.*, 2009; Benjamin *et al.*, 2010), y también una falta de respuesta del carbono edáfico a diferentes rotaciones (Gijsman *et al.*, 1997; Soon *et al.*, 2007; Snapp *et al.*, 2010). Dichos autores plantearon que si bien los motivos de este comportamiento no eran conocidos,

consideraron que el mismo se debía probablemente a las distintas condiciones climáticas, edáficas y de manejo de los distintos ensayos señalados (Amundson *et al.*, 2003; Muller & Hoper, 2004; Fierer *et al.*, 2009). Blanco Canqui *et al.* (2010) encontraron una respuesta distinta del carbono del suelo ante la implementación de diferentes rotaciones, según el sistema de labranza empleado. Estos autores trabajando sobre suelos de la región semiárida de Estados Unidos, observaron luego de 33 años de ensayo, que el carbono de los primeros 10 cm de un suelo bajo siembra directa con una sucesión de cultivos trigo-trigo era en promedio 1,73 veces mayor respecto a la rotación soja-barbecho, mientras que dicho incremento se reducía a 1,22 cuando se analizaban los resultados de las parcelas con la misma rotación pero que presentaban un sistema de labranza destinado al control de malezas. Duval *et al.* (2016) trabajando con distintos suelos bajo siembra directa de la región Pampeana, al comparar el efecto que ejercía sobre el carbono edáfico una mayor proporción de gramíneas en la rotación de cultivos, respecto a otra con predominio de soja y a una tercera situación sin disturbio, observaron que las cuatro series de suelo analizadas (diferentes en su condición textural) no respondían de la misma manera a los distintos usos de la tierra evaluados, aunque en todos los casos el sitio inalterado era el que presentaba el mayor valor para esta propiedad. Por su parte, Novelli *et al.* (2017) a los dos años de iniciado un ensayo dispuesto sobre un Argiudol de la región Pampeana bajo siembra directa, notaron que al complejizar el esquema de rotaciones agrícolas (desde el monocultivo de soja hasta el doble cultivo trigo/soja, analizando también otras rotaciones con una intensificación en la secuencia de cultivos intermedia) se incrementaba el stock de carbono de los primeros 5 cm, comportamiento que no se reproducía de la misma manera en un Vertisol de Entre Ríos con los mismos tratamientos. Estos autores subrayaron el efecto positivo y en el corto plazo de la intensificación en la secuencia de cultivos sobre el

secuestro de carbono, aún teniendo en cuenta que el ensayo se desarrollaba bajo un régimen climático húmedo y templado, donde los suelos se supone que están mas cerca de llegar a una condición de saturación del carbono orgánico respecto a lo que normalmente ocurre en las regiones semiáridas, con un nivel menor de saturación de dicho elemento. Asosta-Martinez *et al.* (2007) también compararon el carbono orgánico de los primeros centímetros de un Paleustol de una zona semiárida de Estados Unidos, entre distintas rotaciones con distinta intensificación en la secuencia de cultivos. Estos autores comprobaron que aquellas sucesiones que no tenían largos períodos de barbecho (todos los años bajo cultivo), exhibían en general mayor contenido de carbono superficial (0 a 5 cm y 5 a 15 cm) respecto a aquellas otras que tenían una secuencia cultivo-barbecho o cultivo-cultivo-barbecho, mientras que la pastura natural ofrecía los mayores valores para esta propiedad. Un comportamiento similar se mostró en dicho trabajo con el contenido de nitrógeno. Corsi *et al.* (2012) señalaron que diferentes rotaciones de cultivos tienen distinto potencial para lograr el secuestro de carbono en el suelo, pero este incremento se da sobretudo y en términos generales, cuando el balance de nitrógeno es positivo, ya sea a partir de su fijación por parte de algunas de las especies incluídas en la secuencia o por el agregado de fertilizantes.

El período de barbecho en una secuencia de cultivos, es un período con actividad microbiana, con descomposición de residuos y sin incorporación de rastrojos, resultando como consecuencia una pérdida neta en el carbono del suelo (Halvorson *et al.*, 2002; Mikha *et al.*, 2010). Por su parte, la labranza como la efectuada en los tratamientos agrícolas analizados en el presente estudio, incrementa la mezcla de los residuos vegetales con el suelo, provocando también una mayor oxigenación, favoreciendo por lo tanto la descomposición de los rastrojos, destruyendo los agregados y exponiendo el carbono previamente protegido en su interior a la acción de la fauna del suelo, siendo

fomentadas también las pérdidas de carbono por erosión (Mikha *et al.*, 2010; Ferrary Laguzzi *et al.*, 2014). Al respecto, numerosos investigadores (Urioste *et al.*, 2006; Van Den Bossche *et al.*, 2009; Sainz Rozas *et al.*, 2011; Ginebra Aguilar *et al.*, 2015) han afirmado que la labranza acelera la mineralización del carbono orgánico, disminuyendo su contenido y el de otros nutrientes, a la vez que la reducción en la estabilidad estructural incrementa la pérdida de fracciones inorgánicas por erosión.

Cabe mencionar también que el índice de cosecha del tabaco es alto (0,6), estimando que el retorno de materia seca al suelo de acuerdo a los rendimientos promedio, estaría en el orden de los 1500 Kg ha⁻¹ año⁻¹. En este sentido, Zou *et al.* (2015) mencionaron que al comparar al tabaco con otros cultivos, dicha especie retorna pocos residuos al suelo como consecuencia de su corto ciclo, por ser sus raíces poco profundas y a que gran parte de su parte aérea es cosechada. Es por eso que el monocultivo de tabaco lleva a una pérdida de carbono, nitrógeno y a una degradación de la estructura edáfica (Zou *et al.*, 2015; Zou *et al.*, 2018).

A su vez, Martínez *et al.* (2009) y Mogollon *et al.* (2015) plantearon que en las zonas semiáridas, la tasa de mineralización del carbono es muy intensa debido a las condiciones climáticas reinantes, y como consecuencia su fijación en las formas mas estables es reducida, provocando el agotamiento de los suelos y por lo tanto generando un proceso de desertificación.

Por lo tanto, y a pesar de la intensa mineralización del carbono sufrida como consecuencia de los numerosos laboreos practicados para la implantación y desarrollo de este cultivo y considerando también el efecto adverso del clima, intercalar gramíneas en la rotación y/o incorporar al suelo abonos verdes entre sucesivos cultivos de tabaco, favorecieron de acuerdo a los resultados del presente estudio, el incremento del carbono

orgánico superficial respecto al monocultivo, mientras que para el caso del uso de abonos verdes este aumento también se dio a nivel subsuperficial.

Quiroga *et al.* (2005) al comparar distintos sistemas de labranza, determinaron en suelos de la región semiárida pampeana, una influencia significativa del contenido de arcilla y de la arcilla más limo sobre los resultados obtenidos de materia orgánica. En el presente trabajo, en la serie Perico no se pudo comprobar en ninguna de las profundidades evaluadas, una asociación significativa entre contenido de arcilla o de la arcilla más limo sobre las diferentes fracciones de carbono analizadas, salvo para el COPT y COPG del estrato mas profundo (Tabla 2.8). No obstante, al realizar el análisis de varianza entre tratamientos para las variables: COPT 2/(arcilla + limo); COPG 2/(arcilla) y COPG 2/(arcilla + limo), no se observaron diferencias estadísticas significativas entre los distintos usos de la tierra evaluados, de la misma manera que cuando se compararon sólo los valores medios de COPT 2 y COPG 2.

Tabla 2.8. Coeficientes de correlación determinados entre los resultados de distintas fracciones del carbono con el contenido de arcilla y de arcilla más limo de ambas profundidades de los suelos evaluados.

Profundidad Variables	0 a 20 cm		20 a 40 cm	
	% arcilla	% arcilla + % limo	% arcilla	% arcilla + % limo
COT	-0,27ns	-0,19ns	0,26ns	0,17ns
COA	-0,24ns	-0,17ns	0,34ns	0,28ns
COPT	-0,25ns	-0,17ns	-0,42ns	-0,56*
COPF	-0,19ns	-0,11ns	0,14ns	0,05ns
COPG	-0,27ns	-0,19ns	-0,52*	-0,65**

COT: carbono orgánico total, COPT: carbono orgánico particulado total, COPG: carbono orgánico particulado grueso, COPF: carbono orgánico particulado fino, COA: carbono orgánico asociado. Ns: no significativo.* p<0,10; **p<0,05.

Llama la atención que entre las fracciones más lábiles del carbono orgánico, las que normalmente son utilizadas como indicadoras del efecto de las prácticas de manejo sobre la calidad del suelo (Álvarez *et al.*, 2009; Duval *et al.*, 2013, 2016; Galantini *et al.*, 2014;) y de los procesos de degradación (Cambardella & Elliot 1992; Elliot *et al.*,

1994; Wander & Bollero, 1999; Haynes, 2000; Six *et al.*, 2002; Morón & Sawchick 2002; Corbella *et al.*, 2006), no se hayan manifestado en ambas profundidades diferencias entre las distintas sucesiones de cultivo evaluadas. El intenso laboreo del suelo bajo este cultivo habría eliminado las posibles diferencias debidas al distinto aporte de material vegetal de los diferentes tratamientos analizados.

Quiroga *et al.* (2017) afirmaron que debido a su naturaleza más dinámica, las fracciones más lábiles de la materia orgánica serían indicadores más tempranos que la materia orgánica total, para reflejar cambios en la calidad de los suelos, resultando más sensibles a las prácticas de manejo empleadas (rotación de cultivos, manejo de residuos, sistema de labranza, fertilización). Dicho comportamiento se debe a que la materia orgánica total está constituida en su mayor parte por las fracciones orgánicas de ciclado más lento (Morón & Sawchick, 2002; Tan *et al.*, 2007; Galantini & Suñer, 2008).

No obstante, en el presente trabajo se comprobó en el estrato superficial una disminución de estas propiedades (COPT1; COPG1; COPF1) en todos los tratamientos agrícolas respecto a la situación testigo, algo que no ocurrió a mayor profundidad. Esta diferencia de comportamiento entre profundidades, obedeció a un proceso de estratificación ocurrido para estas variables en los sitios sin disturbio dada la falta de remoción del suelo, al mismo tiempo que este proceso no ocurrió en los suelos agrícolas. En este sentido, la relación COPT1/COPT2, COPG1/COPG2 y COPF1/COPF2 para los sitios inalterados fue en promedio 8,2-8,5, mientras que para los tratamientos con cultivo de tabaco la misma estuvo entre 1 y 1,45. Respecto a lo sucedido con COT, COA y NT, dicha relación estuvo también siempre por debajo de 2 para todas las situaciones analizadas, con la excepción de los sitios sin disturbio en los que el COT presentó una relación promedio entre estratos de 2,5. Franzluebbbers (2002) si bien señaló que es necesaria una mayor investigación en el tema, propuso que cuando

la relación entre estratos asume valores mayores a 2 para el carbono y nitrógeno edáficos, implica una mejor calidad del suelo.

Las fracciones orgánicas asociadas al tamaño de las arenas (COPG+COPF) representaron en superficie para la situación testigo, el 52 % del COT, mientras que en los sistemas de producción agrícola, este porcentaje se redujo en promedio al 19% (TM: 24 %, TV: 16 %, TG: 18 %). Por su parte, la disminución en los valores del COPT superficial luego de más de 30 años bajo agricultura fue en promedio del 87 %, mientras que para el COA fue del 43 %. Esto muestra que en los sistemas bajo cultivo, hay una disminución diferencial de las fracciones más lábiles, en relación a las fracciones más humificadas y estables.

Fernandez *et al.* (2016) al comparar suelos agrícolas y bajo pastizal natural con un amplio rango de texturas correspondientes a la región semiárida pampeana, observaron disminuciones significativas en el COT, COA, COPG y COPF de las situaciones agrícolas. En el sudeste de la región pampeana, Beltrán *et al.* (2018) determinaron bajo siembra directa y luego de varios años de duración del ensayo, incrementos en el carbono del suelo del 22,7 %, al evaluar la incorporación de la avena como cultivo de cobertura en un monocultivo de soja. Estos autores encontraron que fundamentalmente las fracciones lábiles del carbono eran las responsables de dichos cambios, con aumentos en el COPG del 61,3% y del COPF del 38,7 % ante la incorporación del cultivo de avena. Duval *et al.* (2016) también determinaron mayor COPG y COPF en situaciones inalteradas respecto a suelos bajo agricultura, mientras que entre estos últimos hallaron valores superiores de estas variables en aquellos manejos con mayor proporción de gramíneas. No obstante, estos resultados fueron dependientes del período de muestreo (verano o primavera) y del tipo de suelo considerado. Duval *et al.* (2014) determinaron en un Argiudol típico una reducción del

50 % en el COPG debido a efectos antrópicos (monocultivo vs. rotación de cultivos), al mismo tiempo que no registraron cambios en el carbono total del suelo. Por su parte, Singh *et al.* (2018) luego de tres años de iniciado un ensayo con diferentes rotaciones de cultivos bajo siembra directa en un clima semiárido de India, no comprobaron diferencias en el carbono orgánico total, al mismo tiempo que observaron que las fracciones más lábiles de este elemento eran suficientemente sensibles como para detectar diferencias entre los tratamientos analizados.

Chan *et al.* (2002) indicaron que la labranza remueve principalmente al carbono orgánico particulado, explicando a su vez que dicha pérdida puede ser del 80 % del total de carbono perdido. En el presente trabajo y luego de mas de 30 años de agricultura bajo labranza convencional, la merma en la concentración del COT superficial fue distinta según los tratamientos analizados (TM: 74 %; TV: 64 %; TG: 61 %). De esa pérdida y tal como lo expresara Chan *et al.* (2002), una alta proporción fue explicada por el COPT 1, con reducciones en este parámetro respecto a la condición no disturbada del 88 %, 89 % y 86 %, en TM, TV y TG, respectivamente. Por su parte, el COA 1 disminuyó en menor proporción: 58 %, 37 % y 33 % en TM, TV y TG, respectivamente. De esta manera, la merma observada en COPT 1 fue similar en todos los tratamientos pero la fracción más recalcitrante se redujo en mayor proporción como consecuencia del monocultivo de tabaco. Cabe destacar que estas fracciones son las que presentan un ciclado más lento y por lo tanto requieren de mayor tiempo para su recuperación. En el estrato mas profundo también hubo una pérdida en la concentración del COT 2 en los suelos bajo agricultura (TM: 38 %; TV: 18 %; TG: 36 %). No obstante y debido al proceso de estratificación del COPT 2 ya mencionado para los suelos sin disturbio, esta merma resultó casi exclusivamente a expensas del COA 2.

Si bien se pudieron determinar efectos favorables del aumento de carbono de los suelos sobre algunas propiedades físicas edáficas, estas se debieron exclusivamente al comportamiento de los suelos no disturbados, ya que al no considerar a los mismos en el análisis de correlación, los resultados perdieron significancia estadística. Esto era de esperar, dado que como se vió en la Tabla 2.4 no existieron diferencias significativas en dichas propiedades entre los distintos suelos agrícolas evaluados.

El menor contenido subsuperficial de Ca en TG, podría atribuirse a que bajo este sistema de rotación existe una mayor absorción de este nutriente por parte del cultivo de tabaco, como consecuencia de un incremento en su rendimiento (comunicación personal de productores de la zona). López-Lefebre *et al.* (2001) señalaron que luego del potasio, el calcio es el elemento mineral de mayor demanda por parte del tabaco, y que el contenido de este elemento en la hoja curada puede estar entre el 1,5% y 2%. No obstante, los niveles de este elemento encontrados en los suelos bajo cultivo, resultaron normales para el requerimiento nutricional del tabaco (Ballari, 2005). Los cationes intercambiables en el suelo como el calcio y el magnesio representan una fuente importante para las plantas. Su evaluación es compleja y depende de la capacidad de intercambio catiónico, del contenido de arcilla de los suelos y de la relación entre estos parámetros (Gonzalez *et al.* 2010). Al respecto, como regla general se ha fijado que la relación K:Mg en el suelo es útil como indicador de la demanda de magnesio y su valor varía entre 4:1 y 7:1 (Smith, 2004). Su disponibilidad también depende de las interacciones que se establecen entre el Ca, Mg y Na (RAS, relación de adsorción de sodio) (Ballari, 2005). En cuanto al Na superficial, los contenidos hallados en el presente trabajo, tampoco comprometen a los suelos para un desarrollo adecuado del cultivo del tabaco.

Respecto al PE, se observó en ambas profundidades un proceso de acumulación en los lotes bajo agricultura. Esto se debe a los reiterados aportes de este elemento como fertilizante, respecto a lo que efectivamente es utilizado por los cultivos. Consecuentemente, los suelos que se han empleado con frecuencia para este cultivo son ricos o muy ricos en fósforo (McCants & Wolt, 1967; Hawks & Collins, 1986). Se han reportado concentraciones de este elemento entre 44 y 65 mg kg⁻¹, siendo el valor promedio de 54 mg kg⁻¹ en los suelos cultivados, destacando que estos en su condición natural para la región bajo estudio se caracterizan por tener un nivel bajo de P asimilable, menor a 13 mg kg⁻¹ (García, 2009). De esta manera, los niveles de PE observados en este estudio se incrementaron en cuatro veces respecto a los niveles naturales de este nutriente. No obstante, y aún con estas concentraciones elevadas, es común que se incorpore P en la fertilización de base. Similares resultados reportaron Arzeno *et al.* (2008), Pérez Brandan & Huidobro (2011) y Martínez Robaina (2018) en sistemas de producción de tabaco.

2.3.1.4. Propiedades biológicas

Según se observa en la Tabla 2.9, el CBM y la relación CBM/COT de ambas profundidades y la RB superficial, fueron parámetros sensibles al cambio en el uso de la tierra. Por su parte, la RB subsuperficial y el qCO₂ de ambos estratos de suelo no mostraron diferencias significativas entre los distintos usos de la tierra evaluados, al mismo tiempo que ninguna de las propiedades biológicas presentó un coeficiente de variación superior al 40 % (Tabla 2.9).

Tabla 2.9. Análisis de varianza de las propiedades biológicas para las profundidades de 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2). Se presentan el grado de ajuste (R²), coeficiente de variación (CV) y valor de probabilidad (p).

Variable Profundidad	R ²		CV		Valor p	
	1	2	1	2	1	2
CBM	0,91	0,89	18,16	21,09	<0,001	<0,001
RB	0,94	0,47	9,77	38,71	<0,001	0,152
CBM/COT	0,76	0,85	19,63	25,19	0,007	0,001
qCO₂	0,50	0,60	28,11	36,87	0,1218	0,051

CBM: carbono de la biomasa microbiana, RB: respiración basal, CBM/COT: cociente microbiano, qCO₂: cociente metabólico.

Wardle & Ghani (1995) concluyeron que la respuesta del cociente metabólico (qCO₂) a los disturbios o al estrés en el ecosistema puede ser muy poco predecible. Por su parte, Fernández *et al.* (2018) evaluando indicadores biológicos en suelos de la región semiárida pampeana central, determinaron que el cociente metabólico no era un indicador adecuado para establecer diferencias entre suelos con vegetación natural y aquellos bajo agricultura. Por su parte, Moscatelli *et al.* (2007) si bien pudieron diferenciar el efecto de la agricultura respecto al uso pastoril o forestal sobre el qCO₂ en suelos de Italia, al comparar la incidencia de la agricultura convencional y orgánica o de las pasturas aprovechadas o sin utilizar por el ganado, no encontraron diferencias significativas en este parámetro entre estos últimos tratamientos. Sin embargo, distintos investigadores (Liebig & Doran, 1999; Jakelaitis *et al.*, 2008; Ortiz *et al.*, 2015; Ferreras *et al.*, 2015) reportaron que el qCO₂ era modificado por cambios en el manejo y uso de las tierras. De esta manera, un uso poco intensivo causaría una disminución en este parámetro, lo que indicaría un menor estrés de la comunidad microbiana y una mayor eficiencia en la utilización del carbono por parte de la misma, lo cual puede ser importante en el mantenimiento o incremento del contenido de carbono orgánico del suelo (Babujia *et al.*, 2010).

En el presente trabajo, qCO_2 mostró en superficie valores de $3,39 \cdot 10^{-3}$ y $3,87 \cdot 10^{-3} \mu g \text{ C-CO}_2 \cdot \mu g^{-1} \text{ CBM h}^{-1}$ para T y TG, respectivamente, mientras que TM y TV obtuvieron resultados de $5,40 \cdot 10^{-3}$ y $5,98 \cdot 10^{-3} \mu g \text{ C-CO}_2 \cdot \mu g^{-1} \text{ CBM.h}^{-1}$ respectivamente. De esta manera, y si bien el análisis de varianza no mostró diferencias significativas entre tratamientos, se comprobó un comportamiento algo distinto en T y TG respecto a TM y TV, siendo las comunidades microbianas de los primeros tratamientos mencionados mas eficientes en el uso de los recursos energéticos. A mayor profundidad sucedió algo similar, ya que TG y T presentaron valores de $4,16 \cdot 10^{-3}$ y $2,99 \cdot 10^{-3} \mu g \text{ C-CO}_2 \cdot \mu g^{-1} \text{ CBM h}^{-1}$, respectivamente, mientras que para TM y TV estos fueron de $7,45 \cdot 10^{-3}$ y $7,81 \cdot 10^{-3} \mu g \text{ C-CO}_2 \cdot \mu g^{-1} \text{ CBM h}^{-1}$, no existiendo en ninguna de las dos profundidades una relación significativa entre este parámetro y el carbono orgánico. Fernandez *et al.* (2018) tampoco pudieron determinar una correlación significativa entre el qCO_2 y el carbono orgánico en suelos bajo agricultura y pastizal natural, correspondientes a la región semiárida Pampeana, obteniendo a su vez valores de qCO_2 superiores da los determinados en el presente trabajo.

Por su parte, Raiesi & Beheshti (2015) comprobaron el efecto de la agricultura sobre este parámetro, al ser comparados resultados provenientes de este uso de la tierra con los obtenidos en suelos forestales de Irán. Dichos autores mencionaron que al pasar de un ambiente natural a la agricultura, aparte de modificarse la estructura y composición de la microbiología edáfica, también cambia la eficiencia en el uso del carbono, siendo las comunidades microbianas bajo agricultura menos eficaces. Esto obedecería a una mayor abundancia de bacterias respecto a hongos, siendo estos últimos más eficientes en el uso del carbono. En este sentido, Mc Daniel *et al.* (2014a) señalaron que el incremento en la diversidad de especies en la rotación aumenta la heterogeneidad de la comunidad microbiológica y la abundancia relativa de los hongos respecto a las

bacterias (Gonzalez Chavez *et al.*, 2010; Suzuki *et al.*, 2012). Por lo tanto, el incremento del qCO₂ bajo agricultura respondería a que las condiciones ambientales para los microorganismos son menos favorables, al generarse pérdida de agregados y de la calidad de la materia orgánica del suelo, en especial la de sus fracciones más lábiles (Raiesi & Beheshti, 2015). Los resultados del presente trabajo, mostraron un valor relativamente menor del cociente metabólico bajo la condición natural respecto a los suelos bajo agricultura, con la excepción ya mencionada de TG, en donde se observó un valor del qCO₂ más parecido al obtenido por la condición natural.

En la Tabla 2.10 se observa que la rotación con gramíneas (TG) incrementó significativamente los valores de CBM1, CBM2, CBM/COT1 y CBM/COT2 respecto a TV y TM, mientras que para RB 1 las diferencias se manifestaron entre TV y TG respecto a TM. Por su parte, en la situación testigo solo el CBM y RB superficiales superaron al mejor valor obtenido por alguno de los tratamientos bajo cultivo, al mismo tiempo que el suelo de dicha situación de referencia no se diferenció del de TG en el CBM 2 y en la relación CBM/COT 2, como tampoco de TM y TV en la relación CBM/COT 1.

Tabla 2.10. Valores promedio y desvío estándar para aquellas variables biológicas que presentaron diferencias significativas entre tratamientos para la serie Perico.

Tratamientos Variables	T	TM	TV	TG
CBM 1 (µg C g ⁻¹ suelo)	311,77 ± 43,11 c	86,84 ± 38,8 a	116,23 ± 11,88 a	221,53 ± 30,94 b
CBM 2 (µg C g ⁻¹ suelo)	93,33 ± 5,64 b	35,93 ± 23,37 a	25,82 ± 4,78 a	79,99 ± 3,67 b
RB 1 (µg C-CO ₂ g ⁻¹ suelo h ⁻¹)	1,04 ± 0,09 c	0,42 ± 0,03 a	0,69 ± 0,05 b	0,84 ± 0,10 b
CBM/COT 1 (%)	1,01 ± 0,20 a	1,03 ± 0,20 a	1,05 ± 0,16 a	1,84 ± 0,36 b
CBM/COT 2 (%)	0,75 ± 0,02 b	0,45 ± 0,17 a	0,25 ± 0,05 a	1,03 ± 0,25 b

CBM: carbono de la biomasa microbiana, RB: respiración basal, CBM/COT: cociente microbiano.1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm. T: situación testigo, TM: monocultivo de tabaco, TV: cultivo de tabaco con incorporación de verdeos, TG: cultivo de tabaco en rotación con gramíneas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Test DGC (p<0,05).

Fernández *et al.* (2018) al evaluar la eficacia de distintos indicadores biológicos, informaron al igual que lo ocurrido en el estrato superficial del presente estudio, que el carbono de la biomasa microbiana presentaba una amplia diferencia entre los suelos sin cultivar y aquellos bajo agricultura. A su vez Fernandez *et al.* (2018), determinaron una sustancial disminución a mayor profundidad en este parámetro lo que coincide también con lo señalado por otros investigadores (Zamora *et al.*, 2005; Babujia *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2012), quienes mencionaron que el aumento del CBM está condicionado por la presencia de materia orgánica, cuyo contenido generalmente es mayor en superficie que en los estratos más profundos. A su vez, Fernandez *et al.* (2018) no encontraron diferencias en el CBM de 17 a 23 cm entre los suelos bajo pastizal y agricultura, mientras que de 23 a 40 cm dichos autores pudieron determinar un patrón de diferenciación similar al encontrado en superficie. En el presente trabajo también se observó una disminución del CBM con la profundidad del suelo, además de reducirse el grado de diferenciación entre los distintos sitios evaluados en el estrato de 20 a 40 cm, ya que si bien hubo un mayor CBM 2 en T respecto a TM y TV, dichos resultados no fueron significativamente diferentes de los obtenidos por TG (Tabla 2.10).

La rotación con gramíneas tuvo un efecto positivo sobre el carbono microbiano, con incrementos significativos en TG respecto a TM del 155 % en el estrato superior y del 122% en el inferior. Las diferentes especies vegetales incluidas en una rotación agrícola pueden liberar compuestos específicos en la rizósfera (Vargas Gil *et al.*, 2009), que conducirían a cambios en la composición de las comunidades microbianas asociadas con el tipo de cultivo empleado (Chavarria, 2018).

Frasier *et al.* (2016) determinaron para una situación tomada como de referencia de la región semiárida Pampeana, un rango de CBM entre 143 y 295 $\mu\text{g C g}^{-1}$ suelo, atribuyendo estos resultados al clima regional, siendo los mismos inferiores a los

obtenidos en el presente estudio para el estrato superficial de la situación no disturbada. Contrariamente, Pérez Brandan *et al.* (2011) registraron en los valles templados de Lerma (provincia de Salta), valores muy superiores de CBM (entre 480 a 1040 $\mu\text{g C g}^{-1}$ de suelo) respecto a los observados en el presente trabajo. En dicho estudio se evaluaron las siguientes situaciones: monocultivos de tabaco con diferente antigüedad, cultivo de tabaco con incorporación de rastrojo de sorgo, plantación directa de tabaco con riego por goteo en rotación con trigo, además de una situación de referencia. Los resultados aportados por Pérez Brandan *et al.* (2011) mostraron que la mayor cantidad de rastrojo dejado en superficie, sería lo que favoreció más efectivamente la actividad microbiana, siendo este manejo diferente al realizado en los lotes evaluados en el presente estudio.

La respiración basal superficial de los suelos del sistema no disturbado, superó significativamente en un 60 % a la correspondiente del suelo de TM y en un 37 % promedio a la de los restantes tratamientos. Los mayores niveles de RB superficial en el suelo de referencia, posiblemente se relacionen con una estructura de la comunidad microbiana adaptada a la mayor cantidad de sustratos fácilmente descomponibles presentes en dicho sistema (Gómez *et al.*, 1996; Ferreras *et al.*, 2009), con una cantidad de raíces y producción de sustratos rizosféricos a lo largo del año más constante que los producidos en el monocultivo de tabaco, cuya duración no supera los 6 meses. A su vez, la falta de disturbio en la situación de referencia, también contribuyó a una mayor actividad microbiana (Di Ciocco *et al.*, 2014).

La RB superficial fue un 100 % superior en TG y un 64 % mayor en TV respecto a TM. Shahzad *et al.* (2015) sostuvieron que las raíces vivas y sus exudados afectan a la actividad microbiológica, ya que proporcionan las fuentes de energía necesarias para mantener una alta biomasa microbiana del suelo, estimulando la mineralización de la materia orgánica. Por lo tanto, es probable que este efecto

rizosférico y la materia orgánica adicional proporcionada por el abono verde en TV y la alternancia con gramíneas en TG puedan haber mejorado la funcionalidad del suelo en dichos tratamientos, incrementando la respiración de los microorganismos.

Tanto la respiración basal como el CBM superficiales estuvieron condicionados por el contenido de carbono orgánico, observándose coeficientes de correlación significativos entre dichos parámetros de 0,83 y 0,84, respectivamente. En profundidad solo se comprobó una relación significativa del carbono orgánico con RB 2 (coeficiente de correlación: 0,58; $P=0,049$).

El cociente microbiano refleja la contribución de la biomasa microbiana al COT (Anderson & Domsch, 1989; Dilly, 2005; Balota & Chaves, 2011), e indica al mismo tiempo la disponibilidad de sustrato para los microorganismos del suelo. Este parámetro al presentar valores por debajo del 2%, muestra una señal de agotamiento de la materia orgánica (Anderson, 2003). Los resultados de CBM/COT obtenidos en el presente trabajo, además de revelar diferencias significativas fundamentalmente entre TG y el resto de las situaciones evaluadas, mostraron valores menores al 2% (Tabla 2.10), lo que estaría indicando que todos los manejos evaluados, incluidos los suelos correspondientes a la situación de referencia, tendrían comprometida su materia orgánica. A su vez, los resultados aportados por esta variable indican que las comunidades microbianas en los sistemas de producción de tabaco en rotación con gramíneas, son más eficientes en fijar mayor proporción de carbono entrante en el cociente microbiano, el cual refleja la eficiencia en la inmovilización del carbono por los microorganismos del suelo (Leite *et al.*, 2003; Fernandes *et al.*, 2012).

Nannipieri (1994) observó que los parámetros biológicos y bioquímicos tienden a reaccionar de una manera más rápida a los cambios producidos por el manejo del suelo, y que por lo tanto podrían constituir una señal temprana y de utilidad para estimar

la calidad edáfica (Aruani *et al.*, 2012), incluso antes que las propiedades físicas y químicas detecten cambios de manera consistente. En este sentido, se ha demostrado que tanto la actividad como la composición de la comunidad microbiana del suelo, son susceptibles a cambios asociados a las prácticas de manejo como el sistema de labranza y la rotación de cultivos (Bossio *et al.*, 2005). Di Ciocco *et al.* (2014) evaluaron la respiración edáfica y la fijación biológica de nitrógeno en suelos sometidos a distintos usos, concluyendo que los parámetros biológicos resultaron ser más sensibles que otros para detectar tempranamente los cambios producidos por el diferente uso de la tierra.

Mc Daniel *et al.*, 2014a señalaron que al convertir una comunidad compleja y natural en un sistema simplificado de producción agrícola, se genera una declinación en la biodiversidad (Sala *et al.*, 2000; Tilman *et al.*, 2001). Dichos autores añadieron también, que los monocultivos disminuyen la actividad microbiológica debido a una limitación en la oferta de sustrato, lo cual ha sido comprobado a partir de una reducción en las tasas de respiración en dichos sistemas de producción. La mayor diversidad de cultivos altera las interacciones microbio-materia orgánica del suelo que regulan la disponibilidad de carbono y nitrógeno, modificando dichos cambios el procesamiento de los nuevos residuos que son incorporados al suelo. Si bien los mecanismos aún no están claros, al incrementarse la biodiversidad temporal a partir del uso de distintas especies vegetales, se producen incrementos en la disponibilidad de nitrógeno (Sanchez *et al.*, 2001; Tonito *et al.*, 2006), del carbono orgánico (Grandy & Robertson, 2007; Kou *et al.*, 2012), de la biomasa microbiana (Mc Daniel *et al.*, 2014b) y de la diversidad microbiológica (Suzuki *et al.*, 2012; Xuan *et al.*, 2012). Mc Daniel *et al.* (2014a) mencionaron que tanto la historia de rotación como el tipo de sustrato que se incorpora al suelo y sus interacciones, influyen en la biomasa microbiana y en el ciclado de nutrientes, y que si bien los mecanismos de este comportamiento son desconocidos,

involucran cambios en la estructura y función de la comunidad microbiana y en los sustratos disponibles para la misma. En el trabajo realizado por Mc Daniel *et al.* (2014a) se encontró una mayor tasa de respiración y respiración acumulada ante igual cantidad y calidad de agregado de sustratos, en aquellos suelos que provenían de rotaciones mas diversas. En el mismo sentido, Sanchez *et al.* (2001) determinaron un 40 % mas de nitrógeno mineralizado en una rotación más diversa, respecto a un monocultivo de maíz.

A su vez, Acosta-Martínez *et al.* (2007) determinaron mayor MBC y más nitrógeno de la biomasa microbiana en los primeros 5 cm de un pastizal natural y de una pastura implanatada, respecto a distintos sistemas agrícolas bajo siembra directa con diferente intensificación en la secuencia de cultivos, manteniéndose dichas diferencias en el pastizal natural también a mayor profundidad (5 a 15 cm). En el trabajo recién mencionado, aquellas rotaciones con mayor grado de intensificación en la secuencia de cultivos (entre un 100 % y 67 % de intensificación: trigo-maíz-mijo y trigo-maíz-barbecho, respectivamente) obtuvieron en los primeros 5 cm de suelo mayor MBC que los sistemas agrícolas con menor intensificación en la secuencia de cultivos (50 % de intensificación: trigo-barbecho), no existiendo diferencias al analizar el estrato de 5 a 15 cm, como tampoco entre las secuencias con 100% y 67% de intensificación.

De acuerdo a lo manifestado y a los resultados observados en la Tabla 2.10, en la serie Perico tuvo más relevancia para el incremento de los parámetros biológicos respecto al monocultivo de tabaco, la mayor diversidad de cultivos respecto al aumento en la intensificación en la secuencia de los mismos. TG representa una situación en la cual se hace un solo cultivo al año, intercalando distintas especies en cada campaña agrícola, mientras que en TV se hacen dos cultivos al año siendo el tiempo de ocupación del abono verde menor que el de un cultivo para grano. En este sentido, ha sido extensamente analizado el efecto favorable de los cultivos de servicio sobre las

propiedades biológicas del suelo (Adetunji *et al.*, 2020). Sin embargo, no se pudo comprobar que TV haya influido de manera favorable sobre los parámetros biológicos del suelo analizado, con la excepción de lo sucedido con RB 1 (Tabla 2.10), mientras que en TG se observaron aumentos respecto a TM de todas las variables detalladas en la Tabla 2.10.

2.3.1.5. Indicadores seleccionados

En la Tabla 2.11 se puede observar el Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI), compuesto por variables físicas, químicas y biológicas que fueron seleccionadas para la construcción de los índices de calidad de suelo desarrollados en el Capítulo III. Con dicho propósito, solamente fueron seleccionadas aquellas variables que mostraron en el análisis de varianza un valor de $p < 0,05$ y un coeficiente de variación menor al 40 %.

Tabla 2.11. Conjunto mínimo de indicadores seleccionados para la serie Perico.

Conjunto Mínimo de Indicadores	
Físicas	DMP _p 1 y 2, Da 2 y Vinf
Químicas	pH 1 y 2, CE 1 y 2, NT 1 y 2 COT 1 y 2, Stock C 1, COPT 1, COPG 1, COA 1y 2, Ca 2, Mg 2, Na 1, PE 1 y 2.
Biológicas	CBM 1 y 2, RB 1 y CBM/COT 1 y 2

Vinf.: velocidad de infiltración, DMP_p: diámetro medio ponderado promedio, Da: densidad aparente, COT: carbono orgánico total, NT: nitrógeno total, PE: fósforo extractable, COPT: carbono orgánico particulado total, COPG: carbono orgánico particulado grueso, COA: carbono orgánico asociado, CE: conductividad eléctrica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, CBM: carbono de biomasa microbiana, RB: respiración basal, CBM/COT: cociente microbiano. 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm.

2.3.2. SERIE MONTEERRICO

2.3.2.1. Distribución estadística en los resultados para las variables analizadas

A partir de la prueba de normalidad de Shapiro Wilks modificada (Tabla 2.12), se vio la necesidad de transformar los resultados de potasio asimilable (0-20 cm),

densidad aparente (0-20 y 20-40 cm) y resistencia a la penetración (0-20 cm), utilizando para ello el logaritmo decimal (base 10).

Tabla 2.12. Análisis de normalidad de las variables químicas, físicas y biológicas para las profundidades de: 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2).

Variables Químicas	Valor P		Variables Físicas	Valor P		Variables Biológicas	Valor P	
	1	2		1	2		1	2
COPT	0,911	0,694	DMP_p	0,655	0,468	CBM	0,929	0,920
COA	0,639	0,690	DMP_r	0,870	0,582	RB	0,945	0,451
COPG	0,874	0,602	DMP_m	0,298	0,461	qCO₂	0,386	0,680
COPE	0,701	0,818	DMP_l	0,781	0,549	CBM/COT	0,706	0,443
COT	0,166	0,621	Da	0,038*	0,048*			
Stock C	0,180	0,620	RP	0,040*	0,966			
pH	0,995	0,280	Vinf	0,292	----			
CE	0,304	0,787						
Ca	0,187	0,411						
Mg	0,112	0,552						
Na	0,489	0,498						
K	0,009*	0,748						
NT	0,902	0,543						
PE	0,831	0,500						

COPT: carbono orgánico particulado total, COA: carbono orgánico asociado, COPG: carbono orgánico particulado grueso, COPE: carbono orgánico particulado fino, COT: carbono orgánico total, CE: conductividad eléctrica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, K: potasio, NT: nitrógeno total, PE: fósforo extractable. DMP_p: diámetro medio ponderado promedio, DMP_r: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento rápido, DMP_m: diámetro medio ponderado correspondiente a disgregación mecánica, DMP_l: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento lento, Da: densidad aparente, RP: resistencia a la penetración. Vinf: velocidad de infiltración superficial, CBM: carbono de la biomasa microbiana, RM: respiración basal, CBM/COT: coeficiente microbiano, qCO₂: coeficiente metabólico. * valores transformados.

En la Tabla 4 del anexo se detallan los coeficientes de correlación entre los distintos tamaños de partícula (arena, limo y arcilla) y los resultados de las variables físicas, químicas y biológicas, donde se puede observar de la misma manera que con la serie Perico, que no hubo un condicionamiento de los cambios texturales sobre la mayoría de las mismas.

2.3.2.2. Propiedades físicas

En la Tabla 2.13 se observa que todas las variables físicas analizadas, con la excepción de RP, respondieron al efecto del diferente uso de la tierra, obteniendo a su vez todas un CV menor al 40%.

Tabla 2.13. Análisis de varianza de las propiedades físicas para las profundidades de 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2) cm. Se presentan el grado de ajuste (R²), coeficiente de variación (CV) y valor de probabilidad (p).

Variables Profundidad	R ²		CV		Valor p	
	1	2	1	2	1	2
DMP _p	0,97	0,88	9,44	13,29	<0,001	<0,001
DMP _r	0,99	0,93	8,24	24,00	<0,001	<0,001
DMP _m	0,88	0,63	18,18	19,58	<0,001	0,040
DMP _l	0,63	0,72	24,38	17,79	0,038	0,013
Da*	0,85	0,86	15,83	7,11	0,001	0,0019
Vinf	0,95	-	22,37	-	<0,001	-
RP*	0,58	0,26	4,88	24,92	0,063	0,474

DMP_p: diámetro medio ponderado promedio, DMP_r: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento rápido, DMP_m: diámetro medio ponderado correspondiente a disgregación mecánica, DMP_l: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento lento, Da: densidad aparente, Vinf: velocidad de infiltración, RP: resistencia a la penetración. 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm. *variables transformadas

De la misma manera que con la serie Perico, la RP de ambos estratos no se encontró condicionada por la diferente textura de los suelos, pero si debido a diferencias en el contenido hídrico de los suelos (Tabla 2.14).

Tabla 2.14. Coeficientes de correlación entre la resistencia a la penetración obtenida para ambos estratos con otras propiedades edáficas

Propiedades	RP1	RP 2
Arcilla	-0,40ns	0,07ns
Limo	-0,33ns	0,22ns
Arena	0,48ns	-0,15ns
Humedad edáfica	0,72**	-0,71**

RP resistencia a la penetración, 1: profundidad de 0 a 20 cm, 2: profundidad de 20 a 40 cm.

El intervalo de humedad de las mediciones hechas a campo estuvo entre 7 % y 16% (tabla 6 del anexo), corrigiendo los valores de RP para un contenido hídrico similar (7 %). En el estrato superficial los resultados de RP 1 corregidos (entre 1,29 MPa y 2,81 MPa) no fueron diferentes entre los suelos bajo agricultura, aunque esta propiedad fue superior en el sitio sin disturbio respecto a los tratamientos con cultivo de tabaco. A mayor profundidad, la RP 2 corregida (entre 2,25 MPa y 3,58 MPa) no fue distinta entre los distintos usos de la tierra analizados.

Por su parte, la RP sin corregir por humedad presentó valores de 0,8 a 1,9 MPa (0-20 cm) y de 2 a 2,8 MPa (20 – 40 cm). Por lo tanto, en el estrato mas profundo se superaron los valores críticos para el desarrollo de raíces (Bengough *et al.*, 2006; Da Silva *et al.*, 2015; Silva & Fernandes, 2014).

De igual manera que lo sucedido con la otra serie de suelos, las diferencias encontradas en las propiedades físicas se debieron casi con exclusividad al efecto de la actividad agrícola, no existiendo un impacto significativo de la distinta sucesión de cultivos implementada sobre su comportamiento (Tabla 2.15). De esta manera, el suelo no disturbado presentó una mejor estabilidad estructural, menor densidad aparente en el estrato superior y una mejor tasa de infiltración superficial. Por su parte, la Da subsuperficial del suelo no disturbado no se diferenció de TV pero en ambos casos esta propiedad fue menor a la de TM y TG, existiendo a su vez diferencias entre estos dos últimos tratamientos.

Tabla 2.15. Valores promedio y desvío estándar para aquellas variables físicas que presentaron diferencias significativas entre tratamientos en la serie Monterrico.

Tratamientos	T	TM	TV	TG
Variables				
DMP_p 1 (mm)	2,53 ± 0,06 b	1,13 ± 0,18 a	1,33 ± 0,19 a	0,99 ± 0,10 a
DMP_p 2 (mm)	2,32 ± 0,28 b	1,31 ± 0,27 a	1,30 ± 0,12 a	1,21 ± 0,05 a
DMP_r 1 (mm)	1,89 ± 0,03 b	0,41 ± 0,09 a	0,44 ± 0,09 a	0,34 ± 0,02 a
DMP_r 2 (mm)	1,69 ± 0,22 b	0,44 ± 0,07 a	0,60 ± 0,29 a	0,35 ± 0,01 a
DMP_m1 (mm)	2,72 ± 0,08 b	1,28 ± 0,37 a	1,63 ± 0,34 a	0,96 ± 0,33 a
DMP_m2 (mm)	2,01 ± 0,30 b	1,47 ± 0,23 a	1,35 ± 0,42 a	1,18 ± 0,17 a
DMP_i1 (mm)	2,98 ± 0,09 b	1,70 ± 0,15 a	1,91 ± 0,83 a	1,66 ± 0,53 a
DMP_i2 (mm)	3,28 ± 0,33 b	2,02 ± 0,54 a	1,95 ± 0,50 a	2,10 ± 0,20 a
Da 1 (Mg m ⁻³)	1,16 ± 0,07 a	1,45 ± 0,08 b	1,38 ± 0,06 b	1,43 ± 0,04 b
Da 2 (Mg m ⁻³)	1,41 ± 0,03 a	1,67 ± 0,06 c	1,49 ± 0,06 a	1,54 ± 0,03 b
Vinf (cm h ⁻¹)	3,97 ± 0,07 b	0,87 ± 0,53 a	1,23 ± 0,48 a	0,69 ± 0,24 a

DMP_p: diámetro medio ponderado promedio, DMP_r: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento rápido, DMP_m: diámetro medio ponderado correspondiente a disgregación mecánica, DMP_i: diámetro medio ponderado correspondiente al humedecimiento lento, Da: densidad aparente, Vinf: velocidad de infiltración. T: situación testigo, TM: monocultivo de tabaco, TV: cultivo de tabaco con incorporación de verdeos, TG: cultivo de tabaco en rotación con gramíneas. 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Test DGC (p<0,05).

De acuerdo a las ecuaciones desarrolladas por Kaufman *et al.* (2010) y según la textura de los suelos analizados (Tabla 1.8), los valores óptimos y limitantes estimados para la densidad aparente estuvieron entre $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$ y $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$ para los primeros y entre $1,57 \text{ Mg m}^{-3}$ y $1,68 \text{ Mg m}^{-3}$ para los segundos. De esta manera, los resultados de Da 1 se ubicarían dentro de un rango óptimo, independientemente del uso de la tierra considerado. Por su parte, los valores de Da 2 correspondientes al testigo también serían óptimos, mientras que los deTV y TG se ubican en un rango intermedio entre óptimos y restrictivos, siendo los de TM limitantes para el crecimiento de las raíces. Un comportamiento similar se observó para la otra serie de suelos analizada.

La Da subsuperficial aumentó en todos los casos respecto a los valores determinados en superficie, y como ya se mencionó para la serie Perico, dicho incremento se debería a un proceso de compactación y reordenamiento de las partículas del suelo como consecuencia de las prácticas de laboreo (Bravo & Andreu, 2011).

La tasa de infiltración, de igual manera que en la serie Perico, fue superior en T respecto a los tratamientos agrícolas, siendo esta entre tres y cinco veces mayor a lo registrado en los suelos bajo cultivo. No obstante, los valores de velocidad de infiltración registrados en el presente estudio, resultaron muy bajos en comparación con los reportados por otros autores. En este sentido, Sanzano *et al.* (2005) trabajando sobre un Haplustol típico de textura franco limosa de la llanura Chacopampeana seca subhúmeda de la provincia de Tucumán, determinaron valores de $18,2$ y $3,2 \text{ cm h}^{-1}$ para una situación con bajo disturbio (monte natural) y monocultivo de soja bajo labranza convencional, respectivamente. Por su parte, Gonzalez *et al.* (2002) trabajando en sistemas tabacaleros bajo labranza convencional del sur de la provincia de Misiones, determinaron valores de infiltración de $53,9$ y $15,9 \text{ cm h}^{-1}$ para situaciones no alteradas y bajo cultivo, respectivamente. A su vez, considerando el umbral mínimo de

conductividad hidráulica saturada planteado por Reynolds *et al.* (2009), la tasa de infiltración básica de todos los suelos bajo agricultura, estuvo por debajo de dicho mínimo ($1,8 \text{ cm h}^{-1}$), mientras que esta fue superior en el suelo de la situación testigo. Este comportamiento fue similar al registrado en la serie Perico.

A su vez, si bien los resultados de Vinf en la situación de referencia fueron similares entre ambas series de suelo (Tablas 2.4 y 2.15), en TM, TV y TG la tasa de infiltración de la serie Monterrico fue superior en un 24 %, 41 % y 86 %, respectivamente, a la obtenida para la serie Perico. Estos resultados estarían manifestando para esta propiedad, una respuesta distinta de ambas series de suelo a los tratamientos evaluados.

Según la clasificación de estabilidad estructural planteada por Le Bissonnais (1996), las clases obtenidas por los dos estratos de los distintos tratamientos estuvieron entre medianamente estable y muy estable, obteniendo esta última categoría solo los suelos no disturbados (Tabla 2.16). Dicha clasificación, de la misma manera que cuando se la utilizó para la serie Perico, no fue sensible para distinguir el efecto del monocultivo de tabaco respecto a los otros dos tratamientos agrícolas. A su vez y con la excepción de lo ocurrido en TV, las categorías obtenidas en esta serie de suelos para los distintos tratamientos y profundidades evaluadas, fueron iguales a las registradas en la serie Perico.

Tabla 2.16. Clases de estabilidad estructural de acuerdo a los resultados del DMPp (Le Bissonnais, 1996), para los distintos tratamientos y profundidades evaluadas.

Profundidad Tratamientos	Superficial	Subsuperficial
T	Muy estable	Muy estable
TM	Medianamente estable	Estable
TV	Estable	Estable
TG	Medianamente estable	Medianamente estable

T: situación testigo, TM: monocultivo de tabaco, TV: cultivo de tabaco con incorporación de verdeos, TG: cultivo de tabaco en rotación con gramíneas.

Los valores de estabilidad estructural registrados en todos los tratamientos para ambas profundidades, mostraron el siguiente ordenamiento en cuanto al valor final del DMP: humedecimiento lento > disgregación mecánica > humedecimiento rápido. De esta manera, y pese a las diferencias texturales previamente señaladas entre ambas series de suelo, el efecto relativo de los pretratamientos sobre la rotura de los agregados fue similar, independientemente del uso de la tierra evaluado. Por lo mismo, surgen idénticos comentarios ya vertidos para la serie Perico, en cuanto a que los suelos correspondientes a la serie Monterrico también son muy susceptibles a la degradación física como resultado del estallido de los agregados por humedecimiento rápido, siendo el riego, el impacto de la gota de lluvia sobre el suelo descubierto y las labranzas los factores que incidieron fuertemente sobre el proceso de degradación física de estos suelos. Estos efectos fueron superiores a las posibles diferencias que pudieron haber generado en la estructura los diferentes tratamientos agrícolas evaluados.

2.3.2.3. Propiedades químicas

En esta serie de suelos, las diferencias en las propiedades químicas debidas al cambio en el uso de la tierra, ocurrieron fundamentalmente en el estrato superficial (Tabla 2.17). Salvo el pH, Mg y Na, las restantes variables del estrato de 0-20 cm

mostraron diferencias significativas entre algunas de las situaciones bajo estudio, mientras que a mayor profundidad solo PE, COA y Na fueron distintas según el uso de la tierra considerado. A su vez, y de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 2.17, la CE del estrato subsuperficial, COPT y COPG en ambas profundidades y COPF superficial presentaron un coeficiente de variación superior al 40%, por lo que posteriormente no serán consideradas para la confección del índice de calidad de suelo.

Tabla 2.17. Análisis de varianza de las propiedades químicas para las profundidades de 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2). Se presentan el grado de ajuste (R²), coeficiente de variabilidad (CV) y valor de probabilidad (p).

Variable Profundidad	R ²		CV		Valor p	
	1	2	1	2	1	2
pH	0,51	0,48	2,40	3,17	0,108	0,139
CE	0,79	0,50	20,98	50,58	0,005	0,117
NT	0,89	0,52	18,25	20,36	<0,001	0,103
COT	0,93	0,44	17,21	27,05	<0,001	0,175
COPT	0,82	0,13	46,21	42,26	0,002	0,764
COPG	0,81	0,22	48,90	46,86	0,003	0,556
COPF	0,84	0,51	40,60	31,62	0,001	0,107
COA	0,91	0,67	14,59	24,55	<0,001	0,023
Stock C	0,93	0,44	17,20	27,04	<0,001	0,174
Ca	0,65	0,07	9,69	15,48	0,033	0,888
Mg	0,12	0,47	23,37	15,87	0,771	0,148
Na	0,56	0,69	37,60	18,86	0,077	0,021
K	0,66	0,47	-	33,61	0,028*	0,151
PE	0,81	0,86	27,06	23,77	0,003	0,001

CE: conductividad eléctrica, Nt: nitrógeno total, PE: fósforo extractable, COT: carbono orgánico total, COPT: carbono orgánico particulado total, COPG: carbono orgánico particulado grueso, COPF: carbono orgánico particulado fino, COA: carbono orgánico asociado, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, K: potasio.*variable transformada

Este comportamiento de la serie Monterrico establece alguna disparidad con lo sucedido en la serie Perico, ya que esta última había mostrado diferencias de acuerdo a los distintos usos de la tierra evaluados para el pH, CE, NT, COT y Stock C de ambas profundidades, como así también se observaron algunas desigualdades entre ambas series de suelo en la respuesta del Ca, Mg, Na y K.

A su vez, y también de manera diferente a lo observado con la serie Perico, en este suelo muy pocas variables químicas fueron sensibles al efecto de los distintos

manejos del cultivo de tabaco (Tabla 2.18), observándose en forma mayoritaria diferencias significativas solo al comparar la situación sin disturbio respecto a los suelos bajo agricultura. Unicamente Ca 1 presentó menores valores en TG respecto a los restantes tratamientos agrícolas, mientras Na 2 fue significativamente menor en TV respecto a TG y TM.

Como ya se mencionó también para la serie Perico, el menor contenido de Ca 1 en TG es atribuible a una mayor absorción de este nutriente por parte del cultivo de tabaco, debido a un superior rendimiento de esta especie cuando está en rotación con gramíneas (comunicación personal de productores de la región). Al respecto, Rojo (2008) señaló que el potasio, nitrógeno y calcio son los elementos más demandados por el tabaco. Asimismo, León González *et al.* (2007) al evaluar rotaciones de maíz con tabaco, reportaron que el rendimiento de este último cultivo se incrementó en un 14,5 % y por consiguiente se comprobó una mayor absorción de calcio. Este incremento en los rendimientos del tabaco se debe a que la rotación con gramíneas produce una reducción de plagas y enfermedades, menor presencia de malezas, el uso más eficiente del agua, el incremento en la calidad del suelo y a una mayor actividad biológica (Nyamangara *et al.*, 2013).

Tabla 2.18. Valores promedio y desvío estándar para aquellas variables químicas que presentaron diferencias significativas entre tratamientos en la serie Monterrico.

Tratamientos Variables	T	TM	TV	TG
CE 1 (dSm ⁻¹)	0,46 ± 0,07 a	0,88 ± 0,30 b	1,06 ± 0,16 b	1,29 ± 0,16 b
NT1 (%)	0,26 ± 0,05 b	0,09 ± 0,01 a	0,12 ± 0,02 a	0,14 ± 0,03 a
COT 1 (%)	3,65 ± 0,48 b	0,95 ± 0,09 a	1,43 ± 0,11 a	1,80 ± 0,45 a
COPT 1 (%)	1,65 ± 0,46 b	0,20 ± 0,04 a	0,25 ± 0,03 a	0,77 ± 0,47 a
COPG 1 (%)	1,26 ± 0,34 b	0,12 ± 0,04 a	0,17 ± 0,04 a	0,65 ± 0,041a
COPF 1 (%)	0,38 ± 0,12 b	0,07 ± 0,01 a	0,08 ± 0,02 a	0,12 ± 0,06 a
COA 1 (%)	2,01 ± 0,33 b	0,76 ± 0,06 a	1,18 ± 0,08 a	1,02 ± 0,12 a
COA 2 (%)	0,44 ± 0,15 a	0,91 ± 0,07 b	1,05 ± 0,33 b	0,76 ± 0,12 b
StockC1 (Mg ha ⁻¹)	79,96 ± 10,51 b	20,83 ± 2,07 a	31,29 ± 2,49 a	39,37 ± 9,86 a
Ca 1 (Cmol ⁺ kg ⁻¹)	11,22 ± 0,62 b	11,44 ± 1,54 b	12,28 ± 0,93 b	9,09 ± 0,07 a
Na 2 (Cmol ⁺ kg ⁻¹)	0,32 ± 0,06 a	0,44 ± 0,10 b	0,31 ± 0,05 a	0,53 ± 0,09 b
K 1 (mg.kg ⁻¹)	234 ± 114 a	480 ± 158 b	558 ± 147 b	495 ± 98 b
PE 1 (mg.kg ⁻¹)	12,00 ± 2,65 a	52,33 ± 14,19 b	57,67 ± 8,5 b	69,00 ± 19,67 b
PE 2 (mg.kg ⁻¹)	10,67 ± 1,15 a	52,67 ± 16,65 b	50,67 ± 13,05 b	71,33 ± 6,03 b

CE: conductividad eléctrica, Ca: calcio, Na: sodio, PE: fosforo extractable, K: potasio, COT: carbono orgánico total, COPT: carbono orgánico particulado total, COPG: carbono orgánico particulado grueso, COPF: carbono orgánico particulado fino, NT: nitrógeno total, COA: carbono orgánico asociado, Stock c: stock de carbono. 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Test DGC (p<0,05). T: situación testigo, TM: monocultivo de tabaco, TV: cultivo de tabaco con incorporación de verdeos, TG: cultivo de tabaco en rotación con gramíneas.

La CE superficial de los suelos agrícolas se incrementó entre dos y tres veces respecto a lo registrado en el suelo de referencia, diferenciándose estadísticamente esta última situación con los tratamientos cultivados (Tabla 2.18). Este comportamiento y de igual manera que lo analizado para la serie Perico, es atribuible a la calidad del agua de riego utilizada y a la fertilización. La calidad del agua para riego usada presenta una CE

en promedio de $0,302 \text{ dS.m}^{-1}$ (Lab. suelos y agua FCA – UNJu.), siendo clasificada como C2 según Richards (1954). Estas aguas son de salinidad moderada, pudiendo ser utilizadas en casi todos los cultivos con suelos de buena permeabilidad. No obstante, los valores de CE edáficos determinados no son limitantes para este cultivo (Ballari, 2005). La CE está influenciada por una combinación de propiedades físico-químicas del suelo, como pueden ser la textura, el contenido de materia orgánica, humedad del suelo, capacidad de intercambio catiónico, salinidad, pH, Ca^{+2} y Mg^{+2} y tipo de suelo (Corwin & Lesch, 2005; Sudduth *et al.*, 2005; Serrano *et al.*, 2010; Terrón *et al.*, 2011; Peralta *et al.*, 2013).

El K que no se había mostrado como variable sensible a los distintos usos de la tierra en la serie Perico, en el estrato superficial de los suelos bajo cultivo de la serie Monterrico tuvo un incremento de alrededor del 118 % en relación a los de la situación testigo (Tabla 2.18). Este macronutriente junto con el fósforo, es aplicado todos los años en el cultivo de tabaco como fertilizante de base. Al respecto, Diez (2011) al evaluar la respuesta a la fertilización con K sobre suelos tabacaleros ubicados en Chicoana (provincia de Salta), reportó niveles elevados de este nutriente, aludiendo que las dosis aplicadas por los productores de dicha zona fueron superiores a los requerimientos del cultivo. En este sentido, las dosis de K aplicadas pueden exceder dos a tres veces los requerimientos del tabaco (Fernández de Ulivarri, 1990). Debe tenerse en cuenta, que los suelos pueden acumular K tras haber sido fertilizados con altas dosis durante varios años, suprimiendo así la posterior respuesta a la fertilización, como fue informado por Jauregui (1973) y citado por Diez (2011).

De esta manera, los valores de pH, CE, Ca y Mg reportados para la serie Monterrico, no serían limitantes para la producción de los cultivos (Ballari, 2005).

En ambas profundidades evaluadas y de la misma manera que lo ocurrido en la serie Perico, el PE de los suelos bajo cultivo superó significativamente a los correspondientes sin disturbio, con incrementos de cuatro a seis veces (Tabla 2.18). Los valores reportados en los suelos cultivados correspondieron a niveles elevados, lo que se atribuye a la práctica continua de la fertilización inorgánica desde hace más de 30 años. Similares resultados reportaron Cánepa Ramos *et al.* (2015) y Perez Brandán *et al.* (2011) en sistemas tabacaleros de la provincia de Salta.

En los suelos cultivados, de la misma manera que en la serie Perico, se determinó una caída del COT superficial respecto a la situación testigo (TM: 74 %; TV: 71 %; TG: 51 %), siendo esta propiedad significativamente menor en los primeros mencionados. Sin embargo y de manera diferente a lo sucedido en dicha serie, los tratamientos en donde hubo una mayor incorporación de carbono orgánico a través de la implementación de prácticas como el abono verde y/o la rotación con gramíneas, no lograron diferenciarse estadísticamente en esta propiedad respecto al monocultivo de tabaco. No obstante, se observó una tendencia a un mayor contenido de este elemento en los dos primeros tratamientos mencionados ($p < 0,10$), respecto al último citado. En este sentido, se registraron incrementos del COT en TV y TG en relación a TM, del 50 % y del 89 %, respectivamente. Estos resultados ponen en evidencia que es necesario un mayor aporte de materia seca que tienda a incrementar el contenido de materia orgánica (Martinez Robaina *et al.*, 2018). De lo contrario no habrá un incremento de dicho elemento, tal como lo reportaron Quintana *et al.* (2011) y Hernández Rodríguez *et al.* (2015).

El Stock C 1 tuvo un similar comportamiento al del COT 1, logrando el suelo de referencia superar significativamente a aquellos bajo cultivo, mientras que entre estos

últimos no hubo diferencias en esta propiedad de acuerdo con los distintos sistemas de manejo del cultivo de tabaco.

En el COT se observó en la situación testigo un proceso de estratificación mayor que en la serie Perico, obteniendo la relación COT1/COT2 un valor de 4,84, mientras que en los tratamientos bajo agricultura de la serie Monterrico esta relación estuvo por debajo de 2 (entre 0,83 y 1,66). Es por eso que no se pudieron determinar para esta propiedad y a esta profundidad, diferencias significativas entre la situación testigo y los suelos bajo agricultura (Tabla 2.17).

El nitrógeno total superficial tampoco presentó diferencias entre los distintos suelos bajo agricultura, aunque esta propiedad fue significativamente mayor en la situación sin disturbio respecto a lo determinado en los restantes tratamientos. En este sentido, en los sistemas de producción agrícola se registró una caída promedio de este elemento de un 54 %, en comparación con los suelos sin disturbar. Al respecto, Pérez *et al.* (2010) trabajando en sistemas agrícolas con monocultivo de tabaco, reportaron mermas de un 44 % para este nutriente.

El COPT, COPG y el COPF superficiales, de la misma manera que en la serie Perico, tampoco fueron sensibles al efecto de la diferente sucesión de cultivos, logrando únicamente establecerse desigualdades entre los resultados de los suelos usados como referencia (T) y los correspondientes a los restantes tratamientos, aportando T valores significativamente mayores para los tres parámetros mencionados (Tabla 2.18). Rojas *et al.* (2015), registraron incrementos del COPT al evaluar una rotación de algodón con presencia de gramíneas y mayor frecuencia de cultivos por año, atribuyéndole el aumento del COPT al mayor volumen de raíces generado por la inclusión de gramíneas en la rotación.

Si bien para TM y TV el COPT 1 representó entre el 17 % y el 21 % del COT 1, respectivamente, para TG esta proporción fue del 43 %, cifra similar a la obtenida por la situación testigo (45 %). A su vez, la disminución de COPT 1 en los suelos bajo agricultura respecto a la situación sin disturbio, fue distinta según los diferentes tratamientos (TM: 88 %; TV: 85 %; TG: 53 %). Estos resultados están marcando que si bien no hubo diferencias significativas en esta fracción lábil del carbono entre las diferentes formas de manejo del cultivo de tabaco evaluadas, hubo un comportamiento diferente en TG respecto al resto, al registrar dicho tratamiento una mayor retención del COPT 1. Este comportamiento difiere de lo hallado en la serie Perico, en donde no se observaron diferencias tan marcadas entre tratamientos, tanto en la proporción del COPT 1 respecto al COT 1, como en la pérdida de COPT 1 en relación a la situación testigo.

Al igual que en la serie Perico, las relaciones COPT1/COPT2, COPF1/COPF2 y COPG1/COPG2 fueron altas para la situación testigo (entre 4,7 y 7,7), mostrando un fuerte proceso de estratificación, mientras que para los suelos bajo agricultura la misma estuvo por debajo de 2, con la excepción de COPT1/COPT2 y COPG1/COPG2 para el tratamiento con rotación de gramíneas, siendo sus resultados 2,4 y 2,9, respectivamente.

El COA (0-20 cm) correspondiente a la situación testigo superó ampliamente al de los suelos bajo cultivo. A su vez, y de manera diferente a lo ocurrido en la serie Perico, no se manifestaron diferencias en esta propiedad entre los tratamientos agrícolas (Tabla 2.18). Varios autores han afirmado que los valores de COA no deberían ser muy diferentes entre suelos con diferentes prácticas de manejo (Cambardella y Elliott, 1992; Eiza *et al.*, 2005; Baisden & Amundson, 2003; Bruun *et al.*, 2007; Galantini & Suñer, 2008). Esta propiedad presentó distintas proporciones respecto al COT de acuerdo a los distintos usos de la tierra (T: 55 %; TM: 79%; TV: 82 %; TG: 57 %), siendo el principal

constituyente del carbono orgánico total, lo cual coincide con los resultados obtenidos por Morón & Sawchick (2002), Tan *et al.* (2007) y Galantini & Suñer (2008), quienes señalaron que las fracciones orgánicas más abundantes en el suelo son las de ciclado más lento. A su vez, y de la misma manera que lo sucedido en la serie Perico, la merma en esta propiedad en superficie respecto a la situación testigo fue mayor en TM respecto a los restantes tratamientos (TM: 62 %, TV: 41 %, TG: 49 %).

Por su parte, en el COA subsuperficial tampoco hubo diferencias significativas entre los distintos manejos del cultivo de tabaco, algo que si ocurrió en la serie Perico, llamando la atención a su vez que esta propiedad fue significativamente menor en el suelo de la situación testigo respecto a los agrícolas. Este comportamiento se debió al proceso de estratificación sufrido por esta propiedad en los suelos sin disturbio (relación COA1/COA2: 4,56), mientras que en los cultivados debido al efecto de las labranzas y del aporque, se generó una relación COA1/COA2 entre 0,8 y 1,3.

En la serie Monterrico tampoco se observaron correlaciones significativas entre las distintas fracciones del carbono evaluadas en ambas profundidades con el contenido de arcilla y/o de arcilla más limo (Tabla 2.19), con la excepción de lo ocurrido entre el COPF2 y el contenido de arcilla subsuperficial. No obstante, al hacer un análisis de varianza de la relación COPF2/arcilla2, no se observaron diferencias estadísticas significativas entre los distintos usos de la tierra analizados, de la misma manera que cuando se consideró solamente a COPF2.

Tabla 2.19. Coeficientes de correlación determinados entre los resultados de las distintas fracciones del carbono con el contenido de arcilla y de arcilla más limo de ambas profundidades de los suelos evaluados.

Profundidad Variables	0 a 20 cm		20 a 40 cm	
	% arcilla	% arcilla + % limo	% arcilla	% arcilla + % limo
COT	-0,46ns	-0,42ns	0,52ns	0,50ns
COA	-0,27ns	-0,30ns	0,49ns	0,48ns
COPT	-0,56ns	-0,47ns	0,29ns	0,26ns
COPF	-0,59*	-0,50ns	0,69*	0,55ns
COPG	-0,55ns	-0,46ns	0,10ns	0,10ns

COT: carbono orgánico total, COPT: carbono orgánico particulado total, COPG: carbono orgánico particulado grueso, COPF: carbono orgánico particulado fino, COA: carbono orgánico asociado. Ns: no significativo. *p<0,05.

Por su parte y de la misma manera que lo sucedido con la serie de suelos Perico, las correlaciones entre las distintas fracciones del carbono y las propiedades físicas, se debieron exclusivamente al efecto del testigo, no existiendo vinculación entre las mismas al trabajar solamente con los resultados de los suelos bajo agricultura. Esto es lógico, en la medida que no hubo diferencias estadísticas en las propiedades físicas y en las distintas fracciones del carbono entre los suelos cultivados.

2.3.2.4. Propiedades biológicas

En la Tabla 2.20 se comprueba que el CBM y RB correspondiente a ambas profundidades lograron diferenciarse por el efecto del distinto uso de la tierra, mientras que qCO_2 y CBM/COT no resultaron ser indicadores sensibles para evaluar las diferencias entre dichos usos. Al mismo tiempo, solo qCO_2 (20-40 cm) presentó un coeficiente de variación superior al 40%. De esta manera, esta serie de suelos tuvo un comportamiento diferente en los parámetros biológicos respecto a la serie Perico, ya que en esta última el CBM/COT de ambas profundidades se había mostrado como un

indicador adecuado para separar los efectos de TG respecto a los restantes tratamientos bajo agricultura, mientras que el RB subsuperficial no había sido sensible al diferente uso de la tierra.

Tabla 2.20. Análisis de varianza de las propiedades biológicas para las profundidades de 0-20 cm (1) y 20-40 cm (2). Se presentan el grado de ajuste (R^2), coeficiente de variabilidad (CV) y valor de probabilidad (p).

Profundidad	R^2		CV		Valor p	
	1	2	1	2	1	2
Variables						
CBM	0,90	0,63	20,89	25,46	<0,001	0,038
RB	0,94	0,68	8,69	34,53	<0,001	0,022
CBM/COT	0,34	0,59	29,63	34,37	0,323	0,055
qCO₂	0,51	0,48	24,31	41,52	0,110	0,061

CBM: carbono de biomasa microbiana, RB: respiración basal, CBM/COT: cociente microbiano, qCO₂: coeficiente metabólico. 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm. T: situación testigo, TM: monocultivo de tabaco, TV: cultivo de tabaco con incorporación de verdeos, TG: cultivo de tabaco en rotación con gramíneas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Test DGC ($p < 0,05$).

El comportamiento de qCO₂ en la serie Monterrico también mostró diferencias en relación a lo observado en la serie Perico, siendo los valores de esta propiedad en los tratamientos T, TM, TG y TV registrados en superficie los siguientes: $3,24 \cdot 10^{-3}$; $4,27 \cdot 10^{-3}$; $5,22 \cdot 10^{-3}$ y $5,67 \cdot 10^{-3}$ $\mu\text{g C-CO}_2 \cdot \mu\text{g}^{-1} \text{CBM h}^{-1}$, respectivamente, mientras que a mayor profundidad y siguiendo el mismo orden se determinaron estos resultados: $5,77 \cdot 10^{-3}$; $2,67 \cdot 10^{-3}$; $2,23 \cdot 10^{-3}$ y $3,11 \cdot 10^{-3}$ $\mu\text{g C-CO}_2 \cdot \mu\text{g}^{-1} \text{CBM h}^{-1}$. En general se comprobó un rango de valores similar entre ambas series de suelo, pero su ordenamiento respecto a los distintos tratamientos fue diferente. En superficie, la situación de referencia obtuvo valores parecidos en ambos suelos, mientras que en la serie Monterrico TG registró un resultado mayor. A mayor profundidad, los valores de qCO₂ en T fueron mayores que en la serie Perico, mientras que los de los restantes tratamientos fueron menores. De igual manera que en la serie Perico, en esta serie de suelos no se registraron diferencias significativas para esta propiedad, no obstante lo cual y como consecuencia del distinto comportamiento detallado previamente, no se pudieron agrupar los resultados obtenidos de la misma manera que en la serie Perico,

quedando en superficie solo T con un valor inferior, mientras que en profundidad los menores resultados correspondieron a TM y TG.

Respecto a la relación CBM/COT, los resultados obtenidos para la serie Monterrico también fueron menores al 2%. En este sentido, y de acuerdo con los tratamientos T, TM, TG y TV, en superficie se registraron los siguientes valores: 1,07 %; 1,44 %; 1,12 % y 0,90 %, respectivamente, mientras que a mayor profundidad y siguiendo el mismo orden estos fueron: 1,10 %; 0,57 %; 1,18 % y 0,56 %.

En la Tabla 2.21 se observa que el CBM 2 y la RB 1 fueron superiores en TG respecto a los restantes tratamientos bajo agricultura, no existiendo diferencias significativas entre TM y TV. Para los restantes indicadores biológicos mostrados en dicha Tabla (CBM1 y RB2), no hubo diferencias significativas entre los tratamientos agrícolas, mostrando la condición sin disturbio valores superiores para dichas propiedades, al igual que con RB1.

Tabla 2.21. Valores promedio y desvío estándar para aquellas variables biológicas que presentaron diferencias significativas entre tratamientos para la serie Monterrico.

Tratamientos Variables	T	TM	TV	TG
CBM 1 ($\mu\text{g C g}^{-1}$ suelo)	383,64 $\pm$ 74,16 b	136,05 $\pm$ 14,56 a	126,29 $\pm$ 21,80 a	184,50 $\pm$ 36,56 a
CBM 2 ($\mu\text{g C g}^{-1}$ suelo)	80,99 $\pm$ 11,82 a	64,37 $\pm$ 12,89 a	68,29 $\pm$ 5,62 a	122,2 $\pm$ 38,6 b
RB 1 ($\mu\text{gC-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ suelo h^{-1})	1,21 $\pm$ 0,03 c	0,58 $\pm$ 0,08 a	0,69 $\pm$ 0,12 a	0,94 $\pm$ 0,03 b
RB 2 ($\mu\text{gC-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ suelo h^{-1})	0,46 $\pm$ 0,18 b	0,16 $\pm$ 0,02 a	0,21 $\pm$ 0,05 a	0,26 $\pm$ 0,03 a

CBM: carbono de biomasa microbiana, RB: respiración basal, CBM/COT: cociente microbiano.1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm. T: situación testigo, TM: monocultivo de tabaco, TV: cultivo de tabaco con incorporación de verdeos, TG: cultivo de tabaco en rotación con gramíneas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos. Test DGC ($p < 0,05$).

A su vez, y también igual a lo determinado para la serie Perico, se pudieron comprobar coeficientes de correlación significativos entre el contenido de carbono

orgánico superficial y CBM 1 (0,84; $P=0,0005$) y con RB 1 (0,90; $P=0,0001$). A mayor profundidad tampoco existieron correlaciones significativas entre los mencionados parámetros, como tampoco las hubo entre el COT y el qCO_2 correspondientes a ambas profundidades.

Estos resultados muestran de la misma manera que con la serie Perico, mejoras en la condición biológica del suelo a partir de la rotación con gramíneas, aunque en dicho suelo este comportamiento fue para un mayor número de propiedades y profundidades. También, en la serie Perico RB 1 fue un parámetro biológico que sirvió para diferenciar la respuesta del suelo en TV respecto a TM, cosa que en esta serie no ocurrió. Por lo tanto, si bien en la serie de suelos Monterrico hubo una tendencia general en las propiedades biológicas similar a lo encontrado en Perico, estas presentaron menos contrastes entre los distintos tratamientos analizados.

2.3.2.5 Indicadores seleccionados

En la Tabla 2.22 se puede observar el Conjunto Mínimo de Indicadores (CMI), compuesto por variables físicas, químicas y biológicas que fueron seleccionadas para la construcción de los índices de calidad de suelo que se desarrollan en el Capítulo III. De la misma manera que con la serie Perico, se seleccionaron solamente aquellas que presentaron en el análisis de varianza un valor de $p < 0,05$ y un coeficiente de variación menor al 40 %.

Tabla 2.22. Conjunto mínimo de indicadores seleccionados para la serie Monterrico.

Conjunto Mínimo de Indicadores	
Físicas	DMP _p 1 y 2, Da 1 y 2 y Vinf
Químicas	CE 1, Ca 1, Na 2, PE 1 y 2, COT 1, NT1, COA 1 y 2, Stock C 1
Biológicas	CBM 1 y 2, RB 1 y 2

Vinf: velocidad de infiltración, DMP_p: diámetro medio ponderado promedio, Da: densidad aparente, COT: carbono orgánico total, NT: nitrógeno total, PE: fósforo extractable, COA: carbono orgánico asociado, CE: conductividad eléctrica, Ca: calcio, Na: sodio, CBM: carbono de biomasa microbiana, RB: respiración basal. 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm.

2.4. CONCLUSIONES

2.4.1 Serie Perico

La situación sin disturbio presentó una mejor estabilidad estructural, menor densidad aparente en profundidad y mayor tasa de infiltración superficial respecto a los suelos bajo agricultura.

No existió un efecto significativo de los diferentes tratamientos agrícolas sobre las propiedades físicas edáficas de ambas profundidades analizadas, dado que las numerosas labores aplicadas al cultivo de tabaco, el sistema de riego empleado y la falta de cobertura del suelo en una parte del año, constituyeron factores que generaron disturbios que superaron en magnitud a las posibles diferencias generadas por la distinta sucesión de cultivos estudiada.

Algunas variables químicas (pH, PE y CE) mostraron el efecto de la fertilización y/o del riego sobre el suelo, pero sin diferenciarse las misas entre los tratamientos bajo agricultura, con la excepción de lo sucedido en el estrato subsuperficial de TG.

Dentro de las distintas fracciones del carbono, solo el COT, COA y Stock C superficiales respondieron favorablemente a la inclusión de gramíneas o a la incorporación de abonos verdes en la rotación agrícola, mientras que a mayor profundidad solo hubo una respuesta positiva de estas variables en el tratamiento con abonos verdes.

Todos los tratamientos agrícolas presentaron en superficie una superior caída del COPT respecto al COA, sin poder comprobarse un efecto significativo de TG y TV en el COPTG y COPTF respecto a TM, existiendo una mayor pérdida relativa del carbono mas recalcitrante (COA) en este último tratamiento en relación a los restantes sistemas de conducción del tabaco.

Las propiedades biológicas mostraron una mejor respuesta a los tratamientos analizados respecto a lo sucedido con las variables físicas y químicas, diferenciándose TG en ambas profundidades de TM al mostrar mayor CBM y una relación CBM/COT mas favorable, teniendo a su vez RB 1 un mejor comportamiento en TG y TV respecto al monocultivo de tabaco.

2.4.2 Serie Monterrico

El comportamiento de las propiedades físicas en esta serie de suelo fue muy similar a lo encontrado en la serie Perico, siendo las diferencias encontradas debidas casi con exclusividad al efecto generado por la actividad agrícola, no existiendo un impacto significativo sobre ellas de la distinta sucesión de cultivos implementada.

Como en la serie Perico y debido al efecto del riego y de la fertilización, en los tratamientos agrícolas de la serie Monterrico se comprobaron aumentos en el PE de

ambos estratos pero solo en la CE superficial, al mismo tiempo que no se observaron cambios en el pH, determinándose además un superior valor del K superficial, siendo estas dos últimas observaciones diferentes a lo registrado en la otra serie de suelo.

Ninguna de las fracciones del carbono orgánico analizadas respondió al efecto de los diferentes tratamientos agrícolas, no obstante lo cual se observó una tendencia en los resultados de un superior contenido del COT 1 en TV y TG respecto a TM.

De la misma manera que lo observado en la serie Perico, se comprobó en TM una mayor proporción en la reducción del COA superficial respecto a lo sucedido en los otros dos tratamientos agrícolas.

De manera diferente a lo sucedido en la serie Perico, TG mostró una sustancial y menor reducción en el COPT superficial respecto a TV y TM, al mismo tiempo que dicho tratamiento mostró una similar proporción de esa variable respecto al COT 1 que la determinada en la situación testigo.

Si bien TG se diferenció en algunas propiedades biológicas (CBM 2 y RB 1) del resto de los tratamientos agrícolas, el número de contrastes favorables para dicho uso de la tierra fue menor al observado en la serie Perico, al mismo tiempo que TV no se diferenciación de TM en ninguna de ellas.

El conjunto mínimo de indicadores seleccionado para la serie Monterrico fue menor que el correspondiente a la serie Perico, sobre todo al tomar en cuenta a las variables químicas, que para el primer suelo mencionado no fueron incluídas entre otras a las fracciones lábiles del carbono (COPT1 y COPG1) y el pH1 y pH2.

ELABORACIÓN DE DISTINTOS ÍNDICES DE CALIDAD PARA CADA UNA DE LAS SERIES DE SUELO Y SU COMPARACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS USOS DE LA TIERRA ANALIZADOS

3.1. INTRODUCCIÓN

La construcción de índices de calidad de suelo mediante el análisis de componentes principales, es un método objetivo que a la hora de elegir un conjunto mínimo de indicadores, utiliza una serie de herramientas estadísticas para evitar la redundancia de datos (Doran & Parkin 1996; Andrews, *et al.*, 2002). Se basa principalmente de un enfoque objetivo, ya que el procedimiento estadístico se encargará de seleccionar un bajo número de parámetros de suelo necesarios para calcular el índice de calidad de suelo en función de las variaciones presentes en todo el conjunto de datos.

Con la finalidad de elaborar los índices de calidad de suelo para ambas series, primeramente se realizó un análisis de componentes principales considerando en forma conjunta a todas las variables seleccionadas (A) o agrupando a estas en físicas, químicas o biológicas (B).

3.2. HIPÓTESIS

1. Las propiedades biológicas seleccionadas para el índice de calidad de suelo, tienen mayor gravitación en la diferenciación de los tratamientos agrícolas, al ser estas más sensibles que las variables químicas y físicas.
2. El índice de calidad de suelo generado considerando en forma separada a las propiedades físicas, químicas y biológicas, presenta una mejor capacidad para

discriminar el efecto de la incorporación de gramíneas o abonos verdes al monocultivo de tabaco.

3. El índice de calidad de suelo construido para cada serie, presenta una capacidad diferente para discriminar los efectos de los distintos tratamientos analizados.

3.3. OBJETIVOS

- Elaborar aplicando dos criterios distintos, diferentes índices de calidad para dos suelos característicos del Valle los Pericos (Valle Templados, Provincia de Jujuy), que permitan evaluar y monitorear en la región bajo estudio, los efectos de distintas prácticas de manejo aplicadas al cultivo de tabaco bajo labranza convencional y riego.
- Analizar en cada suelo estudiado, la sensibilidad de los índices de calidad generados, en relación a su capacidad de discriminar los efectos edáficos producidos por las diferentes prácticas de manejo consideradas en el cultivo de tabaco bajo labranza convencional y riego.
- Comprobar si la diferente forma de construcción de los índices de calidad de suelo, altera su capacidad de discriminación entre los distintos tratamientos analizados.
- Determinar mediante los índices de calidad generados, el o los manejos del cultivo de tabaco mas adecuados para mejorar la calidad del suelo respecto a la resultante del monocultivo.
- Evaluar si el comportamiento de los índices de calidad generados en los dos suelos evaluados resultó distinto.

3.4. Construcción de los índices

Con la finalidad de elaborar los índices de calidad de suelo para ambas series, primeramente se realizó un análisis de componentes principales, considerando en forma conjunta a todas las variables seleccionadas (A) o separando a estas en diferentes grupos: físicas, químicas o biológicas (B). Los resultados de dicho análisis se presentan en las Tablas 3.1 y 3.2.

3.4.1. Serie de suelos Perico

Tabla 3.1. Autovalores para las CPs seleccionadas en cada caso y autovalores para las variables físicas, químicas y biológicas en la serie de suelo Perico. Proporción: proporción de la variabilidad explicada por cada CP.

Análisis de componentes principales								
Variables Consideradas	Físicas		Químicas		Biológicas			
	Físicas		Químicas		Biológicas			
CP	1	2	1	2	1	2	1	2
Autovalores	16,85	4,85	2,62	0,98	12,5	3,25	3,42	1,04
Proporción	0,63	0,18	0,65	0,22	0,68	0,18	0,68	0,21
Autovectores								
DMP 1	0,22	0,02	0,6	-0,1				
DMP2	0,2	0,1	0,54	0,03				
ARENA 2	0,06	-0,26	0,29	0,92				
Da2	-0,21	-5,6*10 ⁻⁴	-0,51	0,37				
COPT 1	0,23	0,06			0,28	-0,01		
COA 1	0,22	-1,1*10 ⁻³			0,25	2*10 ⁻³		
COPG 1	0,23	0,06			0,28	-0,01		
COT 1	0,24	0,04			0,29	-4,6*10 ⁻³		
stock C 1	0,24	0,03			0,29	-0,02		
pH1	0,23	-0,01			0,27	-0,11		
CE 1	-0,21	0,05			-0,24	0,15		
Na 1	-0,07	0,37			-0,06	0,52		
NT 1	0,24	0,04			0,28	-8,2*10 ⁻⁴		
PE 1	-0,2	0,11			-0,22	0,25		
COA2	0,18	0,24			0,22	0,29		
COT 2	0,19	0,22			0,23	0,28		
pH2	0,24	-0,06			0,27	-0,14		
CE 2	-0,2	0,1			-0,22	0,11		
Ca 2	0,03	0,39			0,05	0,44		
Mg 2	0,16	0,29			0,2	0,28		
NT 2	0,15	0,25			0,19	0,33		
PE 2	-0,2	0,17			-0,22	0,24		
CBM 1	0,22	-0,15					0,49	-0,22
RB 1	0,21	-0,07					0,45	-0,44
CBM/COT 1	-0,04	-0,34					0,26	0,82
CBM 2	0,19	-0,22					0,52	-0,08
CBM/COT 2	0,1	-0,35					0,46	0,29

3.4.1.1. Índice aditivo ponderado considerando todas las variables conjuntamente (ICSP A)

A partir del análisis de componentes principales (Tabla 3.1), quedaron seleccionados el CP 1 y CP 2. El primero explicó un 64 % y el segundo un 18 % de la variabilidad total del modelo. De las propiedades incluidas dentro del CP 1, quedaron seleccionadas COPT 1, COA 1, COPG 1, COT 1, pH 1, pH 2, NT 1, CBM 1, Stock C1 y DMP_p 1, siendo el COT 1 la propiedad que presentó la mayor suma de correlaciones. El resto se descartó por presentar un coeficiente de correlación mayor a 0,7 con el COT 1 (Tabla 8 del anexo). Dentro del CP 2 quedaron CBM/COT 2, Na 1 y Ca 2, seleccionándose finalmente el CBM/COT 2. De esta manera el ICSP A quedó conformado de la siguiente manera:

$$\text{ICSP A} = 0,78 * \text{COT 1} + 0,22 * \text{CBM/COT 2}$$

Como se puede observar, dentro del ICSP A no quedó incluido ningún parámetro físico del suelo.

3.4.1.2. Índice aditivo ponderado considerando a las variables físicas, químicas y biológicas en forma separada (ICSP B)

En el ACP de las variables químicas tanto la CP 1 como la CP 2 presentaron un autovalor mayor a 1. El CP 1 explicó el 67 % de la variabilidad del modelo, mientras que el CP 2 lo hizo en un 18 %. En el CP 1 quedaron retenidos los siguientes parámetros: COPT 1, COPG 1, COT 1, pH 1, pH 2, NT 1 y Stock C1, efectuándose con los mismos el análisis de correlación. El COT 1 obtuvo la mayor suma de correlaciones, mientras que el resto de las variables presentó coeficientes de correlación mayores a 0,7 con dicho parámetro y por lo tanto no fueron retenidas (Tabla 6 del anexo). En el CP 2 quedó solo el Na 1. Sin embargo, debido a que el Na presentó valores entre 0,34 y 0,66 $\text{Cmol}_{(+)}\text{ kg}^{-1}$, los que se consideran adecuados y que no afectarían el normal crecimiento

del cultivo de tabaco (Ballari, 2005) como tampoco las funciones edáficas, se decidió no incluir esta variable dentro del índice de calidad de suelos. Los valores de pH reportados en estos suelos bajo cultivo (pH: 6,3 a 6,72), reflejan que el Na no estaría presentado un problema para el normal funcionamiento edáfico.

En el ACP de las variables físicas, el CP1 logró explicar un 84 % de la variabilidad total del modelo, quedando retenidas el DMP_p 1 y Vinf. Entre estas, el DMP_p 1 presentó mayor autovalor por lo cual fue el parámetro seleccionado.

El mismo procedimiento se realizó para las variables biológicas, donde el CP1 presentó una proporción de la variabilidad del 68 % y el CP 2 de un 21 %. CMB 1 y CMB 2 fueron retenidas en el CP 1, quedando seleccionada CBM 2 por presentar un autovalor mayor que CBM 1. En el CP 2 la única propiedad retenida fue CBM/COT 1.

De esta manera el ICSP B quedo conformado de la siguiente manera:

$$\text{ICSP B} = \text{COT 1} + \text{DMP 1} + (0,76 * \text{CBM 2} + 0,24 * \text{CBM/COT 1})$$

3.4.2 Serie de suelos Monterrico

Tabla 3.2. Autovalores para las CPs seleccionadas en cada caso y autovalores para las variables físicas, químicas y biológicas en la serie de suelo Monterrico. Proporción: proporción de la variabilidad explicada por cada CP.

Análisis de componentes principales						
Variables consideradas	Físicas		Químicas		Biológico	
	Biológicas		Físicas	Químicas		Biológico
CP	1	2	1	1	2	1
Autovalores	12,47	3,20	4,20	6,26	2,19	2,75
Proporción	0,65	0,17	0,84	0,63	0,22	0,69
Autovectores						
DMP 1	0,27	0,08	0,48			
Da1	-0,26	-0,03	-0,46			
Vinf.	0,27	0,05	0,46			
DMP2	0,26	0,03	0,45			
Da2	-0,21	-2,7*10 ⁻³	-0,37			
COA 1	0,27	-0,03		0,38	-0,05	
COT 1	0,27	-0,11		0,37	-0,18	
Stock C 1	0,25	-0,16		0,35	-0,23	
CE 1	-0,2	-0,26		-0,31	-0,27	
Ca 1	0,02	0,51		0,06	0,63	
NT 1	0,26	-0,09		0,38	-0,15	
PE 1	-0,24	-0,18		-0,35	-0,13	
COA2	-0,21	0,24		-0,28	0,33	
Na 2	-0,13	-0,4		-0,2	-0,52	
PE 2	-0,24	-0,18		-0,34	-0,14	
CBM 1	0,26	-0,09				0,57
RB 1	0,24	-0,23				0,57
CBM 2	-0,01	-0,5				0,2
RB 2	0,23	-0,13				0,56

3.4.2.1. Índice aditivo ponderado considerando todas las variables conjuntamente (ICSM A)

Quedaron seleccionados el CP 1 y el CP 2 (Tabla 3.2), explicando el primero un 66 % de la variabilidad total y el segundo un 17%. De las propiedades incluidas dentro del CP 1 quedaron seleccionadas Stock C1, COA 1, COT 1, NT 1, CBM 1, DMP_p 1, DMP_p 2, Da 1 y Vinf. COT 1 fue el parámetro que presentó la mayor suma de correlaciones, mientras que el resto de las variables quedaron apartadas por presentar un

coeficiente de correlación mayor a 0,7 con dicha variable (Tabla 9 del anexo). Dentro del CP 2 quedaron seleccionadas las propiedades CBM 2 y Ca 1, quedando finalmente seleccionado el CBM 2. El Ca1 no fue incluido en el índice de calidad del suelo, ya que se consideraron los mismos criterios de exclusión que se utilizaron con el Na 1 para la construcción del ICSP B. De esta manera el ICSM A quedo conformado de la siguiente manera:

$$\text{ICSM A} = 0,80 * \text{COT 1} + 0,20 * \text{CBM 2}$$

A partir de analizar cómo quedó conformado este índice, se observa que las variables químicas presentaron mayor sensibilidad que las biológicas para caracterizar las diferencias entre las distintas situaciones bajo estudio. Al igual que con el ICSP A, con esta metodología no quedó retenida ninguna propiedad física.

3.4.2.2. Índice aditivo ponderado considerando a las variables físicas, químicas y biológicas en forma separada (ICSM B)

En la construcción del ICSM B se pretende que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo queden representadas al menos por una variable. Por este motivo se llevaron a cabo tres ACP.

En el correspondiente a las propiedades químicas, el CP 1 y CP 2 presentaron un autovalor mayor a 1. El CP 1 logró explicar el 64 % de la variabilidad del modelo, mientras que el CP 2 un 21 %. En el CP 1 quedaron retenidas COA 1, COT 1, NT 1, PE 1 y PE 2. Con este grupo de parámetros se efectuó el análisis de correlación. El COT 1 obtuvo la mayor suma de correlaciones, mientras que el resto presentó coeficientes de correlación mayores a 0,7 con el COT 1 y por lo tanto fueron descartados (Tabla 9 de anexo).

Del CP 2 quedó retenida solo Ca 1. Esta variable no fue considerada teniendo en cuenta los mismos criterios ya explicados cuando se analizó el ICSM A.

Al realizar el mismo procedimiento con las variables físicas, se comprobó que el CP1 logró explicar un 84 % de la variabilidad total del modelo, siendo el DMP_p 1 la propiedad que presentó el mayor autovalor, quedando retenidas también Da 1, DMP_p 2 y Vinf por mostrar autovalores dentro del 10 % del mayor valor del DMP_p 1. El DMP_p 1 obtuvo la mayor suma de correlaciones, mientras que las demás propiedades fueron descartadas por presentar coeficientes de correlación mayores a 0,7 con el DMP_p 1 (Tabla 9 del anexo). El CP 2 si bien presentó una proporción del 10 %, no cumplió con los criterios de selección al mostrar un autovalor inferior a 1.

Al realizar el ACP para las variables biológicas quedó retenido solo el CP 1 ya que fue el único que cumplió los criterios de selección, explicando un 69 % de la variabilidad del modelo. Las propiedades retenidas fueron el CBM 1, RB1 y RB 2. El CBM 1 presentó la mayor suma de correlaciones, siendo por lo tanto la única variable considerada, ya que las restantes estuvieron asociadas al CBM 1 con coeficientes de correlación mayores a 0,7 (Tabla 9 del anexo).

Considerando los parámetros físicos, químicos y biológicos seleccionados, el ICSM B quedó conformado de la siguiente manera:

$$\text{ICSM B} = \text{COT 1} + \text{DMP}_p \text{ 1} + \text{CBM 1}$$

3.4.3. Análisis de los resultados obtenidos

De acuerdo con estos resultados e independientemente del suelo considerado y del criterio utilizado para seleccionar las variables, el contenido de carbono superficial siempre fue tenido en cuenta en los distintos índices elaborados. A su vez, cuando todas las propiedades se seleccionaron en forma conjunta, entre el 78 y 80 % del índice correspondiente a cada suelo estuvo explicado por dicho parámetro, mientras que el resto estuvo expresado por una variable biológica subsuperficial, no habiendo sido incluido en ningún caso algún parámetro físico. Cuando los índices se elaboraron

tomando en forma separada los distintos grupos de propiedades, en las dos series de suelo quedó incluida la estabilidad estructural superficial como propiedad física, existiendo diferencias entre suelos en el parámetro biológico seleccionado. Por lo expuesto, las únicas diferencias entre las dos series de suelo evaluadas en los índices de calidad de suelo resultantes, se debieron únicamente al parámetro biológico seleccionado.

3.5. Comparación de los índices de calidad de suelo entre los distintos usos de la tierra

3.5.1. Serie de suelo Perico

En la Figura 3.1 (a y b) se comparan los valores de los índices de calidad de suelo ICSP A y ICSP B, obtenidos para las distintas situaciones de manejo estudiadas en la serie Perico, mientras que en la Tabla 7 del anexo se adjunta un ejemplo del procedimiento para su cálculo.

Se observa en dicha figura que ambos índices elaborados (ICSP A y ICSP B), no variaron en su sensibilidad respecto a su capacidad de diferenciar el efecto de los distintos tratamientos evaluados. ICSP A y ICSP B lograron establecer diferencias significativas entre los lotes bajo cultivo y la situación de referencia, siendo el valor de ambos significativamente superior para esta última situación. A su vez y dentro de los lotes bajo agricultura, se pudo separar mediante ambos índices el efecto del sistema de manejo del cultivo de tabaco en rotación con gramíneas (TG) del resto, obteniendo de esta manera TG un mayor valor al mismo tiempo que no existieron diferencias entre TM y TV.

El indicador con mayor peso en los resultados obtenidos para el ICSP A fue el COT 1, ya que este parámetro se encuentra ponderado por un coeficiente de 0,78. COT

1 contribuyó prioritariamente a mostrar las diferencias existentes entre los suelos cultivados y la situación de referencia, mientras que CBM/COT 2, con menor peso relativo dentro del índice ya que está ponderado por un coeficiente igual a 0,22, representó principalmente las diferencias existentes entre TG y los restantes sistemas bajo agricultura. En la Figura 3.1 (a) se comprueba un mayor valor de este indicador en TG respecto a TM y TV, lo que ya había sido analizado en el Capítulo II (Tabla 2.10), donde se comprobó que el valor de CBM/COT 2 era superior en T y TG respecto a TM y TV.

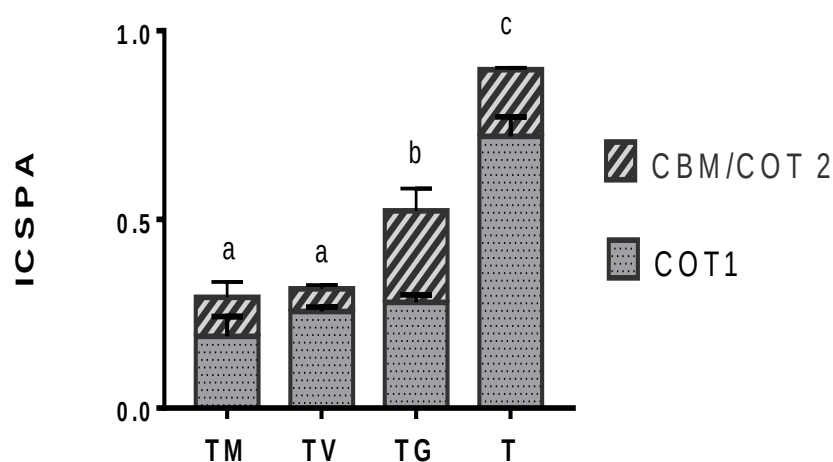
Por lo tanto, mediante el ICSP A se pudo separar el efecto de la agricultura respecto a la situación natural, fundamentalmente a partir del contenido de carbono superficial, mientras que entre los tratamientos agrícolas, el cociente microbiano subsuperficial fue el parámetro dentro de este índice que sirvió para diferenciar el efecto de la incorporación de gramíneas en el cultivo de tabaco respecto a los restantes tratamientos.

Respecto al ICSP B (Figura 3.1 b), las desigualdades entre los suelos cultivados y el testigo fueron mayormente atribuibles al COT 1 y al DMP_p 1, mientras que entre los distintos sistemas de conducción del tabaco, el CBM 2 fue el que fundamentalmente logró separar el comportamiento de TG respecto a TM y TV. Llama la atención el escaso aporte realizado por COT 1 para diferenciar los distintos sistemas de conducción del cultivo de tabaco (Figura 3.1 b), dado que según se vio en el Capítulo II (Tabla 2.8), este parámetro fue significativamente mayor en TG y TV respecto a TM. También se observa en la Figura 3.1 b un ligero pero mayor valor de CBM/COT 1 en TG, que como se viera en la Tabla 2.10, este parámetro fue significativamente mayor en dicho tratamiento respecto a los restantes suelos cultivados. Por último, lo ocurrido con CBM

2 concuerda con lo visto en Tabla 2.10, ya que dicha propiedad fue mayor en TG y T respecto a TM y TV.

Por lo tanto, mediante el ICSP B las diferencias entre los suelos cultivados y sin disturbar fueron aportadas, al igual que con el ICSP A, principalmente por un parámetro químico (contenido de carbono superficial), pero también de manera significativa por un parámetro físico (estabilidad estructural superficial). Por su parte, mediante este índice y de manera similar a lo ocurrido con el ICSP A, las diferencias entre TG y el resto de los suelos cultivados fueron aportadas fundamentalmente por un parámetro biológico subsuperficial, siendo el mismo en este caso el carbono de la biomasa microbiana.

a)



b)

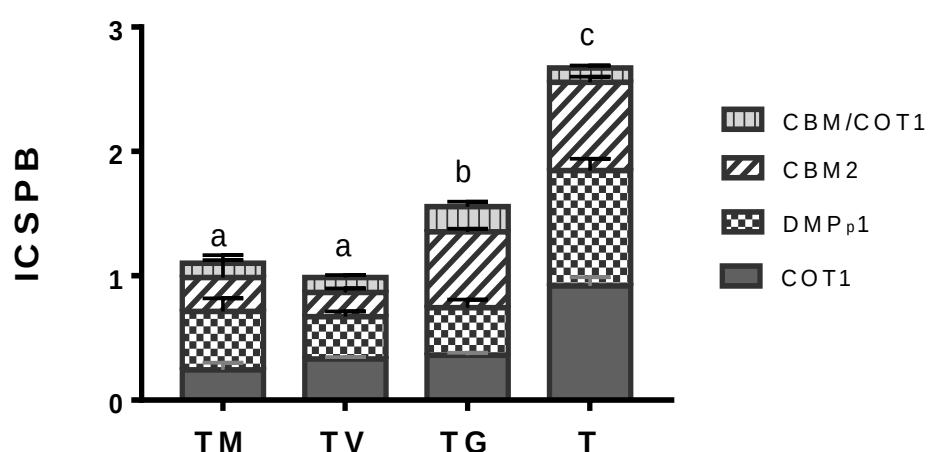


Figura 3.1. Comparación de resultados entre los índices de calidad de suelo (serie Perico) obtenidos para las distintas situaciones bajo estudio. (a) ICSP A, (b) ICSP B. COT: carbono orgánico total, CBM: carbono de la biomasa microbiana, CBM/COT: coeficiente microbiano. DMPp: diámetro medio ponderado promedio. T: situación testigo, TM: monocultivo de tabaco, TV: incorporación de verdeos dentro del cultivo de tabaco, TG: cultivo de tabaco con rotación de gramíneas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm.

La incorporación de las variables por grupos (físicas, químicas y biológicas) en forma separada no produjo variaciones en la capacidad del ICSP B para discriminar entre los distintos tratamientos bajo agricultura. Sin embargo, este índice permitió incorporar el efecto de los distintos manejos en la calidad física del suelo, lo cual es de suma importancia a la hora de identificar la incidencia de las diferentes prácticas sobre

la calidad integral de los suelos, y de esa manera poder plantear a futuro manejos que reviertan estos daños.

Mukherjee & Lal (2015) compararon tres métodos ampliamente utilizados para estimar ICS bajo diferentes sistemas de labranza, utilizando datos de 72 muestras de suelo correspondientes a tres sitios de Ohio. El primer índice (ICS-1) se calculó siguiendo el método descrito por Amacher *et al.* (2007), en el cual a los parámetros del suelo se les fijó valores umbrales basados principalmente en la revisión de la literatura y en la opinión de expertos. En el segundo índice (ICS-2) los indicadores se normalizaron con el sistema lineal (Andrews *et al.*, 2002), después de normalizar los parámetros del suelo. Los puntajes se integraron en un índice único para cada suelo, utilizando un enfoque aditivo ponderado sugerido por Fernandes *et al.* (2011). Los pesos numéricos se asignaron a cada función del suelo de acuerdo a su importancia en el cumplimiento de los objetivos de mantener la calidad del suelo. Para la construcción del tercer índice (ICS-3), se utilizó el análisis de componentes principales (ACP), siguiendo el procedimiento usado por Andrews *et al.* (2002). La normalización se llevó a cabo con el procedimiento lineal y la integración con el índice aditivo ponderado.

La ventaja de usar el ICS-1 es que la calidad del suelo podría evaluarse después de medir cualquier número (bajo a alto) de parámetros del suelo. Su desventaja es que es subjetiva y se basa principalmente en el punto de vista del investigador. La ventaja de ICS-2 es que incluye el peso (ponderación) basado en el diseño del estudio. La desventaja es que requiere numerosos parámetros edáficos, lo que puede ser costoso y llevar mucho tiempo. El ICS-3 es ventajoso en el aspecto de su capacidad para predecir la calidad del suelo en base a un conjunto de datos reducido con un bajo número de parámetros del suelo.

La metodología propuesta en el presente trabajo (mediante ACP), donde las propiedades físicas, químicas y biológicas pueden ser elegidas por el usuario según el conocimiento del sistema, seleccionando las más sensibles en cada caso, evaluando la correlación entre las mismas y otorgando igual peso dentro del índice a pesar de que cada una de ellas pueda estar representada por más de un indicador, pueden salvar las dificultades que presentan los otros dos sistemas detallados previamente propuestos por Fernandes *et al.* (2011) y Amacher *et al.* (2007).

Si se comparan los resultados del ANOVA entre el ICSP A y el ICSP B (Tabla 3.3), el grado de ajuste, el CV y el valor de p (altamente significativo) fueron similares entre ambos métodos. Como ya fuera visto y según estos resultados, la introducción de las variables por grupos, de manera que el índice quede compuesto por propiedades químicas, físicas y biológicas (ICSP B), no logró aumentar su sensibilidad para discriminar el efecto de las distintas situaciones bajo estudio. Por su parte, ambos índices (ICSP A y ICSP B) fueron eficientes para diferenciar TG de los restantes tratamientos bajo el cultivo de tabaco. Sin embargo, se esperaba que alguno de ellos lograra mostrar que los dos tratamientos con mayor diversificación de cultivos (TG y TV) mejoraban la calidad del suelo respecto a TM. En este sentido, y a pesar que para algunas propiedades químicas el tratamiento TV presentó iguales resultados que TG y mayores que TM (por ejemplo COT 1 y Stock C 1) o aún mayores que TG y TM (por ejemplo COT 2, NT 2 y Stock C2), solamente dentro de las propiedades biológicas hubo similitudes entre TV y TG en la respiración basal superficial. Como se vio previamente, los parámetros biológicos fueron dentro de estos índices, los que fundamentalmente establecieron las diferencias entre los tratamientos agrícolas. Por lo tanto, al no haber sido seleccionada la variable RB 1 en ninguno de ellos para la serie

Perico, no se pudo visualizar el efecto favorable sobre el suelo del tratamiento con incorporación de verdeos de invierno.

Tabla 3.3. Resultados del análisis de varianza de los índices de calidad de suelo contruidos para la serie de suelo Perico, presentando el grado de ajuste (R^2), el coeficiente de variabilidad (CV) y el nivel de significancia (p).

Índice	R^2	CV	P
ICSP A	0,95	12,97	<0,0001
ICSP B	0,95	13,26	< 0,0001

3.5.2. Serie de suelo Monterrico

En la Figura 3.2 se presentan los resultados generados mediante el uso del ICSM A, a partir de la cual se comprueba que las difernecias entre tratamientos fueron similares a las obtenidas con el ICSP A. De la misma manera, el carbono superficial sirvió fundamentalmente para diferenciar a los tratamientos agrícolas de la situación no disturbada, mientras que el parámetro biológico subsuperficial (en este caso el carbono de la biomasa microbiana) lo hizo para distinguir la rotación de tabaco con gramíneas respecto a los restantes manejos de dicho cultivo. Estos resultados concuerdan con lo analizado en el Capítulo II (Tablas 2.18 y 2.21), donde se mostró que el COT 1 fue mayor en el testigo respecto a los restantes tratamientos, mientras que el CBM 2 fue superior en TG respecto al las otras formas de producción del cultivo de tabaco.

Coincidentemente con los resultados del presente trabajo, Nosrati (2013) al evaluar la calidad del suelo para distintos usos de la tierra en Irán, seleccionó nueve variables para el cálculo del índice de calidad, siendo el nitrógeno total y el carbono orgánico alguno de los indicadores que conformaron dicho índice. Por su parte, Zhang *et al.* (2016) al elaborar un índice de calidad para suelos de humedales costeros del delta del río amarillo en China a partir de cinco indicadores, también seleccionaron al contenido de carbono orgánico como una de las variables.

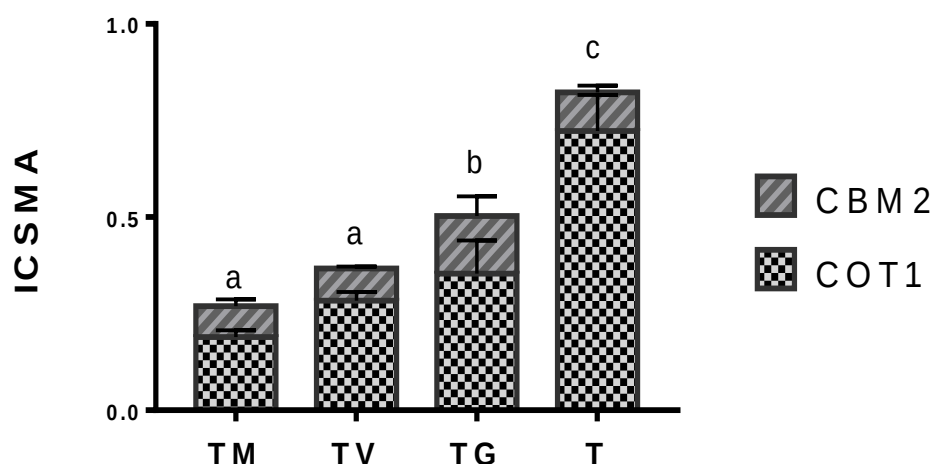


Figura 3.2. Comparación de resultados del ICSM A, entre las distintas situaciones bajo estudio. COT: carbono orgánico total, CBM: carbono de biomasa microbianaT: situación testigo, TM: monocultivo de tabaco, TV: incorporación de verdeos dentro del cultivo de tabaco, TG: cultivo de tabaco con rotación de gramíneas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm

En la Figura 3.3 se presentan los resultados del ICSM B, que como se puede observar logró establecer contrastes distintos a los obtenidos con el ICSM A (Figura 3.2). Mediante su uso se pudieron comprobar diferencias entre los suelos cultivados y sin cultivar, pero en este caso no hubo un predominio de alguno de los parámetros que conforman este índice. A su vez, con el ICSM B se pudo separar la calidad del suelo de TM respecto a la de TG y TV, siendo el valor de dicho índice significativamente superior en los dos últimos tratamientos mencionados.

En este caso, y como se pudo comprobar en el análisis de las Tablas 2.15 y 2.18, no hubo diferencias entre los tratamientos agrícolas en la mayoría de las propiedades físicas y químicas y por lo tanto tampoco entre las seleccionadas para la construcción de este índice. Algo similar ocurrió al analizar las propiedades biológicas (Tabla 2.21), ya que no hubo diferencias en el carbono de la biomasa microbiana superficial entre las distintas formas de producción del cultivo de tabaco. Por lo tanto, y de manera distinta a

lo analizado con los anteriores índices, las diferencias en el ICSM B entre los suelos cultivados no se pueden atribuir a una propiedad específica. En este sentido, en TG estas se podrían asignar a la acción conjunta de COT 1 y CBM 1, mientras que en TV al efecto del COT 1 y DMP 1.

Liu *et al.* (2014) evaluaron la calidad del suelo en arrozceras empleando las siguientes variables que integraron el índice de calidad: el carbono de la biomasa microbiana, nitrógeno total, el pH, contenido de Si y Zn disponible.

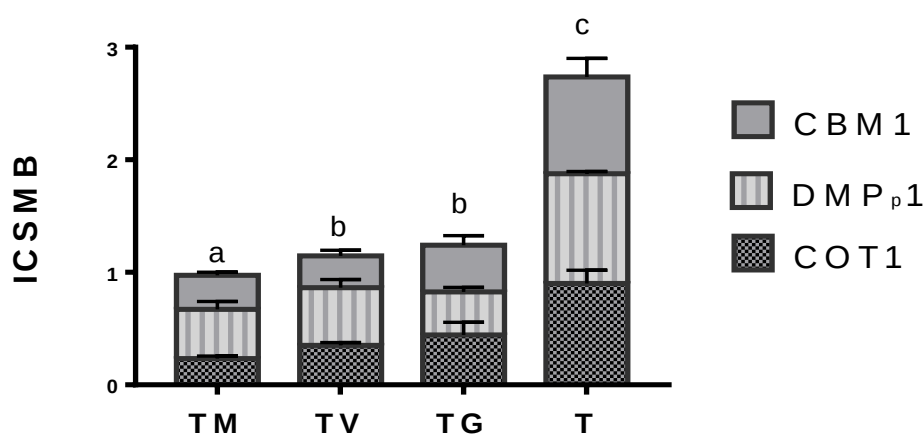


Figura 3.3. Comparación de resultados del ICSM B, entre las distintas situaciones bajo estudio. COT: carbono orgánico total, CBM: carbono de biomasa microbiana, DMPp: diámetro medio ponderado promedio. T: situación testigo, TM: monocultivo de tabaco, TV: incorporación de verdeos dentro del cultivo de tabaco, TG: cultivo de tabaco con rotación de gramíneas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). 1: 0-20 cm, 2: 20-40 cm

La selección de indicadores para la construcción de índices de calidad del suelo es un procedimiento en el que aún no se ha alcanzado un consenso dentro de la comunidad científica (Mukherjee & Lal, 2014), para lo cual se han empleado un número variado en cuanto a número y tipo de indicadores (Sarmiento *et al.*, 2018). Se destaca que no hay estandarización ni homogenización para el proceso de selección del CMD, dado que los indicadores varían significativamente y dependen del contexto de la

investigación, así como de factores inherentes al suelo y su manejo. Finalmente, algunos indicadores no cumplen con todos los criterios que debe tener un indicador ideal de calidad de suelos (Andrews *et al.*, 2002; Vallejo, 2013; Pulido *et al.*, 2017).

Al comparar entre el ICSM A y el ICSM B los resultados del ANVA (Tabla 3.4), el grado de ajuste y el CV fueron mayores para el ICSM B, con un valor de p superior en comparación con el de ICSM A. Según estos resultados, al incluir las variables por grupos de propiedades físicas, químicas y biológicas en forma separada para la confección del índice de calidad de suelo para la serie Monterrico, se logró aumentar su sensibilidad para discriminar los efectos de las distintas situaciones bajo estudio. De esta manera, el ICSM B fue más eficiente para establecer diferencias de acuerdo al sistema de manejo del tabaco, mientras que el ICSM A si bien no logró igual comportamiento, marcó una mejora de uno de los manejos más conservacionistas de dicho cultivo (TG).

Tabla 3.4. Resultados del análisis de varianza de los índices de calidad de suelo contruidos para la serie de suelo Monterrico, presentando el grado de ajuste (R²), el coeficiente de variabilidad (CV) y el nivel de significancia (p).

Índice	R ²	CV	P
ICSMA	0,87	15,58	0,0006
ICSMB	0,99	6,63	< 0,0001

3.6 CONCLUSIONES

3.6.1. Serie Perico

Los índices desarrollados y evaluados para esta serie de suelo (ICSP A y ICSP B), a pesar de estar conformados con distintos parámetros, lograron diferenciar estadísticamente de la misma manera a las distintas situaciones bajo estudio, destacando

a TG como aquel tratamiento agrícola que tuvo un menor nivel de degradación edáfica respecto a las otras formas de manejo del cultivo de tabaco.

El contenido de carbono superficial fue importante en ambos índices para diferenciar a los suelos bajo cultivo de los no disturbados, mientras que en el ICSP B también cobró relevancia para dicha diferenciación la estabilidad estructural superficial.

Los parámetros biológicos subsuperficiales incluidos dentro del índice fueron fundamentales para establecer diferencias entre los tratamientos agrícolas, siendo la calidad edáfica del que presentó rotación con gramíneas, intermedia entre la del sitio no disturbado y la de los restantes suelos bajo cultivo de tabaco.

Pese a que TV presentó algunas diferencias con TM en algunas propiedades químicas y biológicas, los índices de calidad generados para esta serie de suelo, no tuvieron capacidad para detectar disparidades entre ambos tratamientos.

3.6.2. Serie Monterrico

El índice de calidad de suelo construido tomando en forma conjunta todas las variables (ICSM A), tuvo un comportamiento similar al desarrollado para la serie Perico, ya que el contenido de carbono superficial fue la propiedad que fundamentalmente separó el efecto de los suelos cultivados de los no disturbados y a que una propiedad biológica subsuperficial logró establecer las diferencias entre TG y las otras dos formas de producción del cultivo de tabaco.

De manera distinta a lo ocurrido con la serie Perico, ambos índices de calidad (ICSM A y ICSM B) arrojaron en este suelo resultados distintos, permitiendo el ICSM B mostrar la mayor calidad edáfica en los tratamientos TG y TV respecto a TM.

También de manera diferente a lo determinado en la serie Perico, el ICSM B desarrollado para la serie Monterrico no tuvo una propiedad en particular que influyera de mayor manera en las diferencias observadas en la calidad de los suelos cultivados respecto a aquellos sin disturbio y entre las distintas formas de producción del cultivo de tabaco evaluadas.

A pesar que este suelo prácticamente no presentó diferencias entre tratamientos en las propiedades químicas y solo mostró algunas dentro de las biológicas, el ICSM B generado tuvo mayor capacidad para distinguir la mejor calidad edáfica de los tratamientos con mayor diversificación e intensificación en la secuencia de cultivos (TG y TV) respecto al ICSP B.

CONSIDERACIONES FINALES

En los Valles Templados de la Provincia de Jujuy, una gran proporción de los suelos dedicados a la producción de tabaco están bajo monocultivo desde hace más de treinta años. Como consecuencia se ha provocado el deterioro físico, químico y biológico de los suelos, que se manifiesta en una pérdida de su calidad. La actividad tabacalera constituye una importante fuente de aporte al fisco provincial y nacional, genera la mayor demanda de mano de obra a nivel regional y provincial y es una de las actividades agrícolas más importantes para la economía de la provincia de Jujuy, por lo cual es necesaria la búsqueda de alternativas productivas más sustentables.

En el presente trabajo se investigó el efecto que produce sobre la calidad del suelo el aumento en la diversificación y la intensificación en la sucesión cultivos respecto al monocultivo de tabaco, ya sea a través de la rotación con gramíneas o a partir de la incorporación de abonos verdes.

Se trabajó en lotes de productores en dos series de suelo características de la región y a dos profundidades, evaluando entre los distintos tratamientos el resultado de distintas propiedades físicas, químicas y biológicas edáficas.

En el Capítulo 2 se plantearon las siguientes hipótesis:

1. El carbono orgánico particulado y el de la biomasa microbiana, junto con la estabilidad de la estructura, son propiedades edáficas que responden favorablemente a la mayor diversidad o intensificación en la secuencia de cultivos, plasmada en los tratamientos con incorporación de gramíneas (TG) o de abonos verdes (TV) en la rotación.

2. El tratamiento con mayor número de especies por año (TV), presenta los resultados mas favorables en las propiedades analizadas, debido a su mayor aporte de materia seca al suelo.
3. Los parámetros edáficos seleccionados para la elaboración del índice de calidad de suelo, son dependientes del suelo considerado.

La primera hipótesis se rechaza dado que en ninguno de los suelos analizados, la estabilidad estructural y el carbono orgánico particulado fueron parámetros sensibles bajo las condiciones de este estudio, que mostraran un mejoramiento significativo a partir de la mayor diversificación y/o intensificación en la secuencia de cultivos respecto al monocultivo de tabaco. Tal como se describió en su oportunidad, el intenso laboreo del suelo, el efecto del riego y al quedar el suelo desprotegido respecto a las lluvias durante un período de tiempo, fueron factores que tuvieron mayor relevancia en el proceso de degradación física respecto a las posibles mejoras producidas por la mayor diversificación de cultivos evaluada. De igual manera, en el caso del carbono orgánico particulado, tanto la gran cantidad de labores practicadas para la implantación del cultivo de tabaco como el clima imperante, eliminaron las posibles diferencias generadas por el distinto aporte de materia seca de los distintos tratamientos analizados. La biomasa microbiana fue un parámetro mas efectivo que los mencionados previamente en detectar los cambios producidos por el diferente manejo del cultivo de tabaco, aunque solamente la rotación con gramíneas mostró un mejoramiento de dicha variable en ambos estratos de la serie Perico y solo en el subsuperficial de la serie Monterrico, no evidenciándose mejoras en esta propiedad en ninguno de los dos suelos en el tratamiento con incorporación de abonos verdes.

De acuerdo con los comentarios previos, la segunda hipótesis también es rechazada. En el tratamiento con incorporación de abonos verdes solo se observaron algunas mejoras en el estrato subsuperficial de algunas propiedades respecto a lo sucedido en los restantes tratamientos agrícolas (NT 2, COT 2, Stock 2 y COA 2 de la serie Perico y Da 2 de la serie Monterrico). Este comportamiento probablemente sea en respuesta a la incorporación del material vegetal de los abonos verdes a dicha profundidad. También este tratamiento mostró un mejor comportamiento de Ca 2, Mg 2 y PE 2 en la serie Perico respecto a TG, posiblemente como resultado de una mayor pérdida a dicha profundidad de estos elementos en los lotes en rotación con gramíneas, como consecuencia de un mayor rendimiento del cultivo de tabaco en este último tratamiento. Sin embargo, las propiedades biológicas en general mostraron una mejor situación para TG, no mostrando TV en todas las variables biológicas (salvo RB 1 en la serie Perico) diferencias con el monocultivo de tabaco.

Respecto a la hipótesis tercera, esta es aceptada ya que como se dijera previamente, el número de variables seleccionadas para la construcción del índice de calidad de suelo fue menor en la serie Monterrico, sobretodo al considerar las propiedades químicas. Esta serie de suelo tuvo un comportamiento diferente en la diferenciación de los distintos tratamientos respecto a Perico, tanto en los parámetros químicos como biológicos, no creyendo que el mismo obedezca a las diferencias texturales observadas entre ambos suelos.

En relación a las hipótesis planteadas en el Capítulo 3:

1. Las propiedades biológicas seleccionadas para el índice de calidad de suelo, tienen mayor gravitación en la diferenciación de los tratamientos agrícolas, al ser estas más sensibles que las variables químicas y físicas.

2. El índice de calidad de suelo generado considerando en forma separada a las propiedades físicas, químicas y biológicas, presenta una mejor capacidad para discriminar el efecto de la incorporación de gramíneas y/o abonos verdes al monocultivo de tabaco.
3. El índice de calidad de suelo construido para cada serie, presenta una capacidad diferente para discriminar los efectos de los distintos tratamientos analizados.

Teniendo en cuenta los resultados de la serie Perico, la primera hipótesis sería aceptada ya que en los dos índices desarrollados para la misma, una propiedad biológica subsuperficial fue la que arrojó fundamentalmente las diferencias encontradas en la calidad de suelo de los distintos tratamientos agrícolas. Por su parte, en la serie Monterrico si bien en el ICSM A ocurrió lo mismo ya mencionado para la otra serie de suelos, al considerar el ICSM B la diferencia en la calidad de suelos en TG respecto a TM se podría asignar a la acción conjunta de COT 1 y CBM 1, mientras que en TV al efecto del COT 1 y DMP 1. Por lo tanto, la primera hipótesis es rechazada al no existir en todos los casos una prevalencia de las propiedades biológicas en la diferenciación de la calidad de suelo de los tratamientos agrícolas.

La segunda hipótesis es rechazada ya que en la serie de suelos Perico, ambas formas de construir el índice de calidad de suelo (ICSP A, ICSP B) llegaron a los mismos resultados y solo en la serie de suelos Monterrico la opción de construir dicho índice utilizando en forma separada las propiedades físicas, químicas y biológicas (ICSM B), logró separar la mejor calidad del suelo de los tratamientos TV y TG respecto a TM, mejorando de esta manera su capacidad de diferenciación respecto al ICSM A.

La tercera hipótesis es aceptada ya que como se dijera previamente el ICSM B pudo separar la mejor calidad de suelo de los tratamientos TG y TV respecto a TM, mientras que con los dos índices generados para la serie Perico solo se pudo establecer una mejora en la calidad de suelo en el tratamiento TG.

De acuerdo con los resultados de esta tesis, surge como una práctica alternativa y más sostenible que el monocultivo, la rotación del tabaco con gramíneas, ya que este fue el manejo del suelo que se diferenció favorablemente en algunas propiedades químicas y biológicas, sobretodo en la serie Perico. No obstante quedan algunas incógnitas, ya que las dos series de suelo no respondieron de igual manera a los tratamientos evaluados, al mismo tiempo que la incorporación de abonos verdes, pese a ser la alternativa que mayor cantidad de materia seca incorpora al suelo, no resultó ser tan favorable como la rotación del tabaco con gramíneas. Al mismo tiempo, habría que investigar el efecto de otras alternativas de implantación del cultivo de tabaco con menos labores, ya que las mejoras producidas en las fracciones más recalcitrantes del carbono no redundaron en incrementos en la calidad física de estos suelos, lo mismo que las pérdidas del carbono lábil fueron intensas como consecuencia de las labranzas. Los índices de calidad de suelo generados servirán para el monitoreo de los procesos de degradación ocurridos en los suelos regionales dedicados a la agricultura y para relacionarlos con los rendimientos obtenidos. Poder modelizar dicha relación será efectiva para predecir la pérdida de productividad en función de la degradación de los suelos.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta-Martinez, V., Dowd, S., Sun, Y. and Allen, V. 2008. Tag-encoded pyrosequencing analysis of bacterial diversity in a single soil type as affected by management and land use. *Soil Biol Biochem* 40: 2762–2770.
- Acosta-Martinez, V., Mikha, MM and Vigil, MF. 2007. Microbial communities and enzyme activities in soils under alternative crop rotations compared to wheat–fallow for the central Great Plains. *Appl. Soil Ecol.* 37:41–52.
- Adetunji, AT., Ncube, B., Mulidzi, R. & Lewu, FB. 2020. Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. *Soil and Tillage Research*, 204, 104717.
- Agostini, M.A, Studdert, GA. & Domínguez, GF. 2012. Relación entre el cambio en el diámetro medio de agregados y el carbono orgánico y sus fracciones. In XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina (pp. 16-20).
- Albanesi, A., Anriquez, A. & Sánchez, A., 2003. Efectos de la agricultura convencional sobre algunas formas del C en una toposecuencia de la Región Chaqueña; Argentina. *Agriscientia* 9–17.
- Alfonso, CA. 1987. Etude de la degradation des sols cultives en tabac, Cuba, province Pinar of del Río», thèse Docteur Ingenieur, INA-P.G., France.
- Allison, S.D. & Jastrow, J.D., 2006. Activities of extracellular enzymes in physically isolated fractions of restored grassland soils. *Soil Biol. Biochem.* 38, 3245–3256.
- Allison, SD., LeBauer, DS., Ofrecio, MR., Reyes, R., Ta, AM. & Tran, TM. 2009. Low levels of nitrogen addition stimulate decomposition by boreal forest fungi. *Soil Biology and Biochemistry* 41:293–302.
- Álvarez, C., Fernández, P. & Taboada, M. 2012. Relación de la inestabilidad estructural con el manejo y propiedades de los suelos en la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 30 (2): 173-178.
- Álvarez, C., Uriens, A., Bagnato, R., Lienhard, CP. & Diaz-Zorita, M. 2014. Dinámica de agua en barbechos y cultivos de cobertura en la Region Semiárida. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo II Reunión Nacional “Materia Orgánica y Sustancias úmicas” Producción sustentable en ambientes frágiles Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.
- Álvarez, CR., Taboada, MA., Gutiérrez Boem, FH., Bono, A., Fernández, PL. & Prystupa, PL. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73(4): 1242-1250.
- Alvarez, MF., Osterrieth, ML., Bernava Laborde, V. & Montti, LF. 2008. Estabilidad, morfología y rugosidad de agregados de argiudoles típicos sometidos a distintos usos: su rol como indicadores de calidad física en suelos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo* 26(2): 115-129.
- Álvarez, R. 2005. Carbon stocks in Pampean soils: a simple regression model for estimation of carbon storage under non degraded scenarios. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36, 1583–1589.
- Álvarez, R. & Steinbach, HS. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the argentine pampas. *Soil Till. Res.* 104(1):1-15.
- Alvarez, R., Steinbach, HS & De Paepe, JL. 2017. Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: A meta-analysis. *Soil & Tillage Research* 170: 53-65.
- Álvaro-Fuentes, J., Arrúe, JL., Gracia, R. y López, MV. 2008. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: Temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions. *Geoderma* 145:390-396.

- Alves de Castro Lopes, A., Gomes de Sousa, DM., Chaer, GM., Bueno dos Reis Junior, F., Goedert, WJ. & De Carvalho Mendes, I. 2013. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 77(2): 461-472.
- Amacher, MC., O'Neil, KP. & Perry, CH. 2007. Signos vitales del suelo: un nuevo índice de calidad del suelo (SQI) para evaluar la salud del suelo forestal. Res. Papilla. RMRS-RP-65. Fort Collins, CO: Departamento de Agricultura de EE. UU., Servicio Forestal, Estación de Investigación de las Montañas Rocosas. 12 p. 65.
- Amézketa, E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *J. Sust. Agric.* 14: 83-151.
- Amezketta, E., Singer, MJ. & Le Bissonnais, Y. 1996. Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 60(3): 888-894.
- Amundson, R., Austin, AT. Schuur, EAG., Yoo, K., Matzek, V., Kendall, C., Uebersax, A., Brenner, D. & Baisden, WT. 2003. Global patterns of the isotopic composition of soil and plant nitrogen. *Global Biogeochemical Cycles* 17:1031-1035.
- Anderson, JE. & Ingram, J. 1989. The tropical soil biology and fertility programme, TSBF, C.A.B. Intern. (ed), Wallingford, p. 171
- Anderson, T. 2003. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 98:285-293.
- Anderson, TH. & Domsch, KH. 1989. Ratios of microbial biomass carbon total organic carbon in arable soils. *Soil Biol. Biochem.* 21: 471-479.
- Anderson, TH. & Domsch, KH. 1990. Application of eco-physiological quotients (qCO₂ and qD) on microbial biomass from soils of different cropping histories. *Soil Biol. Biochem.* 22: 251-255.
- Andrade, J.F., Poggio, S.L., Ermácora, M., Satorre, E.H., 2015. Productivity and resource use in intensified cropping systems in the rolling pampa, Argentina. *Eur. J. Agron.* 67: 37-51.
- Andrade, JF., Poggio, SL., Ermácora, M., Satorre, EH. 2017. Land use intensification in the Rolling Pampa, Argentina : Diversifying crop sequences to increase yields and resource use. *Eur. J. Agron.* 82: 1-10.
- Andrews, SS., Karlen, DL. & Cambardella, CA. 2004. The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1945-1962.
- Andrews, SS., Karlen, DL. & Mitchell, JP. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90:25-45.
- Aparicio, V. & Costa, JL. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 96: 155-165.
- Arias, JA. 1984. Desflora y desbrota. *Panorama Agropecuario* 25: 22-23.
- Arshad, M & Martin, S. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 88 (2): 153-160.
- Aruani, MC., Machuca, Y., Gili, P. & Spera, N. 2012. Evaluación de las características físico-químicas y biológicas en dos suelos superficiales cultivados con pera (*Pyrus communis* L.) cv. Williams bajo manejo convencional. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 44(1): 77-84.
- Arzeno J L., Corvalán, E., Huidobro, DJ., Rodríguez T. 2017. Ecorregión Norandina. Valles Templados de Salta y Jujuy. Sistema Productivo: Intensivo Tabacalero bajo Riego. Pp 175-178. Manual de indicadores de calidad de suelo para las Ecorregiones de Argentina. Marcelo Wilson (ed). Ediciones INTA.
- Arzeno, JL., Corvalán, E., Vivas, F., Huidobro, DJ. & Ferrary Laguzzi, F. 2012. Indicadores de calidad de suelo en Fincas del Observatorio ambiental de Tartagal. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata.
- Arzeno, JL; Corvalán ER; Guardo, N & Sánchez D.C. 2008. Residualidad del fósforo por fertilización en un suelo Ustocrepto Udico del Valle de Lerma, Salta. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis, p. 260.

- Astier-Calderón, M; Maass-Moreno, M. & Etchevers-Barra, J. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36(5): 605-620.
- Atwell, BJ. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environ. Exp. Bot.* 33(1): 27-40.
- Aziz, I., Mahmood, T. & Islam, KR. 2013. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. *Soil and Tillage Research.* 131: 28-35.
- Babujia, L., Hungria, M., Franchini, J. & Brookes, P. 2010. Microbial biomass and activity at various soil depths in Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. *Soil Biol. Biochem.* 42:2174-2181.
- Bacigaluppo S, Bordero, ML, Balzarini, M, Gerster GR, Andriani JM, Enrico JM, Dardanelli, JL. 2011. Main edaphic and climatic variables explaining soybean yield in Argiudolls under no-tilled systems. *Europ. J. Agronomy* 35:247– 254.
- Baisden, WT. & Amundson, R. 2003. An analytical approach to ecosystem biogeochemistry modeling. *Ecol. Applic.*, 13: 649–663.
- Ballari, MH. 2005. Tabaco Virginia: Aspectos ecofisiológicos de la nutrición en condiciones de cultivo. Editorial Alejandro Graziani, Córdoba, Argentina.
- Balota, EL. & Chaves, JCD. 2011. Microbial activity in soil cultivated with different summer legumes in coffeecrop. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 54: 35-44.
- Bandera, R. 2013. Rehabilitación de suelos salino-sódicos: Evaluación de enmiendas y de especies forrajeras (Doctoral dissertation, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires).
- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T. & García, C. 2008. Past, Present and Future of soil quality índices: A biological perspective. *Geoderma.* 147:159-171.
- Bautista, CA., Etcchevers, B., Castillo, RF. & Gutiérrez, C. 2004. La Calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13 (2): pp. 90 - 97.
- Beltran, MJ., Sainz-Rozas, H., Galantini, JA., Romaniuk, RI. & Barbieri, P. 2018. Cover crops in the Southeastern region of Buenos Aires, Argentina: effects on organic matter physical fractions and nutrient availability. *Environmental Earth Sciences*, 77(12): 428.
- Benedict, C., Cogger, CG. & Andrews, N. 2014. Methods for Successful Cover Crop Management in your Home Garden. Washington State University Extension.
- Bengough, A., Bransby, M., hans, J., McKenna, S., Roberts, T. and valentine, T. 2006. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell, In: *Journal of Experimental Botany.* pp. 437–447.
- Bengough, AG. 1991. The penetrometer in relation to mechanical resistance to root growth. In: Smith, K. A., and CH. Mullins (Eds). *Soil Analysis. Physical Methods.* Marcel Dekker, Inc. New York. pp: 431-445.
- Bengough, AG., McKenzie, BM., Hallett, PD. & Valentine, T.A. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exper. Bot.* 62, 59–68.
- Benintende, SM., Benintende, MC., Sterren, MA & De Battista, JJ. 2008. Soil microbiological indicators of soil quality in four rice rotations systems. *Ecological indicators*, 8(5): 704-708.
- Benintende, SM., Benintende, MC., Sterren, MA., Saluzzio, MF & Barbagelta, PA. 2017. Indicadores biológicos: selección, determinación de niveles de referencia y utilización en la construcción de índices. *Ciencia del suelo*, 35(1): 35-46.
- Benjamin, JG., Halvorson, AD., Nielsen, DC. & Mikha, MM. 2010. Crop management effects on crop residue production and changes in soil organic carbon in the Central Great Plains. *Agronomy Journal* 102:990–997.
- Benjamin, JG., Mikha, M., Nielsen, DC., Vigil, MF., Calderón, F., Henry, WB. 2007. Cropping intensity effects on physical properties of a no-till silt loam. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 1160–1165.
- Bini, C. 2009. Soil: A precious natural resource. In *Conservation of Natural Resources*; Kudrow, N.J., Ed.; Nova Science Publishers: Hauppauge, NY, USA, pp. 1–48.
- Blanco, H & Lal, R. 2008. Principles of soil conservation and management. Dordrecht: Springer. p. 617.

- Blanco-Canqui, H. & Lal, R. 2007. Impacts of long-term wheat straw management on soil hydraulic properties under no-tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:1166-1173.
- Blanco-Canqui, H., & Lal, R. 2004. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. *Critical reviews in plant sciences*, 23(6): 481-504.
- Blanco-Canqui, H. & Ruis, S.J. 2018. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*. 326: 164–200.
- Blanco-Canqui, H., Shaver, T. M., Lindquist, J.L., Shapiro, C.A., Elmore, R.W., Francis, C.A. & Hergert, G.W. 2015. Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal*, 107(6): 2449-2474.
- Blanco-Canqui, H., Stone, L.R. & Stahlman, P.W. 2010. Respuesta del suelo a los sistemas de cultivo a largo plazo en un Argiustoll en las Grandes Llanuras centrales. *Revista de la Sociedad de Ciencias del Suelo de América*. 74 (2): 602-611.
- Bodner, G., Loiskandl, W., Buchan, G. & Kaul, H.P. 2008. Natural and management-induced dynamics of hydraulic conductivity along a cover-cropped field slope. *Geoderma* 146: 317-325.
- Bol, R., Poirier, N., Balesdent, J. & Gleixner, G. 2009. Molecular turnover time of soil organic matter in particle-size fractions of an arable soil. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 23 (16): 2551–2558.
- Bölenius, E., Wetterlind, J. & Keller, T. 2018. Can within field yield variation be explained using horizontal penetrometer resistance and electrical conductivity measurements? Results from three Swedish fields. *Acta Agric. Scand. B*. 68: 690–700.
- Bossio, D., Geheb, K. & Crichtley, W. 2010. Managing water by managing land: addressing land degradation to improve water productivity and rural livelihoods. *Agricultural Water Management*, 97(4): 536-542.
- Bossio, D.A., Girvan, M.S., Verchot, L., Bullimore, J., Borelli, T., Albrecht, A. & Osborn, A.M. 2005. Soil microbial community response to land use change in an agricultural landscape of western Kenya. *Microbial Ecology*, 49(1): 50-62.
- Bradford, M.A., Keizer, J., Davies, A.D., Mersmann, C.A. & Strickland, M.S. 2013. Evidencia empírica de que la formación de carbono en el suelo a partir de insumos vegetales está relacionada positivamente con el crecimiento microbiano. *Biogeochemistry*. 113 (1-3): 271-281.
- Braun Wilke, R.H., Santos, E.E., Picchetti, L.P.E., Larrán M.T., Guzmán, G.F., Colarich C.R. & Casoli, C.A. 2001. Carta de Aptitud Ambiental de la Provincia de Jujuy. Escala 1:250.000. Departamento de Suelos y Ecología. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Jujuy.
- Bravo, C. & Andreu, E. 2011. Propiedades físicas y producción de maíz (*Zea mays* L.) en un alfisol del estado Guárico, Venezuela, bajo dos sistemas de labranza. *Venezuelos*. 3:62-68.
- Bray, R.H. & Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Brejda, J.J., Moorman, T.B., Smith, J.L., Karlen D.L., Allan, D.L. & Dao, T.H. 2000. Distribution and variability of surface soil properties at a regional scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 974-982.
- Bremer, E., Janzen, H.H., Eliert, B.H. & McKenzie, R.H. 2008. Soil organic carbon after twelve years of various crop rotations in an Aridic Boroll. *Soil Science Society of America Journal* 72, 970–974.
- Bremner, J.M. & Mulvaney, C.S. 1982. Nitrogen total. En: Page, A.L. et al. (Eds.) *Methods of Soils Analysis. Part 2. Agronomy 9*. 2° edición. Pp. 595-624. American Society of Agronomy y Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, Estados Unidos.
- Bruun, S., Thomsen, I.K., Christensen, B.T. & Jensen, L.S. 2007. In search of stable soil organic carbon fractions: a comparison of methods applied to soils labeled with ¹⁴C for 40 days or 40 years. *Eur. J. Soil Sci.*, 59: 247–256.
- Bunemann, E.K., Bossio, D.A., Smithson, P.C., Frossard, E. & Oberson, A. 2004. Microbial community composition and substrate use in highly weathered soil as affected by crop rotation and P fertilization. *Soil Biol. Biochem.*, 36: 889–901.

- Burke, W., Gabriels, D. & Bouma, J. 1986. Soil structure assessment: AA Balkema. Rotterdam, Netherlands. Pp. 30-31.
- Busscher, WJ., Bauer, PJ., Camp, CR. & Sojka, E. 1997. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil Tillage Res.* 43: 205–217.
- Cabrera Carcedo, EA., Morejón Miranda, YM. & Amaro Roche, E. 2013. Tecnologías de manejo sostenible de suelo en la cooperativa Jaime Vena, Pinar del Río. *Avances*, 15 (4): 400-409
- Cabrera, EA. 1995. Influencia de la labranza mínima con reducción de la dosis de abono orgánico sobre la conservación del suelo, la atmósfera y el cultivo del tabaco. Pp. 15 p. CMICT, MCTMA, Pinar del Río.
- Calonego, JC., Raphael, JPA., Rigon, JPC., Oliveira Neto, L. & Rosolem, CA. 2017. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *Eur. J. Agron.* 85: 31–37.
- Cambardella, CA & Elliott, ET. 1992. Particulate soil organic matter. Changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.
- Campitelli, P., Aoki, A., Gudelj, O., Rubenacker, A. & Sereno, R. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia del Suelo* 28 (2): 223-231.
- Cánepa Ramos, Y., González, T., Abdón, J., González Mederos, A & Hernández Jiménez, A. 2015. Situación actual de los suelos tabacaleros de la empresa Lázaro Peña de la provincia Artemisa. *Cultivos Tropicales*, 36(1): 80-85.
- Cantú, MP., Becker, A., Bedano, JC & Schiavo, HF. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del suelo*, 25(2): 173-178.
- Caravaca, F., Masciandaro, G & Ceccanti, B. 2002. Land use in relation to soil chemical and biochemical properties in a semiarid Mediterranean environment. *Soil Tillage Research*, 68(1): 23-30.
- Carbone Carneiro, MA., Damacena de Souza, E., Fialho dos Reis, E., Seron Pereira, H & Azevedo, WRD. 2009. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33(1): 147-157.
- Cardoso, EJBN., Vasconcellos, RLF., Bini, D., Miyauchi, MYH., Santos, CAD., Alves, PRL & Nogueira, MA. 2013. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health?. *Scientia Agricola*, 70(4): 274-289.
- Carof, M., Tourdonnet, S. & Roger-Estrade, J. 2005. Changes of Structural Porosity Due to Climatic and Biological Activities Under No-Till Cropping Systems with Permanent Living Cover Crops: Impacts on Soil Hydrodynamic Properties. *Proc. III World Congress Conservation Agriculture*, Nairobi, Kenya.
- Carranca, C., Oliveira, A., Pampulha, E. & Torres, MO. 2009. Temporal dynamics of soil nitrogen, carbon and microbial activity in conservative and disturbed fields amended with mature white lupine and oat residues. *Geoderma*. 151:50–59.
- Carvalho Mendes, I & Reis-Junior, F. 2004. Uso de parámetros microbiológicos como indicadores para avaliar a qualidade do solo e a sustentabilidade dos agroecossistemas. Documentos/Embrapa Cerrados Doc 112. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados. P. 34.
- Casas, R. & Albarracín, G. 2015. El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina. PROSA. Centro Para la Promoción de la Conservación del Suelo y el Agua.
- Castiglioni M G, Chagas C.I., Massobrio M J, Santanatoglia O J, Buján A. 2006. Análisis de los escurrimientos de una microcuenca de pampa ondulada bajo diferentes sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo*. 24 (2): 169-176.
- Castiglioni, M., Kraemer, F & Morras, H. 2013. Efecto de la secuencia de cultivos bajo siembra directa sobre la calidad de algunos suelos de la región Pampeana. *Ciencia del Suelo* 31 (1):93-105.
- Castiglioni, M., Navarro Padilla, R., Eiza, M., Romaniuk, R., Beltran, M. & Mouselgne, F. 2016. Respuesta en el corto plazo de algunas propiedades físicas a la introducción de cultivos de cobertura. *Ciencia del suelo*, 34(2).

- Catania, P., Badalucco, L., Laudicina, VA. & Vallone, M. 2018. Effects of tilling methods on soil penetration resistance, organic carbon and water stable aggregates in a vineyard of semiarid Mediterranean environment. *Environ. Earth Sci.* 77, 348–356.
- Caviglia, OP., Rizzalli, RH., Monzon, JP., García, FO., Melchiori, RJM., Martinez, JJ., Cerrudo, A., Irigoyen, A., Barbieri, PA., Van Opstal, NV. & Andrade, F.H. 2019. Improving resource productivity at a crop sequence level. *F. Crop. Res.* 235:129–141.
- Caviglia, OP., Sadras, VO & Andrade, FH. 2004. Intensificación de la agricultura en la Pampa Suroriental: I. Captación y eficiencia en el uso de agua y radiación en doble cultivo trigo-soja. *Investigación de cultivos de campo.* 87 (2-3):117-129.
- Caviglia, OP., Sadras, VO. & Andrade, FH. 2011. Yield and quality of wheat and soybean in sole- and double-cropping. *Agronomy Journal* 103:1081–1089.
- Caviglia, OP., Sadras, VO. & Andrade, FH. 2013. Modelling long-term effects of cropping intensification reveals increased water and radiation productivity in the South-eastern Pampas. *F. Crop. Res.* 149: 300–311.
- Ceotto, E & Castelli, F. 2002. Radiation-use efficiency in flue cured tobacco (*Nicotiana Tabacum* L.): response to nitrogen supply, climatic variability and sink limitations. *Field Crops Research* 74: 117-130.
- CFI – Pcia de Jujuy. 1981. Relevamiento Semidetallado de suelos en el area de influencia del Dique Las Maderas y el Rio Grande provincia de Jujuy. Informe parcial N° 1 Pp. 27-36.
- Chagas, CI., Santanatoglia, OJ., Castiglioni, MG., Massobrio, MJ., Buján, A. y Iurtia, C. 2008. Número de curva de escurrimiento para una microcuenca de Pampa Ondulada bajo labranza convencional y siembra directa. *Ciencia del suelo.* 26(1).
- Chan, KY., Heenan, DP. & Oates, A. 2002. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. *Soil & Tillage Research.* 63:133–139.
- Chavarría, DN. 2018. Las comunidades microbianas del suelo ante la diversificación de un agroecosistema de la pampa húmeda. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad Nacional de Cordoba, Área Ciencias Agropecuarias.
- Chavarría, DN., Verdenelli, RA., Muñoz, EJ., Conforto, C., Restovich, SB., Andriulo, AE., Meriles, JM. & Vargas-Gil, S. 2016. Soil microbial functionality in response to the inclusion of cover crop mixtures in agricultural systems. *Spanish J. Agric. Res.* 14, e0304.
- Collinet, J & Casariego, M. 1996. Rehabilitación de los suelos Volcánicos degradados utilizando abonos orgánicos, Cuenca del río Las Cañas-El Salvador. XLII Reunión del PCCMCA, 23:18 – 22.
- CONABIO. 2016. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad Biodiversidad Mexicana. Ecosistemas. Procesos ecológicos. <http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/pro-cese.htm>.
- Congreves, KA., Hayes, A., Verhallen, EA. & Van Eerd, LL. 2015. Long-term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems. *Soil and Tillage Research*, 152:17-28.
- Corbella, RD., García, JR., Sanzano, GA., Plasencia, AM & Fernández de Ullivarri, J. 2006. Diferentes fracciones de carbono orgánico como indicadores de calidad de suelos del este tucumano. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy, Argentina.
- Corradini, E., Cuesta, R., Merello, P., Sgesso, R., Gimenez, M., Molfesa, S. & Musco, JM. 2005. Caracterización del sector productor tabacalero en la República Argentina. Serie Documentos de Investigación. Buenos Aires, Universidad Católica Argentina de Buenos Aires.
- Corsi, S., Friedrich, T., Kassam, A., Pisante, M. & Sà, JM. 2012. Soil Organic Carbon Accumulation and Greenhouse Gas Emission Reductions from Conservation Agriculture: A literature review. Plant production and protection division food and agriculture organization of the United Nations. Integrated Crop Management Vol.16. Rome.
- Corwin, DL & Lesch, SM. 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity I. Survey protocols *Computers Electronics Agric.* 46: 103-133.

- Costantini, A., Cosentino, D. & A. Segat, A. 1996. Influence of tillage systems on biological properties of a typic argiudoll soil under continuous maize in central Argentina. *Soil Till. Res.* 38:265-271.
- Cotrufo, MF., Wallenstein, MD., Boot, CM., Denef, K. & Paul, E. 2013. The microbial efficiency-matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology.* 19:988–995.
- Coulter, JA., Nafziger, ED. & Wander, MM. 2009. Soil organic matter response to cropping system and nitrogen fertilization. *Agronomy Journal.* 101: 592–599.
- Dabney, S., Delgado, J., & Reeves, D. 2001. Using winter cover crops to improve soil and water quality. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32, 1221–1250.
- Dabney, SM., Delgado, JA., Meisinger, JJ., Schomberg, HH., Liebig, MA., Kaspar, T., Mitchell, J. & Reeves, W., 2010. Using cover crops and cropping systems for nitrogen management. In: Delgado, J.A., Follett, R. (Eds.), *Advances in Nitrogen Management for Water Quality*. Soil water conservation society, Ankeny, Iowa.
- D’Acunto, L., Andrade, J.F., Poggio, S.L. and Semmartin, M. 2018. Diversifying crop rotation increased metabolic soil diversity and activity of the microbial community. *Agric. Ecosyst. Environ.* 257: 159–164.
- Dalurzo, HC. 2002. Agregado de residuos orgánicos en suelos ferralíticos. Efecto sobre variables que estiman sustentabilidad (Doctoral dissertation, Tesis Magister Scientiae. UNNE.-UBA. Corrientes. Argentina).
- Da Silva, EDJ., Silva, PCC., Amorim, FF., Brito, RBF., Pamponet, BM. & De Oliveira Rezende, J. 2015. Atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo distrófico coeso e crescimento radicular de *Brachiaria decumbens* submetido à subsolagem e fertilização. *Comunicata Scientiae*, 6(4):385-395.
- De la Vega, G., Castiglioni, MG., Massobrio, MJ., Chagas, CI., Santanatoglia, OJ. and Iurtia, C. 2004. Infiltración en un Argiudol Vértico bajo siembra directa en condiciones variables de cobertura y humedad inicial. *Ciencia del Suelo.* 22(1): 52-55.
- Desjardins, T., Folgarait, PJ., Pando-Bahuon, A., Girardin, C. & Lavelle, P. 2006. Soil organic matter dynamics along a rice chronosequence in north-eastern Argentina: Evidence from natural ¹³C abundance and particle size fractionation. *Soil Biology and Biochemistry.* 38(9): 2753-2761.
- Dexter, AR. 2004. Soil physical quality. Part I: Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma.* 120: 201-214.
- Di Bella, CE., Rodríguez, AM., Jacobo, E., Golluscio, RA. & Taboada, MA. 2015. Impact of cattle grazing on temperate coastal salt marsh soils. *Soil Use and Management.* 31(2):299-307.
- Di Ciocco, CA., Sandler, RV., Falco, LB & Coviella, CE. 2014. Actividad microbiológica de un suelo sometido a distintos usos y su relación con variables físico-químicas. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 46(1), 0-0.
- Di Rienzo, J., Guzman, AW & Casanoves, F. 2002. A multiple comparison method based on the distribution of the root node distance of a binary tree. *J Agric Biol Environ Statist.* 7 (2):1-14.
- Diez, J. 2011. Optimización en el uso de los recursos hídricos y nutricionales por el tabaco Virginia en el departamento de Chicoana, Salta. Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias del Suelo.
- Dilly, O. 2005. Microbial energetics in soils. In: Buscot, F., Varma, A. (Eds.), *Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. Pp. 123–138.
- Dilly, O., Blume, HP., Sehy, U., Jiménez, M. & Munich, JC. 2003. Variation of stabilised, microbial and biologically active carbon and nitrogen soil under contrasting land use and agricultural management practices. *Chemosphere.* 52: 557-569.
- Dolan, MS., Clapp, CE., Allmaras, RR., Baker, JM. & Molina, JAE. 2006. Soil organic carbon and nitrogen in a Minnesota soil as related to tillage, residue and nitrogen management. *Soil Tillage Res.* 89: 221-231.

- Domínguez, GF., Diovisalvi, N., Studdert, G. & Monterubbianesi, D. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on mollisols of the southeastern Pampas, *Soil Till. Res.* 102: 93–100.
- Don, A., Schumacher, J. & Freibauer, A. 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. *Glob. Change Biol.* 17: 1658–1670.
- Doorenbos, J. & Kassam, AH. 1979. Yield response to water. Irrigation and drainage paper. 33: 257.
- Doran, JW & Parkin, TB. 1994. Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.E., Stewart, B.A. (Eds.). *Defining soil quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America, Madison. Pp. 3-21.
- Doran, JW & Parkin, TB. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: Doran JW, Jones AJ (Eds.). *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Pub. 49, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI. Pp. 25-37.
- Duval, M., De Sa Pereira, E., Iglesias, JO. & Galantini, JA. 2014. Efecto de uso y manejo del suelo sobre las fracciones de carbono orgánico en un Argiudol. *Ciencia del Suelo*. 32 (1): 105–115.
- Duval, ME., Galantini, JA., Iglesias, JO., Canelo, S., Martínez, JM. and Wall, L. 2013. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil and Tillage Research*. 131: 11-19.
- Duval, ME., Galantini, JA., Martínez, JM., López, FM. & Wall, LG. 2016. Sensitivity of different soil quality indicators to assess sustainable land management: Influence of site features and seasonality. *Soil Till. Res.* 159: 9-22.
- Echeverría, N., Querejazu, S., De Lucia, M., Silenzi, J., Forjan, H. & Manso, M. 2012. Estabilidad y carbono orgánico de agregados bajo rotaciones en siembra directa. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata.
- Eiza, MJ., Fioriti, N., Studdert, GA. & Echeverría, HE. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y de la fertilización nitrogenada. *Ciencia del Suelo*. 23: 59-68.
- Elberling, B., Touré, A. & Rasmussen, K. 2003. Changes in soil organic matter following groundnut-millet cropping at three locations in semi-arid Senegal, West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 96: 37-47.
- Elliot, ET., Burke, IC., Monz, C., Frey, SB., Paustian, K., Collins, HP. & Fry, WW. 1994. Terrestrial carbon pools in grasslands and agricultural soils: Preliminary data from the Corn Belt and Great Plains regions. *Soil Science Society of America*. 35: 179-191
- Etchevers, J., Hidalgo, C., Vergara, M., Bautista, M & Padilla, J. 2009. Calidad de suelo: conceptos, indicadores y aplicación en agricultura. En: Lopez Blanco J. y Rodriguez-Gamino M. de L. *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en Mexico*. Ed. Universidad Nacional Autonoma de Mexico UNAM Coleccion Geografia para el siglo XXI. Serie Libros de Investigation. 3: 196.
- Fabrizzi K, Picone L, Berardo A, García F. 1998. Efecto de la fertilización nitrogenada y fosfatada en las propiedades químicas de un Argiudol Típico. *Ciencia del Suelo*. 16(2): 1-76.
- Fageria NK., Baligar, VC. & Bailey, BA. 2005. Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity. *Communications in soil science and plant analysis*. 36: 2733–757.
- FAO. 2010. Proyecto Evaluacion de la Degradacion de la Tierra en zonas secas (Land Degradation Assessment in Drylands). LADA. (Disponible en <http://www.fao.org/nr/lada/>)
- FAO. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) –technical summary. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
- Fernandes, JC., Gamero, CA., Rodrigues, JGL & Mirás-Avalos, JM. 2011. Determination of the quality index of a Paleudult under sunflower culture and different management systems. *Soil Tillage Research*. 112(2): 167-174.

- Fernandes, JC., Gamero, CA., Rodrigues, JGL. & Miras-Avalos, JM. 2011. Determination of the quality index of a Paleudult under sunflower culture and different management systems. *Soil and Tillage Research*. 112: 167–174.
- Fernandes, MM., Carvalho, MGC., Araujo, JMR., Melo, FR., Silva, CA., Sampaio, FMT. & Lobato, MGR. 2012. Matéria Orgânica e Biomassa Microbiana em Plantios de Eucalipto no Cerrado Piauiense. *Floresta e Ambiente*. 19: 453-459.
- Fernández de Ullivarri, D. 1990. El cultivo de tabacos claros. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Salta – Jujuy, Manual N° 1, Argentina.
- Fernández, L. 1995. Aplicación del índice de estabilidad estructural de Pieri a suelos montañosos de Venezuela. *Terra Nueva Etapa* [Internet]. 2014 [cited 2017 Mar 13]; 30(48): 143–153.
- Fernández, R. 2018. Valores de línea de base para evaluar la degradación de Molisoles de la Región Semiárida Pampeana. Tesis Doctor en Agronomía. Universidad de Bahía Blanca.
- Fernández R., Quiroga, A., Álvarez, C., Lobartini, C. & Noellemeyer, E. 2016. Valores umbrales de algunos indicadores de calidad de suelos en molisoles de la región semiárida pampeana. *Rev Ciencia del Suelo*. 34: 279-292.
- Fernández, GS. 2006. Diversidad e innovación: el uso de tipologías para adecuar el cambio de prácticas en la desinfección de almácigos en los sistemas de producción tabacaleros de Jujuy. *Universidad nacional de Jujuy*. 56-58.
- Fernández, R., Frasier, I., Rorig, M., Quiroga, A. & Noellemeyer, E. 2018. Evaluación de indicadores biológicos en suelos de la región semiárida pampeana central. *Ecología Austral*. 28(1): 145-156.
- Fernández, R., Quiroga, A., Zorati, C. & Noellemeyer, E. 2010. Carbon contents and respiration rates of aggregate size fractions under no-till and conventional tillage. *Soil Till Res*. 109: 103-109.
- Ferrary Laguzzi, F., Osinaga, R., Arzeno, JL., Becker, AR & Rodríguez, T. 2014. Fraccionamiento y mineralización de la materia orgánica en distintos sistemas de labranza en un inceptisol de Salta. *Ciencia del suelo*, 32(1): 63-72.
- Ferreras, L., Toresani, S., Bonel, B., Fernández, E., Bacigaluppo, S., Faggioli, V. & Beltrán, C. 2009. Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del Suelo*. 27 (1): 103-114.
- Ferreras, LA., Toresani, S., Faggioli, V. & Galarza, C. 2015. Sensibilidad de indicadores biológicos edáficos en un Argiudol de la Región Pampeana Argentina. *Spanish Journal of Soil Science*. 5(3): 220.
- Fierer, N., Strickland, MS., Liptzin, D., Bradford, MA. & Cleveland, CC. 2009. Global patterns in belowground communities. *Ecology Letters*. 12: 1238–1249.
- Finney, D., Buyer, J., Kaye, J., 2017. Living cover crops have immediate impacts on soil microbial community structure and function. *J. Soil Water Conserv*. 72: 361–373.
- Fischer, C., Roscher, C., Jensen, B., Eisenhauer, N., Baade, J., Attinger, S. & Hildebrandt, A. 2014. How do earthworms, soil texture and plant composition affect infiltration along an experimental plant diversity gradient in grassland?. *PLoS One*. 9(6). e98987.
- Follett, RF., 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil & Tillage Research*. 61:77–92.
- Franzluebbers, A.J., Hons, F.M., Zuberer, D.A. 1995. Soil organic carbon, microbial biomass and mineralizable carbon and nitrogen in sorghum. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 59: 460–466.
- Franzluebbers, AJ. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality *Soil & Tillage Research*. 66: 95–106.
- Frasier, I., Noellemeyer, E., Figuerola, E., Erijman, L. Permingeat, H., & Quiroga, A. 2016. High quality residues from cover crops favor changes in microbial community and enhance C and N sequestration. *Global Ecology and Conservation* 6: 242-256.
- Frey, SD., Lee, J., Melillo, JM. & Six, J. 2013. The temperature response of soil microbial efficiency and its feedback to climate. *Nature Climate Change*. 3: 395–398.
- Frioni, L. 1999. Procesos Microbianos. Editorial Fundación Universidad Nacional de Río. 6. Pp. 332.

- Fuentes, M., Govaerts, B., De León, F., Hidalgo, C., Dendooven, L., Sayre, K. D. & Etchevers, J. 2009. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *European Journal of Agronomy*. 30(3): 228-237.
- Gabioud, EA., Wilson, MG. & Sasal, MC. 2011. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencia del suelo*. 29(2): 129-139.
- Galantini JA., Duval, ME., Iglesias, JO. & Kruger, H. 2014. Continuous wheat in semiarid regions: Long-term effects on stock and quality of soil organic carbon. *Soil Sci*. 179: 284-292.
- Galantini, JA & Suñer, L. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia* Vol. XXV (1): 41- 55.
- Galantini, JA. & Rosell, RA, 1997. Organic fractions, N, P and S changes in a semiarid Haplustoll of Argentine under different crop sequence. *Soil Till Res* 42:221–228
- Galantini, JA., Rosell, RA., Brunetti, G. & Senesi, N. 2002. Dinámica y calidad de las fracciones orgánicas de un Haplustol durante la rotación trigo-leguminosas. *Ciencia del Suelo*, 20(1): 17-26.
- Galli, J. 2010. Guía práctica para el manejo en almácigos flotantes de Tabaco. (INTA, CR Salta-Jujuy, EEA Salta).
- Garcia, F. 2009. El manejo de los nutrientes. Bases y herramientas. Curso FUNDACREA. Buenos Aires, 29 de Septiembre de 2009. IPNI Cono Sur.
- García, Y., Ramirez, W. & Sánchez, S. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. Matanzas, Cuba: Central España Republicana.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça, M., Montanarella, L., Muñiz, O., Schad, P., Vara, M., Vargas, R. 2014. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe. Comision Europea. Oficinas de producciones de la Union Europea. L- 2995. Luxembourg. 176 p.
- Gaudin, AC., Janovicek, K., Deen, B. & Hooker, DC. 2015. Wheat improves nitrogen use efficiency of maize and soybean-based cropping systems. *Agric. Ecosyst. Environ*. 210: 1–10.
- Geyer, K., Kyker-Snowman, E., Grandy, A. & Frey, S. 2016. Microbial carbon use efficiency: accounting for population, community, and ecosystem-scale controls over the fate of metabolized organic matter. *Biogeochemistry*. 127: 173-188.
- Gijsman, AJ., Oberson, A., Friesen, DK., Sanz, JI. & Thomas, RT. 1997. Nutrient cycling through microbial biomass under rice-pasture rotations replacing native savanna. *Soil Biology and Biochemistry*. 29: 1433–1441.
- Gil-Sotres, F., Trasar-Cepeda, C., Leirós, MC. & Seoane, S. 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(5): 877-887.
- Ginebra Aguilar, M., Rodríguez Alfaro, M., Calero Martin, B., Ponce de León, D. and Font Vila, L. 2015. Carbono lábil como un indicador de cambios en dos suelos bajo diferentes usos. *Cultivos Tropicales*. 36(3): 64-70.
- Girvan, MS., Bullimore, J., Pretty, JN., Osborn, AM. & Ball, AS. 2003. Soil type is the primary determinant of the composition of the total and active bacterial communities in arable soils. *Appl Environ Microbiol*. 69: 1800–1809.
- Giuffré, L., Romaniuk, R., Conti, ME & Bartoloni, N. 2006. Multivariate evaluation of no-tillage system quality indicators in Argiudolls of Rolling Pampa (Argentina). *Biology and Fertility of Soils*. 42: 556-560.
- Gómez, M., Kruger, H., Sagardoy, M. 1996. Actividad biológica de un suelo de la zona semiárida bonaerense cultivado con la secuencia soja-trigo bajo tres prácticas culturales. *Ciencia del Suelo*. 14: 37-41.
- González Martín, JA. 2001. La hoja de tabaco y su consumo. *Prevención del Tabaquismo*. 3 (4): 257-261.
- Gonzalez, RD., Dalurzo, HC & Vázquez, S. 2002. Indicadores de calidad de suelos del sur de la provincia de Misiones. Universidad Nacional del Nordeste, Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, 3.

- González, V. 2006. Metodología, formulación y aplicación de un índice de calidad de suelos con fines agrícolas para castilla-la mancha, España. Tesis Doctoral. Universidad autónoma de Madrid.
- Gonzalez-Chavez, MDCA., Aitkenhead-Peterson, JA., Gentry, TJ., Zuberer, D., Hons, F. & Loeppert, R. 2010. Soil microbial community, C, N, and P responses to long-term tillage and crop rotation. *Soil Till. Res.* 106: 285–293.
- Govaerts, B., Sayre, KD., Lichter, K., Dendooven, L., and Deckers, J. 2007. Influence of permanent raised bed planting and residue management on physical and chemical soil quality in rain fed maize/wheat systems. *Plant Soil.* 291: 39-54.
- Govaerts, B., Sayre, K.D., Goudeseune, B., De Corte, P., Lichter, K., Dendooven, L. & Deckers, J. 2009. Conservation agriculture as a sustainable option for the central Mexican highlands. *Soil Till. Res.* 103: 222-230.
- Graecen, EL. 1986. Root response to soil mechanical properties. *Trans. 13th Congress Inter. Soc. Soil Sci. Hamburg* 5: 20-47.
- Grandy, A., & G. Robertson. 2007. Land-use intensity effects on soil organic carbon accumulation rates and mechanisms. *Ecosystems* 10: 59–74.
- Griffith, D., Mannering, J and Box, E. 1986. Soil and moisture management with reduce tillage. En: Sprague M & G Triplett (Eds.). *No tillage and surface-tillage agriculture*. J. Wiley Sons. New York. Pp. 467.
- Griffiths, B.S., Ritz, K., Bardgett, R.D., Cook, R., Christensen, S. & Ekelund, F. 2000. Ecosystem response of pasture soil communities to fumigation-induced microbial diversity reductions: an examination of the biodiversity–ecosystem function relationship. *Oikos*, 90: 279–294.
- Halvorson, AD., Peterson, GA & Reule, CA. 2002. Tillage system and crop rotation effects on dryland crop yield and soil carbon in the Central Great Plains. *Agron. J.* 94: 1429–1436.
- Hamza, MA. & Anderson, WK., 2005. Soil compaction in cropping systems: a review of nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82: 121–145.
- Hartmann, M., Fliessbach, A., Oberholzer, HR & Widmer, F. 2006. Ranking the magnitude of crop and farming system effects on soil microbial biomass and genetic structure of bacterial communities. *FEMS Microbiol Ecol* 57: 378–388.
- Hawks, SN. & Collins, WK. 1986. Tabaco flue-cured. Principios básicos de su cultivo y curado. Versión española de H Perez Carbonell y E Cabrera Martínez. Secretaría General Técnica. (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación: Madrid)
- Haynes, RJ. 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biol. Biochem.* 32: 211-219.
- Hernández Rodríguez, CE., Bernal Carrazana, Y., Ríos, C., Muñoz Medina, P. & González, O. 2015. Evaluación de manejo conservacionista en suelo Pardo Grisáceo. *Centro agrícola*, 42 (3): 25-33.
- Higashi, T., Yunghui, M., Komatsuzaki, M., Miura, S., Hirata, T., Araki, H. & Ohta, H. 2014. Tillage and cover crop species affect soil organic carbon in Andosol, Kanto, Japan. *Soil Till. Res.* 138(1): 64-72.
- Hooper, DU., Bignell, DE., Brown, VK., Brussard, L., Dangerfield, JM., Wall, DH. y Van Der Putten, WH. 2000. Interactions between Aboveground and Belowground Biodiversity in Terrestrial Ecosystems: Patterns, Mechanisms, and Feedbacks: We assess the evidence for correlation between aboveground and belowground diversity and conclude that a variety of mechanisms could lead to positive, negative, or no relationship—depending on the strength and type of interactions among species. *Bioscience*. 50(12): 1049-1061.
- Hooper, DU., Chapin Iii, FS., Ewel, JJ., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S. & Schmid, B. 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological monographs*. 75(1): 3-35.
- Hulugalle, NR., Weaver, TB., Finlay, LA., Hare, J. & Entwistle, PC. 2007. Soil properties and crop yields in a dryland Vertisol sown with cotton-based crop rotations. *Soil Till. Res.* 93: 356-369.

- Husson, O., Brunet, A., Babre, D., Charpentier, H., Durand, M. & Sarthou, JP. 2018. Conservation Agriculture systems alter the electrical characteristics (Eh, pH and EC) of four soil types in France. *Soil Tillage Research*. 176: 57-68.
- INDEC, 2004. Datos del Censo de Nacional de Población, Hogares y Vivienda, Año 2001.
- INFOSTAT. 2017. InfoStat, versión 1.1. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- Islam, KR. & Weil, RR. 2000. Land use effects on soil quality in a tropic forest ecosystem of Bangladesh. *Agric. Ecosyst. Environ.* 79: 9-16.
- Jakelaitis, A., Silva, AA., Santos, JB. & Vivian, R. 2008. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 38: 118-127.
- Jamioy-Orozco, D., Menjivar Flores, JC. & Rubiano Sanabria, Y. 2015. Chemical soil quality indicators in productive systems of Colombian Piedmont eastern Plains. *Acta Agronómica*. 64(4): 302-307.
- Jaramillo D. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. 1ra ed. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Pp. 619.
- Jarecki, M.K. & Lal, R. 2003. Crop management for soil carbon sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences* 22: 471–502.
- Jauregui, MA. 1973. Caracterización de la fertilidad potásica en algunos suelos tabacaleros del Valle de Lerma, Salta. *Magister Scientiae Tesis*, Escuela para graduados en Ciencias Agrarias, Argentina.
- Jenkinson, DS & Powlson, DS. 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V: A method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry* 8(3): 209-213.
- Jobbagy, EG. & Jackson, RB. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10: 423–436.
- Jokela, W., Posner, J., Hedtcke, J., Balser, T. & Read, H. 2011. Midwest Cropping System Effects on Soil Properties and on a Soil Quality Index. *Agronomy Journal* 103: 1552–1562.
- Kallenbach, CM., Frey, SD., Grandy, AS., Lehmann, J. 2016. Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. *Nature Communications*. 7. Pp. 13630.
- Karlen, DL., Hurley, EG., Andrews, SS., Cambardella, CA., Meek, DW., Duffy, MD. & Mallarino, AP. 2006. Crop rotation effects on soil quality at three northern corn/soybean belt locations. *Agronomy journal*. 98(3): 484-495.
- Karlen, DL; Maubach, MJ; Doran, JW; Cline, RG; Harris, RF; Schuman, GE. 1997. Soil Quality: A concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61: 4-10.
- Karlin, S., Bernasconi Salazar, J., Cora, A., Sánchez, S., Arnulphi, S. & Accietto, R. 2019. Cambios en el uso del suelo: capacidad de infiltración en el centro de Córdoba (Argentina). *Ciencia del Suelo*. 37(2): 196-208.
- Kaschuk, G., Alberton, O & Hungria, M. 2010. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(1): 1-13.
- Kaschuk, G., Alberton, O & Hungria, M. 2011. Quantifying effects of different agricultural land uses on soil microbial biomass and activity in Brazilian biomes: inferences to improve soil quality. *Plant and soil*, 338(1-2): 467-481.
- Kätterer, T., Bolinder, MA., Andrén, O., Kirchmann, H. & Menichetti, L., 2011. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues as revealed by a long-term field experiment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 141: 184–192.
- Kaufmann, M., Tobias, S., & Schulin, R. 2010. Comparison of critical limits for crop plant growth based on different indicators for the state of soil compaction. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(4): 573-583.

- Kou, TJ., Zhu, P., Huang, S., Peng, XX., Song, ZW., Deng, AX. & Zhang, WJ. 2012. Effects of long-term cropping regimes on soil carbon sequestration and aggregate composition in rainfed farmland of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 118: 132-138.
- Kraemer, FB. 2015. Influencia de los factores composicionales y la evolución estructural en el comportamiento hidro-físico de suelos con distinta intensidad y secuencia de cultivos bajo siembra directa. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias.
- Kraemer, FB., Chagas, CI., José, H. & Morrás, M. 2013. Influence of physical and chemical soil properties on the adsorption of *Escherichia coli* in mollisols and alfisols of Argentina. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29: 7–20
- Kraemer, FB., Hallett, PD., Morrás, H., Garibaldi, L., Cosentino, D., Duval, M. & Galantini, J. 2019. Soil stabilisation by water repellency under no-till management for soils with contrasting mineralogy and carbon quality. *Geoderma* 355, 113902.
- Krüger, H., Venanzi, S & Galantini, JA. 2004. Rotación y cambios en propiedades químicas de un Hapludol típico del sudoeste bonaerense bajo labranza. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná. Resumen. Pp. 43.
- Kruskal, WH & Wallis, WA. 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American statistical Association*, 47(260): 583-621.
- Lal, R. 2015. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*. 7: 5875- 5895.
- Lal, R & Vandoren, D. 1990. Influence of 25 years of continuous corn production by three tillage methods on water infiltration of two soils in Ohio. *Soil Till. Res.* 16: 71-74.
- Lal, R. 2014. Societal value of soil carbon. *Journal of Soil and Water Conservation*, 69(6): 186A-192A.
- Lal, R & Shukla, MK. 2004. Principles of soil physics. New York, Marcel Dekker. Pp. 716.
- Lange, M., Eisenhauer, N., Sierra, CA. 2015. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nat. Commun.* 6: 6707.
- Laudicina VA., Badalucco L. & Palazzolo, L. 2011. Effects of compost input and tillage intensity on soil microbial biomass and activity under Mediterranean conditions. *Biol Fertil Soils* 47: 63–70.
- Lavado, RS. & Taboada, MA. 2009. The Argentinean Pampas: A key region with a negative nutrient balance and soil degradation needs better nutrient management and conservation programs to sustain its future viability as a world agresource. *J. Soil Water Conserv.* 65: 150-153.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability. I. Theory and methodology. *European J. Soil Sci.* 47: 425-437.
- Lee, J., Hopmans, JW., Rolston, DE., Baer, SG. & Six, J. 2009. Determining soil carbon stock changes: simple bulk density corrections fail. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 134(3-4): 251-256.
- Lehman, RM., Cambardella, CA., Stott, DE., Acosta-Martinez, V., Manter, DK., Buyer, JS., Maul, JE., Smith, JL., Collins, HP. & Halvorson, JJ. 2015. Understanding and enhancing soil biological health: the solution for reversing soil degradation. *Sustainability* 7: 988–1027.
- Leite, LFC., Mendonça, ES., Machado, PLOA. & Matos, ES. 2003. Total C and N storage and organic C pools of a Red-Yellow Podzolic under conventional and no tillage at the Atlantic Forest Zone, south-eastern Brazil. *Soil Research*. 41(4): 717-730.
- León González, Y., Cabrera, CE., Hernández, JM. & Cordero, PL. 2007. Introducción de cultivos alternantes y tecnologías de mejoramiento y conservación en un agroecosistema tabacalero de la CCS Tomás León. *Cuba Tabaco*. 8(1): 26-33.
- Lepsch, IF., Menk, JRF. & Oliveira, JB. 2010. Carbon storage and other properties of soils under agriculture and natural vegetation in São Paulo State, Brazil. *Soil Use Manag.* 10: 34–42.
- Leung, AK., Garg, A. & Ng, CWW. 2015. Effects of plant roots on soil-water retention and induced suction in vegetated soil. *Engineering Geology*, 193: 183-197.

- Lichter, K., Govaerts, B., Six, J., Sayre, K.D., Deckers, J. & Dendooven, L. 2008. Aggregation and C and N contents of soil organic matter fractions in a permanent raised-bed planting system in the Highlands of Central Mexico. *Plant Soil*. 305: 237-252.
- Liebig, M & Doran, J.W. 1999. Impact of organic production practices on soil quality indicators. *J. Environ. Qual.* 28:1601-1609.
- Liebig, M.A., Varvel, G.E., Doran, J.W. & Wienhold, B.J. 2002. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the western corn belt. *Soil Science Society of America Journal*. 66(2): 596-601.
- Lipiec, J., Horn, R., Pietrusiewicz, J. & Siczek, A., 2012. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil Tillage Res.* 121: 74–81.
- Liu, Z., Zhou, W., Shen, J., Li, S., Liang, G., Wang, X., Sun, J. & Al, C. 2014. Soil quality assessment of acid sulfate paddy soils with different productivities in Guangdong Province, China. *Journal of Integrative Agriculture*. 13(1): 177-186.
- Llanes Hernández, J.M., Cabrera Caicedo, E., Otero Martínez, A. & Domínguez Palacios, D. 2013. Asociación maíz frijol terciopelo alternante con tabaco en San Juan y Martínez. *Avances*. 15 (2): 211-217.
- Llanes, J.M. 2000. Efecto de la asociación maíz-leguminosa en la fertilidad del suelo, el rendimiento y la calidad del tabaco cultivado bajo tela [inédito], tesis para optar por el título de Máster en Ciencias. En Universidad de Pinar del Río, Cuba.
- López-Fando, C & Pardo, M.T. 2011. Soil carbon storage and stratification under different tillage systems in a semi-arid region. *Soil Till. Res.* 111: 224-230.
- López-Lefebvre, L.R., Rivero, R.M. García, P.C. Sánchez, E. Ruiz, J.M. & Romero, L. 2001. Boron effect on mineral nutrients of tobacco. *Journal of Plant Nutrition*. 25(3): 509–522.
- Lowery, B. & Morrison, J.E. 2002. Soil penetrometers and penetrability. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis Part 4, Physical Methods*. Soil Science Society of America. Book Series, Madison, WI, pp. 363–385.
- Luo, Z., Wang, E., & Sun, O.J. 2010. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: A review and synthesis. *Geoderma*. 155: 211-223.
- MAGPN. 2011. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Impacto regional del convenio marco para el control del tabaco (1° ed.). Buenos Aires, Argentina.
- Marinari, S., Mancinelli, R., Campiglia, E & Grego, S. 2006. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecological Indicators*. 6(4): 701-711.
- Marschner, P. Crowley, D. & Yang, C.H. 2004. Development of specific rhizosphere bacterial communities in relation to plant species, nutrition and soil type. *Plant and Soil*. 261: 199–208.
- Martens, D.A. 2000. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biol. Biochem.* 32: 361-369.
- Martínez Castillo, M., Osinaga R. & Arzeno J.L. 2010. Terrón Húmedo (TH5): como indicador de calidad de suelos. En: *Resumen XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Rosario. Pp. 212.
- Martínez Robaina, A.Y., Febles González, J.M., do Amaral Sobrinho, N.M., Benítez Odio, M., Morejón García, M., Ruíz Sánchez, M., & Hernández Carballo, R. 2018. Alternancia de cultivos, su efecto sobre el suelo en zonas dedicadas a tabaco negro en Pinar del Río. *Centro Agrícola*. 45(1): 69-77.
- Martínez, S., Faz A. & Esteve, M. 2009. Contenido en carbono orgánico del proceso de desertificación en suelos desarrollados de material parental volcánico en la región de Murcia. Pp. 327-330.
- Masto, R.E., Chonkar, P.K., Singh, D. & Parta, A.K. 2007. Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. *Agric. Ecosyst. Environ.* 18: 130-142.

- Mataix-Solera, J., Guerrero, C., García-Orenes, F., Bárcenas, G. M. & Torres, MP. 2009. forest fire effects on soil microbiology. *Fire effects on soils and restoration strategies*. 5: 133-175.
- Mazzilli, SR., Kemanian, AR., Ernst, OR., Jackson, RB. & Piñeiro, G. 2014. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. *Soil Biol. Biochem.* 75: 273-281.
- McBratney, A., Field, DJ. & Koch, A. 2014. The dimensions of soil security. *Geoderma*. 213: 203-213.
- McCants, CB & Wolt, WG. 1967. Growth and mineral nutrition of tobacco. *Advances in Agronomy* 19: 211-265.
- McDaniel, MD., Grandy, AS., Tiemann, LK. and Weintraub, MN. 2014a. Crop rotation complexity regulates the decomposition of high and low quality residues. *Soil Biol. Biochem.* 78: 243–254.
- McDaniel, MD., Tiemann, LK. & Grandy, AS. 2014b. Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta- analysis. *Ecological Applications*. 24(3): 560-570.
- Melero, S., López-Garrido, R., Murillo, JM. & Moreno, F. 2009. Conservation tillage: Short and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions. *Soil Till Res.* 104: 292-298.
- Melero, S., Porras, JCR., Herencia, JF. & Madejon, E. 2006. Chemical and biochemical properties in a silty loam soil under conventional and organic management. *Soil Tillage Research*, 90(1-2): 162-170.
- Miglierina, AM., Iglesias, JO., Landriscini, MR., Galantini, JA. & Rosell, RA. 2000. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina. 1. Soil physical and chemical properties. *Soil Tillage Research*, 53(2): 129-135.
- Mikha, MM., Benjamin, JG., Vigil, MF., & Nielson, DC. 2010. Cropping intensity impacts on soil aggregation and carbon sequestration in the central Great Plains. *Soil Science Society of America Journal*, 74(5): 1712-1719.
- Mogollón, JP., Martínez, A., Rivas, W., Meseda, C., Muñoz, B., Marquez, E. & Campos, Y. 2015. Carbono orgánico como indicador del proceso de desertificación en suelos agrícolas al Norte de Venezuela. *Suelos Ecuatoriales*, 45(1): 24-30.
- Mome Filho, EA., Silva, AP., Figueiredo, GC., Gimenes, FHS. & Vitti, AC. 2014. Compared performance of penetrometers and effect of soil water content on penetration resistance measurements. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 38: 744–754.
- Monzon, JP., Mercau, JL., Andrade, JF., Caviglia, OP., Cerrudo, AG., Cirilo, AG., Vega, CRC., Andrade, FH. & Calviño, PA. 2014. Maize-soybean intensification alternatives for the Pampas. *F. Crop. Res.* 162, 48–59.
- Moraes, MT., Debiasi, H., Franchini, JC. & Silva, VR. 2012. Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 36, 1704–1713.
- Moreira, MMS & Siqueira, JO. 2002. *Microbiologia e bioquímica do solo*. Ed. UFLA. Brasil.
- Morón, A. & Sawchik, J. 2002. Soil quality indicators in a longterm crop-pasture rotation experiment in Uruguay. Paper 1327. *Proceedings 17th World Congress of Soil Science. Symposium N° 32*. Bangkok, Tailandia.
- Moscatelli, M., Di Tizio, A., Marinari, S. & Grego, S. 2007. Microbial indicators related to soil carbon in Mediterranean land use systems. *Soil Till Res.* 97: 51-59.
- Mota, JCA., Alves, CVO., Freire, AG. & De Assis Júnior, RN. 2014. Uni and multivariate analyses of soil physical quality indicators of a Cambisol from Apodi Plateau–CE, Brazil. *Soil Till. Res.* 140: 66-73.
- Moustakas, NK & Ntzanis, H. 2005. Dry matter accumulation and nutrient uptake in flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Field Crops Research*. 94 (1): 1- 13.
- Mukherjee, A. & Lal, R. 2015. Short-term effects of cover cropping on the quality of a Typic Argiaquolls in central Ohio. *Catena*. 131(1): 125-129.

- Muller, T. & Hoper, H. 2004. Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content: consequences for model applications. *Soil Biology and Biochemistry* 36(6): 877–888.
- Muñoz-Rojas, M. 2018. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 47-52.
- Muñoz-Romero, V., López-Bellido, J., Fernandez-García, P., Redondo, R., Murillo S. & López-Bellido, L. 2017. Effects of tillage, crop rotation and N application rate on labile and recalcitrant soil carbon in a Mediterranean Vertisol. *Soil Till Res* 169:118–123.
- Murphy, D. V., Cookson, WR., Braimbridge, M., Marschner, P., Jones, DL., Stockdale, EA. & Abbott, LK. 2011. Relationships between soil organic matter and the soil microbial biomass (size, functional diversity, and community structure) in crop and pasture systems in a semi-arid environment. *Soil Research*. 49: 582–594.
- Musso, TB., Cantú, MP. & Becker, A. 2006. Indicadores de calidad del suelo. Un set mínimo para Hapludoles de la cuenca del arroyo La Colacha. *Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina*, Salta, Argentina.
- Mwendera, EJ. & Saleem, MAM. 2010. Infiltration rates, surface runoff, and soil loss as influenced by grazing pressure in the Ethiopian highlands. *Soil Use Manag.* 13: 29–35.
- Nadir, A & Chafatinos, T. 1990. Los suelos del NOA (Salta y Jujuy). *Universidad Nacional de Salta*. Salta, Argentina.
- Nadir, A., Osinaga, R., Zapater, MA. & Mattalia, MC. 2004. Diagnóstico para el programa de desarrollo para pequeños productores tabacaleros. *Administración Fondo especial del tabaco, Secretaría de la producción*. Salta, Argentina. Pp 80.
- Nannipieri, P. 1994. The potential use of soil enzymes as indicators of productivity, sustainability and pollution. *Soil biota: management in sustainable farming systems*, 238-244.
- Navarrete Segueda, A., Vela Correa, G., Lopez Blanco, J. & Rodríguez Gamiño, M. 2011. Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *Contactos*. 80: 29-37.
- Navarro Padilla, RA. 2017. Cultivos de cobertura: Aporte y ciclado de nutrientes. Efecto en el corto plazo sobre las propiedades químicas y físicas edáficas y el rendimiento del cultivo sucesor. Tesis presentada para optar al título de Magister de la Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Naveed, M., Brown, LK. & Raffan, AC. 2017. Plant exudates may stabilize or weaken soil depending on species, origin and time. *Eur. J. Soil Sci.* 68: 806–816.
- Nelson, DW. & Sommers, L. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter 1. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. Pp. 539-579.
- Nielsen, M & Winding, A. 2002. *Microorganisms as Indicators of Soil Health*. National Environmental Research Institute, Denmark. Technical Report N°. 388.
- Niero, LAC., Dechen, SCF., Coelho, RM & De Maria, IC. 2010. Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um Latossolo Vermelho distroférico com usos e manejos distintos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(4): 1271-1282.
- Noellemeyer, E., Fernández, R. & Quiroga, A. 2013. Crop and tillage effects on water productivity of dryland agriculture in Argentina. *Agriculture*. 3(1): 1-11.
- Noellemeyer, E., Frank, F., Álvarez, C., Morazzo, G. & Quiroga, A. 2008. Carbon contents and aggregation related to soil physical and biological properties under a land-use sequence in the semiarid region of central Argentina. *Soil Till Res* 99:179-190.
- Noellemeyer, E., Quiroga, A.R. & Estelrich, D. 2006. Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *J. Arid Environ.* 65: 142–155.
- Nortcliff, S. 2002. Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88: 161-168.
- Nosetto, MD., Jobbágy, EG., Brizuela, AB. and Jackson, RB. 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 154: 2-11.
- Nosrati, K. 2013. Assessing soil quality indicator under different land use and soil erosion using multivariate statistical techniques. *Environ. Monit. Assess.* 185: 2895-2907.

- Novelli, LE. 2013. Intensificación de las secuencias de cultivos en un Molisol y un Vertisol: cambios en la estabilidad estructural y en el almacenaje de C en agregados. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias.
- Novelli, LE., Caviglia, OP. & Melchiori, RJM. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma*. 167: 254-260.
- Novelli, LE., Caviglia, OP. & Piñeiro, G. 2017. Increased cropping intensity improves crop residue inputs to the soil and aggregate-associated soil organic carbon stocks. *Soil and Tillage Research*. 165: 128-136.
- Novelli, LE., Caviglia, OP., Wilson, MG. & Sasal, MC. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma*. 195: 260-267.
- Nyamangara, J., Nyazaradzo Masvaya, E., Tirivavi, R. & Nyengerai, K. 2013. Effect of hand-hoe based conservation agriculture on soil fertility and in selected smallholder areas in Zimbabwe. *Soil Till Res*. 126: 19-25.
- OBIO. Observatorio Nacional De Biodiversidad. 2016. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación. Suelos. Buenos Aires, Argentina.
- Ochoa, PA., Fries, A., Mejía, D., Burneo, JI., Ruíz-sinoga, JD. and Cerdà, A. 2016. Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. *Catena*. 140: 31– 42.
- Ojeda, G., Alcañiz, JM. & Le Bissonnais, Y. 2008. Differences in aggregate stability due to various sewage sludge treatments on a Mediterranean calcareous soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 125(1-4): 48-56.
- Olson, K., Ebelhar, SA. & Lang, JM. 2014. Long-term effects of cover crops on crop yields, soil organic carbon stocks and sequestration. *Open J of Soil Sc*. 4: 284.
- Ortega, A. 2009. Producción y manejo sustentable de sistemas tabacaleros en los valles templados de Salta y Jujuy. Proyecto INTA, EEA Salta.
- Ortíz, J., Faggioli, V & Ullé, JA. 2015. Salud del suelo: en la búsqueda de un indicador biológico de sustentabilidad. En: V Congreso Latinoamericano de Agroecología-SOCLA (7 al 9 de octubre de 2015, La Plata).
- Orwin, KH. & Wardle, DA. 2005. Plant species composition effects on belowground properties and the resistance and resilience of the soil microflora to a drying disturbance. *Plant and Soil*. 278: 205–221.
- Ouédraogo, E., Mando, A. & Stroosnijder, L. 2006. Effects of tillage, organic resources and nitrogen fertiliser on soil carbon dynamics and crop nitrogen uptake in semi-arid West Africa. *Soil Tillage Research*. 91(1-2): 57-67.
- Page, AL. 1982. Ed. *Methods of soil Analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. 2nd Edition. Madison, Wisc. USA, American Society of Agronomy (Agronomy Series no. 9).
- Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L. & Grace, P. 2014. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agric. Ecosyst. Environ*. 187: 87-105.
- Pankhurst, CE., Kirkby, CA., Hawke, BG & Harch, BD. 2002. Impact of a change in tillage and crop residue management practice on soil chemical and microbiological properties in a cereal-producing red duplex soil in NSW, Australia. *Biol Fert Soils*. 35: 189-196.
- Pascaud, A., Soulas, M., Amellal, S. & Soulas, G. 2012. An integrated analytical approach for assessing the biological status of the soil microbial community. *European Journal of Soil Biology* 49: 98-106
- Peech, M., Alexander, LT., Dean, LA. & Reed, JF. 1947. *Methods of soil analysis for soil-fertility investigations*. USDA circ. 757, Washington, D.C. 25 p.
- Peralta, NR., Costa, JL., Balzarini, M. & Angelini, H. 2013. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. *Canadian Journal of Soil Science*. 93(2): 205-218.
- Pérez Brandán, C. & Huidobro, J. 2011. Efecto del monocultivo de tabaco (*Nicotiana tabacum*) sobre algunos parámetros biológicos en suelos del Valle de Lerma. Congreso Nacional

- de Ecología y Biología de Suelos. 2. 2011 04 18-20, 18 al 20 de abril de 2011. Mar del Plata, Buenos Aires. AR.
- Pérez Brandán, C., Huidobro, J., Conforto, C., Arzeno, J.L., March, G., Merites, J. & Vargas Gil, S. 2010. Impacto de los sistemas de labranza sobre indicadores biológicos de calidad de suelo. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo - Rosario. Pp. 67.
- Pérez L.; Colque, G., Osinaga, R., Corvalán, E. & Arzeno, J.L. 2010. Características físico-químicas de los suelos del Valle de Lerma y su relación con el manejo. En: Resumen XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario. pág 226.
- Piovanelli, C., Gamba, C., Brandi, G., Simoncini, S. & Batistoni, E. 2006. Tillage choices affect biochemical properties in the soil profile. *Soil Till Res.* 90: 84- 92.
- Pittelkow C., Liang, X., Linquist, B., Van Groenigen, K., Lee, J., M. Lundy, M., Van Gestel, N., Six, J. & Van Kessel, C. 2015. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature.* 517: 365–368.
- Poeplau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., Van Wesemael, B., Schumacher, J. & Gensior, A. 2011. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach. *Glob. Change Biol.* 17: 2415–2427.
- Ponge, J. 2015. The soil as an ecosystem. *Biology and Fertility of Soils* 51:645-648.
- Porras, P. & Alfonso, CA. 1996. Influencia de los cultivos intersechas sobre la conservación del suelo y la calidad del tabaco en la CPA Eliseo Caamaño de Pinar del Río, 4 p., Estación Experimental de Suelos, Pinar del Río.
- Porras, P., Márquez, E. & Díaz, V. 2003. Tecnología integral para la producción sostenible de tabaco de sol en palo en Consolación del Sur [in- édito], Informe final de Proyecto Territorial 0308, 31 p., Estación Experimental de Suelos, Pinar del Río.
- Portugal, AF., Costa, ODV. & Costa, LM. 2010. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da Zona da Mata mineira. *Rev. Bras. Ci. Solo.* 34: 575-585.
- Posse, G., Lewczuk, N., Di Bella, C., Richter, K., Oricchio, P. & Hilbert, J. 2018. Impact of land use during winter on the balance of greenhouse gases. *Soil Use Manag.* 34: 525–532.
- Pulido, M., Schnabel, S., Contador, F., Lozano-Parra, J. & Gómez-Gutiérrez, A. 2017. Selecting indicators for assessing soil quality and degradation in rangelands of Extremadura (SW Spain). *Ecological Indicators.* 74: 49-61.
- Pulido Moncada, M., Gabriels, D., Cornelis, W. & Lobo, D. 2013. Comparing aggregate stability tests for soil physical quality indicators. *Land Degradation & Development.* 26(8): 843-852.
- Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W. & Gu, Z. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma.* 149: 325–334.
- Quintana, G.V., Pino, L.A.P., Hurtado, L.L., Núñez, A.M. & Carrazana, O.L. 2011. La rotación de cultivos en tabaco (*Nicotiana tabacum* L) como práctica indispensable para una agricultura sostenible. *Cuba Tabaco.* 12(1): 40-49.
- Quiroga A., Funaro, D., Fernández, R. & Noellemeyer, E. 2005. Factores edáficos y de manejo que condicionan la eficiencia del barbecho en la región pampeana. *Cienc. Suelo.* 23 (1): 79-86.
- Quiroga, A.R., Oderiz, A.J., Uhaldegaray, M., Alvarez, C., Scherger, E.D., Fernández, R. & Frasier, I. 2017. Influencia del uso de suelos sobre indicadores físicos de compactación. *Semiárida*, 26(2).
- Raiesi, F. & Beheshti, A. 2015. Microbiological indicators of soil quality and degradation following conversion of native forests to continuous croplands. *Ecological Indicators*, 50: 173-185.
- Rani Sarker, J., Pal Singh, B., Dougherty, W.J., Fang, Y., Badgery, W., Hoyle, F.C., Dalal, R.C. & Cowie, A.L. 2018. Impact of agricultural management practices on the nutrient supply potential of soil organic matter under long-term farming systems. *Soil Till Res.* 175: 71–81.

- Restovich, SB., Andriulo, AE., Armas-Herrera, CM., Beribe, MJ. & Portela, SI. 2019. Combining cover crops and low nitrogen fertilization improves soil supporting functions. *Plant Soil*. 442: 401–417.
- Reynolds, W., Drury, C., Tan, C., Fox, C. & Yang, X. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to qualify soil physical quality. *Geoderma*. 152: 252-263.
- Reynolds, WD., Bowman, BT., Drury, CF., Tan, CS. & LU, X. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110: 131–146.
- Rhoades, JD. 1982. Soluble salts. *Methods of soil analysis*. Part, 2(2): 167-178.
- Richards, L. 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. USDA. Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos. *Agric. Handbook N° 60*. 172 pp.
- Rodriguez, MB. 2008. Fertilidad del suelo y nutrición de las plantas. En *Fertilización de cultivos y pasturas*. 2ª edición ampliada y actualizada. (Eds R Melgar y M Díaz Zorita) pp. 37-49. (Hemisferio Sur: Argentina).
- Rojas, JM., Prause, J., Sanzano, GA., Arce, OEA. & Sanchez, MC. 2016. Soil quality indicators selection by mixed models and multivariate techniques in deforested areas for agricultural use in NW of Chaco, Argentina. *Soil and Tillage Research*, 155: 250-262.
- Rojas, JM., Roldan, MF. & Guevara, GS. 2015. Influencia de rotaciones en la calidad del suelo en la zona central del Chaco y su relación con la producción de algodón. *Ciencias del Suelo*. 33(2): 239-246.
- Rojo, W. 2008. Guía de manejo nutrición vegetal de especialidad. Tabaco. Cropkit. SQM S.A. 108 p.
- Roldán, A., Salinas-García, JR., Alguacil, MM. & Caravaca, F. 2005. Changes in soil enzyme activity, fertility, aggregation and C sequestration mediated by conservation tillage practices and water regime in a maize field. *Appl. Soil Ecol*. 30: 11–20.
- Romaniuk, R., A. Costantini, L. Giuffré, & P. Nannipieri. 2016. Catabolic response and phospholipid fatty acid profiles as microbial tools to assess soil functioning. *Soil Use and Management*. 32: 603-612.
- Romaniuk, R., Giuffre, L. & Rosario, R. 2011. A soil quality index to evaluate the vermicompost amendments effects on soil properties. *Journal of environmental protection*. 2 (05): 502-510.
- Romaniuk, R., Giuffré, L., Costantini, A., Bartoloni, N. & Nannipieri, P. 2012. A comparison of indexing methods to evaluate quality of soils: the role of soil microbiological properties. *Soil Research*. 49: 733-741.
- Romaniuk, R; Giuffré, L; Costantini, A; Bartoloni, N & Nannipieri, P. 2014. A comparison of indexing methods to evaluate quality of horticultural soils. Part II. Sensitivity of soil microbiological indicators. *Soil Research*. 52: 409–418.
- Russell, AE., Laird, DA. & Mallarino, AP. 2006. Nitrogen fertilization and cropping system impacts on soil quality in Midwestern Mollisols. *Soil Science Society of America Journal*. 70: 249–255.
- Sainju, U., Singh, B. & Whitehead, W. 2002. Long-term effects of tillage, cover crops, and nitrogen fertilization on organic carbon and nitrogen concentrations in sandy loam soils in Georgia. USA. *Soil Tillage Res*. 63: 167–179.
- Sainz Rozas, HR., Echeverría, HE & Angelini, HP. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del Suelo*. 29: 29-37
- Sala, OE., Chapin, FS., Armesto, JJ., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R. & Leemans R. 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*. 287(5459): 1770-1774.
- Salomé, C., Coll, P., Lardo, E., Metay, A., Villenave, C., Marsden, C. & Le Cadre, E. 2016. The soil quality concept as a framework to assess management practices in vulnerable agroecosystems: A case study in Mediterranean vineyards. *Ecological indicators*. 61: 456-465.
- Sanchez, JE., Willson, TC., Kizilkaya, K., Parker, E. & Harwood, RR. 2001. Enhancing the mineralizable nitrogen pool through substrate diversity in long term cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*. 65:1442–1447.

- Sánchez-Navarro, A., Gil-Vázquez, JM., Delgado-Iniesta, MJ., Marín-Sanleandro, P., Blanco-Bernardeau, A. & Ortiz-Silla, R. 2015. Establishing an index and identification of limiting parameters for characterizing soil quality in Mediterranean ecosystems. *Catena*, 131: 35-45.
- Santos, V., Araújo, A., Leite, L., Nunes, L. & Melo, W. 2012. Soil microbial biomass and organic matter fractions during transition from conventional to organic farming systems. *Geoderma*. 170: 227-231.
- Sanzano, GA., Corbella, RD., García, JR. & Fadda, GS. 2005. Degradación física y química de un Haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. *Ciencia del suelo*. 23(1): 93-100.
- Sarmiento, E., Fandiño, S., & Gómez, L. 2018. AEET. *Ecosistemas*, 27(3): 130-139.
- Sasal, MC., Boizard, H., Andriulo, AE., Wilson, MG., & Léonard, J. 2017. Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil and Tillage Research*. 173: 33-41.
- Sasal, MC., Castiglioni, MG y Wilson, MG. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.* 108: 24-29.
- Schimel, J. & Schaeffer, SM. 2012. Control microbiano sobre el ciclo del carbono en el suelo. *Frontiers in microbiology*. 3. Pp. 348.
- Schoenholtz, S.H., Miegroet, HV. & Burger, JA. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *For. Ecol. Manag.* 138: 335-356.
- Serrano, JM., Peça, JO., da Silva, JRM & Shaidian, S. 2010. Mapping soil and pasture variability with an electromagnetic induction sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*. 73(1): 7-16.
- Shahzad, T., Chenu, C., Genet, P., Barot, S., Perveen, N., Mougin, C., & Fontaine, S. 2015. Contribution of exudates, arbuscular mycorrhizal fungi and litter depositions to the rhizosphere priming effect induced by grassland species. *Soil Biology and Biochemistry*. 80: 146-155.
- Shaver, TM., Peterson, GA. & Sherrod, LA. 2003. Cropping intensification in dryland systems improves soil physical properties: regression relations. *Geoderma*. 166:149-164.
- Sherrod, LA., Peterson, GA., Westfall, DG. & Ahuja, LR. 2003. Cropping intensity enhances soil organic carbon and nitrogen in a no-till agroecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1533-1543.
- Shukla, MK., Lal, R. & Ebinger, M. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*. 87(2): 194-204.
- Silva, RP. & Fernandes, C. 2014. Soil uses during the sugarcane fallow period: influence on soil chemical and physical properties and on sugarcane productivity. *Rev. Bras. Ci. Solo*. 38(2): 575-584.
- Singh, G., Bhattacharyya, R., Das, TK., Sharma, AR., Ghosh, A., Das, S. & Jha, P. 2018. Crop rotation and residue management effects on soil enzyme activities, glomalin and aggregate stability under zero tillage in the Indo-Gangetic Plains. *Soil and Tillage Research*. 184: 291-300.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S & Denef, K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Research*. 79(1): 7-31.
- Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., De Gryze, S., Morris, SJ., Gregorich, EG. & Paustian, K. 2002. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil science society of America journal*. 66(6): 1981-1987.
- Six, J., Frey, SD., Thiet, RK & Batten, KM. 2006. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 555-569.
- Smith OH., Petersen, GW. & Needelman, BA. 2000. Environmental indicators of agroecosystems. *Adv. Agron.* 69: 75-97.
- Smith, W. 2004. Extension Crop Science Specialist – Tobacco. Sherwood Wood Department of Crop Science. Pp. 24.

- Snapp, SS., Gentry, LE. & Harwood, R. 2010. Management intensity—not biodiversity—the driver of ecosystem services in a long-term row crop experiment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 138: 242–248.
- Soon, Y. K., Arshad, MA., Haq, A. & Lupwayi, N. 2007. The influence of 12 years of tillage and crop rotation on total and labile organic carbon in a sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*. 95: 38–46.
- Sparling, GP. 1992. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as sensitivity indicator of changes in soil organic matter. *Aust. J. Soil. Res.* 30: 195–207.
- Stefanoski, DC., Figueiredo, CCD., Santos, GG & Marchão, RL. 2016. Selecting soil quality indicators for different soil management systems in the Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 51(9): 1643–1651.
- Strickland, MS., Osburn, E., Lauber, C., Fierer, N. & Bradford, MA. 2009. Litter quality is in the eye of the beholder: initial decomposition rates as a function of inoculum characteristics. *Functional Ecology*. 23: 627–636.
- Sudduth, KA., Kitchen, NR., Wiebold, WJ., Batchelor, WD., Bollero, GA., Bullock, DG & Thelen, KD. 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and electronics in agriculture*. 46(1-3): 263–283.
- Suwardji, P. & Eberbach, PL. 1998. Seasonal changes of physical properties of an Oxic Paleustalf Red Kandosol after 16 years of direct drilling or conventional cultivation. *Soil Till. Res.* 49: 65–77.
- Suzuki, C., Takenaka, M., Oka, N., Nagaoka, K. and Karasawa, T. 2012. A DGGE analysis shows that crop rotation systems influence the bacterial and fungal communities in soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* 58: 288–296.
- Szatanik-Kloc, A., Horn, R., Lipiec, J., Siczek, A. & Szerement, J. 2018. Soil compaction induced changes of physicochemical properties of cereal roots. *Soil Tillage Res.* 175: 226–233.
- Taboada, MA., Rubio, G. & Chaneton, EJ. 2011. Grazing impacts on soil physical, chemical, and ecological properties in forage production systems. *Soil management: building a stable base for agricultura*. 301–320.
- Taboada-Castro, MM., Rodríguez-Blanco, ML., Taboada-Castro, MT. & Oropeza-Mota, JL. 2011. Vulnerabilidad estructural en suelos de textura gruesa bajo cultivo y huerta. *Terra Latinoamericana*. 29(1): 11–21.
- Tan, Z., Lal, R., Owens, L. & Izaurralde, RC. 2007. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. *Soil Tillage Research*. 92(1-2): 53–59.
- Terrón, JM., Da Silva, JM., Moral, FJ. & García-Ferrer, A. 2011. Soil apparent electrical conductivity and geographically weighted regression for mapping soil. *Precision Agriculture*. 12(5): 750–761.
- Tiemann, L. & Billings, S. 2011. Indirect effects of nitrogen amendments on organic substrate quality increase enzymatic activity driving decomposition in a mesic grassland. *Ecosystems*. 14: 234–247.
- Tiemann, LK. & Grandy, AS. 2015. Mechanisms of soil carbon accrual and storage in bioenergy cropping systems. *Glob. Change Biol. Bioenergy*. 7: 161–174.
- Tiemann, LK., Grandy, AS., Atkinson, EE., Marin-Spiotta, E. & McDaniel, MD. 2015. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecol. Lett.* 18: 761–771.
- Tilman, D., Cassman, KG., Matson, PA., Naylor, R. & Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*. 418: 671–677.
- Tilman, D., Reich, P., Knops, J., Wedin, D., Mielke, T. & Lehman, C. 2001. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science*. 294: 843–845.
- Tilman, D., Reich, PB. & Knops, JM. 2006. Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature*. 441: 629–632.
- Tonitto, C., M. B. David & L. E. Drinkwater. 2006. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 112: 58–72.

- Tormena, CA., Araújo, MA., Fidalski, J. y Costa, JM. 2007. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistemas de plantio direto. *Rev. Bras. Cienc. Solo*. 31: 211–219.
- Torres, CG & Fernández, GS. 1996. Erosión Actual de los Suelos en los Valles Templados de Jujuy. *Agraria*. 1(01): 77-78p.
- Torres, CG., Fernández, GS. & Yarade, LGD. 2019. Provincia de Jujuy. En: Manual de buenas prácticas de conservación del suelo y del agua en áreas de secano. Tomo I. R Casas & F. Damiano (eds). PROSA. FECIC. INTA. Pp: 443-474
- Trasar-Cepeda, C., Leiros, MC., Seoane, S. & Gil-Sotres, F. 2008. Biochemical properties of soils under crop rotation. *Appl Soil Ecol*. 39: 133-143.
- Tso, TC. 1990. Production, Physiology, and Biochemistry of Tobacco Plant (Institute of International Development & Education in Agricultural and Life Sciences: Maryland, USA).
- Urioste, AM., Hevia, GG., Hepper, EN., Anton, LE., Bono, AA. & Buschiazzi, DE. 2006. Cultivation effects on the distribution of organic carbon, total nitrogen and phosphorus in soils of the semiarid region of Argentinian Pampas. *Geoderma*. 136(3-4): 621-630.
- Vallejo, V. 2013. Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*. 16(1): 83-99.
- Van Den Bossche, A., De Bolle, S., De Neve, S. & Hofman, G. 2009. Effect of tillage intensity on N mineralization of different crop residues in a temperate climate. *Soil Till. Res*. 103(2): 316-324.
- Van der Putten, WH., Bardgett, RD., De Ruiter, PC., Hol, WHG., Meyer, KM. & Bezemer, TM. 2009. Empirical and theoretical challenges in aboveground–belowground ecology. *Oecologia*. 161: 1–14.
- Vance, ED., Brookes, PC. & Jenkinson, DS. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem*. 19 (6): 703-707.
- Vargas Gil, S., Meriles, JM., Conforto, C., Figoni, G., Basanta, M., Lovera, E. & March, GJ. 2009. Field assessment of soil biological and chemical quality in response to crop anagement practices. *World J. Microbiol. Biotechnol*. 25: 439-448.
- Varvel, GE. 2006. Soil organic carbon changes in diversified rotations of the Western Corn Belt. *Soil Science Society of America Journal*. 70: 426–433.
- Varvel, GE. & Wilhelm, WW. 2011. No-tillage increases soil profile carbon and nitrogen under long-term rainfed cropping systems. *Soil Tillage Res*. 114: 28–36.
- Vaz, CMP., Manieri, JM., Maria, IC. & Tuller, M. 2011. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*. 166: 92–101.
- Venter, ZS., Jacobs, K. & Hawkins, HJ. 2016. The impact of crop rotation on soil microbial diversity: a meta-analysis. *Pedobiologia*. 59: 215–223.
- Videla, C. & Picone, L. 2017. Indicadores biológicos de calidad de suelo. In: MG Wilson (ed.). Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina. 1a edn. Pp 83-87. Ediciones INTA. Libro digital, PDF.
- Viglizzo, EF. & Jobbágy, E. 2010. Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental. Ediciones INTA. Buenos Aires.
- Villamil, MB., Bollero, GA., Darmody, FW., Simmons, RG. & Bullock, DG. 2006. No-till corn/soybean systems including winter cover crops. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 70: 1936–1944.
- Wagger, MG. & Denton, HP. 1989. Influence of cover crop and wheel traffic on soil physical properties in continuous no-till corn. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 53: 1206–1210.
- Waldrop, MP., Zak, DR., Sinsabaugh, RL. & Sallo, MG. 2004. Nitrogen deposition modifies soil carbon storage through changes in microbial enzymatic activity. *Ecological Applications*. 14: 1172–1177.
- Wander, MM. & Bollero, GA. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Science Society of America Journal*. 63(4): 961-971.

- Wang, J., Li, FM. & Jia, Y. 2006. Responses of soil water, nitrogen, and organic matter to the alfalfa crop rotation in semiarid loess area of China. *Journal of Sustainable Agriculture*. 28: 117–130.
- Wang, P., Marsh, EL., Ainsworth, EA., Leakey, AD., Sheflin, AM. & Schachtman, DP. 2017. Shifts in microbial communities in soil, rhizosphere and roots of two major crop systems under elevated CO₂ and O₃. *Scientific reports*. 7(1): 1-12.
- Wardle, DA & Ghani, A. 1995. A critique of the microbi metabolic quotient (qCO₂) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. *Soil Biol. Biochem.* 27: 1601-1610.
- Wardle, DA. 1992. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soils. *Biological Reviews*. 67: 321–358.
- West, TO. & WM. Post. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66(6): 1930-1946.
- Wickings, K., Grandy, AS., Reed, SC & Cleveland, CC. 2012. The origin of litter chemical complexity during decomposition. *Ecology Letters*. 15: 1180–1188.
- Wiesmeier, M., Hübner, R., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A. & Kögel- Knabner, I. 2014. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation. *Global change biology*. 20(2): 653-665.
- Wilkinson, WC., Fisher, LR., Smith, WD. & Jordan, DL. 2007/2008. Effects of stand loss, planting date, and replanting method on yield and quality of flue-cured tobacco. *Tobacco Science*. 47: 44-52.
- Wilson, MG., Sasal, MC. & Caviglia, OP. 2013. Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. *Geoderma* 192: 354–361.
- Wingeyer, AB., Amado, TJ., Pérez-Bidegain, M., Studdert, GA., Varela, CHP., García, FO. & Karlen, DL. 2015. Impactos en la calidad del suelo de las prácticas agrícolas actuales de América del Sur. *Sostenibilidad*. 7 (2): 2213-2242.
- Xuan, D., Guong, V., Rosling, A., Alström, S., Chai, B. & Högborg, N. 2012. Different crop rotation systems as drivers of change in soil bacterial community structure and yield of rice, *Oryza sativa*. *Biology and Fertility of Soils*. 48: 217–225.
- Yang, H., Niu, J., Tao, J., Gu, Y., Zhang, C., She, S. & Yin, H. 2016. The Impacts of Different Green Manure on Soil Microbial Communities and Crop Health. *Preprints*.
- Yang, X., Ren, W., Sun, B. & Zhang, S. 2012. Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China. *Geoderma*. 177: 49–56.
- Yang, XM. & Wander, MM. 1999. Tillage effects on soil organic carbón distribution and storage in a silt loam soil in Illinois. *Soil Till. Res.* 52(1-2): 1-9.
- Yin, C., Jones, KL., Peterson, DE., Garrett, KA. & Hulbert, SH. 2010. Members of soil bacterial communities sensitive to tillage and crop rotation. *Soil Biol Biochem.* 42: 2111–2118.
- Zach, A., Noellemeyer, E. & Tiessen, H. 2006. Carbon turnover and ¹³C natural abundance under landuse change in the semiarid La Pampa, Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Pp. 70.
- Zak, DR., Holmes, WE., White, DC., Peacock, AD. & Tilman, D. 2003. Plant diversity, soil microbial communities andecosystem function: are there any links? *Ecology*. 84: 2042–2050.
- Zamora, F., Pastor Mogollón, J. & Rodríguez, N. 2005. Cambios en la biomasa microbiana y la actividad enzimática inducidos por la rotación de cultivos en un suelo bajo producción de hortalizas en el estado Falcón, Venezuela. *Multiciencias*, 5(1): 62-70.
- Zen, O., Imhoff, S., Gambaudo, S., Fontanetto, H. & Martel, R. 2009. Identificación de ambientes homogéneos de manejo mediante indicadores de calidad física y química de suelos. INTA EEA Rafaela. Información Técnica de Cultivos de Verano, Campaña, 29-36.
- Zhang, B. & Horn, R. 2001. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China. *Geoderma*. 99(1-2): 123-145.

- Zhang, G., Bai, J., Xi, M., Zhao, Q., Lu, Q. & Jia, J. 2016. Soil quality assessment of coastal wetlands in the Yellow River Delta of China based on the minimum data set. *Ecological Indicators*. 66: 458-466.
- Zhang, J., Changchun, S. & Wenyan, Y. 2007. Effects of cultivation on soil microbiological properties in a freshwater marsh soil in Northeast China. *Soil Till Res*. 93: 231-235.
- Zhang, K., Zheng, H., Chen, FL., Ouyang, ZY., Wang, Y., Wu, YF. & Xiang, XW. 2015. Changes in soil quality after converting Pinus to Eucalyptus plantations in southern China. *Solid Earth*. 6(1): 115-123.
- Zhao, G., Mu, X., Wen, Z., Wang, F., and Gao, P. 2013. Soil erosion, conservation, and Eco-environment changes in the Loess Plateau of China. (9): 1-13.
- Zilio, JP. 2015. Aspectos de calidad de suelos representativos del sur de la provincia de Buenos Aires y efectos de la actividad agropecuaria sobre la misma. Tesis de Magister en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur.
- Zimmerman, R. & Kardos, L. 1961. Effect of bulk density on root growth. *Soil Sci*. 91: 280-288.
- Zornoza, R., Acosta, JA., Bastida, F., Domínguez, SG., Toledo, DM. & Faz, A. 2015. Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. *Soil*. 1(1): 173.
- Zou, C., Li, Y., Huang, W., Zhao, G., Pu, G., Su, J. & Jin, Y. 2018. Rotation and manure amendment increase soil macro-aggregates and associated carbon and nitrogen stocks in flue-cured tobacco production. *Geoderma*. 325: 49-58.
- Zou, CM., Pearce, RC., Grove, JH. & Coyne, MS. 2015. Conservation practices in tobacco production increase large aggregates and associated carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79 (6): 1760–1770.
- Zuber, SM., Behnke, GD., Nafziger, ED & Villamil, MB. 2017. Multivariate assessment of soil quality indicators for crop rotation and tillage in Illinois. *Soil & Tillage Research* 174 : 147–155
- ZubeBinir, SM. & Villamil, MB. 2016. Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*. 97: 176-187
- Zuber, SM., Behnke, GD., Nafziger, ED. & Villamil, MB. 2015. Crop rotation and tillage effects on soil physical and chemical properties in Illinois. *Agron. J.* 107: 971–978.

ANEXOS

Tabla 1. Coordenadas geográficas correspondientes a cada sitio de muestreo para la serie de suelo Perico.

Tratamientos	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
T	S 24° 23' 54.3" W 65° 08' 28.00"	S 24° 23' 53.1" W 65° 08' 28.2"	S 24° 23' 54.4" W 65° 08' 20.0"
TM	S 24° 24' 01.77" W 65° 08' 54.15"	S 24° 23' 46.14" W 65° 09' 09.34"	S 24° 25' 37.38" W 65° 06' 22.00"
TV	S 24° 24' 19.24" W 65° 08' 34.28"	S 24° 24' 28.81" W 65° 09' 15.44"	S 24° 24' 1.44" W 65° 06' 18.67"
TG	S 24° 33' 44.8" W 65° 08' 24.9"	S 24° 27' 37.40" W 65° 06' 40.38"	S 24° 25' 21.16" W 65° 06' 14.81"

Tabla 2. Coordenadas geográficas correspondientes a cada sitio de muestreo para la serie de suelo Monterrico.

Tratamientos	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
T	S 24° 27' 05.1" W 65° 09' 42.0"	S 24° 25' 49.63" W 65° 12' 44.55"	S 24° 25' 55.73" W 65° 12' 46.20"
TM	S 24° 27' 15.4" W 65° 08' 59.3"	S 24° 27' 28.17" W 65° 09' 07.1"	S 24° 25' 11.55" W 65° 12' 48.3"
TV	S 24° 27' 1.0" W 65° 09' 41.3"	S 24° 27' 04.93" W 65° 09' 29.09"	S 24° 25' 47.1" W 65° 12' 53.05"
TG	S 24° 26' 55.7" W 65° 10' 06"	S 24° 25' 30.9" W 65° 12' 53.85"	S 24° 25' 50.52" W 65° 13' 5.4"

Tabla 3. Analisis de correlación entre los distintos tamaños de partícula (arcilla, limo, arena) y los resultados de las variables físicas, químicas y biológicas para la serie de suelo Perico.

Profundidad	0-20 cm			20-40 cm		
Variables	% arcilla	% limo	% arena	% arcilla	% limo	% arena
COPT	-0,25 ns	-0,07 ns	0,21 ns	-0,42 ns	-0,64 *	0,56 ns
COA	-0,24 ns	-0,09 ns	0,20 ns	0,34 ns	0,17 ns	-0,28 ns
COPG	-0,27 ns	-0,09 ns	0,23 ns	-0,52 ns	-0,72*	0,65*
COPF	-0,19 ns	0,01 ns	0,15 ns	0,14 ns	0,06 ns	-0,05 ns
COT	-0,27 ns	-0,09 ns	0,22 ns	0,26 ns	-0,06 ns	-0,05 ns
PH	-0,39 ns	-0,20 ns	0,35 ns	-0,42 ns	-0,37 ns	0,42 ns
CE	-0,29 ns	0,10 ns	-0,25 ns	0,05 ns	-0,04 ns	-0,01 ns
Ca	0,70*	0,69*	-0,68*	0,54 ns	0,46 ns	-0,53 ns
Mg	0,51 ns	0,50 ns	-0,48 ns	0,03 ns	-0,06 ns	0,01 ns
Na	0,64*	0,60 *	-0,65*	0,31 ns	0,28 ns	-0,31 ns
K	0,58 ns	0,49 ns	-0,51 ns	-0,47 ns	-0,09 ns	0,31 ns
NT	-0,23 ns	-0,04 ns	0,18 ns	0,35 ns	0,11 ns	-0,25 ns
C/N	-0,32 ns	-0,15 ns	0,29	-	-	-
PE	0,44 ns	0,26 ns	-0,39 ns	0,41 ns	0,33 ns	-0,39 ns
CBM	-0,40 ns	-0,28 ns	0,38 ns	-0,44 ns	-0,32 ns	0,40 ns
RB	-0,39 ns	-0,14 ns	0,29 ns	-0,08 ns	-0,28 ns	0,18 ns
qCO ₂	0,13 ns	0,13 ns	-0,16 ns	0,39 ns	0,13 ns	-0,28 ns
CBM/COT	-0,19 ns	-0,25 ns	0,21 ns	-0,50 ns	-0,21 ns	0,39 ns
Stock C	-0,27 ns	-0,08 ns	0,22 ns	0,39 ns	0,15 ns	-0,29 ns
DMP _p	-0,24 ns	-0,16 ns	0,25 ns	-0,27 ns	-0,32 ns	0,31 ns
HR	-0,31 ns	-0,18 ns	0,30 ns	-0,30 ns	-0,52 ns	0,29 ns
HM	-0,13 ns	-0,14 ns	0,16 ns	-0,30 ns	-0,30 ns	0,32 ns
HL	-0,23 ns	-0,14 ns	0,24 ns	-0,12 ns	-0,34 ns	0,23 ns
Da	-0,50 ns	-0,59*	0,57 ns	0,12 ns	0,16 ns	-0,14
RP	-0,14 ns	-0,01 ns	0,07 ns	0,07 ns	0,22 ns	-0,15 ns
Vel. Inf.	-0,30 ns	-0,15 ns	0,27 ns	-	-	-

Tabla 4. Analisis de correlación entre los distintos tamaños de partícula (arcilla, limo, arena) y los resultados de las variables físicas, químicas y biológicas para la serie de suelo Monterrico.

Profundidad		0-20 cm			20-40 cm	
Variables	% arcilla	% limo	% arena	% arcilla	% limo	% arena
COPT	-0,56 ns	0,01 ns	0,47 ns	0,29 ns	0,04 ns	-0,26 ns
COA	-0,27 ns	-0,17 ns	0,30 ns	0,49 ns	0,16 ns	-0,48 ns
COPG	-0,55 ns	0,01 ns	0,46 ns	0,10 ns	0,04 ns	-0,10 ns
COT	-0,46 ns	-0,07 ns	0,42 ns	0,52 ns	0,15 ns	-0,50 ns
PH	0,30 ns	-0,44 ns	-0,07 ns	0,16	-0,13 ns	-0,08 ns
CE	0,44 ns	-0,01 ns	-0,37 ns	0,42	0,24 ns	-0,45 ns
Ca	0,33 ns	0,42 ns	-0,45 ns	0,41	0,49 ns	-0,55 ns
Mg	0,02 ns	0,29 ns	-0,14 ns	0,31	0,17 ns	-0,33 ns
Ca/Mg	0,18 ns	-0,05 ns	-0,13 ns	-	-	-
Na	0,11 ns	0,72 *	-0,39 ns	-0,01 ns	-0,26 ns	0,11 ns
K	0,43 ns	0,03 ns	-0,37 ns	0,68*	-0,07 ns	-0,55 ns
NT	-0,48 ns	-0,06 ns	0,43 ns	0,52 ns	0,15 ns	-0,50 ns
PE	0,45 ns	0,04 ns	-0,40 ns	0,40 ns	-0,24 ns	-0,23 ns
CBM	-0,52 ns	-0,19 ns	0,51 ns	0,03 ns	-0,41 ns	0,14 ns
RB	-0,43 ns	-0,24 ns	0,46 ns	-0,22 ns	-0,03 ns	0,20 ns
qCO ₂	0,62*	0,14 ns	-0,58*	-0,23 ns	0,12 ns	0,15 ns
CBM/COT	-0,34 ns	-0,24 ns	0,38 ns	-0,28 ns	-0,39 ns	0,40 ns
Stock C	-0,46 ns	-0,07 ns	0,42 ns	0,52 ns	0,15 ns	-0,50 ns
DMP _p	-0,40 ns	-0,07 ns	0,31 ns	-0,46 ns	0,15 ns	0,33 ns
HR	-0,52 ns	-0,04 ns	0,45 ns	-0,39 ns	0,20 ns	0,25 ns
HM	-0,28 ns	0,05 ns	0,22 ns	-0,20 ns	0,44 ns	-0,02 ns
HL	-0,31 ns	0,17 ns	0,19 ns	-0,58*	-0,11 ns	0,54 ns
Da	0,29 ns	-0,03 ns	-0,23 ns	-0,19 ns	0,05 ns	0,18 ns
RP	0,40 ns	-0,33 ns	0,48	-0,12 ns	0,32 ns	-0,03 ns
V _{inf.}	-0,47 ns	-0,15 ns	0,46	-	-	

Tabla 5. Humedad del suelo para la serie de suelo Perico (0-20 cm)

Tratamiento	Humedad %
TV	7,7
TM	7,7
TG	9,0
T	9,3

Tabla 6. Humedad del suelo para la serie de suelo Monterrico (0-20 cm)

Tratamiento	Humedad %
TV	8,3
TG	9
TM	10,7
T	14

Tabla 7. Ejemplo del procedimiento realizado para obtener los valores finales de los índices de calidad de suelo para el testigo de la Serie de Suelo Perico en el ICSP A.

Indicadores seleccionados	Valores	Valores extremos	Calculo	Valor normalizado	Ponderación	Valor Índice
COT 1	3,11	3,37	3,11/3,37	0,92	0,78	0,90
CBM/COT 2	0,75	0,94	0,75/0,94	0,80	0,22	

Valores: valores medios de las variables COT 1 y CBM/COT 2 T; Valores extremos: valores máximos hallados para cada variable según la variable responda al criterio de “cuanto mayor es mejor”; Cálculo: se divide el valor observado por el mayor valor hallado para COT 1 y CBM/COT 2; Valor normalizado: valor resultante del cálculo anterior; Valor índice: valor resultante de la sumatoria de los valores normalizados de los indicadores multiplicado por su ponderación (ICSP A= COT 1*0,78+CBM/COT 2*0,22).

Tabla 8. Coeficientes de correlación entre las variables físicas, químicas y biológicas seleccionadas para la serie de suelo Perico.

	COPT 1	COA 1	COPG 1	COT 1	pH1	CE 1	Na 1	N 1	P 1	CBM 1	RB 1	CBM/ COT 1	Stock C 1	DMP 1	Vel. Inf.	COA2	COT 2	pH2	CE 2	Ca 2	Mg 2	N 2	P 2	CBM 2	CBM/COT 2	DMP2	Da2
COPT 1	1																										
COA 1	0,72	1																									
COPG 1	1	0,73	1																								
COT 1	0,97	0,87	0,97	1																							
pH1	0,94	0,77	0,94	0,94	1																						
CE 1	-0,88	-0,62	-0,88	-0,85	-0,92	1																					
Na 1	-0,21	-0,13	-0,21	-0,2	-0,4	0,47	1																				
N 1	0,95	0,88	0,96	0,99	0,91	-0,82	-0,19	1																			
P 1	-0,74	-0,62	-0,75	-0,75	-0,86	0,77	0,56	-0,74	1																		
CBM 1	0,72	0,9	0,72	0,84	0,78	-0,7	-0,46	0,84	-0,67	1																	
RB 1	0,73	0,86	0,73	0,83	0,72	-0,54	-0,2	0,84	-0,69	0,83	1																
CBM/COT 1	-0,35	9,00E-04	-0,35	-0,24	-0,27	0,22	-0,47	-0,2	0,16	0,3	0,08	1															
stock C 1	0,97	0,87	0,97	1	0,94	-0,85	-0,22	0,99	-0,75	0,84	0,82	-0,23	1														
DMP 1	0,87	0,79	0,87	0,9	0,92	-0,86	-0,31	0,88	-0,76	0,75	0,59	-0,3	0,91	1													
Vel. Inf.	0,92	0,8	0,93	0,94	0,96	-0,85	-0,19	0,91	-0,73	0,72	0,66	-0,4	0,94	0,92	1												
COA2	0,71	0,71	0,71	0,76	0,61	-0,48	0,27	0,78	-0,33	0,56	0,58	-0,28	0,74	0,6	0,71	1											
COT 2	0,74	0,73	0,75	0,79	0,62	-0,51	0,24	0,8	-0,31	0,61	0,59	-0,25	0,78	0,63	0,73	0,99	1										
pH2	0,92	0,83	0,92	0,95	0,97	-0,89	-0,44	0,93	-0,8	0,89	0,79	-0,08	0,96	0,89	0,92	0,6	0,64	1									
CE 2	-0,69	-0,82	-0,69	-0,78	-0,64	0,53	0,22	-0,8	0,61	-0,8	-0,94	-0,12	-0,77	-0,56	-0,56	-0,53	-0,54	-0,72	1								
Ca 2	0,2	0,12	0,21	0,19	0,1	4,10E-03	0,77	0,18	0,02	-0,26	0,03	-0,82	0,17	0,15	0,29	0,43	0,37	-0,03	0,09	1							
Mg 2	0,72	0,52	0,72	0,69	0,67	-0,55	0,32	0,66	-0,48	0,3	0,38	-0,72	0,69	0,69	0,78	0,71	0,71	0,57	-0,24	0,73	1						
N 2	0,61	0,6	0,61	0,65	0,48	-0,37	0,34	0,66	-0,12	0,48	0,44	-0,25	0,64	0,5	0,6	0,96	0,97	0,5	-0,42	0,36	0,63	1					
P 2	-0,71	-0,74	-0,71	-0,77	-0,77	0,6	0,49	-0,78	0,85	-0,82	-0,86	-0,12	-0,78	-0,7	-0,65	-0,35	-0,38	-0,82	0,78	0,15	-0,36	-0,2	1				
CBM 2	0,67	0,74	0,67	0,74	0,66	-0,67	-0,51	0,76	-0,63	0,9	0,77	0,36	0,75	0,67	0,53	0,36	0,43	0,78	-0,83	-0,35	0,14	0,28	-0,81	1			
CBM/COT 2	0,24	0,42	0,24	0,33	0,29	-0,34	-0,59	0,35	-0,48	0,61	0,55	0,55	0,34	0,29	0,09	-0,15	-0,11	0,41	-0,65	-0,54	-0,27	-0,25	-0,65	0,83	1		
DMP2	0,85	0,55	0,85	0,8	0,78	-0,75	-0,11	0,79	-0,71	0,52	0,47	-0,45	0,8	0,84	0,76	0,63	0,66	0,71	-0,45	0,3	0,78	0,53	-0,6	0,54	0,15	1	
Da2	-0,71	-0,9	-0,72	-0,83	-0,81	0,64	0,25	-0,81	0,64	-0,81	-0,72	0,12	-0,82	-0,82	-0,83	-0,65	-0,67	-0,81	0,72	-0,02	-0,49	-0,59	0,66	-0,6	-0,27	-0,55	1

Tabla 9. Coeficientes de correlación entre las variables físicas, químicas y biológicas seleccionadas para la serie de suelo Monterrico.

	COA1	COT1	CE 1	Ca 1	NT 1	PE 1	CBM1	RB 1	Stock C1	DMP1	Da1	Vinf.	COA2	Na 2	P 2	CBM2	RB 2	DMP2	Da2
COA1	1																		
COT1	0,92	1																	
CE 1	-0,6	-0,55	1																
Ca 1	0,06	-0,06	-0,47	1															
NT 1	0,9	0,99	-0,57	-0,01	1														
P 1	-0,73	-0,72	0,81	-0,27	-0,73	1													
CBM1	0,88	0,84	-0,67	-0,15	0,81	-0,77	1												
RB 1	0,84	0,9	-0,39	-0,29	0,88	-0,62	0,86	1											
Stock C 1	0,85	0,98	-0,45	-0,12	0,98	-0,63	0,75	0,89	1										
DMP1	0,9	0,87	-0,76	0,22	0,86	-0,8	0,86	0,7	0,79	1									
Da1	-0,89	-0,8	0,61	-0,07	-0,77	0,78	-0,89	-0,74	-0,69	-0,92	1								
Vel. Inf.	0,88	0,88	-0,78	0,11	0,85	-0,83	0,88	0,71	0,8	0,96	-0,87	1							
COA2	-0,7	-0,72	0,51	0,35	-0,7	0,52	-0,79	-0,75	-0,67	-0,63	0,63	-0,64	1						
Na 2	-0,52	-0,28	0,6	-0,77	-0,31	0,45	-0,31	-0,13	-0,19	-0,53	0,46	-0,48	-0,02	1					
PE 2	-0,78	-0,72	0,7	-0,26	-0,72	0,93	-0,75	-0,59	-0,62	-0,85	0,84	-0,86	0,43	0,5	1				
CBM2	0,08	0,17	0,42	-0,71	0,13	0,48	0,11	0,33	0,26	-0,11	0,11	-0,11	-0,33	0,46	0,43	1			
RB 2	0,75	0,72	-0,49	-0,21	0,64	-0,63	0,89	0,78	0,64	0,74	-0,8	0,78	-0,63	-0,18	-0,65	0,17	1		
DMP2	0,87	0,9	-0,68	0,1	0,92	-0,85	0,8	0,76	0,85	0,9	-0,83	0,89	-0,69	-0,37	-0,88	-0,13	0,6	1	
Da2	-0,77	-0,73	0,35	-0,21	-0,72	0,49	-0,57	-0,75	-0,72	-0,67	0,69	-0,61	0,41	0,52	0,53	-0,06	-0,57	-0,62	1