

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FISICO-QUIMICAS Y
NATURALES**

TESIS DOCTORAL EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

**õEVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO DEL ÁREA ORIENTAL DE
LA REGIÓN SEMIÁRIDA PAMPEANAö**

DOCTORANDO: MSc. Cristian Osvaldo Álvarez

DIRECTORA: Dra. Analía Rosa Becker

CODIRECTOR: Dr. Alberto Raúl Quiroga

A los 17 días del mes de diciembre del año 2018

í í í í í í í í í ..

Dr. Pablo J. Bouza

.í í í í í í í ..í ..

Dr. Hugo R. Krüger

í í í í í í í í í í í ..

Dra. María Grumelli

DEDICATORIA

*•A María de los Angeles, mi esposa,
y a mis hijos Abi y Juan•*

AGRADECIMIENTOS

A Analia Becker por confiar en mí. Muy especialmente a Elke Noellemeyer y Alberto Quiroga, por ser mis consejeros y orientadores.

Al INTA Gral. Pico y EEA Anguil. Especialmente a mi amiga y compañera Romina Fernández.

A los Drs. Hugo Schiavo, Camilo Bedano y María Grumelli.

Al Departamento de geología de UNRC.

A mi primo Ramiro Bagnato por toda la colaboración durante su estadía como pasante en la agencia.

A mis padres y abuela Florinda

RESUMEN

Dada la creciente demanda de alimentos, el deterioro de los suelos y la alta variabilidad de rendimientos asociados a las condiciones limitante de los diferentes ambientes productivos, es necesario encontrar indicadores de gestión y calidad de suelo para mitigar los procesos negativos. Es por ello que se plantea como objetivo evaluar el impacto de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo relacionadas con la textura, mineralogía, materia orgánica y relieve, en relación al manejo específico, sobre la productividad del suelo del área oriental y medanosa de la región semiárida pampeana. En primera instancia se realizó un abordaje a escala regional donde se efectuó un muestreo considerando el efecto del uso del suelo en una transecta edafo-climática desde el noroeste de la provincia de La Pampa hasta el sureste de la misma. Por otra parte, se llevó a cabo un estudio a una escala de detalle considerando la variabilidad de ambientes dentro de una catena representativa. A fin de cumplir con los objetivos se determinó carbono orgánico total y sus fracciones, nitrógeno total, textura, distribución de tamaño de agregados, inestabilidad estructural, densidad aparente máxima, susceptibilidad a la compactación, humedad crítica, mineralogía de arcillas y arenas, y se realizaron y analizaron cortes delgados. Es importante destacar que la catena presenta diferentes secciones, superior, media e inferior (SS, SM y SI, respectivamente). Los procesos pedogenéticos han diferenciado los perfiles de los suelos de la catena generando nuevos horizontes, y se puede estipular que el material parental no fue el factor que ha incidido en los cambios morfológicos en el perfil, ya que no se encontraron diferencias en la textura ni en la mineralogía de arcillas y arenas. El desarrollo de horizontes pedológicos no fue influenciado por el clima, sino por el factor relieve-drenaje, evidenciado a través de rasgos pedogenéticos de óxido-reducción (presencia de moteados de Fe y Mn). En tanto que, en la SM, por tener influencia del nivel freático cercano, se observó salinización en superficie que afectaría el crecimiento vegetal. En SI la presencia del nivel freático cercano a la superficie genera anoxia temporaria en el perfil (óxido-reducción), condicionando el crecimiento y desarrollo del cultivo, sumado al alto riesgo de anegamiento que presenta el mismo. En las condiciones estudiadas, los indicadores más sensibles y sencillos de medir para evaluar calidad de suelos están relacionados a la fertilidad química (materia orgánica) y física (relaciones entre agregados y textura). La variación de los contenidos de MOT estuvo relacionada principalmente a la posición en la catena. Si bien los valores medios de este indicador en la SS y SI fueron similares, la variación espacial de este parámetro fue mayor en la SI posiblemente afectada por las variaciones de micro-relieve dentro de la misma, asociada a la influencia del nivel freático. En tanto que en la SM los niveles de MOT fueron menores,

posiblemente asociados a la concentración de sales que se registra tanto en esta grilla como en el perfil modal, generando un alto CV en este parámetro asociado a la variabilidad intrínseca de esta sección. El indicador compuesto, IMO, tomó los valores más bajos en la SM y SI, posiblemente asociado a los procesos de óxido reducción y salinización generados a través de la capa freática cercana. Los cambios en el régimen hídrico por exceso o déficit han provocado cambios significativos en los rendimientos del cultivo de maíz, variando entre campaña y fecha de siembra en cada sección del perfil. En síntesis, la productividad del cultivo de maíz fue determinada por el ambiente, reflejándose en indicadores del estado físico-hídrico del suelo, como es EUA, observando los mayores valores en la SS en todas las campañas evaluadas y en fechas de siembras tempranas. Esta variabilidad espacial en los procesos pedogenéticos en función de las diferencias del régimen hídrico causado por el tipo de la vegetación y el uso del suelo resulta en la diferenciación de perfiles de suelo en el paisaje determinados por el efecto antrópico. No existe una relación directa entre las variables indicadoras utilizadas y el rendimiento de los cultivos. Esto remarca la importancia de conocer la catena y los procesos morfopedogenéticos de la misma. Resultaría conveniente realizar estudios sobre nutrición de los cultivos o evaluar los efectos del manejo (Ejemplo: sistemas de labranza, rotaciones) considerando el régimen hídrico de los suelos.

ABSTRACT

Given the growing demand for food, the deterioration of soils, and the high variability of yields associated with the production-limiting conditions of different environments, it is necessary to find indicators of soil management and -quality to mitigate negative processes. That is why the objective was to evaluate the impact of the spatial variability of soil properties related to texture, mineralogy, organic matter and topography, in relation to site-specific management, on soil productivity of the eastern sandy area of the semi-arid Pampa region. On the other hand, a study was carried out on a detailed scale considering the variability of environments within a representative catena. In order to comply with the objectives, total organic carbon and its fractions, total nitrogen, texture, distribution of aggregate size, structural instability, maximum bulk density, susceptibility to compaction, critical moisture, clay and sand mineralogy were determined and thin sections were made and analyzed. It is important to note that the catena has different sections, upper, middle and lower (SS, SM and SI, respectively). The pedogenetic processes have differentiated the soil profiles of the catena generating new horizons, and it can be postulated that the parental material was not the factor that has affected the morphological changes in the profile, since no differences were found in the texture or in the clay and sand mineralogy. The development of pedological horizons was not influenced by climate, but by the relief-drainage factor, evidenced by pedogenetic redox features (presence of mottles of Fe and Mn). While, in the SM, because of the influence of the high water table, surface salinization was observed that would affect plant growth. In SI the presence of the groundwater level near the surface generates temporary anoxia in the profile (oxide-reduction), conditioning the growth and development of the crop, in addition to the high risk of waterlogging. In the conditions studied, the most sensitive and simple indicators to evaluate soil quality are related to chemical (MO) and physical (relations between aggregates and texture) fertility. The variation of MOT contents was related mainly to the position in the catena. Although the mean values of this indicator in the SS and SI were similar, the spatial variation of this parameter was greater in the SI possibly affected by micro-relief variations, associated with the influence of the water table. While in SM the MOT levels were lower, possibly due to the concentration of salts, generating a high variability in this parameter associated with the intrinsic variability of this section. The composite indicator, IMO, took the lowest values in the SM and SI, possibly related to the redox processes and salinization generated through the high water table. Changes in the water regime due to excess or deficit have caused significant changes in maize crop yields, varying between season and date of planting in each section of the profile. In summary, the

productivity of the corn crop was determined by the environment, reflected in indicators of the hydro-physical state of the soil, as EUA, observing the highest values in the SS in all the evaluated seasons and in early plantings. This spatial variability in the pedogenetic processes depending on the differences in the water regime caused by the type of vegetation cover and the use of the soil results in the differentiation of soil profiles in the landscape determined by the anthropic effect. There is no direct relationship between the indicator variables used and the yield of the crops. This highlights the importance of knowing the catena and the morphopedogenetic processes of it. It would be convenient to carry out studies on crop nutrition or to evaluate the effects of management (Example: tillage systems, rotations) considering the water regime of the soils.

Contenido

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	15
1.1.	Introducción General	16
1.2.	Efecto de factores ambientales sobre la productividad de los cultivos	17
1.2.	Efecto de la heterogeneidad espacial de las propiedades de suelos sobre la productividad de los cultivos	19
1.4.	Variables de suelo que condicionan el rendimiento de los cultivos.....	20
1.5.	Hipótesis	26
1.6.	Objetivo general	27
1.7.	Objetivos específicos.....	27
CAPÍTULO 2	MATERIALES Y MÉTODOS	28
2.1.	Ubicación del área de estudio	29
2.2.	Caracterización del área.....	29
2.3.	Metodología General.....	33
2.4.	Metodología específica.....	33
2.5.	Selección de los sitios de muestreo	35
2.6.	Caracterización de las propiedades de los sitios	35
2.7.	Análisis mineralógico.....	37
2.8.	Análisis micromorfológico	38
2.9.	Evaluación de la conductividad eléctrica aparente	38
2.10.	Análisis estadístico	40
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSION.....	42
3.1.	Caracterización climática.....	43
3.1.1.	Precipitaciones.....	43
3.1.2.	Régimen térmico	45
3.1.3.	Régimen de heladas	46
3.1.4.	Balance hídrico modular	47
3.1.5.	Régimen de vientos	48
3.1.6.	Índice de severidad de Palmer.....	49
3.2.	Caracterización geomorfológica	50
CAPÍTULO 4	ANÁLISIS REGIONAL	52
4.	Análisis regional de la interacción entre sitio y uso del suelo sobre algunas variables indicadoras.....	53
4.1.	Efecto de sitio sobre indicadores de calidad de suelos	54
4.2.	Efecto del manejo sobre indicadores de calidad de suelos.....	60
CAPÍTULO 5	CARACTERIZACIÓN DE LA CATENA	64
5.	Caracterización de la catena	65

5.1. Caracterización morfológica y propiedades químicas, físico-químicas y físicas de los perfiles de la catena.	66
5.1.1. Sección superior	66
5.1.2. Sección intermedia	68
5.1.3. Sección inferior	70
5.2. Caracterización mineralógica.....	73
5.3. Caracterización micromorfológica de los perfiles de la catena	80
5.3.1. Sección superior	80
5.3.2. Sección intermedia	82
5.3.3. Sección inferior	85
CAPÍTULO 6 CATENA Y CULTIVO	88
6. Propiedades edáficas y de cultivos evaluados en la catena	89
6.1. Valores medios de las propiedades de los suelos en las tres posiciones de la catena	90
6.2. Rendimiento del cultivo de maíz.....	92
6.3. Recurrencia de inundaciones en la sección inferior	96
6.4. Relaciones entre las propiedades edáficas y la medición georeferenciada de la conductividad eléctrica aparente.....	101
6.5. Variabilidad y distribución espacial de las propiedades del suelo.....	103
CAPÍTULO 7 INTEGRADOR	108
7.1. La variabilidad espacial de las propiedades físicas y su relación con la textura, mineralogía, relieve y los procesos pedogenéticos	109
7.2. El efecto del manejo del suelo sobre la calidad física y el contenido de materia orgánica	110
7.3. Relaciones entre indicadores de calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos	111
CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES	114
8.1. La variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo está condicionada por la textura y la mineralogía del suelo, y asociadas a la variabilidad climática zonal.....	115
8.2. Las propiedades físicas/químicas del suelo varían de acuerdo al efecto del relieve debido a los diferentes procesos pedogenéticos que han actuado	115
8.3. Las prácticas de manejo teniendo en cuenta las características morfopedogenéticas contribuyen a mejorar la productividad de los suelos.....	115
8.4. Existe una relación directa entre el nivel de las variables indicadoras de fertilidad física/química y el rendimiento de los cultivos	116
BIBLIOGRAFÍA	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Fechas medias, desvío estándar de primeras y últimas heladas, temperatura mínima media y absoluta, periodo medio con heladas e índice crikindinoscópico a 1,5m al Este de la provincia de La Pampa (Serie 1973-2014).	46
Tabla 2. Balance hídrico modular mensual de Gral. Pico (Serie 1961-2014), La Pampa con una capacidad de campo= 200 mm.	48
Tabla 3. Balance hídrico modular de Gral. Pico (Serie 1961-2014), La Pampa con una capacidad de campo=100 mm.	48
Tabla 4. Clasificación del ISSP para períodos húmedos y secos.	49
Tabla 5. Contenido de arcilla (Ar), arcilla + limo (a+l), materia orgánica total (MOT), joven (MOJ), intermedia (MOI), vieja (MOV) en tres sitios y dos usos de suelo, prístino y agrícola.	54
Tabla 6. Densidad Aparente máxima (DAmax.), susceptibilidad a la compactación (SC), índice de inestabilidad estructural (IIE), proporción de agregados >2mm en tres sitios diferentes (noroeste-centro y sureste la provincia de la pampa y bajo uso agrícola y prístino).	58
Tabla 7. Valores de indicadores de calidad de suelos, en los sitios agrícola y prístino de la región semiárida pampeana.	59
Tabla 8. Valores de probabilidad de Pearson, en uso agrícola y sitio prístino de la región semiárida pampeana.	60
Tabla 9. Materia orgánica total (MOT), joven (MOJ), intermedia (MOI), vieja (MOV) bajo los suelos prístino y agrícola.	60
Tabla 10. Densidad aparente máxima (DAmax.), susceptibilidad a la compactación (SC), índice de inestabilidad estructural (IIE), proporción de agregados >2 mm bajo sitio prístino y agrícola.	62
Tabla 11. Valores de indicadores de calidad de suelos en uso prístino y agrícolas.	62
Tabla 12. Propiedades químicas, físico-químicas y físicas del perfil.	67
Tabla 13. Propiedades químicas, físico-químicas y físicas del perfil.	69
Tabla 14. Propiedades químicas, físico-químicas y físicas del perfil de la sección inferior.	71
Tabla 15. Contenido de arcilla + limo (a+l), materia orgánica (MO), Fósforo (P) y pH, Conductividad eléctrica (CE), Índice de materia orgánica/ arcilla + limo (IMO), promedios, máximos y mínimos de los suelos superficiales en distintas posiciones de la sección	

(valores promedios de los puntos de muestreo en una grilla espacial). (L-sección superior), (ML-sección media) y (B-sección inferior).....	91
Tabla 16. Rendimiento promedio del cultivo de maíz, agua disponible (AD) y eficiencia uso de agua (EUA) para las secciones de la catena en las campañas 2011-2012 y 2012-2013.....	93
Tabla 17: Rendimiento promedio del cultivo de maíz, agua disponible a la siembra (ADS) y eficiencia de uso de agua (EUA) para fechas de siembra temprana y tardía en ambientes de sección superior y media.	94
Tabla 18. Rendimiento promedio del cultivo de maíz, agua disponible y eficiencia de uso de agua para fechas de siembra temprano y tardío en las campañas 2011-2012 y 2012-2013.....	95
Tabla 19. Medidas descriptivas de las propiedades del suelo. Número de muestras (n), Desvío Estándar (D.E), Variación (Var), Coeficiente de variación (CV), Valor Mínimo (Mín) y Máximo (Máx).....	104
Tabla 20. Coeficiente de correlación lineal entre las variables. Arcilla+limo (a+l), materia orgánica total (MOT), fósforo (P), pH, Conductividad eléctrica (CE), Índice de Materia orgánica (IMO).	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rendimientos potenciales experimentales y comerciales del cultivo de sorgo (R^2 rinde/precipitaciones=0,00275).	19
Figura 2. Ubicación del área de estudio.	29
Figura 3. Paisaje región central oriental y medanosa semiárida pampeana.	30
Figura4. Precipitaciones medias anuales y temperaturas medias mensuales	30
Figura 5. Vista de la gran planicie medanosa pampeana	31
Figura 6. Vegetación natural de la región semiárida pampeana.	32
Figuras 7. Uso actual de la tierra y perfil típico característico de la zona de espesor variable de la calcreta (90 a 120 cm).....	32
Figura 8. Ubicación del muestreo considerando el efecto de uso (agrícola vs prístino) en una transecta edafo-climática NE- SE provincia de la Pampa.	34
Figura 9. Ubicación de la catena representativa en el noreste de la	34

Figura 10. Esquema del Veris 3100 empleado para las determinaciones de conductividad eléctrica aparente (Farahani <i>et al.</i> , 2005).	39
Figura 11: Rastra Veris utilizada en la catena.	40
Figura 12. Precipitaciones anuales para la localidad de Gral. Pico (Serie 1921-2017), La Pampa. Datos correspondientes a Campo Anexo INTA Gral. Pico.	44
Figura 13. Precipitaciones promedio mensuales para la localidad de Gral. Pico.....	45
Figura 14: Temperatura máxima, media, mínima, anual e histórica de la ciudad de Gral. Pico (Serie 1973-2017).	47
Figura 15. Rosa de los vientos medio anual de la región oriental.	49
Figura 16. Índice de severidad de Palmer para Gral. Pico (Serie 1961-2017), La Pampa...50	
Figura 17. Vista general del paisaje del área.	51
Figura 18. Vista del paisaje y perfil representativo del uso agrícola.	53
Figura 19. Vista del paisaje y perfil representativo del uso prístino.....	54
Figura 20. Relación entre arcilla + limo (a+l) y materia orgánica/arcilla + limo (MOT/a+l).	63
Figuras 21. Bi-plot de las primeras dos componentes principales del conjunto de todas las variables analizadas de los sitios prístinos y agrícolas.	63
Figura 22. Vista del paisaje de la catena.	65
Figura 23. Ubicación de los perfiles en las distintas secciones de la catena.	65
Figura 24. Perfil representativo del suelo de la sección superior de la catena.	66
Figura 25. Perfil representativo del suelo de la sección intermedia de la catena.	68
Figura 26. Perfil representativo del suelo de la sección baja de la catena.	70
Figura 27. Fracción liviana (a- a luz paralela) y pesada (b-a nicoles cruzados) del horizonte 2Btx del perfil.....	74
Figura 28. Difractograma de Rayos X (DRX) de muestras al natural del perfil de la sección superior.....	77
Figura 29. Difractograma de Rayos X (DRX) de muestras al natural del perfil de la sección intermedia.	78
Figura 30. Difractograma de Rayos X (DRX) de muestras al natural del perfil de la.....	79
Figura 31. Rasgo pedológico (nódulo) del horizonte Bw de la sección superior de la catena.	81
Figura 32. Rasgo pedológico(revestimientos de arcilla /arcilla hierro) a nicoles cruzados del horizonte 2Btx de la sección superior de la catena.	81

Figura 33. Microestructura (fisura, carbonato micrítico) a luz paralela del 2Btxk de la sección superior de la catena.	82
Figura 36. Rasgo pedológico (revestimiento arcilla/arcilla hierro) a nicoles cruzados del horizonte 2Btx de la sección intermedia de la catena.	84
Figura 39. Rasgo pedológico (revestimiento de arcilla/arcilla hierro) a nicoles cruzados del horizonte Btn2 de la sección inferior de la catena.	86
Figuras 40. Relación entre rendimiento del cultivo y eficiencia de uso de agua (EUA) en los distintos ambientes.	96
Figura 41. Evolución del nivel freático medida en pozos del APA desde 1977 hasta 2008-2016.....	98
Figuras 42. Secuencia de imágenes Landsat de años con exceso hídrico y secos con presencia de sal en superficie entre 1998 seco (S), 2001 inundado (I)-2009 (S) y 2016 (I). Imágenes Lansad (5 al 7).	99
Figura 43. Probabilidad de precipitaciones en el periodo octubre marzo (históricos 1921 a 2015) para la zona de influencia de Gral. Pico.....	100
Figura 44. Variabilidad en la altura del cultivo de maíz y posterior anegamiento del ambiente bajo.....	100
Figura 45. Diferenciación de ambientes en función de CEa en los espesores de 0-30 cm (a)	102
Figura 46. Semivariograma empírico (puntos) y ajustado (línea) y mapas de la distribución espacial para la altimetría y todas las propiedades edáficas en estudio.	107

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

- ADS agua disponible a la siembra
- CO = Carbono
- MOT = Materia Orgánica total
- MOI= Materia orgánica intermedia
- MOV= Materia orgánica vieja
- MOJ= Materia orgánica joven
- CR = compactación relativa
- DA = densidad aparente
- DAMáx= densidad aparente máxima
- DAS = distribución tamaño de agregados
- EEA = estabilidad estructural en húmedo
- EUA = eficiencia de uso de agua
- HC = humedad crítica
- a + l= arcilla + limo
- MS = materia seca
- P = fósforo disponible
- SC = susceptibilidad a la compactación
- SD = siembra directa
- UC = uso consuntivo
- AP= agricultura de precisión
- SS sección superior de la catena
- SM= sección media de la catena
- SI= sección inferior de la catena

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción General

La creciente demanda de alimentos por el aumento de la población mundial, está asociada al marco de escenarios agronómicos actuales caracterizados por cambios en el clima (i.e. aumentos en la temperatura global) y en la variabilidad de la disponibilidad hídrica (Easterling *et al.*, 2000; Holzkämper *et al.*, 2013). Además, a incrementos en la demanda de manejos sustentables y eficientes en el uso de los recursos (Viglizzo *et al.*, 2011), las tecnologías de procesos permiten identificar limitantes del rendimiento de los cultivos y/o de su estabilidad (Andrade, 2016). En particular, y en referencia al impacto del cambio climático, se proyecta que la falta de adaptación de prácticas de manejo afectará significativamente el rendimiento de los cultivos en secano (Deryng *et al.*, 2014; Rose *et al.*, 2016). Los rendimientos alcanzables de los cultivos varían como resultado de la interacción de factores naturales y de manejo que ocurren durante su desarrollo afectando la oferta y aprovechamiento de recursos productivos. Brechas entre rendimiento potencial de los cultivos y rendimientos reales es reducida en cultivos bajo riego, en los cuales se obtiene alrededor de 85 a 95% del rendimiento potencial, mientras que en cultivos de secano raras veces se obtienen más de 50% (Andrade, 2016). Por otra parte, de acuerdo a varios autores, el avance genético ha llegado a su límite en cuanto su impacto sobre el rendimiento de los cultivos. Por este motivo, diversos autores plantean la necesidad de estudiar impactos de cambios en fecha de siembra, densidad, manejo de cobertura, etc. Dichas estrategias de manejo serán cada vez más importantes para la mitigación del efecto detrimental del cambio climático sobre el rendimiento de los cultivos (Teixeira *et al.*, 2013; Gabaldón-Leal *et al.*, 2015; Senthilkumar *et al.*, 2015). Cassman (1999) plantea que es necesario lo que él llama *intensificación ecológica*, que serían sistemas de producción de altos rendimientos que protegen la calidad de los suelos y del ambiente, y conservan los recursos naturales. Si bien, sería en la práctica imposible lograr todos estos objetivos, el concepto de intensificación productiva utilizando conceptos ecológicos provee un abordaje novedoso para vencer las barreras que causan las brechas de rendimiento. Lobell *et al.* (2009) estipulan que una de las cuestiones a resolver sería identificar el efecto que tiene la variación climática y la variabilidad de suelos sobre la productividad potencial de un sitio. En cuanto a las condiciones de suelo que afectan el rendimiento de los cultivos se puede distinguir entre factores físicos [capacidad de retención de agua-(CRA), densidad aparente-(DA) y nutricionales [disponibilidad de nitrógeno-(N), fósforo-(P), etc.]. A su vez, estos factores podrían ser genéticamente determinados o ser el resultado de procesos de degradación causados por el uso del suelo.

El cambio de uso del suelo y de la cobertura vegetal es un proceso característico de las regiones subhúmedas y semiáridas, donde las actividades productivas han generado pérdidas de la calidad de los suelos (Zach *et al.*, 2006; Caride *et al.*, 2012; Berhongaray *et al.*, 2013; Nosetto *et al.*, 2015). El creciente proceso de agriculturización en muchas situaciones desmedido, sumado al manejo inadecuado de las tierras, ha conducido a un deterioro de la estructura del suelo y a la consecuente reducción del nivel de materia orgánica (MO), con una marcada disminución en la fertilidad física y química (Salinas-García *et al.*, 1997; Ferreras *et al.*, 2007).

Por este motivo, es fundamental investigar los recursos naturales relacionados a la actividad agropecuaria, generando conocimiento sobre los distintos ambientes intervenidos por el hombre y definir sobre esta base el adecuado manejo de los factores controlables y el desarrollo de nuevas tecnologías. La aplicación de diferentes manejos de acuerdo al potencial de los suelos permite aumentar la eficiencia productiva y disminuir el impacto ambiental (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004). Para ello, es necesario conocer y caracterizar la heterogeneidad espacial de los suelos y definir áreas homogéneas, como así también, la clasificación de suelos constituye una parte fundamental del estudio del recurso, porque permite organizar y describir sus propiedades (Zinck, 2012).

1.2. Efecto de factores ambientales sobre la productividad de los cultivos

Entre los factores de la producción en condiciones extensivas de secano en regiones semiáridas y subhúmedas se destacan estrechas relaciones entre la productividad de los cultivos y la disponibilidad de agua durante el ciclo de producción (Singels, 1992). Por ejemplo, Musick *et al.* (1994) describieron que los máximos rendimientos de trigo (*Triticum aestivum* L.), superiores a 7000 kg ha^{-1} en las planicies de Estados Unidos (USA) se obtienen con ofertas de agua superiores a los 650 mm. Kucharik & Ramankutty (2005) en la región de Nebraska-Kansas (USA) señalan que la irrigación en cultivos de maíz (*Zea mays* L.) redujo la variabilidad interanual de los rendimientos en un 60% con respecto a los cultivos manejados en condiciones de secano. Sun *et al.* (2007) en la región semiárida de Ceará (Brasil) indican que un índice climático definido principalmente por las precipitaciones ocurridas durante el ciclo de los cultivos explicó aproximadamente el 57% de las variaciones interanuales de los rendimientos de maíz. A partir de la década del 70 diversos estudios científicos observaron aumentos en los totales de precipitación anual y estacional en distintas regiones de la Argentina. Entre las investigaciones más recientes se puede citar a Minetti *et al.* (2003),

Liebmann *et al.* (2004), Penalba & Vargas (2004), Boulanger *et al.* (2005), Magrin *et al.* (2005), Penalba & Robledo (2010) y Casagrande *et al.*, (2006), entre otros. En suelos propicios para los cultivos, este aumento de precipitación favoreció el desplazamiento de la frontera agrícola, facilitando la difusión de los principales cultivos hacia el área marginal occidental más seca (Viglizzo *et al.*, 2011). Por su parte, Murphy (2010) explica que este cambio dio lugar al desarrollo de tecnología e instrumentos que aseguren la sustentabilidad del sistema. Asimismo, Spescha *et al.* (2009) destacan la rápida y efectiva adaptación tecnológica autónoma que se produjo y su impacto positivo sobre las economías regionales de la zona semiárida del país. Esta adaptación implica un cambio en el uso del suelo que influye directamente sobre la humedad disponible en el mismo y, por lo tanto, sobre el balance hídrico del suelo. Podestá *et al.* (1999) en estudios realizados en la región pampeana de Argentina encontraron una correlación positiva entre los rendimientos de maíz y las precipitaciones del trimestre noviembre a enero ($r=0,82$) y entre los rendimientos de sorgo y las precipitaciones del trimestre diciembre a febrero ($r=0,49$), coincidente en ambos casos con el período crítico de los cultivos. En este mismo estudio y para el caso de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] observaron una correlación positiva entre los rendimientos y las precipitaciones comprendidas entre el periodo noviembre a enero ($r=0,66$) sólo en campañas con precipitaciones inferiores a los valores promedios (340 mm). Por otra parte, no se encontró relación entre ambas variables en campañas con precipitaciones abundantes (superiores a los valores normales). En la misma región, Andriani *et al.* (1991) y Dardanelli *et al.* (1991) mostraron que las precipitaciones ocurridas durante el llenado de los granos de soja (estadios de R4 a R6) es el principal factor climático que afecta los rendimientos, con incrementos del orden de 10 kg ha^{-1} de grano por cada mm de agua consumida, en un rango de consumo de 120 a 240 mm. En la zona de influencia de EEA INTA Anguil se evaluó los rendimientos potenciales, experimentales y comerciales del cultivo de sorgo en las campañas 1980-1990, considerando la evolución del cultivo y precipitaciones en el mismo periodo (Vargas, 1990). Donde no se encontró correlación significativa entre rendimiento y precipitación ($R^2=0,0075$) (Figura 1).

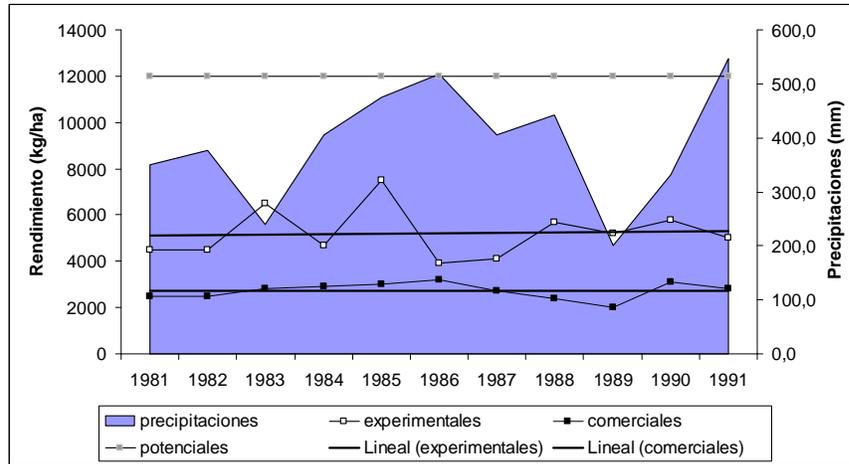


Figura 1. Rendimientos potenciales experimentales y comerciales del cultivo de sorgo (R2 rinde/precipitaciones=0,00275).

1.2. Efecto de la heterogeneidad espacial de las propiedades de suelos sobre la productividad de los cultivos

La identificación de diferentes tipos de suelos en el paisaje es una herramienta muy útil para delimitar zonas de igual manejo en un marco de manejo sitio-específico (Stevens *et al.*, 2014). El concepto de unidad suelo-geoforma (Mulder *et al.*, 2011) se basa en que el desarrollo de los suelos responde a la litología y al movimiento del agua en el paisaje (McKenzie & Ryan, 1999; Ballantine *et al.*, 2005). La variabilidad espacial dentro de un lote agrícola es originada por factores pedogenéticos y antropogénicos (Corwin *et al.*, 2003), y por la escala espacial y temporal (Trangmar *et al.*, 1985). A escala regional, el clima, los patrones de uso de la tierra, tipo de vegetación y características del relieve son los principales determinantes de las variaciones (Mallarino & Vittry, 2004). A nivel de lote, la topografía es uno de los principales factores que origina variabilidad a través del control de distribución de agua y sedimentos (Ceddia *et al.*, 2009). Estos factores ocasionan perturbaciones en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo que ocurren simultáneamente y con diferente intensidad (Moral *et al.*, 2010). La variabilidad de la productividad de los cultivos está asociada a la distribución espacial de las propiedades edáficas que explican diferencias en la producción. En efecto para el establecimiento de prácticas de producción (fecha de siembra, densidad, fertilización, etc.) que tiendan a atenuar la heterogeneidad productiva es conveniente la identificación y cuantificación de estas relaciones suelo-cultivo. Los estudios de relaciones entre propiedades edáficas y prácticas de manejo de los cultivos tendientes a reducir la variabilidad espacial de los rendimientos son más frecuentes en cultivos de cereales tales como maíz y trigo (Kravchenko *et al.*, 2005; Satorre *et al.*, 2005; Eghball *et al.*, 2003) que en

cultivares de soja y otros. Esto se debería entre otros factores, a la menor variabilidad espacial en los rendimientos de soja con respecto a las gramíneas (Kravchenko *et al.*, 2005) o a la mayor respuesta al agregado de fertilizantes tales como N en maíz y trigo que permite a través de estudios de manejo sitio-específicos implementar estrategias de manejos variables (Godwin *et al.*, 2003; Khosla *et al.*, 2002).

Además, abundan análisis de relaciones entre propiedades del suelo y producción de cultivos desarrolladas bajo escalas de evaluación diferentes a las de aplicación extensiva. Muchas de las relaciones entre propiedades edáficas y rendimientos fueron ajustadas considerando análisis regionales (comparación entre lotes) con limitados estudios de validación en escalas menores dentro de lotes de producción (Barraco, 2012). Álvarez (2004) en la pampa ondulada (Argentina), a partir del análisis de lotes en condiciones extensivas de producción de maíz y de trigo mostró que la variabilidad en los rendimientos no puede ser explicada por propiedades individuales sino que la respuesta de los mismos depende de la interacción de factores edáficos [MO, P, nitrógeno total (Nt)], prácticas de manejo (labranzas, cultivo antecesor) y las precipitaciones ocurridas durante su ciclo de producción. Kalivas & Kollias (2001) en estudios en cultivos de algodón (*Gossypium hirsutum* L.) muestran que entre lotes la interacción de variables de suelo (textura y presencia de carbonatos) y de manejo (genotipo y cultivo antecesor) explican el 65% de la variabilidad en los rendimientos.

1.4. Variables de suelo que condicionan el rendimiento de los cultivos

Numerosas variables y parámetros del suelo han sido usados como indicadores de calidad física. Larson & Pierce (1994) y Doran & Parkin (1996) incluyeron textura, densidad aparente (DA), cantidad de agua disponible para las plantas, conductividad hidráulica (CH) y resistencia a la penetración (RP) en un set mínimo de indicadores de calidad física de los suelos. La DA, macroporosidad y RP son usados como indicadores actualmente para calcular las condiciones de crecimiento de raíces y aireación del suelo (Lipiec & Hakansson, 2000). Sin embargo, el crecimiento de las plantas resulta altamente dependiente de la humedad del suelo y del valor óptimo de DA, macroporosidad y RP, difiriendo con el régimen de agua en el suelo (Letey, 1985). La cantidad de agua almacenada en el perfil de suelo depende, entre otros factores, de la textura de los suelos, de la profundidad efectiva para el desarrollo de raíces (Krüger *et al.*, 2005) y del relieve. En este sentido, Pachepsky *et al.* (2001) encontraron que variables topográficas (pendiente, elevación y curvatura) y contenidos de arena explicaron entre el 60 y 70% de las variaciones en el agua disponible en suelos y rendimiento

en Hapludults de Maryland (USA).

Además, los contenidos de partículas finas (arcillas y limos) y materia orgánica (MOT) de los suelos se relacionan en parte con la capacidad de almacenaje de agua de los suelos, incidiendo en la productividad de los cultivos. Cox *et al.* (2003) encontraron en suelos franco limo arcillosos de Mississippi (USA) que la producción de soja aumentaba a medida que se incrementaba el contenido de arcillas de los suelos hasta valores de 200 gkg⁻¹ como consecuencia de una mayor disponibilidad de agua en períodos secos. Similares resultados fueron descriptos por Baver *et al.* (1972) y Rogasik & Smukalsky (1988) que mostraron que los contenidos de materia orgánica total (MOT) y de arcillas afectaron la productividad de los cultivos en suelos con contenidos de arcillas menores a 200 gkg⁻¹ y en suelos de texturas francas a franco-arenosas, respectivamente.

La variabilidad textural en la región semiárida pampeana, fue originalmente causada por diferencias en el material parental, pero debido a fuertes procesos erosivos, especialmente dado por el comienzo de ciclos agrícolas, pudieron haber acentuado estas diferencias originales (Covas & Glave, 1988). El contenido de agua es el factor determinante de los procesos biológicos y como consecuencia de los contenidos de MOT en la región semiárida, que tienen una influencia positiva sobre las características físicas de los suelos (Quiroga *et al.* 1999). La región de la pampa arenosa (Argentina) presenta diferencias en propiedades de suelos afectando la capacidad total de almacenaje de agua según tipos de suelos entre lotes por diferencias en su espesor respecto a la calcreta (dentro del metro de profundidad) y/o por la presencia de horizontes argílicos (Bt). Además, se encuentran diferencias en atributos edáficos según posiciones en el relieve, como así también, en el espesor de perfil de suelo explorable por las raíces que muestra un importante condicionamiento para la normal productividad de los cultivos con varios elementos permanentes que lo generan, como la presencia de horizontes petrocálcicos, argílicos, nátricos, fragipanes, duripanes, entre otros. Calviño & Sadras (1999) en el sudeste de Buenos Aires (Argentina) observaron estrechas relaciones entre la productividad de maíz, soja, trigo y girasol (*Helianthus annuus* L.) y la profundidad a la que se encontraba el horizonte petrocálcico. En la región de la pampa arenosa, Pérez *et al.* (2002), encontraron diferencias de rendimiento de alrededor de un 15% en maíz y girasol entre suelos Hapludoles típicos (sin limitantes físicas para el desarrollo de los cultivos) y Hapludoles thapto-argílicos (con presencia de un horizonte subsuperficial argílico).

Si bien en algunos estudios preliminares (Menéndez *et al.*, 2005) se han descripto diferencias en el comportamiento entre grupos de madurez (GM) de soja según ambientes de producción

(lomas vs bajos, espesor de suelo sobre calcretas) estos resultados no son concluyentes, ni consideran interacciones originadas por diferencias en la fecha de siembra u otras prácticas de manejo. La capacidad de almacenaje de agua de los suelos característicos de la región varía entre 70- 80 mm y 90-120 mm¹ en Entisoles y Molisoles, respectivamente (SAGYP-INTA. 1989). Numerosos estudios describen relaciones entre la productividad de los cultivos y las propiedades edáficas dentro de los lotes de producción. Por ejemplo, la posición del cultivo en el terreno, según Yang *et al.* (1998) explica entre el 49 y el 84% de las diferencias de rendimiento, dado que en sectores bajos del paisaje éstos son mayores que en posiciones contrastantes (õlomasõ). Similar comportamiento fue descrito por Changere & Lal (1997) para cultivos de maíz en suelos con pendientes de 5 a 6% en la región central de Ohio (USA). Sin embargo, el efecto de la topografía sobre los rendimientos puede diferir según las precipitaciones ocurridas en el periodo de crecimiento de los cultivos.

Por otra parte, Lindstrom *et al.* (1986) en el sur de Alberta (Canadá) mostraron mayores rendimientos de maíz en áreas elevadas del terreno que en los sectores más bajos como consecuencia de anegamiento en estos últimos en períodos de altas precipitaciones. Este comportamiento del cultivo entre sitios por efecto de diferencias en el régimen de precipitaciones también podría tener lugar entre lotes como diferencias por distintos espesores y/o composición granulométrica de los suelos, tal lo planteado por Fontana *et al.* (2006) para Haplustoles énticos de la Región semiárida Pampeana.

La mayoría de las experiencias a nivel regional como las efectuadas por Quiroga *et al.* (2005) indican que factores como el régimen hídrico condiciona el efecto del sistema de labranza, especialmente el de siembra directa (SD), sobre las propiedades de los suelos. Estos autores comprobaron una estrecha relación entre los contenidos de MO y fracciones granulométricas de los suelos bajo SD, coincidiendo con los resultados obtenidos por Campbell *et al.* (1996) respecto a la relación positiva entre contenidos de arcilla y MO en suelos de Canadá bajo SD. Este comportamiento en ambos estudios no se comprobó en los suelos bajo labranza convencional (LC). La MOT es un componente crítico de la relación planta-suelo (Duval *et al.*, 2014; Ghani *et al.*, 2003), debido a que es clave en el ciclado de nutrientes, e influye sobre propiedades químicas que modifican las disponibilidad de los mismos (Bongiovanni & Lombartini, 2006; Galantini & Suñer, 2008), particularmente de N (Vityakon, 2007). Además, la disminución de la MO causa pérdidas en la capacidad de retención de agua y nutrientes, acelera los procesos erosivos y disminuye la actividad biológica y enzimática de los suelos (Ghani *et al.*, 2003). Similarmente, el estudio de la magnitud del secuestro de C orgánico por parte de un recurso natural como el suelo a través de la MOT, ha tomado especial relevancia

para la definición de prácticas de manejo sustentables y por la mitigación de emisiones de CO₂ a la atmósfera y su consecuente impacto sobre el calentamiento global (Steinbach & Álvarez, 2006; Baker *et al.*, 2006).

En otros estudios que relacionaron los rendimientos y propiedades permanentes de los sitios de producción se demostró que los rendimientos de cultivos de maíz y centeno (*Secale cereale* L.) en Kentucky (USA) se incrementaron al aumentar el espesor del horizonte superficial (Frye *et al.* 1982), mientras que los rendimientos de soja en suelos franco limo arcillosos de Mississippi (USA) aumentaron a medida que se incrementaba el contenido de arcillas de los suelos como consecuencia de una mayor disponibilidad de agua en períodos con precipitaciones inferiores a lo normal (Cox *et al.*, 2003). Según Díaz-Zorita *et al.* (1999) en estudios desarrollados en Haplustoles y Ustipsamentos de la región semiárida Pampeana de Argentina al incrementarse los contenidos de MOT los rendimientos medios de trigo se incrementan en respuesta a una mayor disponibilidad de nutrientes y mejores condiciones de captación, almacenaje y oferta de agua. Resultados similares fueron descriptos por Kravchenko & Bullock (2000) en cultivos de soja y de maíz en Hapludalf de Indiana (USA). Parte de la variabilidad en la productividad de los cultivos se explica también por diferencias en el ambiente edáfico en relación con la disponibilidad de nutrientes, la acidez, la aireación y otros procesos fisicoquímicos. Estudios en Haplacuales, Argiudoles y Hapludalfes de la región del centro de Illinois y del este de Indiana (USA) mostraron relaciones significativas entre los contenidos de carbono (C) de los suelos y los rendimientos de maíz y soja (Kravchenko & Bullock, 2000). Estos autores determinaron una correlación positiva entre el contenido de C y la producción de grano ($r^2=0,60$) en sitios con niveles de C inferiores a 17 gkg⁻¹, mientras que no se observó relación significativa entre ambas variables para valores de C superiores a los 17 gkg⁻¹.

En Hapludoles, Haplustoles y Ustipsamentos de la región semiárida Pampeana (Argentina) la productividad de trigo, analizada en condiciones extensivas de producción y en ausencia de fertilizantes se relacionó con los contenidos de MOT, tanto como fuente de nutrientes como por sus efectos sobre la capacidad hídrica de los suelos (Díaz-Zorita *et al.*, 1999). En esa misma región Funaro *et al.* (2005) mostraron que el índice de MOT, definido por la relación entre los contenidos de MOT / (arcilla + limo)*100 de los suelos, explicó el 56% de la variación de los rendimientos de girasol en años sin restricciones hídricas durante el período de floración de los cultivos. Estudios desarrollados por Álvarez (2004) a partir del análisis de lotes y considerando varias campañas de producción mostraron que una parte de la variabilidad en los rendimientos puede ser explicada por la interacción de varias propiedades

edáficas. De esta manera en Argiudoles de la pampa ondulada (Argentina) algunos de los factores edáficos que describen su estado de fertilidad (MO, N total y P) permitieron explicar el 33% de la variabilidad de los rendimientos de trigo y sólo el 5% de los de maíz. Cantú *et al.* (2001; 2007, 2008) en estudios realizados en el área centro-sur de la Provincia de Córdoba indican que para estos suelos el contenido de carbono orgánico, nitrógeno y la estabilidad de los agregados han demostrado ser los mejores indicadores de la degradación del suelo. Tan *et al.* (2007) señalan que la dinámica de la materia orgánica total aporta muy poco para el estudio de los efectos de las prácticas agronómicas de corto y mediano plazo. Esto se debe a que las fracciones orgánicas más abundantes en el suelo son las de ciclado más lento, por ello se necesitan periodos de tiempo más largos para detectar diferencias estadísticamente significativas (Galantini & Suñer, 2008). En cambio, las fracciones de la MOT que son sensibles a los efectos de diferentes usos de la tierra pueden ser utilizadas como indicadores tempranos de la dirección de esos cambios (Six *et al.*, 2002). Por este motivo, los componentes lábiles del carbono del suelo han sido sugeridos como los indicadores más sensibles a los efectos de la rotación de cultivos o del sistema de labranza sobre la calidad del suelo (Gregorich *et al.*, 1994; Quiroga *et al.*, 1996; Janzen *et al.*, 1998; Alvarez & Alvarez 2000; Haynes, 2005, Fabrizzi *et al.*, 2003; Galantini *et al.*, 2007; Diovisalvi *et al.*, 2008). La relación entre el carbono orgánico particulado (COP) y el carbono orgánico total (COT) es un importante indicador del efecto de diferentes manejos que modifican el aporte de carbono o su velocidad de descomposición (Galantini *et al.*, 2004; Noellemeyer *et al.*, 2006). Sin embargo, las características del suelo (Quiroga *et al.*, 2001; Galantini *et al.*, 2004; Noellemeyer *et al.*, 2006) y el efecto de los factores ambientales, también modifican la producción y el aporte de materia seca así como la velocidad de transformación (Galantini & Rosell, 2006). La base fundamental del fraccionamiento físico de los componentes orgánicos del suelo se centra en el rol de los minerales edáficos dentro de la estabilización y ciclado de la MOT. En este sentido, se las pueden considerar químicamente menos destructivas y sus resultados directamente relacionados con la estructura y función de la MOT *in situ* (Galantini, 2005; Galantini *et al.*, 2007).

En la Argentina numerosos autores han estudiado los procesos degradativos de los suelos como consecuencia de la intensificación de las actividades agrícolas (Pilatti *et al.*, 1988; Casanovas *et al.*, 1995; Urricariet & Lavado, 1999; Micucci & Taboada, 2006; Sánchez *et al.*, 2006) afectando principalmente el sector norte de la región Pampeana. Sin embargo, poco es sabido acerca de la incidencia de estos factores sobre el desarrollo de los cultivos y resulta necesario cuantificar el efecto de ellos para corregir las brechas de rendimiento. Escasos

trabajos han cuantificado la incidencia de factores de calidad física y química de suelos sobre la productividad de los cultivos. Ninguna de las variables que se utilizan para evaluar diferentes aspectos de fertilidad física ha sido calibrada para establecer rangos normales y umbrales de suficiencia. La mayoría de las variables físicas presentan alta variabilidad espacial, cuyas características no han sido evaluadas sistemáticamente con el fin de establecer el muestreo adecuado (Quiroga *et al.*, 2017; Noellemeyer *et al.*, 2008). Si bien se sabe que la degradación física del suelo tiene efectos negativos sobre el desarrollo de las raíces, la disponibilidad hídrica, la infiltración entre otros, que afectan en forma negativa al crecimiento de las plantas y el rendimiento de los cultivos, no se ha establecido aun una relación directa entre los valores de las variables de fertilidad física del suelo y el desarrollo de un cultivo o el efecto de diferentes manejos del suelo sobre ellos (Venanzi *et al.*, 2002; Miretti *et al.*, 2012; Pilatti *et al.*, 2012; Damiano & Moschini, 2011).

Dada la multiplicidad de variables que se han considerado como indicadores de calidad se hace imprescindible el uso de metodologías que permitan identificar las que tengan mayor incidencia (Quiroga *et al.*, 2003). Un mejor conocimiento del proceso suelo-ecosistema necesita de la evaluación de varias propiedades y de herramientas analíticas multivariadas (Sena *et al.*, 2002). El uso de la técnica estadística multivariada de análisis de componentes principales, ha hecho posible la resolución de numerosos problemas, tales como, la determinación de propiedades discriminantes de manejo en la zona semiárida (Quiroga *et al.*, 1998). El análisis de componentes principales (ACP) es usado para agrupar suelos de una población estudiada y permite la interpretación de las potenciales causas de las diferencias observadas en las propiedades de suelo.

Este nuevo escenario de la agricultura obliga a los productores a aumentar la eficiencia productiva a través de la utilización de nuevas prácticas agrícolas, entre ellas las relacionadas a la agricultura de precisión (AP) (Hörbe *et al.*, 2013; Oliver, 2013). En ambientes agrícolas, donde frecuentemente la disponibilidad de agua y de nutrientes son limitantes del cultivo, la producción de granos depende en gran medida del tipo de suelo; en particular de su capacidad para retener agua y nutrientes para luego ponerlos a disponibilidad del cultivo. Uno de los requerimientos centrales de la AP es la obtención de zonas de manejo (ZM) definidas por factores limitantes del rendimiento, que luego podrán ser manejadas de acuerdo a sus propiedades intrínsecas (Córdoba, 2014). Según Fraisse *et al.* (2001) y Plant *et al.* (2001), los principales requerimientos que las ZM deben cumplir para ser consideradas como tales son: a) las diferencias de rendimientos entre ZM debe ser mayor que las diferencias dentro de las ZM; y b) los factores limitantes de rendimiento dentro de la ZM deben ser los mismos.

Por este motivo, es fundamental investigar los recursos naturales relacionados a la actividad agropecuaria, generando conocimiento sobre los distintos ambientes intervenidos por el hombre y definir sobre esta base el adecuado manejo de los factores controlables y el desarrollo de nuevas tecnologías.

1.5. Hipótesis

1. La variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo está condicionada por la textura y la mineralogía del suelo, y asociadas a la variabilidad climática zonal.
2. Las propiedades físicas/químicas del suelo varían de acuerdo al efecto del relieve debido a los diferentes procesos pedogenéticos que han actuado.
3. Las prácticas de manejo teniendo en cuenta las características morfopedogenéticas contribuyen a mejorar la productividad de los suelos.
4. Existe una relación directa entre el nivel de las variables indicadoras de fertilidad física/química y el rendimiento de los cultivos.

1.6. Objetivo general

Evaluar el impacto de la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo relacionadas con la textura, mineralogía, materia orgánica y relieve, en relación al manejo específico, sobre la productividad del suelo del área oriental y medanosa de la región semiárida Pampeana.

1.7. Objetivos específicos

1. Evaluar la variabilidad espacial de las propiedades físicas y su relación con la textura, mineralogía, relieve y los procesos pedogenéticos.
2. Evaluar el efecto del manejo del suelo sobre la calidad física y el contenido de materia orgánica.
3. Desarrollar, validar y calibrar un índice de las propiedades físicas de los suelos.
4. Establecer relaciones entre indicadores de calidad física del suelo y el rendimiento de los cultivos.

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ubicación del área de estudio

El estudio se desarrolló en el sector oriental y medanoso de la región semiárida Pampeana, ubicada en el sector NE de la provincia de La Pampa (63°45'0" y 64°30'0" O y 35° y 36°30' S). El área ocupa una superficie aproximada de 50.000 km² y comprende los departamentos de Realicó, Chapaleufú, Conhelo, Trenel, Maracó, Quemú Quemú, Capital, Catrilo y Guatrache (Figura 2).

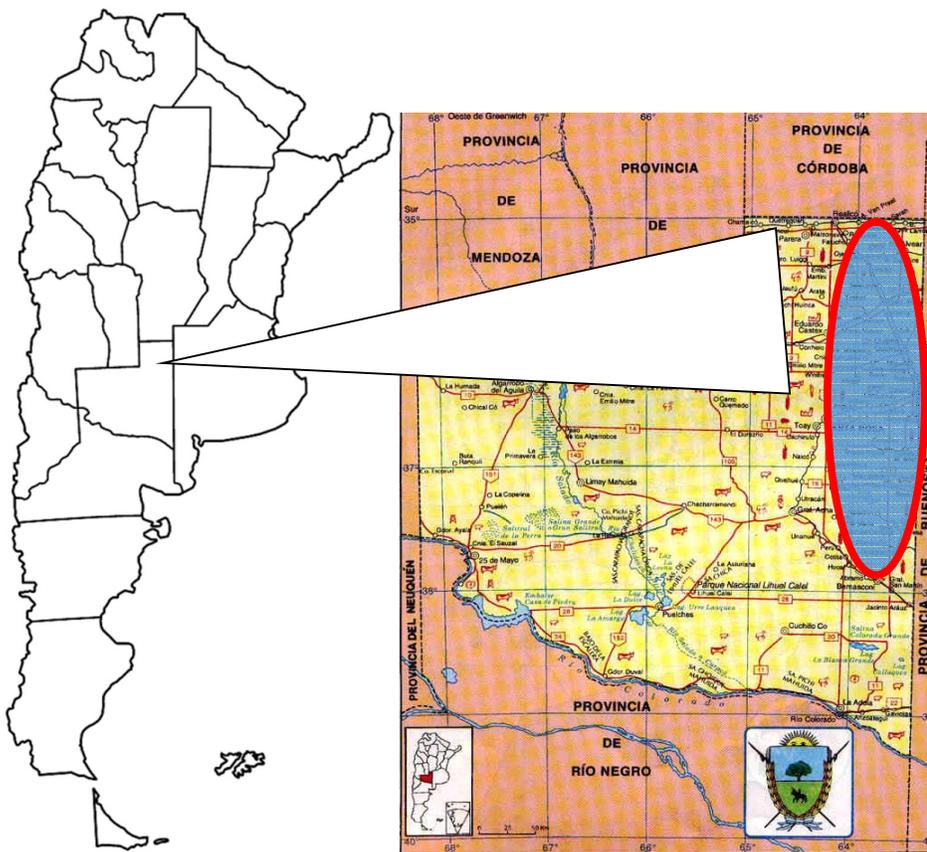


Figura 2. Ubicación del área de estudio.

2.2. Caracterización del área

La región oriental y medanosa semiárida Pampeana (Figura 3) se caracteriza por presentar un relieve plano donde el sedimento arenoso eólico descansa sobre un manto de calcretas con un modelado del paisaje por acciones hídricas y eólicas que origina ondulaciones arenosas y

médanos aislados que contienen suelos enterrados (Atlas de suelo de la República Argentina, 1992).



Figura 3. Paisaje región central oriental y medanosa semiárida Pampeana.

El área de planicie abarca una considerable extensión en sentido N-S lo que pone de manifiesto ciertas diferencias climáticas entre ellas. El clima es templado con un régimen de lluvia estival que oscila entre 500-6750 mm año⁻¹ y una temperatura media anual de 16°C (Figura 4). Los vientos tienen un predominio en las direcciones N-NE y S-SW con una velocidad anual de 10-12 kmh⁻¹ (Casagrande *et al.*, 2006).

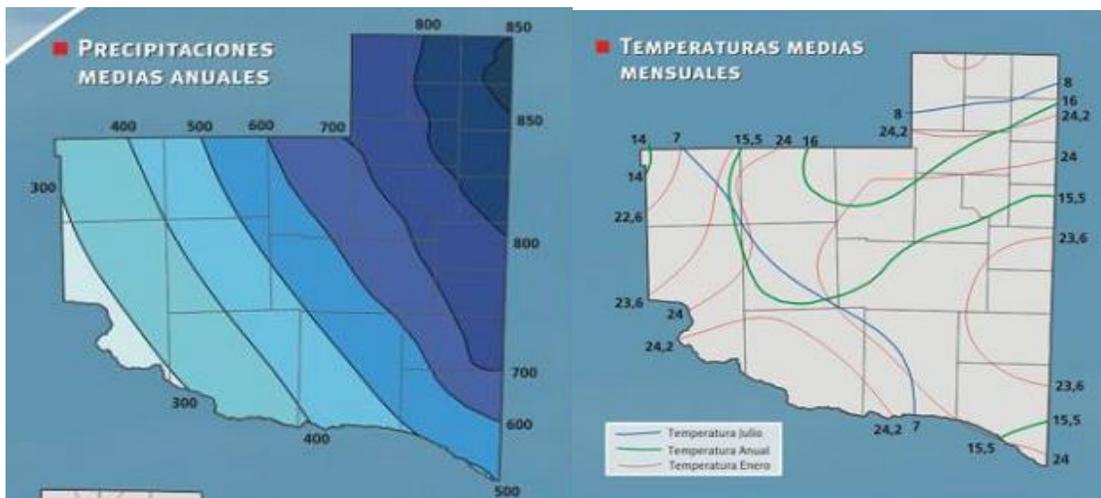


Figura4. Precipitaciones medias anuales y temperaturas medias mensuales (Serie 1921-2006, adaptado de Casagrande *et al.*, 2006).

Geomorfológicamente, la planicie medanosa Pampeana (Figura 5) presenta un estrato superior de material eólico, de textura franco arenosa y espesor variable, depositados en discordancia sobre las calcretas que se encuentra a profundidades variables entre 60 y +200 cm (Zarate & Tripaldi, 2012).

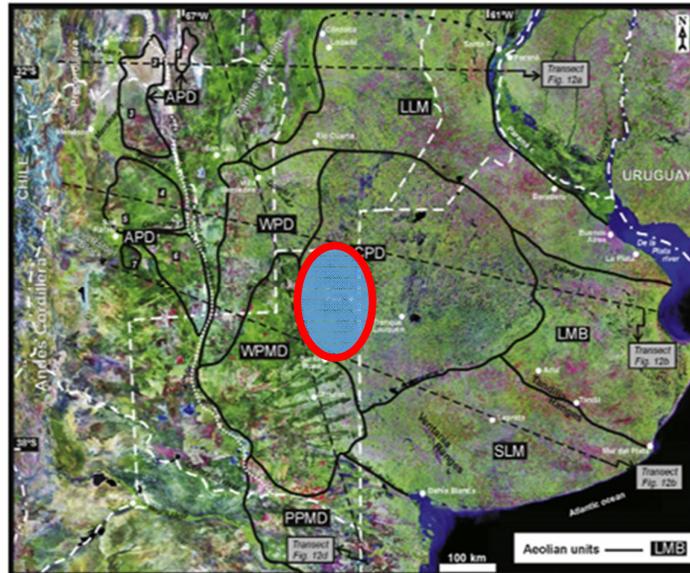


Figura 5. Vista de la gran planicie medanosa pampeana (Adaptado de Zárata & Tripaldi, 2012).

En el ámbito de la provincia de La Pampa, los modelos sedimentarios propuestos hasta el momento, sugieren que los materiales arenosos cuaternarios constituyen las facies proximales de un sistema eólico regionalmente muy extenso (Iriondo & Kröhling, 1996), cuyas áreas de aporte estuvieron localizadas en las planicies de inundación del sistema fluvial del Bermejo-Desaguadero-Salado-Curacó (Iriondo, 1990). Distintos autores (Teruggi, 1957, Zárata & Blasi, 1993, Iriondo & Kröhling, 1996, Zárata & Tripaldi, 2012) coinciden en que vientos predominantes del cuadrante oeste-sudoeste habrían deflacionado estos materiales para transportarlos hacia el este-noreste, cubriendo gran parte del centro este de la provincia, así como principalmente las provincias de Buenos Aires, sur y este de San Luis, este de Córdoba y Santa Fe.

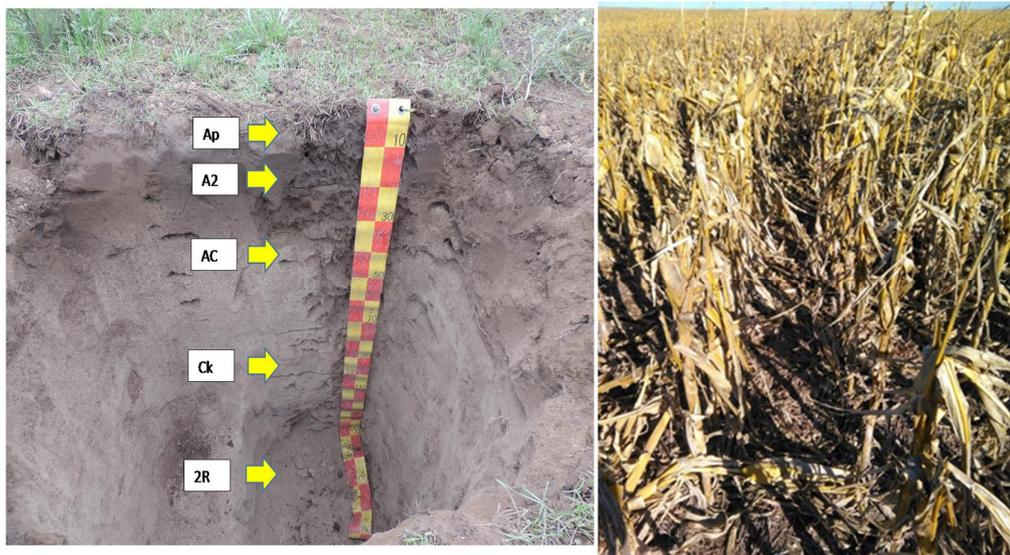
En la planicie medanosa se desarrollan suelos que conforman un complejo indiferenciado con cierta organización edafogenética donde predominan Haplustoles énticos, diferenciándose dos fases de acuerdo a la profundidad de las calcretas Haplustoles enticos (Atlas de Suelos de la República Argentina, 1992) y Paleustoles Petrocalcio (calcreta a menos de 1,5 m- actualizado su clasificación Soil Taxonomy 2014).

La vegetación natural corresponde con un dominio de *Nassella tenuissima* (Trin.) Barkworth (Videla, comunicación personal) con pequeños sectores de *Prosopis caldenia* (Inventario de recursos naturales provincia La Pampa) (Figura 6).



Figura 6. Vegetación natural de la región semiárida Pampeana.

En la actualidad el uso de la tierra es principalmente agrícola (Figura 7) de secano con cultivos de sorgo, maíz, girasol, soja y trigo, bajo labranza convencional/directa (Ministerio de Agroindustria, 2016).



Figuras 7. Uso actual de la tierra y perfil típico característico de la zona de espesor variable de la calcreta (90 a 120 cm).

2.3. Metodología General

La metodología utilizada en la presente investigación tiene el punto de partida en el concepto de Calidad de Suelo (Karlen *et al.*, 1997) y en la concepción de las funciones del suelo (Blum & Santelisis, 1994) donde se considera que el suelo es un sistema natural resiliente, capaz de cumplir varias funciones tanto ecológicas como no ecológicas las que en muchas situaciones suelen ser excluyentes o inhibidoras entre sí. En un análisis holístico, estas funciones del suelo son representadas por algunos atributos que pueden estar informando sobre el estado del suelo y la capacidad del mismo para cumplir alguna función en particular.

Se seleccionaron como los principales atributos a los físicos, tales como, textura, estabilidad estructural, densidad aparente, densidad aparente máxima, porosidad, tamaño de poros, como así también, la materia orgánica y sus fracciones, entre otros. Por otra parte, se establece el supuesto de que los suelos prístinos (SP), o cercanos a la condición natural (suelos de referencia) presentan condiciones donde las funciones del sistema (ecológicas o no ecológicas) están en equilibrio con el medio ambiente. Por lo tanto, si esas propiedades son evaluadas en los suelos de referencia y en aquellos bajo uso agrícola se obtiene una medida del desvío de estos últimos respecto al SP, e incluso es posible discernir la variabilidad de las propiedades físicas entre distintos usos y manejos, y la productividad.

2.4. Metodología específica

En primera instancia se realizó un abordaje a escala regional donde se efectuó un muestreo considerando el efecto del uso del suelo en una transecta edafo-climática desde el noroeste de la provincia de La Pampa hasta el sureste de la misma (Figura 8) y por otro lado, se efectuó un estudio a una escala de detalle considerando la variabilidad de ambientes dentro de una catena representativa (Figura 9).



Figura 8. Ubicación del muestreo considerando el efecto de uso (agrícola vs prístino) en una transecta edafo-climática NE- SE provincia de la Pampa.
A: zona norte, B: zona centro, C: zona sureste.



Figura 9. Ubicación de la catena representativa en el noreste de la Provincia de La Pampa.

La caracterización climática del área de estudio se realizó con datos proveniente de la EEA Anguil y el inventario de Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa (Serie 1973-2014) donde se obtuvo la Información pluviométrica, termométrica, vientos, evapotranspiración real y potencial (Thorntwaite & Mather, 1955), balance hídrico modular (Thorntwaite & Mather, 1955) y balance hídrico seriado (Ravelo, 1990).

2.5. Selección de los sitios de muestreo

Los sitios de muestreo fueron seleccionados de acuerdo al uso (agrícola vs prístino) en una transecta edafoclimática. Se evaluó a dos escalas, en un primer paso, por comparaciones de pares de situaciones (agrícola vs prístino) a través del rango textural que caracteriza a los suelos representativos del área (Haplustoles énticos). Luego, aplicando análisis discriminante se obtuvo una representación de los sitios en el plano de las variables canónicas, que permitió seleccionar situaciones contrastantes en las que se intensificaron los estudios de las propiedades físicas. Esta etapa permitió identificar aquellos indicadores más sensibles a los cambios en la calidad de los suelos (Quiroga *et al.*, 1998).

En la segunda escala se evaluó el efecto del relieve sobre las variables de suelo a nivel de una catena representativa del área de estudio. En la misma se realizaron muestreos en los tres ambientes que la componen y se realizó un grillado cada 70 m² (620 puntos de muestreos) para caracterizar la variabilidad espacial y se describieron los perfiles representativos de las mismas. Posteriormente, se efectuó la caracterización de las propiedades, análisis mineralógico y micromorfológico de los perfiles de la catena.

2.6. Caracterización de las propiedades de los sitios

En cada uno de los sitios seleccionados se realizó la descripción y el muestreo de los perfiles de los suelos para su caracterización (Handbook N°18 - Soil Survey Staff, 1993) y posterior clasificación (Soil Taxonomy, 2014). Además, se tomaron muestras del horizonte superficial (A o Ap) y por triplicado de 0-20 cm en cada sitio donde se determinó:

➤ **A escala regional**

- **Contenido de materia orgánica y sus fracciones** por el método de Walkley & Black (Jackson, 1976).
- **Estabilidad estructural y cálculo del índice de inestabilidad** mediante un método combinado de estabilidad en seco y en húmedo (De Boodt & De-Leenheer, 1967).
- **Densidad aparente máxima, susceptibilidad a la compactación y contenido de humedad crítico** mediante la prueba Proctor (ASTM, 2003).
- **Textura:** proporción de arcilla, limo y arena (método Bouyoucus).
- **Proporción de agregados** entre 19 y <0,42 mm mediante el uso de tamiz rotativo (Chepil, 1962).
- **Materia orgánica joven y vieja:** mediante la técnica descrita por Cambardella & Elliott (1992) modificada por Noellemeyer *et al.* (2006) para obtener las fracciones de agregados 100-2000 μm (MOJ -materia orgánica joven), 50-100 μm (MOI- materia orgánica intermedia) y < 50 μm (MOJ- materia orgánica vieja). Posteriormente, se determinó el carbono orgánico de estas fracciones (Walkley & Black, 1934).
- **Cálculo del índice de materia orgánica/arcilla+limo** (MOT/a+1) propuesto por Quiroga *et al.*(2006).
- **Cálculo del índice de materia orgánica/arcilla** (MOT/a) mediante el método de Ferraris *et al.* (2002).
- **Cálculo de agregados $\times 2\text{mm}$ /arcilla** ($\times 2\text{mm/a}$).

➤ **A nivel de la catena**

- **Contenido de materia orgánica** por el método de Walkley & Black (Jackson, 1976).
- **pH** método potenciométrico relación suelo-agua (1:2,5).
- **Capacidad de Intercambio Catiónico (C.I.C.)** por el método del acetato de sodio (AcNa - pH: 8,2), determinando Na^+ total por fotometría de llama de acuerdo al Personal Laboratorio de Salinidad (1982).
- **Bases Intercambiables** por el método del acetato de amonio determinando por colorimetría los cationes Ca^{++} y Mg^{++} y por Fotometría de llama Na^+ y K^+ de acuerdo al Personal Laboratorio de Salinidad (1982).
- **Conductividad eléctrica** en pasta (Richards, 1982)
- **Fósforo disponible** por el método de Bray-Kurtz I (1945).
- **Granulometría** por el método combinado de la pipeta para las fracciones menores a 50

micrones (Day, 1965) y tamizado a las fracciones más gruesas, separadas según los rangos establecidos por el Soil Survey Staff (1993).

- **Rendimiento del cultivo de maíz y sus componentes** (peso de mil y número de grano). 5 repeticiones a lo largo de la catena (3: superior, medio e inferior), fechas de siembra (2: temprana-octubre y tardía ódiciembre).

Además, se trabajo con Imágenes LANDSAT8 OLI/TIRS (<https://www.usgs.gov/>) para analizar los cambios del área de estudio y los periodos de anegamientos en los últimos 30 años.

2.7. Análisis mineralógico

En cada horizonte muestreado se efectuó el secado y tamizado. El análisis mineralógico se realizó a las fracciones más gruesas por microscopía óptica, mientras que a las más finas por difracción de Rayos X.

El estudio mineralógico de la fracción más gruesa se efectuó sobre la arena fina por serla más representativa en cuanto al porcentaje. Se pesó un gramo de muestra, sobre el cual se llevó a cabo la separación densimétrica mediante el empleo de un líquido denso (Politungstato de sodio, peso específico 2,88). La separación de minerales pesados y livianos mediante técnicas densimétricas es de relevancia, ya que brinda la posibilidad de estudiar individualmente los minerales de importancia edafogenética.

Sobre cada una de las fracciones separadas se montó preparados, incluidos en un medio diáfano, para la identificación y descripción de las características fundamentales de cada especie mineral identificada, mediante microscopio petrográfico a luz paralela y nicoles cruzados. Se realizó un análisis semicuantitativo de la fracción arena fina mediante el método de conteo de puntos (Chayes, 1965), considerando que 500 puntos de conteo representan un nivel de confianza del 95% y error probable de 5% (Becker, 1987; Grumelli, 2010).

El análisis mineralógico de la fracción arcilla <2 m se realizó en todos los horizontes muestreados mediante difracción de Rayos X. A cada muestra se le efectuó un pretratamiento de acuerdo a Besoain (1985), donde se analizaron muestras al natural, glicoladas y calcinadas a 550°C.

La determinación mineralógica de la fracción arcilla se efectuó en un equipo, de uso compartido UNRC-UNC, Phillips PANalytical XPERT-PRO, con Goniómetro PW3050/60,

a 40 mA y 40 kV, y Ánodo de Cu, realizando un barrido entre 2° y 45° para muestras naturales y glicoladas y entre 2° y 15° para muestras calcinadas. El programa PANalytical X'PERT-HighScore (PW3209, Versión 2.1b), corrido conjuntamente, genera los diagramas de Rayos X donde se registra las intensidades de los planos difractados como picos y la longitud de los mismos, ya que el programa cuenta con una base de datos de JCPDS-INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION. A partir de los diagramas generados con este programa se semicuantificó la composición mineralógica de las muestras, teniendo en cuenta que los datos no deben tomarse como valores absolutos de cantidad sino como indicadores relativos de la concentración de cada mineral.

2.8. Análisis micromorfológico

El estudio micromorfológico se realizó en todos los horizontes sobre muestras no disturbadas con la ayuda de técnicas microscópicas, para identificar constituyentes, determinar mutuas relaciones en espacio y tiempo, e interpretar condiciones de formación.

Previamente, las muestras fueron secadas al aire y tratadas en laboratorio, como bloques de 5 cm de ancho por 3 cm de largo y 1 a 2 cm de espesor aproximadamente. Se realizó la impregnación con resinas polyester, combinada con diluyente (monómero de estireno, hasta un 20%), catalizador y acelerador, en bomba de alto vacío. Luego se efectuó un corte de la muestra hasta obtener una superficie plana con el tamaño de la preparación microscópica deseado. Esta superficie se pulió para eliminar las huellas del corte y obtener un plano lo más suave posible. La muestra se desbastó hasta alcanzar un espesor de 30 μ m. El estudio microscópico de las muestras del suelo se realizó mediante microscopio petrográfico a luz paralela y nicoles cruzados sobre secciones delgadas normales y perpendiculares de cada horizonte. Las descripciones de las muestras se realizaron de acuerdo a Stoops (2003).

2.9. Evaluación de la conductividad eléctrica aparente

La conductividad eléctrica aparente (CEa) fue medida mediante el empleo un SMD denominado Veris 3100 (Veris Technologies, 2001) de acuerdo a Johnson *et al.* (2001) como lo indica la Figura 10.

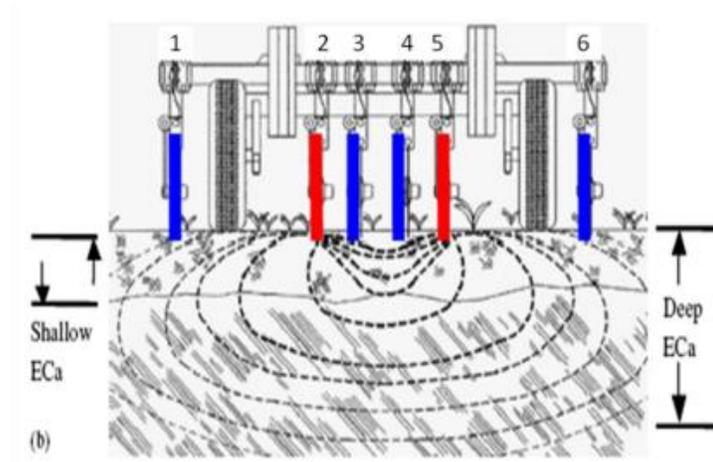


Figura 10. Esquema del Veris 3100 empleado para las determinaciones de conductividad eléctrica aparente (Farahani *et al.*, 2005).

El mismo posee tres pares de discos como electrodos para determinar la CEa del suelo. Los discos están montados sobre un bastidor con ruedas y levante hidráulico, lo que permite arrastrarlo por el terreno o evaluar montado a un vehículo. Los discos penetran en la superficie del suelo a una profundidad de aproximadamente 5-6 cm. El par de discos 2 y 5 (Figura 10) emite una corriente eléctrica en el suelo, mientras que los discos 1, 3, 4 y 6 detectan el grado de disminución en la corriente eléctrica emitida a causa de su transmisión a través del suelo (resistencia). El par central, (discos 3 y 4) lee la resistencia ofrecida por el suelo de 0-30 cm de profundidad, mientras que el par externo, (discos 1 y 6) lee la resistencia de 0-90 cm de profundidad. El grabador de datos del equipo trabaja acoplado a un Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS) donde almacena un dato por segundo de conductividad eléctrica ($1/\text{resistencia} = \text{conductividad}$) en decisiemens por metro (dSm^{-1}) y la posición exacta (latitud y longitud) al momento de la medición (Johnson *et al.*, 2001). El instrumento fue calibrado según las instrucciones del manual, previo al inicio de recolección de datos. Luego fue remolcado a través del lote por una camioneta en series de transectas paralelas separadas aproximadamente 5m en cada sección con el propósito de ser más eficientes en el tiempo de muestreo manteniendo la precisión de la medición. Según Farahani & Flinn (2007) no existen diferencias en la eficiencia de predicción del mapa en transectas separadas entre 2,5 y 30m; por encima de este valor (separaciones entre 30 a 50m) la reducción en la calidad del mapa generado es solamente de un 10%. La velocidad promedio de trabajo fue de 15 kmh^{-1} . Cada una de secciones establecidas en este estudio fue mapeada individualmente para obtener la CEa previo a la siembra del cultivo (Figura 11) y se trabajó con los datos de CEa en profundidad (0-30 y 0-90 cm).



Figura 11: Rastra Veris utilizada en la catena.

2.10. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos se analizaron estadísticamente con el programa InfoStat (Universidad Nacional de Córdoba, 2017). Se realizó Análisis de Varianza para determinar los factores que afecten a los parámetros estudiados (factores sitios y uso). Las medias de los diferentes tratamientos se compararon con el Test de medias LSD o el Test de Tukey. Las relaciones entre variables se analizaron a través del Análisis de Regresión lineal o no lineal según corresponda (Sokal & Rohlf, 1995). Además, se utilizó un análisis multivariado de componentes principales y discriminantes para obtener una representación de los sitios en el plano de las variables canónicas (combinación lineal de propiedades edáficas con efectos independientes). Por otra parte, para contemplar la falta de independencia de los datos los mismos se analizaron estadísticamente mediante la utilización de modelos lineales mixtos. Para evaluar si la medición georeferenciada de la CEa permite delimitar áreas homogéneas dentro de los lotes, se compararon las diferencias en los promedios de las propiedades del suelo (arcilla, A; limo, L; arena, Ar; MO; pH; P y CE) en las diferentes clases de CEa utilizando el ANOVA de PROC MIXED (SAS Institute, 2002), con las clases de CEa como efectos fijos, las secciones (SS sección superior, SI intermedia e SI inferior) como efecto aleatorios y los puntos de muestreo dentro de cada clase de CEa como una repetición (Littell *et al.*, 1996). Se realizó la comparación de medias de las propiedades del suelo con un nivel de significancia de (p-value 0,05). La variabilidad espacial de la CEa fue cuantificada mediante una correlación espacial de la CEa con semivariogramas (Ec.1).

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z(x_i) - z(x_i + h))^2 \quad (1)$$

El semivariograma es una función básica que describe la variabilidad espacial de un fenómeno de interés (CEa) y fue estimado utilizando la ecuación (Isaaks *et al.*, 1989): donde; $\gamma(h)$ =valor del semivariograma en intervalos de distancia h ; $z(x_i)$ =valor de la variable de interés en el punto x_i , en el cual hay datos x_i y $x_i + h$; $N(h)$ es el número total de pares de puntos dentro del intervalo de distancia. El semivariograma muestra la degradación de la correlación espacial entre dos puntos en el espacio, cuando la distancia de separación incrementa. En Samper & Carrera (1990) se presenta una discusión respecto a las características y condiciones que éstos deben cumplir. El mejor modelo de semivariograma que se ajustó a la estructura espacial de la CEa fue el esférico. Para la clasificación de la estructura espacial de la CEa se utilizó la relación meseta parcial: pepita (parcial sill: nugget), i.e. proporción de varianza explicada por el modelo respecto a la varianza total ($C1/(C0+C1)$), adoptando tres clases propuestas por Cambardella *et al.* (1994): fuerte ($>0,75$), moderada ($0,25-0,75$), y débil ($<0,25$). Posteriormente, se procedió a la interpolación de los datos de CEa con el procedimiento kriging ordinario, el cual cuantifica la estructura espacial de los datos usando los semivariogramas y los predice estadísticamente asumiendo que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que disminuye conforme se aleja del punto de interés (Bullock *et al.*, 2002). El valor interpolado con este método carece de sesgo ya que la interpolación de las variables en un punto medido devuelve el valor de la variable en ese punto con un error de estimación nulo (Vieira, 2000).

CAPITULO 3

RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Caracterización climática

Los cambios climáticos en las precipitaciones resultan esencialmente importantes en regiones donde las mismas limitan la producción (Parry, 1990). La diversidad de los agroecosistemas utilizados está asociada en gran medida a la cantidad y distribución de las lluvias. Durante las últimas décadas el noreste de la provincia de La Pampa registró un considerable incremento del área cultivada con granos (Sierra *et al.*, 1995). Algunos autores lo atribuyen a la innovación tecnológica (Pizarro & Cascardo, 1991) induciendo a pensar que la producción agropecuaria habría sobrepasado las fronteras climáticas tradicionales. Recientes trabajos demostraron que este proceso no solo obedeció a causas económicas y a la innovación tecnológica sino que fue acompañado por un incremento en las precipitaciones (Sierra *et al.*, 1994; Pérez *et al.*, 1999) que lo favoreció considerablemente. Por tratarse de una franja de transición entre el clima húmedo de la región oriental y el clima semiárido que se extiende hacia el oeste de la Argentina, el área en estudio presenta una alta vulnerabilidad a las fluctuaciones del régimen de lluvias (Roberto *et al.*, 1994) por lo que resulta necesario llevar a cabo una precisa evaluación de los cambios operados en su régimen de precipitaciones. El clima es uno de los factores que más influye en el modelado del paisaje, en las características del suelo, la fisonomía de la vegetación y en el potencial productivo de una región. La acción del clima puede ser física, química o biológica. Interviene en la pedogénesis constituyéndose en el principal factor de algunas reacciones químicas y físicas que ocurren en el suelo y actúa también como desencadenante de procesos de erosión eólica o hídrica.

3.1.1. Precipitaciones

La precipitación es un elemento del clima que condiciona en gran medida el rendimiento agrícola y la producción de forraje de una región. El agua aportada por las lluvias y otros hidrometeoros (granizo, nieve, llovizna) es un agente imprescindible en la formación del suelo y necesaria para el desarrollo de diversos organismos que contribuyen a la formación de humus en el mismo; además transporta materiales de una parte del perfil a otra. Entre sus acciones negativas se destacan los problemas de erosión y de inundaciones.

En La Pampa dada la baja capacidad de retención que poseen los suelos, el período de aprovechamiento de las lluvias para el crecimiento de los cultivos es muy corto. Para su estudio se efectuaron análisis de la distribución anual y mensual (Figura 12). En la misma se pueden observar las precipitaciones anuales desde el año 1921 al 2017, la cual en promedio es de 750mm. Además, considerando el mismo periodo se comprobó un aumento de

precipitaciones en estos 99 años de unos 150 mm. Con su variaciones entre años característicos de regiones de transición entre régimen semiárido y subhúmedo.

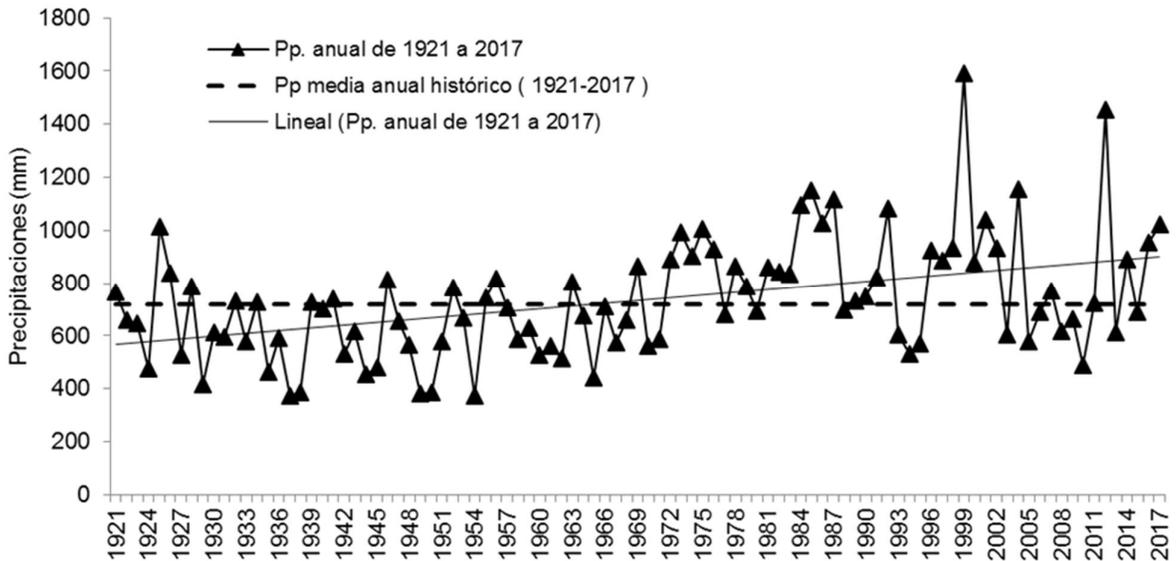


Figura 12. Precipitaciones anuales para la localidad de Gral. Pico (Serie 1921-2017), La Pampa. Datos correspondientes a Campo Anexo INTA Gral. Pico.

El régimen de la distribución de las lluvias a lo largo del año en La Pampa ocurren en el semestre estival (octubre a marzo) con picos mayores en octubre y /o marzo. El mes de menores lluvias en general es agosto, sin embargo en la parte meridional lo son junio o julio. La distribución de las lluvias máximas y mínimas absolutas mensuales es aleatoria, si bien puede mencionarse que las máximas ocurren en los meses de verano y otoño y las mínimas en los meses de invierno. Precipitaciones del semestre cálido (Octubre-Marzo)= 626,5 mm (75,1%). Precipitaciones del semestre frío (Abril-Septiembre)= 207,4 mm (24,9%). En orden decreciente de importancia estacional de las precipitaciones: 1° Verano (Diciembre + Enero + Febrero) = 317,9 mm (38,1%), 2° Primavera (Septiembre + Octubre + Noviembre) = 231,7 mm (27,8%), 3° Otoño (Marzo + Abril + Mayo) = 226,5 mm (27,2%), 4° Invierno (Junio + Julio + Agosto) = 57,7 mm (6,9%) como se observa en la Figura 13.

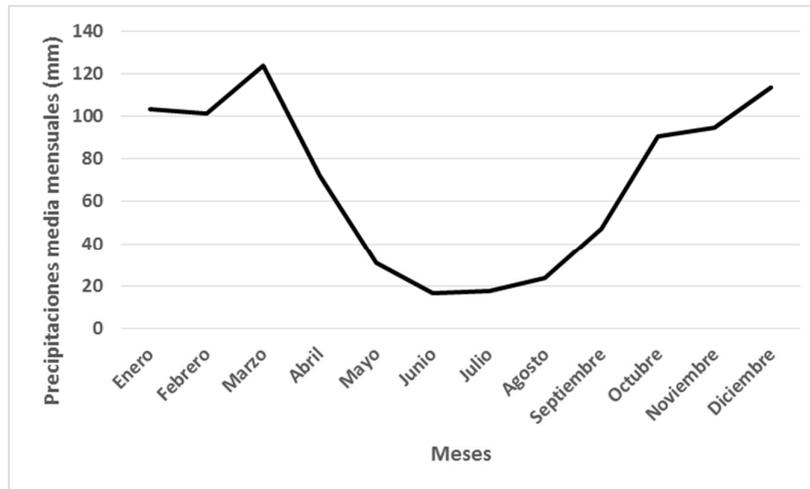


Figura 13. Precipitaciones promedio mensuales para la localidad de Gral. Pico (Serie 1921-2017), La Pampa.

3.1.2. Régimen térmico

La temperatura es un factor ecológico muy importante; en sus variaciones extremas muy frecuentemente actúa como limitante para el crecimiento y distribución de plantas y animales. La provincia de La Pampa se caracteriza por poseer un tipo de clima templado (temperatura media anual entre 14° y 16°C). Es importante señalar la gran amplitud térmica (diferencia entre el mes más caliente y el mes más frío) con una temperatura media anual de 16°C (Tabla 1). Esto refleja el carácter continental que se incrementa hacia el oeste. En el verano la temperatura media del mes más caliente (enero) fue de 24°C en el N-NE y de 22°C en el O-SO. En la estación invernal la temperatura media del mes más frío (julio) presenta menos variaciones por el alcance que tienen las profundas irrupciones de las masas de aire polar que llegan a tener incidencia hasta el Brasil. La parte menos fría es el N de La Pampa, que posee una temperatura media del mes de julio de alrededor de 8°C, mientras que la más fría es la del O-SO con valores cercanos a los 6°C. La temperatura máxima anual media es de unos 40°C, siendo la zona centro-norte la que posee los valores más altos y por lo tanto el clima más cálido de la provincia. La máxima absoluta oscila entre los 40° y 45°C para las series analizadas. La mínima anual media va de 8°C en el NE a 12°C en el SO. Los valores extremos de la temperatura mínima anual absoluta fluctúan entre 10°C en el NE y 17°C en el SO. Como se aprecia existe una mayor heterogeneidad que en las máximas lo cual se debe en parte a que es mayor el contenido de humedad del aire en el área nororiental (atemperando la acción negativa de la temperatura) y una mayor superficie del suelo cubierto por vegetación. Además, otra causa importante es la circulación general de la atmósfera.

3.1.3. Régimen de heladas

Este fenómeno constituye junto con la sequía uno de los de mayor importancia en su acción perjudicial sobre los vegetales (Tabla 1 y Figura 14). Las heladas otoñales y primaverales tienen gran incidencia sobre la producción agrícola ya que por su época de ocurrencia pueden llegar a producir hasta la pérdida total de las cosechas. En general las gramíneas de ciclo invernal toleran bastante bien temperaturas de varios grados bajo cero en el estado de pasto pero adquieren notoria sensibilidad en los momentos de floración o granazón lechosa (trigo, cebada, etc.). Los cultivos estivales son sensibles a las heladas a lo largo de todo su ciclo vegetativo (sorgo, maíz, girasol, mijo, etc.). De lo expresado resulta que las heladas otoñales y primaverales adquieren un rol trascendental sobre la producción agrícola por su época de ocurrencia y variabilidad.

En varios sistemas de clasificación climática de las zonas áridas se ha tenido en cuenta la temperatura para valorar sus condiciones térmicas (Burgos, 1963a y 1963b) considerando como límite mínimo para llevar a cabo una agricultura de desarrollo el valor de 150 días (5 meses) libres de heladas.

Tabla 1. Fechas medias, desvío estándar de primeras y últimas heladas, temperatura mínima media y absoluta, periodo medio con heladas e índice criokindinoscópico a 1,5m al Este de la provincia de La Pampa (Serie 1973-2014).

Localidad	Fecha Media	Fecha Media	T°C. Mínima Media	T°C Mínima	Período medio con heladas	ICK Heladas	
	1° Helada	Ult. Helad		Absoluta		C. Per	C. An.
Gral. Pico	4/5 +/-	22/9	-7,3°C	-11,4°C	141 días	-9,9°C	-8,6°C
	17 días	+/-18 días					
Anguil	21/4	14/10	-8,9°C	-12,3°C	176 días	-11,7°C	-10,3°C
	+/-16 días	+/-18 días					
Bordenave	30/4	4/10	-6,7°C	-8,5°C	163 días	-8,8°C	-7,8°C
	+/-20 días	+/-21 días					

Fuente: Datos de EEA Anguil y Bordenave.

La Figura 14 muestra la temperatura media máxima, media y mínima entre el año 1973 y 2017 para la ciudad de Gral. Pico. En la misma se observa que los cambios en la temperatura se han dado solo en la mínima media, siendo la misma superior a 1°C.

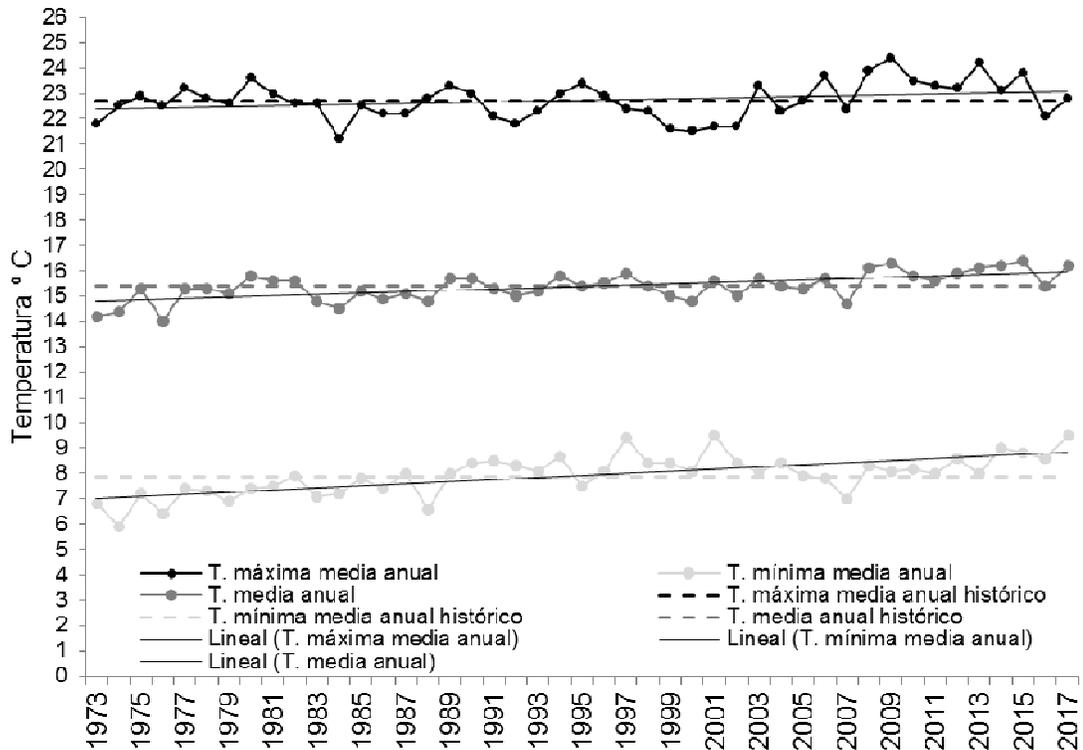


Figura 14: Temperatura máxima, media, mínima, anual e histórica de la ciudad de Gral. Pico (Serie 1973-2017).

3.1.4. Balance hídrico modular

El régimen hídrico de una región no queda caracterizado sólo con los datos de precipitación. La misma actúa sustancialmente disminuyendo o aumentando las posibilidades de crecimiento de los cultivos ante una demanda climática representada por la evapotranspiración, siendo necesario además considerar otros parámetros ejemplo temperaturas máximas y mínimas, radiación, entre otras.

Para la localidad de General Pico (Serie 1961-2012) se realizó el balance hídrico modular, basado en la estimación de la evapotranspiración potencial (ETP) calculada mediante la temperatura del aire para un mes tipo de 30 días y 12 meses y considerando una capacidad de campo= 200 mm (Tabla 2) y 100 mm (Tabla 3).

En la Tabla 2 y 3 se observa que la ETP es superior a las precipitaciones en la mayoría de los meses, característico del régimen semiárido. Además, variando la capacidad de retención de los suelos representativos, presenta un déficit importante. Esto lleva a que algunas estrategias como el desplazamiento de la fecha de siembra sea una alternativa importante para obtener producciones aceptables y estables en los sistemas de producción.

Tabla 2. Balance hídrico modular mensual de Gral. Pico (Serie 1961-2014), La Pampa con una capacidad de campo= 200mm.

Variables												
(mm)	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Pp	103	101	123	72	31	16	17	24	47	90	94	113
ETP	184	143	106	65	34	17	26	46	71	111	157	196
Almacenaje	6	5	22	30	29	29	28	21	22	20	15	10
Diferencia	-3,2	-1,2	17,7	7	-0,5	-0,1	-1,2	-3	-2,9	-2,2	-5,4	-5
ETR	106,7	102,2	106	65	31,4	16,6	18,7	26,7	49,8	92,6	99,8	118,4
Déficit	77,3	40,8	0	0	2,6	0,4	7,3	19,3	21,2	18,4	57,2	77,6
Exceso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Índice de Aridez: 27,9. Índice de Humedad: 0,0. Índice Hídrico: -16,7.

Tabla 3. Balance hídrico modular de Gral. Pico (Serie 1961-2014), La Pampa con una capacidad de campo= 100 mm.

Variables												
(mm)	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Pp	103	101	123	72	31	16	17	23	47	90	94	113
ETP	184	143	106	65	34	17	26	46	71	111	157	196
Almacenaje	1,1	0,7	18	25	25	24	22	17	14	11	6	2
Diferencia	-1,4	-0,4	17,7	7	-0,8	-0,1	-2	-4,6	-3,9	-2,7	-5,4	-3,4
ETR	104,9	101,4	106	65	31,7	16,6	19,5	28,3	50,8	93,1	99,8	116,8
Déficit	79,1	41,6	0	0	2,3	0,4	6,5	17,7	20,2	17,9	57,2	79,2
Exceso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Índice de Aridez: 27,9. Índice de Humedad: 0,0. Índice Hídrico: -16,7.

3.1.5. Régimen de vientos

La velocidad promedio anual del viento oscila entre 10 y 15 kmh⁻¹, siendo la primavera la estación con mayor intensidad. Esto coincide con el final del período de menor precipitación, lo que contribuye a aumentar los riesgos de erosión eólica. Por su acción desecante, este elemento adquiere, en determinados momentos, características adversas para la producción agropecuaria. Ejemplos de ello son la influencia del zonda de dirección N-NW que es caliente y seco y del pampero (de dirección S-SW) que es frío y seco, desplazándose en forma rápida hacia el NE. Los vientos de las direcciones E y NE son los más beneficiosos para el sector oriental de la región semiárida pampeana, pues aportan masas de aire húmedo precediendo generalmente a las precipitaciones (Figura 15).

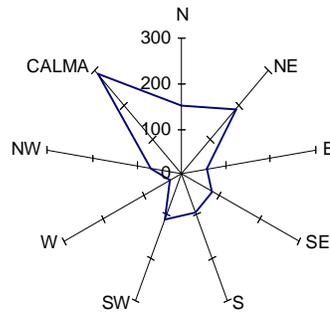


Figura 15. Rosa de los vientos medio anual de la región oriental.

3.1.6. Índice de severidad de Palmer

El Índice de Severidad de Sequía de Palmer (1965) fue desarrollado como un índice "para estimar el suministro de humedad". Se basa en el concepto de demanda-suministro de agua, teniendo en cuenta el déficit entre la precipitación real y la precipitación necesaria para mantener las condiciones de humedad climática o normal. El ISSP aplicado en forma areal varía entre -4 y +4, pudiendo puntualmente sobrepasar estos valores. En forma arbitraria Palmer seleccionó la escala para las condiciones de humedad (Tabla 4) basado en su estudio original para las regiones de Iowa central y Oeste de Kansas con amplia difusión en USA.

Tabla 4. Clasificación del ISSP para períodos húmedos y secos.

Valores de índice	Categorías
< 4,0	Extremadamente húmedo
3,0 a 3,99	Muy húmedo
2,0 a 2,99	Moderadamente húmedo
1,0 a 1,99	Levemente húmedo
0,5 a 0,99	Incipiente período húmedo
0,49 a 0,49	Normal
-0,5 a 0,99	Incipiente período seco
-1,0 a 0,99	Sequía débil
-2,0 a 0,99	Sequía moderada
-3,0 a 0,99	Sequía severa
= -4,0	Sequía extrema

Fuente: *Meteorological drought (Palmer, 1965).*

El estudio de frecuencia de episodios húmedos y secos en la localidad de General Pico durante el período analizado (472 meses) muestra que en el 46,7% de los casos ocurrieron sequías con distintos grados de intensidad. El 46,2% de los meses fueron húmedos, también con distintos grados de intensidad y el 7,9% normales (Figura 16).

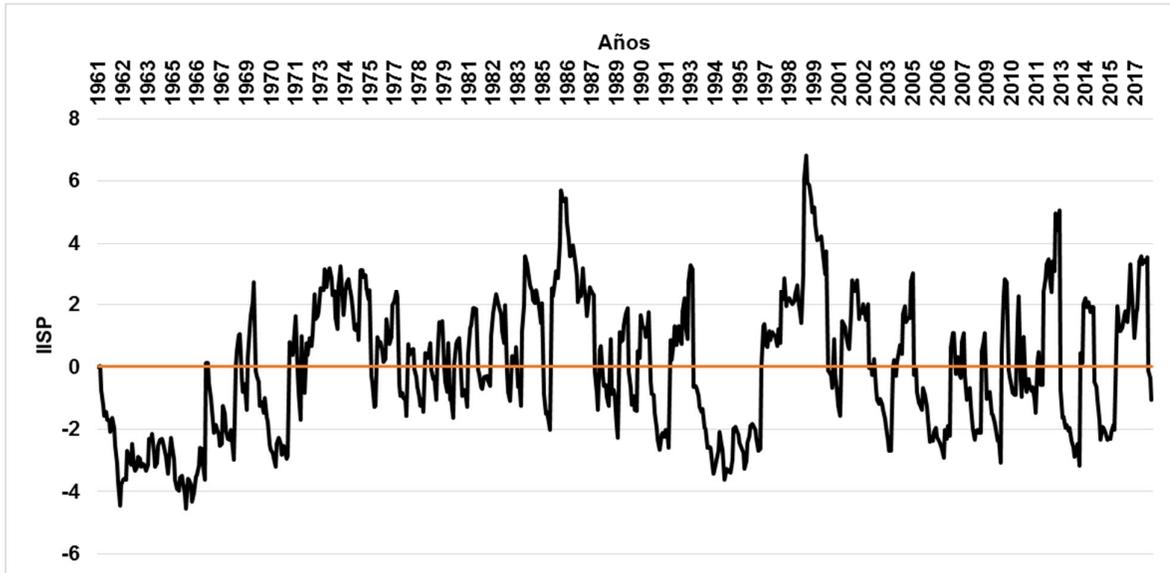


Figura 16. Índice de severidad de Palmer para Gral. Pico (Serie 1961-2017), La Pampa. Datos aportados por el área de Climatología, Facultad de Agronomía, UNLPam.

3.2. Caracterización geomorfológica

La región bajo estudio se caracteriza por presentar un paisaje modelado por acciones hídricas y eólicas en un relieve donde el sedimento eólico arenoso por procesos de acumulación y deflación ha originado un paisaje muy suavemente ondulado con médanos aislados (Figura 17). Estos sedimentos en la provincia de La Pampa han sido denominados como Formación Meaucó (Giai, 1975) de edad Pleistoceno Tardío-Holoceno con intercalaciones de facies lacustres y paleosuelos comparables con Molisoles, que sugieren condiciones de humedad más benignas que las actuales (Giai *et al.*, 2008). De acuerdo a Zárate & Tripaldi (2012) el área está comprendida por dos unidades geomorfológicas. Una de ellas corresponde al *Campo de Dunas de la Región Pampeana Central* con un relieve suave y pendiente hacia el E; con formas controladas por tectonismo. Los depósitos eólicos sobreyacen al loess del Mioceno Tardío y depósitos loessoides o al sustrato Cuaternario (Pleistoceno Medio al Tardío) compuesto de arenas limosas masivas a pobremente estratificadas con acumulaciones de

carbonatos de origen desconocido. Además, esta unidad presenta depósitos de arena modificados por pedogénesis incluyendo en varias localidades capas de cenizas de 1 a 2 cm relacionadas con la erupción del Volcan Quizapú (Imbellone & Camilión, 1988; Hildreth & Drake, 1992). Las dunas incluidas en esta unidad controlan el sistema de drenaje superficial pobremente integrado del área. La mayoría de las dunas son lineales de 100 a 130km de longitud y 2 a 3km de ancho, con una orientación general de NE-SO y un alto de 2m. Las dunas parabólicas más asociadas con esta forma se encuentran en la parte sur del Campo de Dunas. La variabilidad en el tamaño de arenas en general va desde las arenas gruesas en la parte inferior a arenas finas en la parte superior en la zona noroeste.



Figura 17. Vista general del paisaje del área.

La otra unidad corresponde al *Campo de Dunas de la Región Occidental Pampeana* que incluye diferentes dunas rodeadas por mantos eólicos discontinuos, mayormente formados por dunas estabilizas por vegetación. Las formas más conspicuas son voladuras y dunas parabólicas de origen eólico, originadas por paleovientos del SE y NE. La región N de esta unidad ésta cubierta por arenas eólicas y mantos limo arenosos con pequeñas dunas localizadas y estrechamente asociadas con corrientes efímeras (Zárate & Tripaldi, 2012).

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS REGIONAL

4. Análisis regional de la interacción entre sitio y uso del suelo sobre algunas variables indicadoras

El estudio se desarrolló en Paleustoles petrocálcicos y Haplustoles énticos, comprendidos en una transecta N-S (400km) de la planicie con calcretos y medanosa de la región semiárida pampeana. Los puntos de muestreo comprendidos en esta transecta se agruparon de acuerdo a su ubicación geográfica en tres sitios: Noroeste, Centro y Sudeste. En la Figura 18 se presenta una vista del paisaje y el perfil representativo del sistema agrícola, como así también, en la Figura 19 el paisaje y perfil representativo del sistema prístino.

Se seleccionaron sitios por diferencias en las prácticas de producción: planteos agrícolas vs situaciones de monte virgen como testigo. En cada punto de la transecta se evaluaron 6 sitios los cuales correspondieron a 3 situaciones de uso prístino (SP) y 3 situaciones del uso agrícola (SA) con diferente estado de uso (agricultura más de verano en Noroeste y de invierno más en el Sureste). No se tiene información sobre la historia de manejo de cada uno de estos potreros, y puede haber habido diferencia en el manejo entre estos, tanto en los suelos agrícolas como en aquellos bajo vegetación nativa.

Con el fin de evaluar el estado de degradación de los suelos se realizó una caracterización de los sitios seleccionados mediante los parámetros que se describieron en Materiales y Métodos (Capítulo 2).



Figura 18. Vista del paisaje y perfil representativo del uso agrícola.

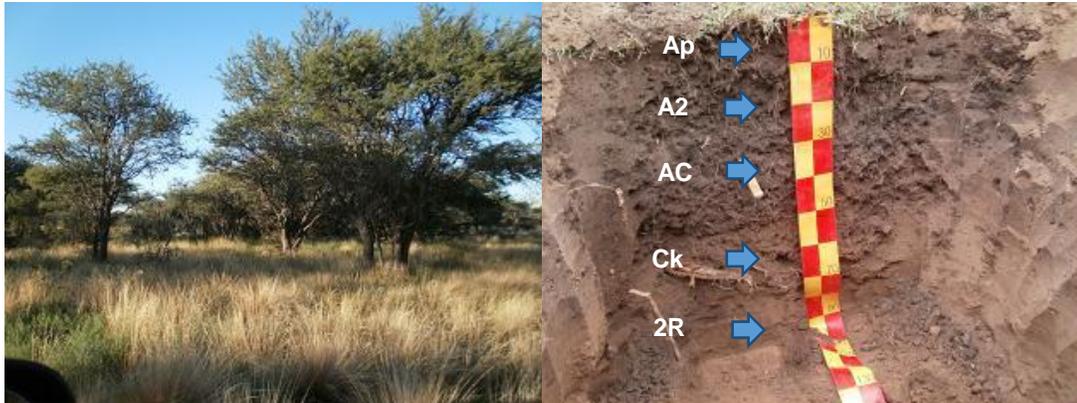


Figura 19. Vista del paisaje y perfil representativo del uso prístino.

4.1. Efecto de sitio sobre indicadores de calidad de suelos

Los tres sitios, Noroeste, Centro y Sureste, representan las regiones de mayor actividad agropecuaria de la provincia de La Pampa, y se diferencian por la predominancia de los cultivos de verano en la primera y los de invierno en la última. Al evaluar la interacción sitio*uso ($p=0,22$), la misma no resultó significativa en los parámetros que se presentaran a continuación. En la Tabla 5 se presentan la materia orgánica total (MOT), materia orgánica joven (MOJ), materia orgánica intermedia (MOI), materia orgánica vieja (MOV) en los sitios agrícolas (SA) y en el sitio de referencia (SP).

Tabla 5. Contenido de arcilla (a), arcilla + limo (a+l), materia orgánica total (MOT), joven (MOJ), intermedia (MOI), vieja (MOV) en tres sitios y dos usos de suelo, prístino y agrícola.

Uso	Indicadores	Noroeste	Centro	Sureste	p-Value
Agrícola	a	13,1 b	14,4 b	7,9 a	p: $\ddot{O},0002$
	a+l	55,4 a	48,9 a	48,9 a	p: $\ddot{O},06$
	MOT	1,99 a	2,13 a	2,19 a	P=0,50
	MOJ	0,71 a	0,74 a	0,80 a	P=0,75
	MOV	1,28 a	1,39 a	1,39 a	P: 0,61
	MOJ/MOT	0,34 a	0,35 a	0,38 a	P: 0,64
Prístino	a	8,4 b	13,3 c	3,4 a	p: $\ddot{O},0001$
	a+l	41,6 b	38,9 a	41,9 b	p: $\ddot{O},04$
	MOT	3,06 a	3,51 b	2,51 a	P=0,012
	MOJ	1,65 a	2,15 a	1,44 a	P=0,38
	MOV	1,41 a	1,36 a	1,07 a	p: 0,27
	MOJ/MOT	0,45 a	0,57 b	0,58 b	p: $\ddot{O},0122$

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias significativas entre sitio para cada indicador y uso de suelo $p<0,05$.

La textura de los suelos de los tres sitios fue diferente ya que los contenidos de arcilla + limo (a+l) y A mostraron diferencias significativas. Sobre todo, el contenido de arcillas fue diferente, con valores más bajos en el Sudeste y mayores valores en el Centro. Estas diferencias fueron más notables en los suelos prístinos que en los agrícolas. (Tabla 5). También los valores de MOT fueron más bajos en el Sudeste que en el Centro, sin diferencias significativas entre Sudeste y Noroeste en los suelos prístinos. Si bien no se observaron diferencias significativas en los contenidos de MOJ, la MOV se diferenció entre sitios, siendo mayor en aquellos de textura más fina. Esto refleja la continuidad de ciclado de carbono en estos suelos no-disturbados, ya que el ingreso de C desde los residuos vegetales es similar debido a similares estructuras de la vegetación, similar a lo observado por Noellemeyer *et al.* (2006) en suelos del Caldenal con distintas texturas. Sin embargo, la capacidad de fijar y estabilizar este carbono difiere y depende de la proporción de arcillas que tienen los suelos (Quiroga *et al.*, 1996). Estas diferencias de las proporciones de las diferentes fracciones de MO de acuerdo a las características texturales no se observaron en los suelos agrícolas, ya que no hubo diferencias significativas entre sitios en ninguna fracción de MO, ni en MOT. Esto nuevamente refuerza el concepto de que el uso agrícola homogeneiza las propiedades de los suelos en valores bajos de estos indicadores. Esto ya fue observado por Quiroga *et al.* (2006), quienes sugirieron un indicador que relativiza el contenido de MOT al contenido de la fracción textural más fina para evaluar el estado de degradación de suelos agrícolas de diferentes regiones dentro de la región semiárida pampeana.

Al comparar los sitios agrícolas, el contenido de arcilla fue mayor que en la situación de referencia. Esto podría vincularse a que los suelos prístinos han actuado como trampa de sedimentos acumulando limo y arenas finas, partículas que viajan por rodadura y saltación de acuerdo a lo expresado por Li *et al.* (2008). A pesar de los mayores contenidos de partículas minerales finas, en los suelos agrícolas de los tres sitios, los contenidos de MOT y MOJ fueron menores a los de los suelos prístinos. Esto demostró la pérdida de MO en estos suelos aún a mejoradas capacidades de fijar y retener el carbono.

Las diferencias observadas entre suelos prístinos y agrícolas indica que las pérdidas fueron de 13, 35 y 39 % para los sitios Sureste, Noroeste y Centro, respectivamente, similares a los valores reportados por Zach *et al.* (2006). En Hapludolesfranco arenosos del SO de la provincia de Buenos Aires, Krüger *et al.* (2004), reportaron valores de pérdidas del 35% del COT como resultado de agricultura permanente, respecto de un suelo definido como ñaturalö. A su vez, Urioste *et al.* (2002) encontraron pérdidas del 38% del COT por efecto

de la agricultura, en el horizonte superficial de Hapludoles y Haplustoles de la región semiárida pampeana. Bravo (2013), a partir de un estudio zonal en la Pampa Austral, detectó variaciones en el COT debidas a la intensidad de manejo para grupos texturales más gruesos, pero sin diferencias en grupos texturales más finos. Zilio (2015) comparando situaciones agrícolas y naturales solo registró diferencias significativas entre sitios por efecto textural (arenosos y finos).

Las fracciones de MO, joven, intermedia y vieja no variaron entre sitio y uso, a diferencia de lo encontrado por Kapkiyai *et al.* (1999) quienes señalaron que la fracción joven de la materia orgánica (MOJ) resulta clave para interpretar cambios en la fertilidad del suelo y potencialmente puede ser utilizada como un índice de calidad de los mismos, aunque esto no queda de manifiesto en los resultados obtenidos en la presente tesis. En tanto que al evaluar los cambios dentro del uso este varió en función del régimen de precipitaciones (rangos desde 650 a 850mm anuales). Las diferencias encontradas entre sitio no fueron explicadas por la precipitación media anual, ya que la regresión entre contenido MOT y precipitaciones medias anuales no resultó ser significativa ($r=0,22$ $p=0,87$). Otra posible fuente de variación del contenido de MOT es la textura, sin embargo en los resultados del presente estudio su efecto fue aleatorio en función del sitio y uso.

La relación entre MOJ/MOT presentó diferencias significativas solo en el SP, sin embargo no presentó diferencias significativas en la situación agrícola. Este indicador presenta buen comportamiento en situaciones prístinas y pasturas perennes/permanentes donde los cambios en la intensidad de uso no son de gran magnitud y el ciclado de carbono no sufre alteraciones de gran impacto (el único caso de cambios significativos podría ser la ocurrencia de incendios) (Gili *et al.*, 2010). En cambio en los sitios agrícolas podría haber suelos que tuvieron un uso muy intensivo históricamente y que recientemente han sido transformados en sistemas más conservacionistas, éstos pueden tener valores de MOT bajas respecto a sus texturas, pero están acumulando altos volúmenes de rastrojos con cambios significativos en los contenidos de MOJ. Por otra parte, podrían incluir suelos que vienen de sistemas rotados con pasturas que presentan altos contenidos de MOT y recientemente fueron transformados en sistemas simples, ejemplo de esto situaciones de monoculturas de sojas donde el aporte de carbono es bajo alterando el ciclado de carbono estable/estabilizado. La utilización de índices vinculados al funcionamiento de los sistemas agropecuarios para detectar los cambios debidos al manejo, en relación a los indicadores, tienen la ventaja de que no son influenciados por las variaciones meteorológicas, edáficas, topográficas y/o estacionales, y los mismos son considerados de crucial importancia en la

determinación del estado de degradación o de reconversión de los suelos (Zornoza *et al.*, 2008).

Estos resultados mostraron que si bien en los suelos cultivados disminuyó la MOJ, también lo hizo la MOT, manteniéndose la proporción que existía en suelos bajo condición original, de manera que la degradación producida por el uso fue de magnitud proporcionalmente semejante en las dos fracciones consideradas. Las variaciones en la proporción de MOJ, respecto de la MOT, permitieron inferir acerca del enriquecimiento o pérdida de MOT en suelos sometidos a diferentes manejos, así valores bajos del índice MOJ/MOT, indicarían condiciones muy favorables para la transformación del material orgánico que ingresa al suelo (Galantini, 2008). Galantini *et al.* (2002) en Haplustoles de clima templado, hallaron valores similares para suelos cultivados (COP/COT: 0,17 a 0,22). Sin embargo, para suelos de referencia encontraron valores más elevados (0,29). En Molisoles y Entisoles de la región semiárida pampeana, Quiroga *et al.* (2008) encontraron que 10 años de agricultura continua, bajo labranza convencional, disminuyeron la relación entre COP y COT del suelo (COP/COT), respecto de suelo bajo SP. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran escasa relación entre el MOJ/MOT para diferenciar entre sitios bajo uso agrícola ($p=0,64$; Tabla 5).

Las propiedades físicas e hidráulicas de suelos de regiones semiáridas se deterioran con el uso y la compactación es una forma de degradación física muy común (Stengel *et al.*, 1984). Este problema de degradación está asociado a la escasa cobertura en la superficie del suelo, debido principalmente a secuencias de cultivos no apropiadas para la región, la utilización de los residuos por la ganadería y sistemas de labranzas no conservacionistas, lo cual se relaciona con pérdida de MOT siendo ésta la principal causa de la degradación física. Algunos indicadores que se relacionan con la compactación se presentan en la Tabla 6 y 7.

En la Tabla 6 se presentan los valores medios y la interacción entre sitio*uso de los siguientes indicadores: inestabilidad de agregados (IIE), agregados > 2mm, compactación medido a través de la DAMax y la susceptibilidad a la compactación (SC) respectivamente. De los indicadores físicos que se evaluaron, el único que presentó diferencias entre sitios en ambos usos fue el índice de IIE, variando entre 1,35 y 0,73 para uso agrícola y SP, respectivamente. Los agregados > 2mm también presentaron diferencias entre sitio pero sólo en SP como se observa en la Tabla 6 los valores promedio de los diferentes

indicadores (eg. DAmax, SC y agregados >2mm) fueron menores bajo SP. Estas variables se correlacionaron negativamente con a+I; MOT y MOJ solo en uso agrícola, en tanto que, bajo SP solo mostraron relación con MOT y MOJ. En suelos bajo uso agrícola se halló una relación negativa entre IIE y MOT ($r = -0,43$), mientras que, en los suelos prístinos no se encontró relación entre ambos indicadores ($r = 0,09$). Esto se puede explicar dado que la adsorción de compuestos orgánicos sobre la superficie de las arcillas aumenta la porosidad intra-agregado (porosidad textural) para constituir el complejo arcillo-húmico, modificando el comportamiento de los suelos frente a la compactación y a las propiedades de retención de agua (Guérif *et al.*, 2001; Ferraras *et al.*, 2007).

Tabla 6. Densidad aparente máxima (DAmax.), susceptibilidad a la compactación (SC), índice de inestabilidad estructural (IIE), proporción de agregados >2mm en tres sitios diferentes (noroeste-centro y sureste la provincia de la pampa y bajo uso agrícola y prístino).

Uso	Indicadores	Noroeste	Centro	Sureste	p-Value
Agrícola	DA max	1,34 a	1,42 a	1,42 a	P=0,41
	SC	0,67 a	1,17 a	0,91 a	P=0,24
	IIE	1,09 a	1,38 b	1,45 b	P= 0,065
	×2mm	72,7 a	71,6 a	68,5 a	P= 0, 52
Prístino	DA max	1,15 a	1,20 a	1,17 a	P=0,80
	SC	0,49 a	0,63 a	0,51 a	P= 0,78
	IIE	0,63 a	0,68 ab	0,88 b	P= 0,049
	×2mm	77,8 b	64,6 a	61,4 a	p: 0,0001

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias significativas entre sitio para cada indicador y uso de suelo $p < 0,05$.

A fin de minimizar los efectos de variaciones en la granulometría sobre indicadores de calidad de suelos, podría ser adecuado el uso de índices, tales como, MO/a+I (Pieri, 1995; Quiroga *et al.*, 2006, Galantini *et al.*, 2004, Noellemeyer *et al.*, 2006), MO/a (Ferraris *et al.*, 2002) o agregados >2mm/a. En la Tabla 7 se evalúa la utilidad de estos indicadores donde independientemente de la textura y del clima, estos indicadores discriminan entre suelos degradados y no degradados, con valores medios muy diferentes entre manejos. Los indicadores variaron ampliamente entre MOT/a (5,9 y 114), MOT/a+I (2,3 y 33,8), agregados ×2mm/a (0,7 y 2,1). El indicador MOT/a+I sólo resultó sensible para distinguir suelos bajo SP de sistemas cultivados. Considerando que no se encontraron diferencias significativas en las fracciones arcilla+limo, el índice estaría respondiendo únicamente a

las diferencias en los contenidos de MOT y su utilización sería más recomendable cuando los suelos bajo las situaciones a comparar difieran en su granulometría, a fin de minimizar los efectos en las variaciones debidos a la textura (Quiroga *et al.*, 2008). El indicador MOT/a resultó menor en sureste agrícola en relación con los otros sitios donde el menor contenido de arcilla se combina con la tendencia a valores mayores de MOT. Según la clasificación propuesta por Quiroga (2002), que estipula un valor de 5 como umbral, todos los suelos agrícolas muestreados presentan algún grado de degradación física.

Tabla 7. Valores de indicadores de calidad de suelos, en los sitios agrícola y prístino de la región semiárida pampeana.

Uso	Indicadores	Noroeste	Centro	Sureste	p-Value
Agrícola	MOT/a	17,1 a	15,1 a	29,5 b	p: $\bar{0},0001$
	MOT/a+1	3,69 a	4,41 b	4,42 b	p: $\bar{0},045$
	$\times 2\text{mm/a}$	6,07 a	5,20 a	9,80 b	p: $\bar{0},0001$
Prístino	MOT/a	42,8 b	26,1 a	58,5 b	p: $\bar{0},0012$
	MOT/a+1	6,4 a	6,7 a	5,5 a	p=0,63
	$\times 2\text{mm/a}$	10,3 b	5,26 a	17,8 c	p: $\bar{0},0001$

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias significativas entre sitio para cada indicador y uso de suelo $p < 0,05$.

La Tabla 8 muestra los valores del coeficiente de regresión (r) para distintas relaciones entre indicadores. En el uso agrícola, IIE se correlacionó negativamente con MO/a+1 y agregados $\times 2\text{mm/a}$, siendo la primera significativa ($p < 0,05$). En tanto que, MOJ se correlacionó positivamente con MOT/a+1 y agregados $\times 2\text{mm/a}$, siendo en ambos casos significativa la correlación. En uso de referencia IIE no presentó correlaciones significativas con los indicadores combinados en tanto que MOP registró correlaciones positivas con MOT/a+1 y agregados $\times 2\text{mm/a}$, mostrando correlaciones altamente significativas.

Tabla 8. Valores de probabilidad de Pearson, en uso agrícola y sitio prístino de la región semiárida pampeana.

Uso	Ind. Simples/p-Value	Indicadores combinados		
		MOT/a	MOT/a+1	×2mm/a
Agrícola	IEE	0,05	-0,35	-0,13
	p-value	0,73	0,02	0,37
	MOJ	-0,15	0,63	0,44
	p-value	0,32	1,9 10 ⁻⁶	1,8 10 ⁻³
Prístino	IEE	-0,14	-0,17	0,23
	p-value	0,38	0,28	0,14
	MOJ	0,03	0,73	0,54
	p-value	0,83	3,2 10 ⁻⁸	11 10 ⁻³

Fernandez *et al.* (2016) encontraron en los suelos prístinos que registraban valores cercanos al 3% de MOT o superior no presentaban cambios significativos en los diferentes parámetros aquí evaluados. No obstante, los usos agrícolas tienden a homogeneizar el efecto de los indicadores y solo expresan cambios significativos en transectas edafoclimáticas como las estudiadas por Quiroga *et al.* (2002).

4.2. Efecto del manejo sobre indicadores de calidad de suelos

Los resultados del presente estudio mostraron que los contenidos de materia orgánica vieja (MOV) prácticamente no se han modificado por el manejo, pero la MOT en los suelos agrícolas se encuentra principalmente constituida por la MOV representando el 67% de la misma, mientras que en el uso SP la MOV representó el 51 % de la MOT (Tabla 9). En relación a las fracciones más lábiles de la MO, ambas (MOJ, MOI) fueron mayores bajo SP que bajo el uso agrícola, donde la MOJ representó el 29,5 y 18,9 % de la MOT para el SP y agrícola, respectivamente. Mientras que para la MOI representa el 18 y 16 % de la MOT para el SP y agrícola respectivamente.

Tabla 9. Materia orgánica total (MOT), joven (MOJ), intermedia (MOI), vieja (MOV) bajo uso prístino y agrícola.

Indicadores	Prístino	Agrícola	P
MOT	2,4 a	1,9 b	p: $\bar{0},0001$
MOJ	0,71 a	0,36 b	p: $\bar{0},0001$
MOI	0,43 a	0,31 b	p: $\bar{0},0001$
MOV	1,23	1,27	p: 0,41

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias significativas para cada indicador y uso de suelo $p < 0,05$.

El manejo afectó los contenidos de MOJ y MOI, cuya disminución resultó en la pérdida de la MOT, mientras que la fracción MOV, no cambió entre usos. Al respecto, Casanovas *et al.* (1995) señalaron que como consecuencia de la descomposición de la fracción liviana quedan como remanente formas más estables de la MOT. Bongiovanni & Lobartini (2006), en Haplustoles encontraron diferencias en las proporciones relativas de las distintas fracciones del carbono del suelo dependiendo del manejo: en situaciones SP, las fracciones lábiles representaron el 29,6% del total, y en lotes agrícolas esta proporción se redujo a 15,8%.

Los suelos SP presentaron valores menores con diferencia significativa en cuanto a DAMax, SC e IIE con respecto a los suelos bajo uso agrícola (Tabla 10). No obstante, la proporción de agregados >2mm en ambos usos de suelos fue similar, no presentando diferencias significativas entre sí. Al respecto Quiroga (1994) concluyó que este indicador puede ser considerado como una propiedad física fuertemente influenciada por la textura y con una baja capacidad de respuesta al manejo. En el caso de los suelos SP, la presencia de estructura granular o migajosa podría haber causado esta falta de diferencia entre usos. Si bien es común encontrar bloques subangulares que rompen a granular en suelos prístinos de la región del Caldenal, en suelos agrícolas la presencia de agregados de menor tamaño siempre se asocia a la pérdida de MOT y alta inestabilidad estructural (Fernández *et al.*, 2016; Riestra *et al.*, 2012). Zilio (2015) trabajando en Hapludoles y Haplustalfes del sur de la Provincia de Buenos Aires encontró un efecto significativo de la textura sobre este indicador, comprobándose que a mayores valores de a+1 resultó mayor diámetro medio ponderado de agregados. En el caso bajo estudio la mayor estabilidad no fue explicada por el porcentaje de a+1, sino por los contenidos de MOT en manejo agrícola, mientras que este parámetro explica la mayor estabilidad en el SP.

La DAMax y la SC fueron menores en los suelos con mayores contenidos de MOT. Al respecto, Nhantumbo & Cambule (2006) observaron que suelos de granulometría fina y con bajos contenidos de MOT son más susceptibles a la compactación y presentaron mayor DAMax. En coincidencia con esto, Quiroga *et al.* (1998) determinaron para suelos Haplustoles énticos de la región semiárida que los sistemas de manejo con menores contenidos de MOT poseían los valores más elevados de susceptibilidad a la compactación. Efectos similares de la MOT sobre la susceptibilidad a la compactación fueron encontrados por Díaz Zorita & Grosso (2000), sobre suelos de una amplia zona, incluyendo diversas texturas y condiciones ambientales.

Tabla 2. Densidad aparente máxima (DA_{max}), susceptibilidad a la compactación (SC), índice de inestabilidad estructural (IIE), proporción de agregados >2 mm bajo uso prístino y agrícola.

Indicadores	Prístino	Agrícola	
DA max	1,17 a	1,39 b	p: 0,0001
SC	0,54 a	0,93 b	p: 0,02
IIE	0,70 a	1,28 b	p: 0,0001
×2mm	69,5	69,7	p: 0,95

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias significativas entre sitio para cada indicador y uso de suelo $p < 0,05$.

La Tabla 11 muestra la comparación entre valores de los índices estudiados entre los usos agrícola y prístino. Se observa que los valores de todos los indicadores son mayores en el prístino con respecto al uso agrícola, presentando diferencias altamente significativas. Estudios realizados por Quiroga *et al.* (2006) en cebada y Funaro (2007) en girasol comprobaron que la relación entre el rendimiento y los contenidos de MOT fue significativa, sin embargo, el rendimiento de ambos cultivos presentó una relación positiva y más estrecha con el índice de MOT/a+l.

Tabla 11. Valores de indicadores de calidad de suelos en uso prístino y agrícolas.

Indicadores	Prístino n:42	Agrícola n: 48	
MOT/a	51 b	23 a	p: 0,0001
MOT/a+l	5,5 b	4,1 a	p: 0,0001
×2mm/a	12,8 b	7,3 a	p: 0,0001

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias significativas para cada indicador y uso de suelo $p < 0,05$.

Si bien la clase textural de todos los suelos en estudio fue franco arenoso, se encontraron rangos de variación en sus contenidos de a+l. El índice de MOT/a+l varió entre 2,87 a 5,46 en el uso agrícola, mientras que, bajo SP el rango fue mayor (3,71 y 7,16).

De manera preliminar se puede expresar que a un cierto contenido de a+l se puede obtener en ambos usos de suelos valores de índices diferentes. Por ejemplo, a la misma granulometría 490 gkg⁻¹ de a+l en el uso agrícola se encontraron suelos con un índice de MOT/a+l de 3,5 y 5,2 y en SP de 3,7 y de 6,4 (Figura 20).

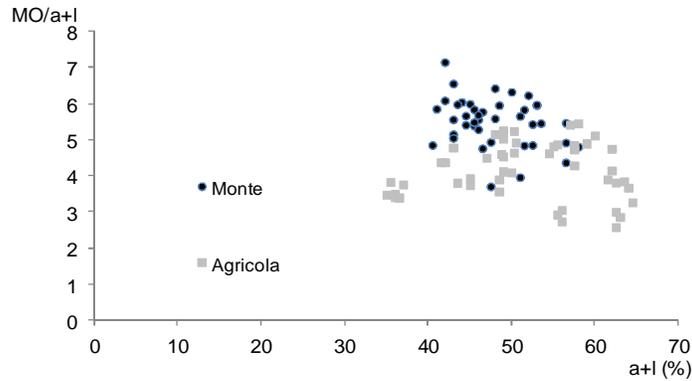
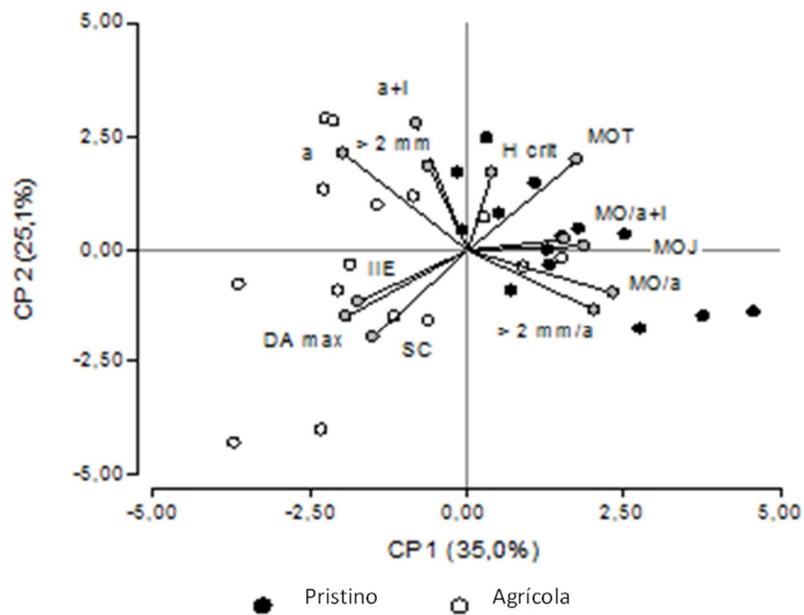


Figura 20. Relación entre arcilla + limo (a+l) y materia orgánica/arcilla + limo (MOT/a+l).

Al considerar la distribución de los sitios evaluados y de las propiedades edáficas en el plano de las 2 primeras componentes principales (60 % de la variabilidad total) se comprobó una estrecha relación positiva entre MOJ e índices de MOT/a+l y MOT/a (Figura 21) y una relación negativa con componente textural. En tanto que, los valores medios de MOT se relacionaron de manera significativa pero negativamente con la SC, la DAmax e IIE, siendo este sector donde se ubican con mayor proporción los suelos bajo uso agrícola. El IEE varió significativamente por efecto de las prácticas de uso, coincidentemente distintos estudios han expresado la sensibilidad de este indicador para evaluar cambios en la calidad de los suelos (Gartzia-Bengoetxea *et al.*, 2009; Quiroga *et al.*, 1998).



Figuras 21. Bi-plot de las primeras dos componentes principales del conjunto de todas las variables analizadas de los sitios prístinos y agrícolas.

CAPÍTULO 5 CARACTERIZACIÓN DE LA CATENA

5. Caracterización de la catena

Geomorfológicamente, la catena representativa se encuentra en un relieve compuesto por sedimentos eólicos arenosos modelados por procesos de acumulación y deflación que originaron un paisaje muy suavemente ondulado con médanos aislados como se aprecia en la Figura 22.



Figura 22. Vista del paisaje de la catena.

La variabilidad de los perfiles en las distintas secciones a lo largo de la catena representativa se presenta en la Figura 23.

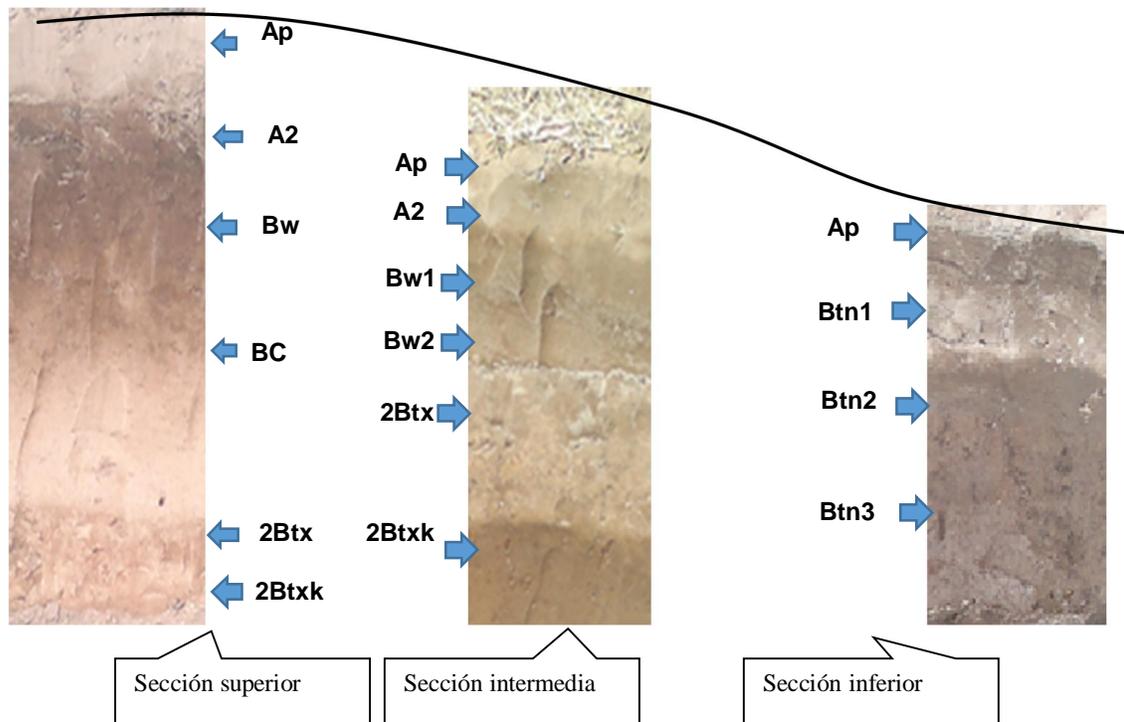


Figura 23. Ubicación de los perfiles en las distintas secciones de la catena.

5.1. Caracterización morfológica y propiedades químicas, físico-químicas y físicas de los perfiles de la catena.

A continuación se presenta la caracterización morfológica y las propiedades químicas, físico-químicas y físicas de los perfiles representativos de las distintas secciones que componen la catena.

5.1.1. Sección superior

En la Figura 24 se presenta el perfil representativo del suelo de la sección superior de la catena. El suelo se ha desarrollado a partir de sedimentos eólicos en un paisaje muy suavemente ondulado, y se caracteriza por presentar un solum poco profundo (100 cm), de escaso desarrollo pedogenético, textura franco arenoso, con permeabilidad rápida y bien drenado.

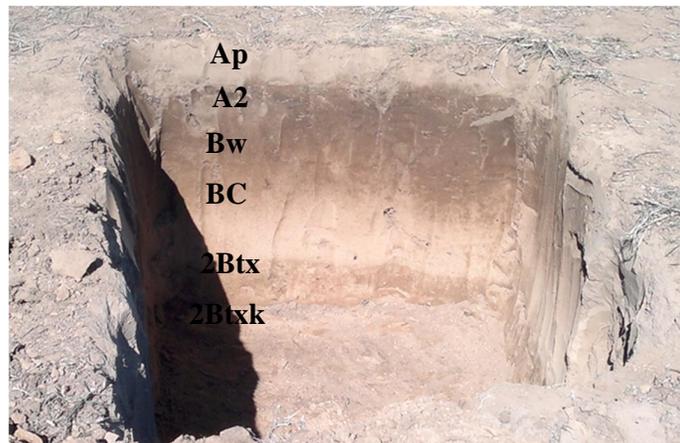


Figura 24. Perfil representativo del suelo de la sección superior de la catena.

A continuación se presenta la descripción morfológica del perfil superior de la catena.

Ap (0-15 cm); pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en seco; franco arenoso; estructura laminar gruesa-masiva, muy duro, muy friable, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo, límite claro y suave.

A2 (15-32 cm); pardo oscuro (10YR 2/2) en húmedo y pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco; franco a franco limoso; estructura en bloques angulares; ligeramente duro, friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; límite claro y suave.

Bw(32-50 cm); pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo y pardo (10YR 5/3) en seco; franco arenoso; estructura en bloques angulares, que rompen a bloques subangulares y grano suelto, duro; muy friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; escasos barnices arcillo-húmicos, finos sobre las caras de los agregados; límite claro y suave.

BC (50-68 cm); pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en húmedo y pardo grisáceo (10YR 5/2) en seco; franco arenoso; estructura masivo, grano suelto, duro, firme, ligeramente

plástico, ligeramente adhesivo; muy escasos barnices arcillosos, muy finos, límite claro y suave.

2Btx (68-100 cm); pardo (10YR 5/2) en húmedo y pardo claro (10YR 7/2) en seco; franco arenoso; estructura masiva; muy firme, muy friable; no adhesivo, no plástico, abundante barnices arcillosos -humicos, moteados de hierro, precisos, comunes, finos; abrupto suave.

2Btxk (100 cm +) pardo (10YR 5/1) en húmedo y pardo amarillento claro (10YR 7/2) en seco; franco arenoso; estructura masiva; muy duro, muy firme; no adhesivo, no plástico, abundantes barnices arcillosos-humicos, moteados de hierro, precisos, comunes, finos; abundante carbonato en la masa.

En la Tabla 12 se presentan los datos analíticos del perfil superior de la catena.

Tabla 32. Propiedades químicas, físico-químicas y físicas del perfil.

Horizontes	Ap	A2	Bw	BC	2Btx	2Btxk
Profundidad (cm)	0-15	15-32	32-50	50-68	68-100	100
Carbono (%)	1,30	0,87	0,41	0,15	0,01	0,01
Nitrógeno (%)	0,12	0,09	0,05	0,04	0,03	0,04
Fósforo (mg kg ⁻¹)	15,20	5,60	3,00	3,40	2,40	3,30
Arcilla < 2 (μm)	12,36	16,18	15,12	12,93	8,73	7,57
Limo 2-50 (μm)	31,65	26,05	24,67	19,82	19,21	23,29
Arena muy fina 53-105 (μm)	6,95	6,45	8,35	7,1	7,4	7,45
Arena fina 105-250 (μm)	39,15	38,5	45,5	47,25	50,35	45,8
Arena media a gruesa 250-2000 (μm)	5,05	4,55	5,25	5,65	6,4	5,25
Carbonatos (%)	0,40	0,10	0,80	0,70	0,30	0,80
pH agua (1:2,5)	5,69	5,94	6,42	6,09	7,66	8,56
CE (dS m ⁻¹)	0,41	0,61	0,47	1,37	0,33	1,44
Cationes de intercambio (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)						
Na	0,05	0,75	0,15	0,63	1,42	2,93
K	1,92	1	0,52	0,48	0,8	1,92
Ca	5,2	6,8	6,5	4,8	6,2	2,8
Mg	1,2	2,3	3,2	2,3	4,3	2,1
Suma de bases (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	8,37	11,85	10,37	8,21	12,72	9,75
CIC (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	11,3	13,2	11,8	9,8	9,7	13,8

PSI (%)	0,4	5,7	1,3	6,4	14,6	21,2
Saturación con bases (%)	74,07	89,77	87,88	83,78	--	70,65

A partir de la descripción morfológica y las propiedades químicas, físico-químicas y físicas del perfil típico (Tabla 12) el suelo taxonómicamente corresponde a un Haplustol típico thapto frágico. Las propiedades físicas asociadas a la discontinuidad litológica es de origen morfológico, en tanto que los niveles de PSI elevado posiblemente este asociados con el ascenso de la freática.

5.1.2. Sección intermedia

El suelo de la sección intermedia de la catena (Figura 25) se ha desarrollado a partir de sedimentos eólicos y se caracteriza por presentar un solum poco profundo (100 cm), de escaso desarrollo pedogenético, textura franco arenoso, con permeabilidad rápida y bien drenado.

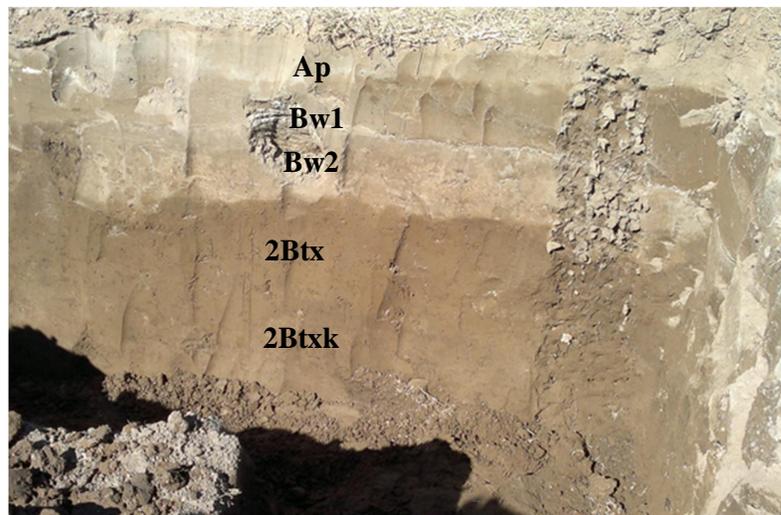


Figura 25. Perfil representativo del suelo de la sección intermedia de la catena.

Morfológicamente el perfil presenta las siguientes características:

Ap (0-20 cm); pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo y pardo (10YR5/3) en seco; franco arenoso; estructura laminar y bloques subangulares, ligeramente duro, muy friable, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo, límite abrupto y suave.

Bw1 (20-38 cm); pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo y pardo (10YR 5/3) en seco; franco arenoso; estructura en bloques angulares moderados, muy duro, muy friable; muy plástico, ligeramente adhesivo; escasos barnices arcillo-húmicos, finos; límite claro y suave.

Bw2 (38-57 cm); pardo oscuro (10YR 4/3) en húmedo y pardo (10YR 5/3) en seco; franco arenoso; estructura en bloques subangulares muy debilitados que rompen a grano suelto, duro; firme; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; escasos barnices óhúmicos, fino sobre la cara de agregado, moteados de hierro, precisos, comunes, finos, límite claro y suave.

2Btx (57-80 cm); pardo amarillento oscuro (10YR 3/2) en húmedo y gris pardusco claro (10YR 4/2) en seco; franco arenoso; estructura masiva; muy duro, muy firme; abundantes barnices arcillo-húmicos, no adhesivo a ligeramente adhesivo, moteados de hierro, precisos, comunes, gruesos, límite claro y suave.

2Btxk (100 cm); pardo (10YR 5/1) en húmedo y pardo amarillento claro (10YR 7/2) en seco; franco arenoso; estructura masiva; muy duro, muy firme; abundantes barnices arcillo-húmicos, no adhesivo, no plástico, moteados de hierro, precisos, comunes, gruesos.

En la Tabla 13 se presentan los datos analíticos del perfil intermedio de la catena.

Tabla 43. Propiedades químicas, físico-químicas y físicas del perfil.

Horizontes	Ap	Bw1	Bw2	2Btx	2Btxk
Profundidad (cm)	0-20	20-38	38-57	57-80	>80
Carbono (%)	1,26	0,91	0,14	0,6	0,01
Nitrógeno (%)	0,11	0,05	0,02	0,03	0,04
Fósforo (mg kg ⁻¹)	25,30	4,30	3,50	2,80	3,30
Arcilla < 2 (µm)	9,12	15,38	11,97	7,43	7,57
Limo 2-50 (µm)	22,08	14,21	18,45	19,1	23,29
Arena muy fina 53-105 (µm)	7,1	6,2	6,8	6,4	7,45
Arena fina 105-250 (µm)	50,1	50	52,45	53,2	45,8
Arena media a gruesa 250-2000 (µm)	7,05	6,85	6,7	6,2	5,25
Carbonatos (%)	0,20	0,30	0,20	0,40	0,80
pH agua 1: 2,5	6,20	6,60	7,00	7,60	8,56
CE (dS m ⁻¹)	0,46	0,27	0,74	0,57	1,44
Cationes de intercambio (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)					
Na	0,61	0,62	0,34	0,66	11,20
K	2,20	2,29	0,65	0,57	0,86
Ca	4,30	9,00	4,80	4,90	2,80
Mg	1,30	3,60	2,70	2,80	2,10

Suma de bases (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	8,41	15,51	8,49	8,93	16,96
CIC (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	9,10	13,00	9,40	9,70	13,80
PSI (%)	6,7	4,8	3,6	6,8	81,2
Saturación con bases (%)	92,42	--	90,32	92,06	--

A partir de la descripción morfológica y las propiedades químicas, físico-químicas y físicas del perfil típico (Tabla 13) taxonómicamente el suelo es un Haplustol típico thaptofrágico. Las propiedades físicas asociadas a la discontinuidad litológica es de origen morfológico, en tanto que los niveles de PSI elevado posiblemente este asociados con el ascenso de la freática.

5.1.3. Sección inferior

La sección inferior de la catena presenta un suelo desarrollado (Figura 26) a partir de sedimentos eólicos, textura franco arenosa, permeabilidad muy lenta y mal drenado con nivel freático entre 20 y 100 cm.

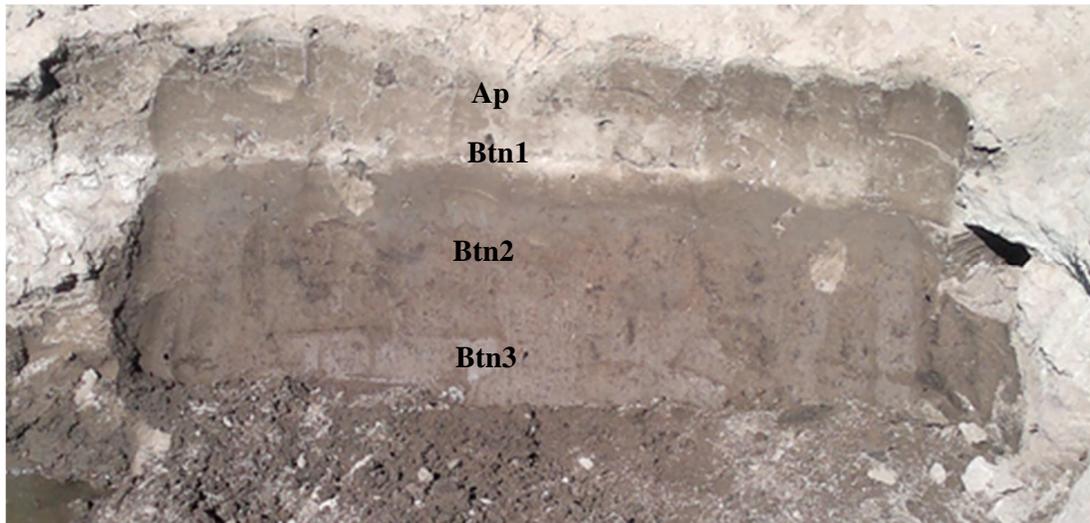


Figura 26. Perfil representativo del suelo de la sección baja de la catena.

Morfológicamente el perfil presenta las siguientes características:

Ap (0-24 cm); pardo grisáceo (10YR 5/2) en húmedo y gris pardusco claro (10YR 6/2) en seco; arenoso franco; estructura en bloques subangulares, blando, muy friable, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo, moteados de hierro, precisos, comunes medios, límite abrupto y Suave.

Btn1 (24-39 cm); pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo y pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco; franco arenoso; estructura en prismas simples irregulares, y bloques fuertes que rompen a prismas simples irregulares, medios a finos; muy duro, muy friable; plástico, ligeramente adhesivo; abundantes barnices arcillo-húmicos; moteados de hierro, precisos, abundantes, gruesos, límite claro y suave.

Btn2 (33-54 cm); pardo (10YR 5/4) en húmedo y pardo grisáceo (10YR 5/2) en seco; franco arenoso; estructura prismas que rompen a bloques subangulares, muy duro; muy friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; abundantes barnices arcillo-húmicos, finos sobre las caras de los agregados; moteados de hierro, precisos, abundantes, gruesos; Pequeños nódulos de carbonatos dispersos en la masa; límite claro y suave.

Btn3 (+54 cm); gris pardusco claro (10YR 6/2) en húmedo y pardo amarillento (10YR 5/4) en seco; franco arenoso; estructura prismas que rompen a bloques subangulares; extremadamente duro, muy friable, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; escasos barnices arcillosos, muy finos; moteados de hierro, precisos, abundantes, gruesos. Pequeños nódulos de carbonatos dispersos en la masa; límite claro y suave.

En la Tabla 14 se presentan los datos analíticos del perfil inferior de la catena.

Tabla 54. Propiedades químicas, físico-químicas y físicas del perfil de la sección inferior.

Horizontes	Ap	Btn1	Btn2	Btn3
Profundidad (cm)	0-24	24-39	39-54	>54
Carbono (%)	1,75	0,72	0,21	0,05
Nitrógeno (%)	0,13	0,05	0,02	0,02
Fósforo (mg kg ⁻¹)	34,00	4,60	4,90	4,90
Arcilla < 2 (µm)	11,82	12,47	6,48	7,25
Limo 2-50 (µm)	18,19	16,96	21,51	18,13
Arena muy fina 53-105 (µm)	6,1	5,50	6,55	6,75
Arena fina 105-250 (µm)	58,25	50,05	52,75	57,55
Arena media a gruesa 250-2000 (µm)	2,45	5,45	5,45	6,45
Carbonatos (%)	0,70	0,20	1,20	0,80
pH agua 1: 2,5	6,70	8,60	8,70	8,90

CE (dS m ⁻¹)	3,39	2,44	3,08	2,33
Cationes de intercambio (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)				
Na	0,61	2,31	3,63	5,22
K	1,67	1,86	1,93	1,9
Ca	9,1	9,2	8,2	5,4
Mg	2,2	0,6	2,6	1,8
Suma de bases (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	13,58	13,27	16,36	14,32
CIC (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	14,8	14,7	11,9	10,7
PSI (%)	4,1	15,7	30,5	48,8
Saturación con bases (%)	91,76	94,97	--	--

A partir de la descripción morfológica y las propiedades químicas, físico-químicas y físicas el perfil tipo (Tabla 14) taxonómicamente es un Natracuol típico.

A lo largo de la catena, principalmente la forma y longitud de la pendiente, en combinación con los factores de formación (clima, material originario, drenaje, tiempo) y los procesos de pedogénesis generaron una organización o una anisotropía en los diferentes perfiles con pérdidas y ganancias globales que controlaron la morfología y variaciones en las propiedades edáficas de los suelos a lo largo de la misma. Esto coincide con lo expresado en estudios sobre una toposecuencia tales como lo señalado por Becker (2006) en Hapludoles el suroeste de Córdoba, Grumelli (2010) en Hapludoles/Argiudoles el centro de Córdoba, Bouza *et al.* (2014) en Aridisoles nord-patagónicos; así también, Iturri (2015) en una transecta edafo-climática de Molisoles de régimen ústicos a údicos.

La topografía y algunas propiedades estables del suelo, tales como, textura, pH, carbonato de calcio y materia orgánica han sido utilizados con relativo éxito para la definición de zonas de igual manejo (Khosla *et al.*, 2008; Kravchenko & Bullock, 2000; Kumhálová *et al.*, 2011; Vitharana *et al.*, 2008). La catena de suelos en este estudio, asociada principalmente al relieve y drenaje, muestra claramente una estratificación diferencial entre los perfiles a lo largo de la misma. Según, Irrizarri *et al.* (2013) en una toposecuencia que represente la catena de suelos asociada al gradiente hídrico muestra en las zonas altas los suelos zonales, en las posiciones bajas los suelos intrazonales hidromórficos más conspicuos, y en el flanco de la pendiente los intergrados a los diferentes Órdenes. Por otra parte, la heterogeneidad espacial de los suelos de la catena con diferencias morfológicas en

los perfiles (espesor variable del fragipan) y sodio asociado posiblemente al nivel freático estarían generando limitaciones para la productividad de los cultivos, tales como las que fueran señaladas por Phillips & Marion (2005).

El hidromorfismo en la catena estudiada constituye un conjunto de procesos que tiene como origen la saturación con agua del perfil del suelo y se traduce en la presencia de rasgos redoximórficos relacionados a la química del hierro y manganeso tal como se observa principalmente en la sección inferior de la transecta (Imbellone *et al.*, 2010; Zappino, 2010). La presencia de moteados de diverso contraste a profundidades variables en los perfiles de la catena, con cromas de dos (Vepraskas & Wilding, 1983) indicaría déficit de oxígeno en las reacciones químicas, bioquímicas y procesos biológicos, que se manifiestan en la aparición de los mismos (Figuras 24 a 26).

Es importante destacar que en la sección inferior la presencia de moteados es relevante e indicaría condiciones redox del suelo (Doran *et al.* 1996; Percival *et al.* 2000), provocando efectos negativos para la producción, tales como, la desnitrificación, retardo de la humificación, sodificación, entre otros (Imbellone *et al.* 2010 y Broquen, 2004) afectando la aireación de los suelos, siendo este uno de los principales componentes de los ciclos biogeoquímicos. Esto demuestra que si bien el manto arenoso que se deposita sobre el suelo generó diferentes evoluciones, no diferenciándose en sus componentes texturales y mineralógico de arena, evidenciado este que el principal factor formador de los perfiles de esta catena fue el relieve (= clima, material original, tiempo y vegetación). Estos perfiles no solo presentan limitantes por discontinuidad litológica asociada a los Btxk (fragipán) descritos en las secciones S y M, sino también una condicionante química relacionada con los niveles de sales y sodio presente en diferentes magnitudes y profundidades en las 3 secciones.

5.2. Caracterización mineralógica

El análisis mineralógico semicuantitativo de la fracción arena fina de los horizontes de los perfiles representativos que componen la catena permitió determinar una gran similitud mineralógica en los mismos. Se observó un amplio dominio de minerales livianos (mayor al 90%) compuestos principalmente por vidrio volcánico, plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo, muscovita, lititos, y alteritas; mientras que la fracción pesada es muy escasa e integrada por anfíboles (lamprabolita, hornblenda), piroxenos, biotitas, minerales opacos (óxidos de hierro) y lititos como se observa en la Figura 27 a y b.

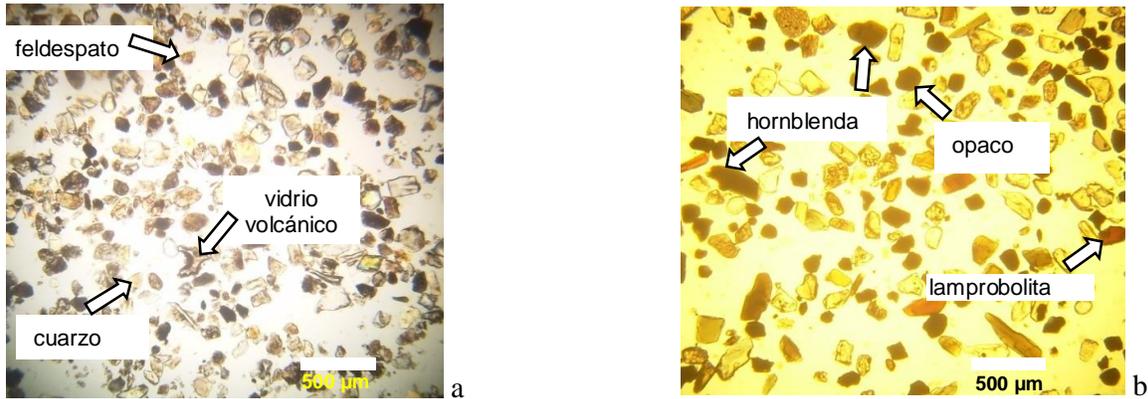


Figura 27. Fracción liviana (a- a luz paralela) y pesada (b-a nicoles cruzados) del horizonte 2Btx del perfil de la sección superior.

La composición mineralógica encontrada coincide con diversos autores, Grumelli *et al.* (2014) en sur de Córdoba, Imbellone *et al.* (2004) en oeste de Buenos Aires, así también, Becker (2006) y Schiavo *et al.* (1995) en centro-sur de Córdoba, que señalan abundantes minerales livianos (aprox. 97%) principalmente vidrios volcánicos, cuarzo, plagioclasas, feldespatos potásicos, lititos, y alteritas, a los que se añaden ocasionalmente silicofitolitos. Además, indican que los minerales pesados son más escasos (aproximadamente 3%) y constituidos por anfíboles (lamprobolita), piroxenos, biotitas, muscovitas, opacos, lititos y minerales heredados, más o menos transformados del material original. Asimismo, algunos minerales formados por procesos edáficos como los óxidos de hierro.

En relación a la mineralogía de la fracción arcilla los perfiles de la catena presentaron una distribución homogénea donde la especie dominante es la illita con cantidades subordinadas de interstratificados illita/smectita, siendo similares en todos los perfiles evaluados de la catena. En los difractogramas de Rayos X (DRX) de muestras al natural (Figura 28, 29 y 30) la Illita se identificó en todos los horizontes por sus reflexiones características, principalmente en 10 \AA (001), asimétrica, bien definida, y seguida de una reflexión en $4,9 \text{ \AA}$ (002) y $2,95 \text{ \AA}$ (003). En la sección superior se observan escasos óxidos hierro en los horizontes Bw, 2Btx y 2Btxk (Figura 28), mientras que, en la intermedia en el Bw2, 2Btx, 2Btxk (Figura 29) y en la inferior en el Btn1, Btn2 y Btn3 (Figura 30) se incrementan en profundidad. La fracción de minerales no arcillosos que acompañan a la illita son principalmente cuarzo y feldespato potásico. Estos resultados son similares a los registrados en trabajos realizados en la región central del país por Camillon & Imbellone (1984), Panigatti (1975 y 1980); Panigatti & Mosconi 1978/9); Schiavo *et al.* (1995), Becker (2005), Grumelli *et al.* (2008 y 2010), Visconti *et al.* (2010), Iturri (2015) entre otros, donde indican que la fracción arcilla es semejante, mostrando una distribución homogénea y dominante de la illita, acompañada por minerales no arcillosos (cuarzo y feldespato potásico).

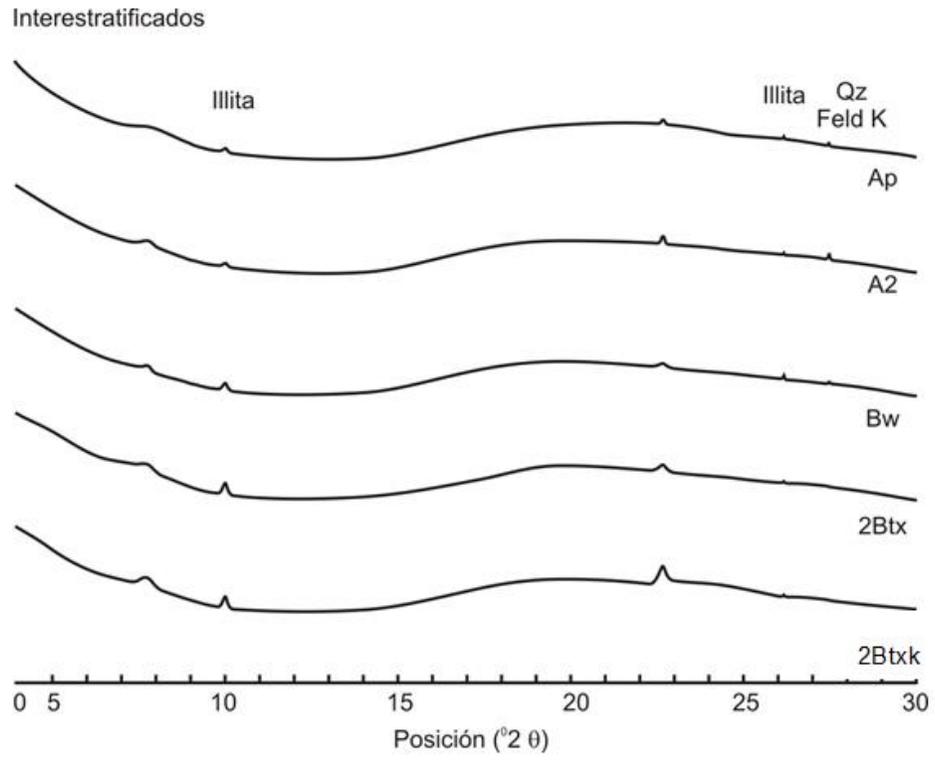


Figura 28. Difractograma de Rayos X (DRX) de muestras al natural del perfil de la sección superior.

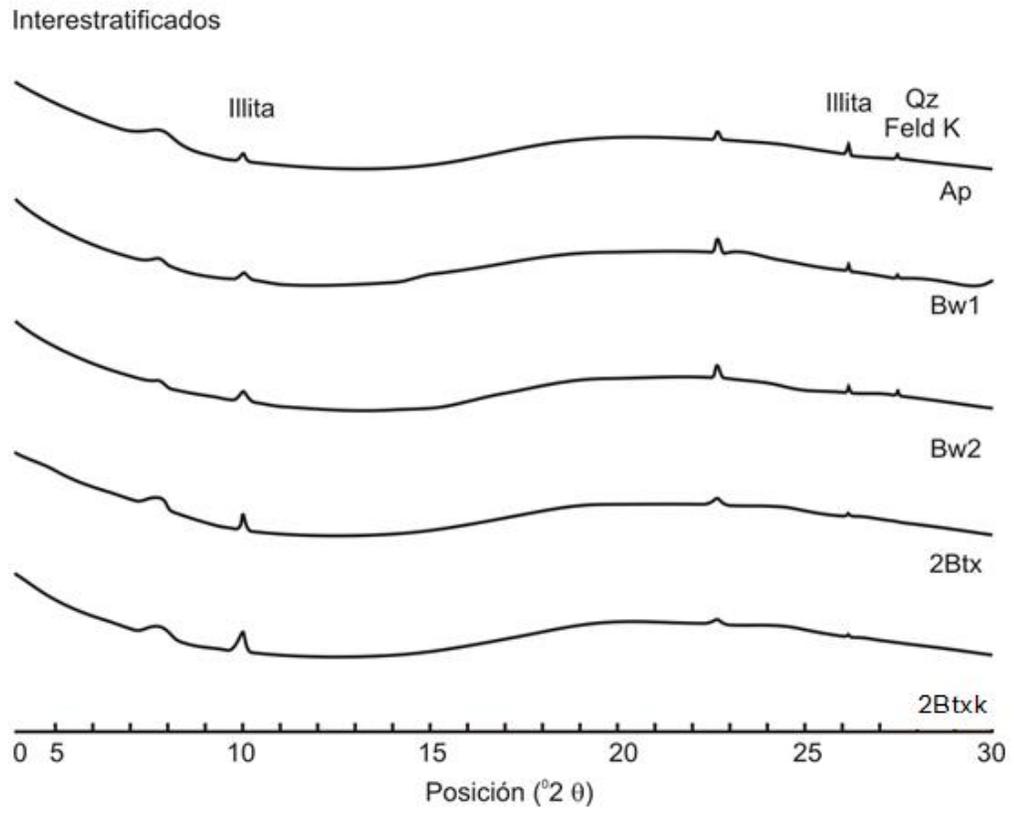


Figura 29. Difractograma de Rayos X (DRX) de muestras al natural del perfil de la sección intermedia.

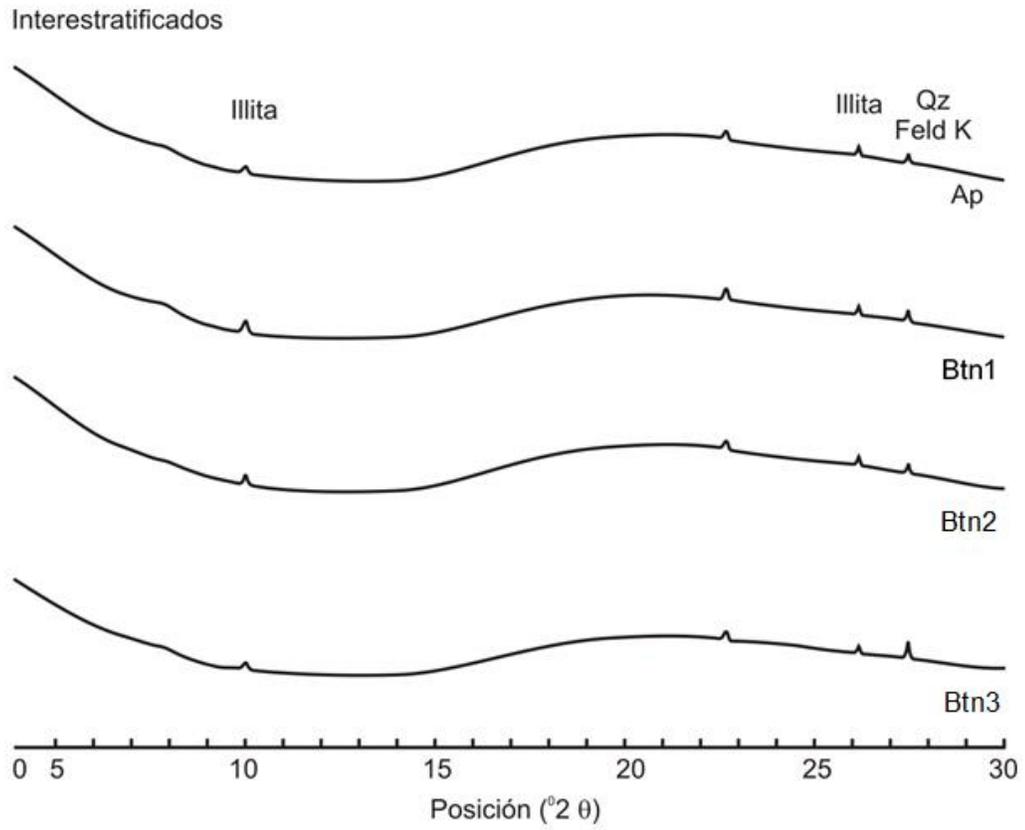


Figura 30. Difractograma de Rayos X (DRX) de muestras al natural del perfil de la sección inferior.

5.3. Caracterización micromorfológica de los perfiles de la catena

Se describieron micromorfológicamente todos los horizontes de los perfiles representativos de la catena. A continuación se presentan las descripciones de los horizontes B de las diferentes secciones de la catena por considerarse los más representativos.

5.3.1. Sección superior

La micromorfológica del horizonte Bw muestra una **microestructura y porosidad** en bloques subangulares moderadamente desarrollados, con orientación aleatoria de los agregados; *distribución relacionada g/f* enáulica y límite g/f 5 m. Se observan poros de empaquetamiento compuesto con abundantes canales tubulares, de paredes suaves y pequeñas cavidades irregulares. La **masa basal** presenta un *material grueso mineral* compuesto por granos gruesos y medios subangulares a subredondeados de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, abundantes fragmentos líticos, vidrios volcánicos y lamprabolita, y minerales opacos. Escasos minerales muestran alteración pelicular. Se observan artefactos, como burbujas de aire en la resina. La *micromasa* presenta una contextura de birrefringencia indiferenciada a moteada, turbia, con presencia de óxidos de hierro dispersos en la matriz. El **material orgánico** está compuesto por restos de residuos orgánicos como raíces descompuestas y material fino orgánico.

Los principales **rasgos pedológicos** (Bw) son rellenos sueltos discontinuos de canales con limo, nódulos redondeados de limo bien seleccionado, con bordes netos a alterados parcialmente (Figura 31), nódulos pequeños muy dispersos de óxidos. Se observan escasos revestimientos.

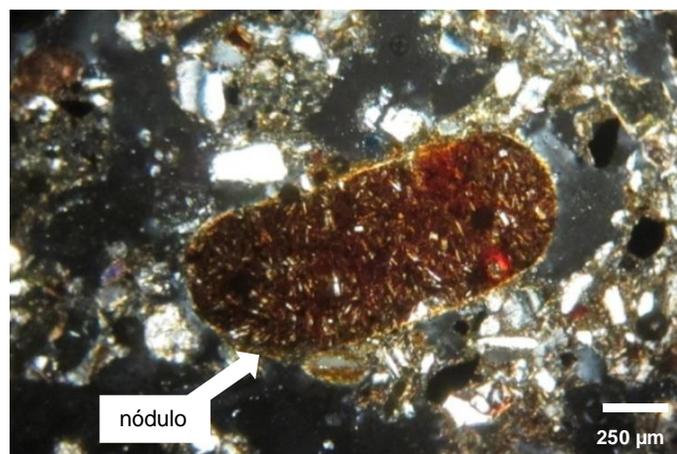


Figura 31. Rasgo pedológico (nódulo) del horizonte Bw de la sección superior de la catena.

El horizonte 2Btx muestra una **microestructura laminar gruesa** con fisuras horizontales y subhorizontales, poros de empaquetamiento con abundantes canales, cavidades y fisuras. La **masa basal** presenta un **material grueso mineral** compuesto por granos gruesos y medios subangulares a subredondeados de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, abundantes fragmentos líticos, vidrios volcánicos, y minerales opacos. La **micromasa** presenta una contextura de birrefringencia granoestriada a indiferenciada. El **material orgánico** está compuesto por restos de residuos orgánicos como raíces descompuestas y material fino orgánico. Los principales **rasgos pedológicos** son rellenos sueltos discontinuos de canales con arcillas, nódulos redondeados de limo bien seleccionado, con bordes netos a alterados parcialmente y nódulos pequeños muy dispersos de óxidos, segregaciones de hierro moderadas a fuertes, revestimientos finos y medios (5µm), continuos y microlaminados de arcilla y arcilla/hierro pardo amarillenta a rojiza con intenso color de interferencia, localizados alrededor del esqueleto, fisura y poros (Figura 32).



Figura 332. Rasgo pedológico (revestimientos de arcilla /arcilla hierro) a nicoles cruzados del horizonte 2Btx de la sección superior de la catena.

El horizonte 2Btxk presenta una **microestructura** con alta densidad de empaquetamiento con fisuras horizontales y subhorizontales, abundante carbonato micrítico relleno de canales, cavidades y fisuras (Figura 33). La **masa basal** presenta un **material mineral grueso** compuesto por granos gruesos y medios subangulares a subredondeados de cuarzo,

plagioclasa, feldespato potásico, fragmentos líticos, vidrios volcánicos, anfíboles (lamprabolita) y minerales opacos. *La micromasa* presenta una contextura de birrefringencia granoestriada a indiferenciada. Se observan abundantes *rasgos pedológicos* principalmente revestimientos de arcilla alrededor minerales, fisura y poros.

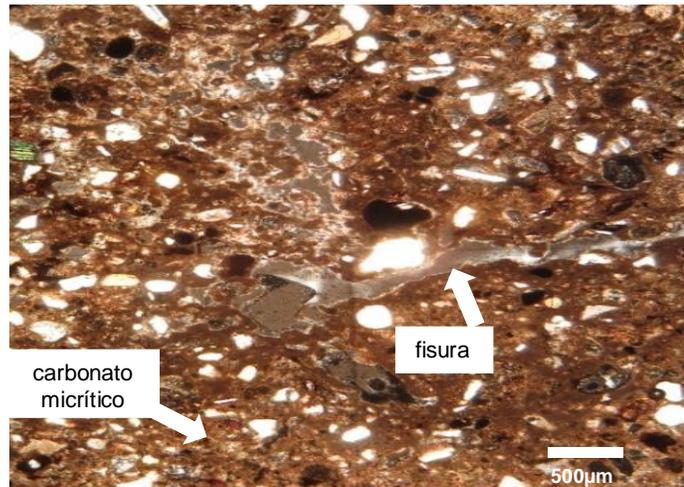


Figura 333. Microestructura (fisura, carbonato micrítico) a luz paralela del 2Btxk de la sección superior de la catena.

5.3.2. Sección intermedia

La secuencia de horizontes Bw presenta una **microestructura y porosidad** en bloques angulares a subangulares moderados, con orientación aleatoria de los agregados; *distribución relacionada g/f* enáulica y límite *g/f* 5 m. Se observan poros de empaquetamiento compuesto con canales tubulares de paredes suaves y cavidades irregulares dispersas. La *masa basal* presenta un *material grueso mineral* compuesto por granos gruesos subangulares de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, abundantes fragmentos líticos, vidrios volcánicos y minerales opacos. Algunos minerales muestran alteración pelicular. Los granos minerales más gruesos presentan una laminación paralela a lo largo del horizonte (Figura 34). *La micromasa* presenta una contextura de birrefringencia indiferenciada a granoestriada, turbia, con presencia de óxidos dispersos. El *material orgánico* está compuesto por restos de residuos orgánicos como raíces descompuestas y material fino orgánico.



Figura 34. Masa basal (laminación paralela de minerales) a nicoles cruzados del horizonte Bw de la sección media de la catena.

Los principales *rasgos pedológicos* son rellenos sueltos discontinuos de canales con limo como se observa en el Bw1 (Figura 35) nódulos de limo bien seleccionado, con bordes netos y alterados parcialmente, nódulos dispersos de limo, arcilla pardo amarillenta y óxidos, con bordes netos, revestimientos finos, (<5μm), escasos y discontinuos de arcilla pardo amarillenta y óxidos en paredes de algunos granos minerales gruesos.

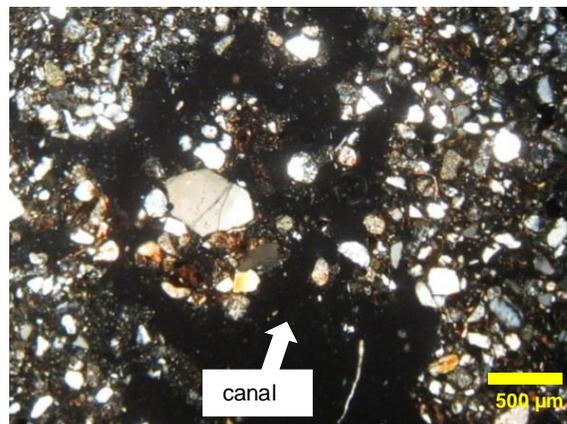


Figura 35. Rasgo pedológico (canal relleno) a nicoles cruzados del horizonte Bw1 de la sección intermedia de la catena.

La secuencia micromorfológica de horizontes inferiores, principalmente 2Btx, muestra una microestructura laminar gruesa, poros de empaquetamiento con abundantes fisuras horizontales y subhorizontales, y subordinadas, cavidades y canales. La *masa basal* presenta un *material grueso mineral* compuesto por granos gruesos y medios subangulares a subredondeados de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, abundantes fragmentos

líticos, vidrios volcánicos, y minerales opacos. *La micromasa* presenta una contextura de birrefringencia granoestriada a indiferenciada. El *material orgánico* está compuesto por restos de residuos orgánicos como raíces descompuestas y material fino orgánico. Los principales *rasgos pedológicos* son nódulos redondeados de limos finos bien seleccionados, rellenos sueltos discontinuos de canales con arcillas y óxidos, nódulos pequeños muy dispersos de óxidos, revestimientos finos y medios (5µm), continuos y microlaminados de arcilla y arcilla/hierro pardo amarillenta a rojiza con intenso color de interferencia alrededor del esqueleto, fisuras y poros (Figura 36).

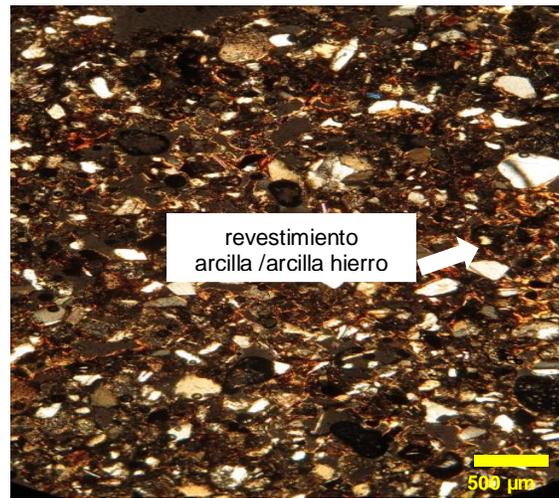


Figura 346. Rasgo pedológico (revestimiento arcilla/arcilla hierro) a nicoles cruzados del horizonte 2Btx de la sección intermedia de la catena.

El horizonte 2Btxk presenta una *microestructura* con alta densidad de empaquetamiento con fisuras horizontales y subhorizontales, abundante carbonato micrítico relleno de canales, cavidades y fisuras (Figura 37). La *masa basal* presenta un *material grueso mineral* compuesto por granos gruesos y medios subangulares a subredondeados de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, fragmentos líticos, vidrios volcánicos, anfíbolita (lamprabolita) y minerales opacos. *La micromasa* presenta una contextura de birrefringencia granoestriada a indiferenciada. Se observan abundantes *rasgos pedológicos* localizados alrededor del esqueleto, fisura y poros.



Figuras 37. Microestructura (carbonato micrítico) a luz paralela del horizonte 2Btxk de la sección intermedia de la catena.

5.3.3. Sección inferior

Los horizontes Btn1 y Btn2 presentan una **microestructura y porosidad** en bloques subangulares moderados, con orientación aleatoria de los agregados; *distribución relacionada g/f* quitónica y límite g/f 5 m. Se observan poros de empaquetamiento compuesto con canales tubulares y cámaras y cavidades irregulares dispersas. La **masa basal** presenta un *material grueso mineral* compuesto por granos gruesos y medios subangulares de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, fragmentos líticos, vidrios volcánicos, anfibolita (lamprabolita) y minerales opacos. Algunos minerales muestran alteración pelicular. Los granos minerales más grueso presentan una laminación paralela a lo largo del horizonte. Se observan abundantes artefactos, como burbujas de aire en la resina. La *micromasa* presenta una contextura de birrefringencia poro estriada y grano estriada, turbia, con presencia de óxidos de hierro dispersos.

El **material orgánico** está compuesto por restos de residuos orgánicos como raíces descompuestas y material fino orgánico. Los principales **rasgos pedológicos** son pequeños nódulos redondeados de limo, arcilla pardo amarillenta y óxidos de hierro con bordes netos y parcialmente alterados como se observa en el horizonte Btn1 (Figura 38), nódulos pequeños y dispersos de óxidos, revestimientos finos a medios abundantes y continuos de arcilla pardo amarillenta (horizonte Btn2, Figura 39) y óxidos rojizos en paredes de granos minerales gruesos y poros. El proceso de iluviación se vió acentuado dada las características hídricas de esta sección. La estructura no se vió alterada por la presencia de sodio,

posiblemente porque la presencia del mismo ha sido posterior a los procesos pedogenéticos que dieron origen al perfil.

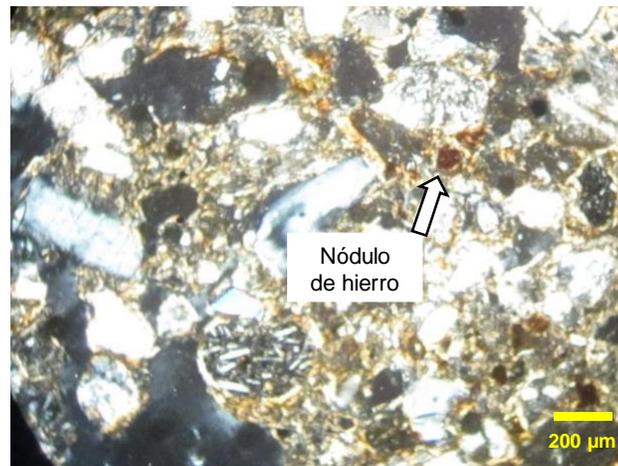


Figura 38. Rasgo pedológico (nódulo de hierro) a nicols cruzados en el Horizonte Btn1 de la sección inferior de la catena.



Figura 359. Rasgo pedológico (revestimiento de arcilla/arcilla hierro) a nicols cruzados del horizonte Btn2 de la sección inferior de la catena.

Las determinaciones mineralógicas indican que los perfiles de la catena se han desarrollado sobre un material predominantemente eólico sobreyacente a un material loésico con la presencia de un nivel de fragipan a distintas profundidades. Micromorfológicamente, los rasgos pedológicos evidencian procesos de iluviación de arcilla, eventualmente con hierro asociado (Figura 39) en los horizontes B. La existencia de fisuras subparalelas y paralelas a

la horizontal, tal como lo señalara Schiavo *et al.* (1995, 2014) son la principal evidencia de la presencia de fragipanes en los horizontes inferiores de la sección superior e intermedia. La cementación estaría dada por la presencia de revestimientos de arcilla y arcilla/hierro uniendo partículas del esqueleto y rellenando poros y fisuras.

La diferenciación pedogenética a lo largo de la catena en la región noroeste de la provincia de La Pampa es una herramienta integradora de los procesos que ocurren en el suelo y que se reflejan en las propiedades morfológicas, físicas, físico-químicas, químicas, mineralógicas y micromorfológicas con una marcada relación con la posición en el paisaje y los materiales originarios donde se desarrollan. La marcada variabilidad de los perfiles reflejan la impronta de los procesos pedogenéticos elementales, principalmente traslocación (enriquecimiento de arcillas, sales solubles, entre otras) con un progresivo incremento de horizontes diagnósticos como argílicos y nátricos (Huggett, 1976), fragipanes y petrocálicos (Schiavo *et al.*, 1995, Schiavo *et al.*, 2014). La presencia de fragipanes en los horizontes inferiores de las secciones superior e intermedia, podría estar generando una discontinuidad hidráulica, desconectando parcialmente el agua de infiltración del nivel freático.

Los estudios morfológicos, mineralógicos y micromorfológicos de los distintos perfiles de la catena permiten determinar/inferir una homogeneidad en el material parental, tanto como el clima, el tiempo de evolución y la biogenosis, poniendo de manifiesto que el efecto del relieve en el desarrollo de los procesos pedogenticos ha sido predominante. Los distintos grado de evolución de los perfiles estudiados se manifiestan en los diferentes efectos sobre la productividad y los parámetros (MO, P, pH, entre otros) asociados además a la variabilidad de la profundidad del nivel freático y su aporte de sales.

CAPÍTULO 6 CATENA Y CULTIVO

6. Propiedades edáficas y de cultivos evaluados en la catena

Los antecedentes de estudios llevados a cabo en la región pampeana indicarían que la heterogeneidad espacial de los suelos estaría ligada a su posición en el relieve, ya que ésta tendría relación con la presencia de niveles freáticos someros, diferencias texturales, presencia de carbonato de calcio (Urricariet *et al.*, 2011), y la disponibilidad de agua y de nitrógeno (Gregoret *et al.*, 2006). La profundidad a la que se encuentra un horizonte restrictivo, como el horizonte petrocálcico de la subregión de mesetas y valles de la provincia de La Pampa, limita el desarrollo de las raíces y la capacidad del suelo para retener agua útil. Esto a su vez impacta sobre la productividad y genera en los cultivos mayor dependencia de la distribución temporal de las precipitaciones (Bagnato *et al.*, 2014; Quiroga *et al.*, 2004). La variabilidad espacial dentro de un lote agrícola es originada por factores pedogenéticos y antropogénicos (Corwin *et al.*, 2003). Estos factores ocasionan perturbaciones en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo que ocurren simultáneamente y con diferente intensidad (Moral *et al.*, 2010) resistiendo la productividad de los cultivos. La adopción de recientes tecnologías geospaciales, tales como sistemas de información geográfica (SIG), sistemas de posicionamiento global (GPS) y técnicas de sensoramiento remoto brindan la información necesaria para analizar la variabilidad espacial y temporal de parámetros topográficos, hidrológicos, climáticos y edáficos con el fin de implementar prácticas de manejo conservacionistas (Adamchuk *et al.*, 2004; Delgado & Berry, 2008). Múltiples métodos han sido usados para determinar la variabilidad espacial de propiedades del suelo (Shaner *et al.*, 2008). Algunos de los más utilizados son: [I] Interpolación de propiedades del suelo, a partir de muestreo por grilla a distancias homogéneas (Carroll & Oliver, 2005); [II] Determinación de zonas de muestreo, a partir de atributos auxiliares que reflejan diferencias en propiedades del suelo (Anderson-Cook *et al.*, 2002) y [III] Sensoramiento proximal y directo del suelo (Corwin *et al.*, 2003).

Un método que está recibiendo mucha atención es la medición georeferenciada de la CEa, a través de sensores de contacto (Johnson *et al.*, 2001). Este punto fue tratado con mayor detalle en el Capítulo 3. Numerosos trabajos han propuesto el uso de la CEa como método para estimar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo a escala de lote (Carroll & Oliver, 2005; McCutcheon *et al.*, 2006; Peralta *et al.*, 2013).

6.1. Valores medios de las propiedades de los suelos en las tres posiciones de la catena

Algunos parámetros dinámicos (CEa) y permanentes (topografía) han sido usadas ampliamente para caracterizar la variabilidad espacial de varias propiedades edáficas (Fraisie *et al.*, 2001; Corwin *et al.*, 2003; Peralta & Costa, 2013). Por lo tanto, el análisis conjunto de CEa y topografía, podría permitir, en un futuro, optimizar la escala a la cual se caracteriza un lote de esta región. El movimiento de las sales dentro del perfil del suelo y su acumulación en la superficie están asociados con la concentración salina de las aguas subterráneas o del nivel freático (de Oliveira, 1997) y es causada por difusión, convección o ambos procesos simultáneo sucesivamente (Lavado *et al.*, 1992). Este movimiento provoca gradientes espacio-temporales de salinidad y humedad edáficas, considerándose uno de los factores físicos más importantes en la zonación de la vegetación de los humedales salinos (Álvarez Rogel *et al.*, 2001). Dichos gradientes tienen un componente espacial, al existir zonas con mayor acumulación de sales o inundaciones más prolongadas, pero también temporales, al secarse el suelo y concentrarse las sales en los periodos secos, o diluirse estas en los meses lluviosos (Alvarez Rogel *et al.*, 2000). Esta estrecha relación entre características del suelo y vegetación ha llevado a proponer el uso de las plantas halófitas como indicadoras de las condiciones edáficas (Álvarez Rogel *et al.*, 2001).

Se encontraron diferencias significativas entre las secciones en todos los parámetros edáficos evaluados ($p < 0,05$) (Tabla 15). Los contenidos de a+l más bajos se observaron en la SM, al igual que el contenido de MOT, esto implicó un bajo IMO sumado a concentraciones salinas y pH elevados que generan un ambiente de alto riesgo productivo (condicionando la productividad). En tanto que, la SI fue la que presentó los mayores niveles de fósforo y MOT, aunque los niveles de producción presentaron un alto coeficiente de variabilidad asociado a los anegamientos temporarios y frecuentes que sufrió esta sección en los años de evaluación. En este tipo de catena la calidad del ambiente no solo está asociada con la clase textural y el espesor del perfil, denominado CRA (Quiroga, 2012) y la relación entre el contenido de materia orgánica y la textura, denominado IMO (Quiroga *et al.*, 2009) sino también, con el riesgo hídrico por exceso o defecto. Los mayores coeficientes de variación se observaron en la variable P en todos los ambientes evaluados.

Tabla 6. Contenido de arcilla + limo (a+l), materia orgánica (MO), Fósforo (P) y pH, Conductividad eléctrica (CE), Índice de materia orgánica/limo+arcilla (IMO), promedios, máximos y mínimos de los suelos superficiales en distintas posiciones de la sección (valores promedios de los puntos de muestreo en una grilla espacial). (L-sección superior), (ML-sección media) y (B-sección inferior).

Ambiente	Variable	n	Media	D.E.	CV
Sección superior	a+l (%)	206	29,35	3,23	11,02
	MOT (%)	206	1,45	0,32	22,26
	P (mg kg ⁻¹)	206	12,25	7,47	61,02
	pH	206	5,67	0,34	5,94
	CE (dS m ⁻¹)	206	0,44	0,17	37,77
	IMO	205	4,93	1,01	20,42
Sección media	a+l (%)	153	19,67	3,72	18,94
	MOT (%)	153	0,72	0,43	59,27
	P (mg kg ⁻¹)	153	18,11	11,31	62,44
	pH	153	6,87	0,8	11,66
	CE (dS m ⁻¹)	153	1,53	0,17	31,97
	IMO	153	3,78	2,24	59,35
Sección inferior	a+l(%)	178	41,84	12,3	29,4
	MOT (%)	178	1,41	0,61	43,61
	P (mg kg ⁻¹)	178	33,17	16,03	48,33
	pH	178	6,41	0,8	12,4
	CE (dS m ⁻¹)	178	0,69	0,23	33,32
	IMO	178	3,38	1,29	38,36

Las propiedades físico-químicas del suelo (textura, contenido de MOT, concentración de sales, pH del suelo, entre otras), presentan variabilidad espacial dentro del lote, las cuales pueden influenciar el crecimiento y desarrollo de los cultivos y; por ende, la distribución espacial del rendimiento en grano (Johnson *et al.*, 2001; Sudduth *et al.*, 2003; Corwin *et al.*, 2005). La variabilidad espacial de los suelos es causada por interacciones entre procesos físicos, químicos y biológicos que actúan simultáneamente con diferente intensidad (Mallarino & Vittry, 2004). Se considera que el manejo uniforme de los lotes no tiene en cuenta la variabilidad existente, en consecuencia, no es una estrategia de manejo eficiente (Moral *et al.*, 2010). Por ende, una comprensión de la distribución espacial de las propiedades físico-químicas del suelo es importante para aplicar manejo sitio-específico de los cultivos. El mismo es definido como una subdivisión de los lotes en áreas homogéneas para aplicar manejo diferencial en función del potencial del sitio (Bullock *et al.*, 2007).

La primera aproximación que se utilizó en este trabajo fue la caracterización de la catena en función de diferentes parámetros, morfológicos, físico, físico químicos y químicos para poder clasificar taxonómicamente los suelos, como así también, mineralógica y

micromorfológicamente para establecer las implicancias agronómicas sobre los cultivos. Al hacer un zoom en las diferentes secciones se pudieron identificar, categorizar y jerarquizar algunos parámetros (ejemplo altimetría, profundidad efectiva (80 y 100 cm), secuencia de horizontes, nivel de P) y diferenciar el área en zonas de manejo en sección superior (S), medio (M) e inferior (I). Una de las características en las secciones S y M es la profundidad al 2Btxk, propiedad que en condiciones de años con escasas precipitaciones impacta sobre la disponibilidad de agua a los cultivos por efecto de profundidad efectiva que limita la cantidad de agua, y en la influencia del sodio sobre la productividad de los cultivos. Si bien las precipitaciones medias en los años de evaluación han sido abundantes (en promedio entre los meses de octubre y febrero 500 mm), solo en la campaña 2012-2013 se presentó un periodo sin lluvias de unos 70 días entre enero y marzo, que provocó efectos negativos sobre los maíces de siembra tardía. En tanto que, la sección inferior presentó características redox que la definen como un ambiente con alto riesgo hídrico (Tabla 14). Observando una secuencia de imágenes de 1977 a la fecha, la misma presenta un riesgo de anegamiento en el 60% de los años analizados. Las probabilidades de lluvias anuales mayores a 900 mm o >350 mm acumulados entre los meses de diciembre-marzo afectarían negativamente a esta posición, asociado principalmente a la variación de la nivel freático dentro de los primeros 1,5m, provocarían anegamiento temporarios en la SI y salinización en la SM.

6.2. Rendimiento del cultivo de maíz

El rendimiento promedio del cultivo de maíz en las dos campañas evaluadas fue diferente en cada sección en la catena. Los mismos variaron entre 3520 y 7982 kg ha^{-1} en los ambientes y campañas evaluados en la sección media y superior, dado que en ambas campañas el cultivo en la sección inferior se perdió por inundación (ver imágenes y descripción del perfil). Como se puede observar en la Tabla 16 se registraron diferencias significativas entre secciones ($p < 0,0001$) para las campañas 2011-2012 y 2012-2013 respectivamente. Estas diferencias observadas en producción se asociaron a variables de suelo ya discutidas anteriormente, como por ejemplo el efecto de períodos de anoxia dado el espesor al 2Btxk, procesos redox y niveles de sales y sodio. Además, las diferencias dentro de la sección fueron menores que entre secciones en el rendimiento del cultivo ($p = 0,69$) para las dos campañas evaluadas. El agua disponible (ADS) a la siembra varió entre 116 y 334 mm entre ambientes y campañas evaluadas, registrándose diferencias

significativas entre las mismas. Como se puede observar, las mayores eficiencias se lograron en sección S en la campaña con mejores condiciones hídricas (Tabla 16), similares diferencias fueron observadas por Proot (2011), Corro Molas & Ghironi (2012), entre otros.

Tabla 7. Rendimiento promedio del cultivo de maíz, agua disponible (ADS) y eficiencia uso de agua (EUA) para las secciones de la catena en las campañas 2011-2012 y 2012-2013.

Ambiente	Campaña	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	ADS (mm)	EUA (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)
Sección superior	2012-2013	7983 a	295,4 a	14,1 a
	2011-2012	6798 a	116,1 c	9,2 b
Sección media	2012-2013	5639 ab	334,1 a	6,8 bc
	2011-2012	3521 b	137,3 b	5,6 c

Medias con una letra común en la misma columna no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Al comparar entre fechas de siembra y ambiente se observa diferencias significativas entre momentos de siembra tempranas y tardías dentro de cada ambiente ($p < 0,05$), con rendimientos entre 3241 y 8599 kg ha⁻¹ (Tabla 16). Los mayores rendimientos en la SS se registraron en las fechas de siembra tardía, mientras que en la SM los rendimientos fueron menores en promedio asociado posiblemente a la suma de anoxia por efecto napa dentro del metro del perfil, sequía temporal dado por el suelo somero y distribución de lluvia y/o salinización-sodificación. Corro Molas & Ghironi (2012), y Otegui (2002) atribuyen mayor disponibilidad hídrica para el cultivo en fechas de siembra tardía como la causa de mayores rendimientos en estas fechas de siembra, mientras que Satorre (2008) atribuye los mayores rendimientos a fechas de siembra temprana. Las mayores disponibilidades hídricas se registraron en fecha de siembra tardía (Tabla 16). El ADS varió entre 188 y 243 mm para los ambientes y fechas de siembra analizados, encontrándose diferencias significativas entre fecha de siembra ($p < 0,05$). En promedio el ambiente de la sección media presentó mayor disponibilidad hídrica asociada a la presencia del nivel freático cercano a la superficie en el mismo (1,6 m). La EUA varió entre 4,6 y 14,9 kg ha⁻¹ mm⁻¹ registrando diferencias significativas entre ambiente y fecha de siembra ($p < 0,05$). En promedio las EUA de fechas tardías fueron menores que en siembras tempranas (Tabla 17).

Tabla 8: Rendimiento promedio del cultivo de maíz, agua disponible a la siembra (ADS) y eficiencia de uso de agua (EUA) para fechas de siembra temprana y tardía en ambientes de sección superior y media.

Ambiente	Fecha de siembra	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	ADS (mm)	EUA (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)
Sección superior	Tardía	8599 a	224,1 a	8,39 b
	Temprana	6180 b	188,1 b	14,9 a
Sección media	Tardía	3241 c	243,1 a	4,68 c
	Temprana	5918 b	228,4 a	7,83 b

Letras diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas entre ambientes y fecha de siembra.

El comportamiento de las dos fechas de siembra difirió significativamente entre campañas, ya que en la del 2011-2012 el maíz tardío fue superior a la siembra temprana, aún sin registrarse diferencias en el contenido hídrico del suelo entre ambas fechas (Tabla 17). En cambio, para la campaña 2012-2013 se obtuvieron mejores rendimientos en el cultivo temprano, sin diferencias en la disponibilidad de agua a la siembra. Los rendimientos de maíz variaron entre 3800 y 8040 kg ha⁻¹ para fechas de siembra y campañas, registrándose diferencias significativas solo entre fechas de siembra dentro de la campaña ($p < 0,05$). Estos resultados indicaron que la distribución de lluvias estuvo contribuyendo a que los rendimientos entre campañas en los mismos ambientes se comporten diferentes, logrando las mayores productividades en siembras tardías en la campaña 2011-2012 y los menores en la misma fecha en la campaña 2012-2013. La variable ADS no fue un indicador que se correlacionó con rendimiento, por lo antes explicado, ya que los mayores valores de ADS se registraron en fechas de siembra tardías en la campaña 2012-2013.

La EUA varió entre 5,4 y 10,7 $\text{kg ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$, y estas diferencias estuvieron más relacionadas con la fecha de siembra que con la campaña (Tabla 18), ya que solo se registraron diferencias estadísticas significativas en la campaña 2011-2012 entre fechas de siembra tardías y tempranas ($p < 0,05$).

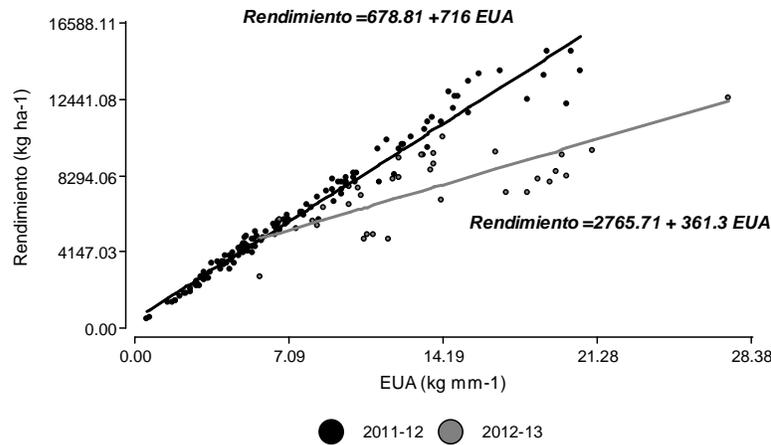
Tabla 9. Rendimiento promedio del cultivo de maíz, agua disponible a la siembra (ADS) y eficiencia de uso de agua (EUA) para fechas de siembra temprana y tardía en las campañas 2011-2012 y 2012-2013.

Campaña	Fecha de siembra	Rendimiento (kg ha^{-1})	ADS (mm)	EUA ($\text{kg ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$)
2011-2012	Tardía	8040 a	122,1 b	9,47 a
2012-2013	Temprana	7702 a	320,4 a	10,78 a
2011-2012	Temprana	4396 b	132,1 b	5,44 b
2012-2013	Tardía	3800 b	309,1 a	10,20 a

Medias con una letra común en la misma columna no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Si bien un 91% de la variabilidad en el rinde fue explicado por la EUA, se observó que en las distintas campañas las pendientes estimadas en el análisis de regresión (Figura 40) presentaron diferencias ($p < 0,0001$), lo que indicaría una relación distinta de acuerdo al año y las condiciones del mismo. Se observó que en la campaña 2012-2013 el rinde cambió menos por cada unidad que aumento la EUA que en el 2011-12.

La existencia de relaciones directas entre rendimiento y eficiencia de uso de agua han sido demostradas para cultivos de maíces irrigados (Howell *et al.*, 1998). El efecto de año sobre esta relación podría reflejar las diferencias en cuanto a la disponibilidad hídrica entre las dos campañas (Tabla 18). Estudios con trigo en Argentina han demostrado que en términos generales, la EUA aumenta en condiciones limitantes de agua (Abbate *et al.*, 2004), sin embargo, los datos obtenidos no indicarían esta tendencia, ya que los mayores valores de EUA correspondieron a los cultivos de la campaña 2012-13, con mayores contenidos hídricos en el suelo a la siembra.



Figuras 36. Relación entre rendimiento del cultivo y eficiencia de uso de agua (EUA) en los distintos ambientes.

El rendimiento del cultivo de maíz fue afectado por el ambiente siendo un 41 y 93% mayor en SS que en SM, en las campañas 2011-2012 y 2012-2013 respectivamente. La fecha de siembra tardía mejoró el rendimiento del cultivo en un 39% respecto de la temprana, mientras que en la SM fue un 54% menor en rendimiento que la fecha de siembra temprana. Se observó un importante efecto de año que estuvo explicado por las diferencias de disponibilidad hídrica en suelo a la siembra, diferencia que posiblemente enmascaró el efecto de la fecha de siembra. Se encontraron relaciones directas y lineales entre EUA y rendimiento del cultivo de maíz, con distintas pendientes para cada año, lo cual indicaría que el rendimiento y la EUA estarían influenciados de manera diferencial por la disponibilidad hídrica.

6.3. Recurrencia de inundaciones en la sección inferior

A través de los años, la zona ha recibido inundaciones periódicas, dadas principalmente por el volumen de precipitaciones y la concentración en determinados periodos de los años. En las fases más húmedas del ciclo pluviométrico, es frecuente que el nivel freático se encuentre a escasa profundidad de la superficie (menos de 2 m), lo cual determina una interacción entre el agua superficial y el agua subterránea (Jobbágy *et al.*, 2008; Aragón *et al.*, 2010). Es posible, en tales circunstancias, que el nivel freático entre en contacto directo con las raíces de la vegetación, razón por la cual el agua subterránea puede ser una fuente importante de agua o, por el contrario un factor de anegamiento, inundación y/o salinidad en los suelos (Nosetto *et al.* 2009; Florio *et al.*, 2014; Nosetto *et al.*, 2015).

El nivel freático es una variable de interés en cuencas rurales. La cercanía a la superficie

puede afectar el desarrollo de los cultivos (Nosseto *et al.*, 2009, Stone & Ekwue, 1993), y la salinidad del suelo (Northey *et al.*, 2005; Jobaggy & Jackson, 2004 y 2007). Algunos autores han estudiado, en la región pampeana, la influencia recíproca entre la vegetación y el nivel freático sobre los flujos de descarga y recarga del agua subterránea (Nosseto *et al.*, 2009; Nosseto *et al.*, 2015), siendo aún relevante su estudio para la comprensión de estas interacciones complejas. La variabilidad del nivel freático es un aspecto importante para el manejo de sistemas agrícolas (Viglizzo *et al.*, 2009), especialmente en Pampa Arenosa donde el balance precipitación-evapotranspiración está estrechamente relacionado con su fluctuación (Kruse *et al.*, 2001). En la sección inferior de la catena se siguió desde 2009 hasta el 2015 la evolución in situ del nivel freático, donde se registraron profundidades de 2,1 hasta 0,20 m (Figura 41). Esta presencia del nivel freático próximo a la superficie generaría suelos con características hidromórficas y halohidromórficas, con variable intensidad del proceso de acuerdo a la posición topográfica, características de los materiales del suelo, contenido de oxígeno disuelto en el agua freática, entre otros (Imbellone *et al.*, 2010). Según esta misma autora, en materiales arenosos el color es gris claro a blanco (Munsell: 5Y) con bajos contenidos de hierro y manganeso.

Como se observa en la Figura 41, en la región de estudio las precipitaciones de los últimos 30 años han oscilado entre los 380 y los 1545 mm con una media de 930 mm. En la misma Figura se presentan datos desde 1977 hasta el 2017 donde se observa que la zona sufre una frecuencia de anegamiento del 30% de los años evaluados, asociada a los volúmenes de precipitaciones elevados y al nivel freático cercano. Similares comportamientos del nivel freático y precipitaciones han sido estudiados por Nosseto *et al.* (2010) y Viglizzo (2012) en la zona de la pampa arenosa. Es importante destacar que la tendencia en la variación de precipitaciones y del nivel freático es un fenómeno de carácter cíclico generando impacto positivos entre el 1 y 2 m de profundidad para aportar al UC de los cultivos y/o generando un riesgo alto de anegamiento/inundaciones temporarias y salinización/alcalinización en función de la calidad de la misma o solo generando impacto negativos sobre la estructura del suelo con el huellado ocasionado en las cosecha de los cultivos por la falta de piso.

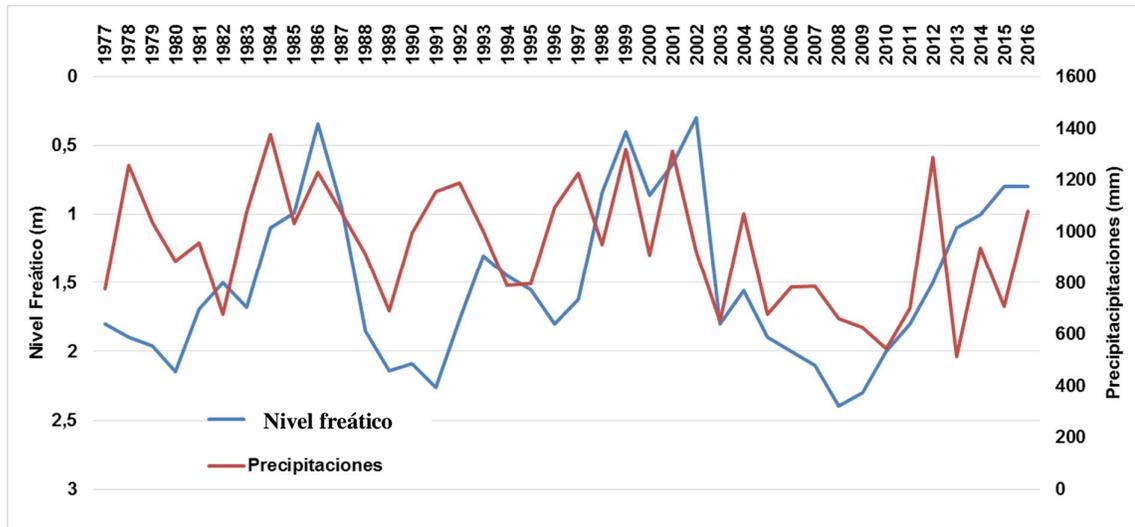
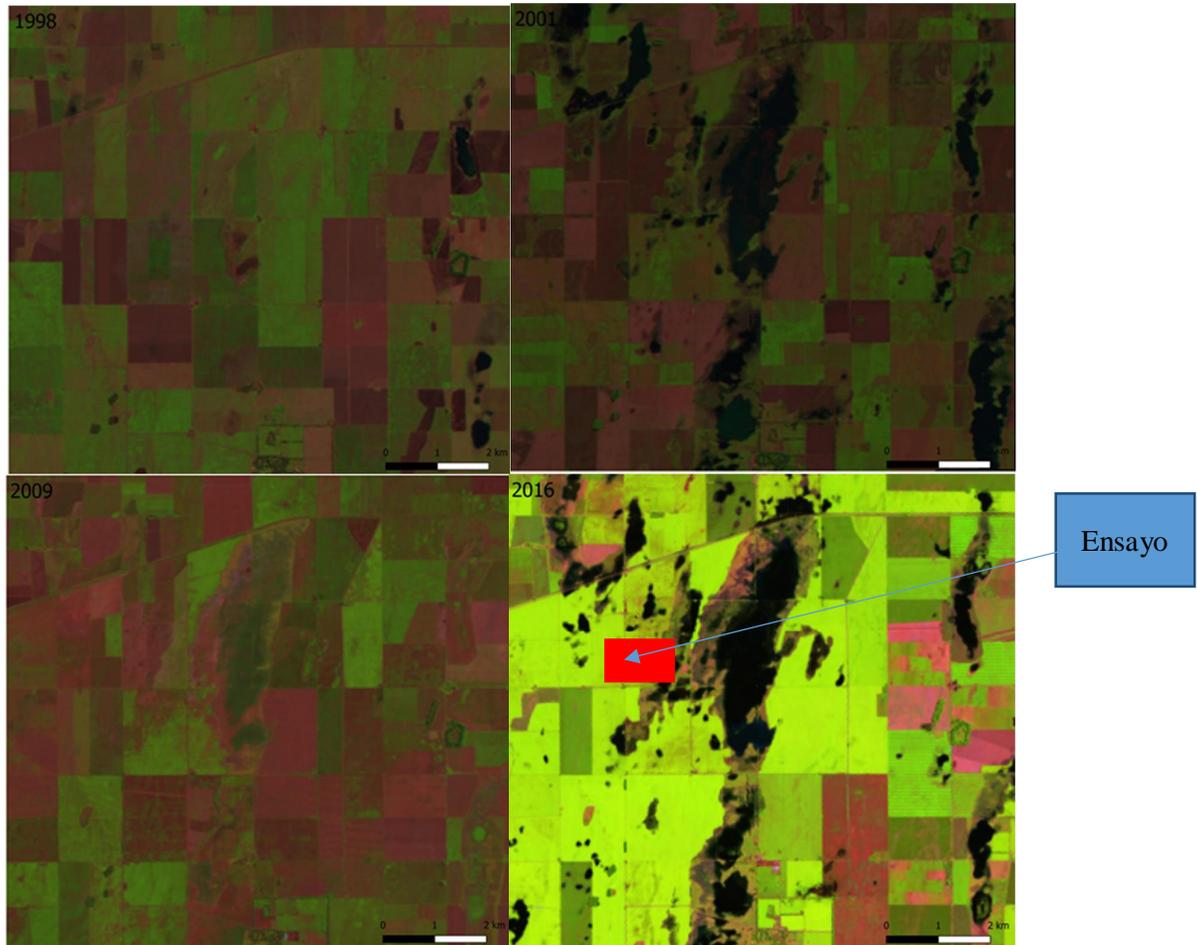


Figura 37. Evolución del nivel freático medida en pozos del APA desde 1977 hasta 2008, y desde 2009 a 2016 evaluada in situ.

Para describir la frecuencia de anegamientos entre 1984 y 2015 se utilizó imágenes del satélite Landsat (5 a 8). En esta secuencia de imágenes se puede apreciar que el 30% de los años evaluados presenta algún síntoma de anegamiento el ambiente de recuadro amarillo (Figura 42). El drenaje natural es un componente del régimen hídrico y una forma de caracterizar los suelos, sobre todo localmente, para usos agrícolas y separar suelos con ciertas limitaciones para los cultivos. Posee siete clases y principalmente tres de ellas (imperfectamente drenada, pobremente drenada y muy pobremente drenada), se aplican a suelos «húmedos», con algunas excepciones en las otras clases que son demasiado secas para incluir suelos hidromórficos (Soil Survey Staff, 1993). El drenaje se refiere a la rapidez y grado con que el agua se elimina del suelo, y a la frecuencia y duración de los períodos cuando el suelo no está saturado. Tiene dos componentes: a) uno interno propio del suelo, influenciado por la permeabilidad y relaciones con el nivel freático, y b) otro externo, dependiente de la configuración de la pendiente. En el presente estudio el horizonte presenta drenaje lento provocando encharcamiento prolongado por relieve y por proximidad del nivel freático (ver descripción de la sección inferior, Tabla 14, Figura 14). La susceptibilidad de un suelo a ser inundado limita fuertemente su aptitud de uso agrícola. No obstante, debe tenerse en cuenta el origen del agua inundante (*i.e.* superficial o freático), la periodicidad con que ocurre este fenómeno, así como, su duración (Taboada *et al.*, 2009).



Figuras 38. Secuencia de imágenes Landsat de años con exceso hídrico y secos con presencia de sal en superficie entre 1998 seco (S), 2001 inundado (I)-2009 (S) y 2016 (I). Imágenes Lansad (5 al 7).

En ambientes donde el monitoreo sistemático del nivel freático no se realiza rutinariamente, se utilizan los indicadores morfológicos como registros indirectos de su influencia (Imbellone *et al.*, 2010). Los colores de los rasgos redoximórficos correlacionados con los procesos redox en los suelos indican cuando los óxidos de hierro y manganeso son químicamente reducidos, oxidados y translocados. Así, los rasgos pedogenéticos más comunes utilizados para inferir condiciones de humedad son: 1) color de la matriz y motas de baja intensidad (chroma), 2) revestimientos de canales y agregados de color gris (albanes o esqueletanes álbicos), 3) nódulos o concentraciones de sesquióxidos (Figura 19), y 4) moteados de alta intensidad en el interior de los agregados. Colores grises, oliva o pálidos (intensidades iguales o menores a 2) indican humedad o saturación. El hierro ferroso es incoloro y los suelos con abundancia del mismo suelen poseer el color de los minerales primarios livianos. Colores rojizos indican en la mayoría de los casos que el hierro se encuentra en estado oxidado. En estas condiciones, cuando no hay limitaciones para que el

oxígeno se difunda en la masa del suelo desde la atmósfera, la matriz es roja (5YR o más roja), parda (10YR), y/ o pardo-rojiza (7,5YR) como los observados en este trabajo en todas las secciones a distintas profundidades e intensidades del proceso.

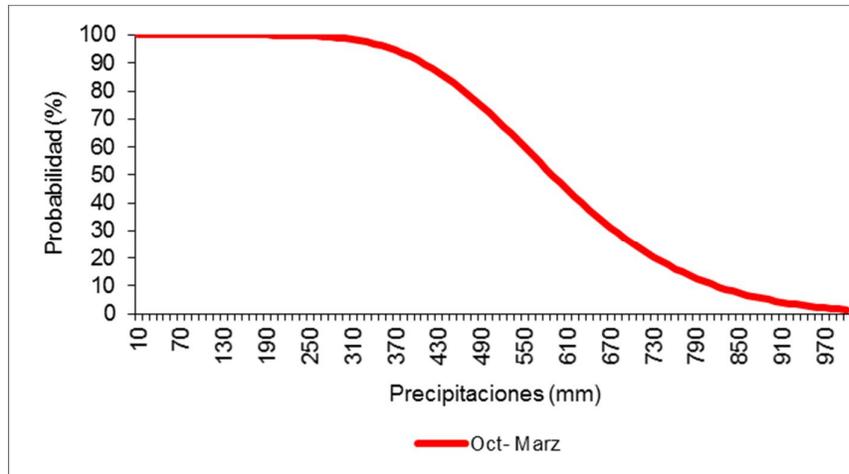


Figura 39. Probabilidad de precipitaciones en el periodo octubre marzo (históricos 1921 a 2015) para la zona de influencia de Gral. Pico.

La probabilidad de ocurrencia de lluvias para el periodo 1921 al 2015 para la zona de influencia de Gral. Pico presenta un promedio de 490 mm para el 80% de los años evaluados (octubre-marzo). Analizando las precipitaciones ocurridas entre octubre y marzo de cada año se pudo comprobar que precipitaciones mayores a 700 mm en este periodo o dos años consecutivos de 1000 mm provocarían anegamiento (Figura 43).

De acuerdo a la probabilidad ocurrencia de estos niveles de precipitaciones se estaría con riesgo hídrico el 30% de los años (Figura 44).



Figura 40. Variabilidad en la altura del cultivo de maíz y posterior anegamiento del ambiente bajo.

6.4. Relaciones entre las propiedades edáficas y la medición georeferenciada de la conductividad eléctrica aparente

La información obtenida de la sonda *Veris* presentó diferencias en la CEa observada en la catena (Figura 45). La intensidad de la Cea en la catena, permitió separar la misma en 3 niveles (representados por diferentes colores), que varían en espacio en función de la profundidad de observación considerada (0-30 o 0-90 cm). Estas diferencias entre secciones estuvieron explicadas en las observaciones de 0-30 cm de profundidad, por diferencias en altimetría, mostrando que la topografía juega un rol importante en la respuesta hidrológica, desde la captación de precipitaciones hasta la disponibilidad hídrica para producciones agrícolas (Verity & Anderson, 1990; Timlin *et al.*, 1998; Kravchenko & Bullock, 2000; Kitchen *et al.*, 2003). La conductividad eléctrica aparente varió entre secciones de la catena, de manera similar a lo encontrado por Peralta *et al.* (2013) en la región de Mar y Sierras de la Provincia de Buenos Aires. En diferentes zonas de la provincia de La Pampa es frecuente encontrar lotes con un manto calcáreo a profundidad variable que limita la capacidad de almacenaje de agua del suelo, la profundidad explorada por las raíces y termina afectando el rendimiento (Calviño & Sadras, 1999, Fontana *et al.*, 2006, Ross *et al.*, 2012, Leonardi, 2012, Méndez *et al.*, 2010). Esta relación entre el rendimiento y la profundidad del horizonte petrocalcico, justifica diferenciar distintas zonas de manejo de los lotes en función de dicha profundidad, fundamentalmente teniendo en cuenta que esta última suele presentar una variabilidad considerable en su distribución espacial (Peralta *et al.*, 2012). La variabilidad espacial de la profundidad de la calcreta suele relevarse mediante una grilla de puntos de muestreo, donde se mide la profundidad al horizonte petrocálcico mediante la introducción de una vara metálica hasta que esta se frene sobre la misma. Este método es lento y costoso sobre todo si los puntos deben ser tomados a intervalos lo suficientemente próximos para lograr un mayor detalle (Sessevalle, 2013). En contraposición, la medición de la CEa permite determinar la profundidad a la que se encuentran capas de distinta conductividad (Corwin & Lesch, 2010; Moral *et al.*, 2010). En la catena la sonda *Veris* permitió detectar en el perfil superior y intermedio zonas diferentes que corresponderían a la profundidad de las zonas compactadas (2Btxk) o/y salinidad (Btn), variables que pueden confundir la interpretación. En la zona roja (SS) la CEa es baja, indicando la ausencia de impedimentos físicos y químicos, en la zona amarilla (SM) la CEa es intermedia, indicando la presencia de un horizonte Btxk cercano y en la zona verde (SI) la CEa es la más alta indicando presencia de sales o carbonatos cementados. Cuando se comparan las imágenes de las dos profundidades de medición, se

aprecia la presencia de un impedimento que genera mayor CEa en gran parte de la SS a una profundidad de 90 cm (Figura 45). En algunos casos se ha correlacionado la profundidad horizonte petrocalcico con la CEa del rango de profundidad del suelo de 0 a 30 cm de profundidad (Domenech *et al.*, 2013). La presencia de impedimentos cercanos a la superficie en ambientes con petrocalcico como los citados por Peralta *et al.*, 2013 y Krüger (Comunicación personal) señalan un desenso de la CEa, mientras que en este estudio la diferenciación de las secciones, además de limitaciones por la presencia del fragipan tienen el efecto sales de sodio posiblemente interactuando sobre la CEa. Modificando así, la distribución de colores que se observan en la Figura 45. Observándose en la misma que el color amarillo se introduce en la SS.

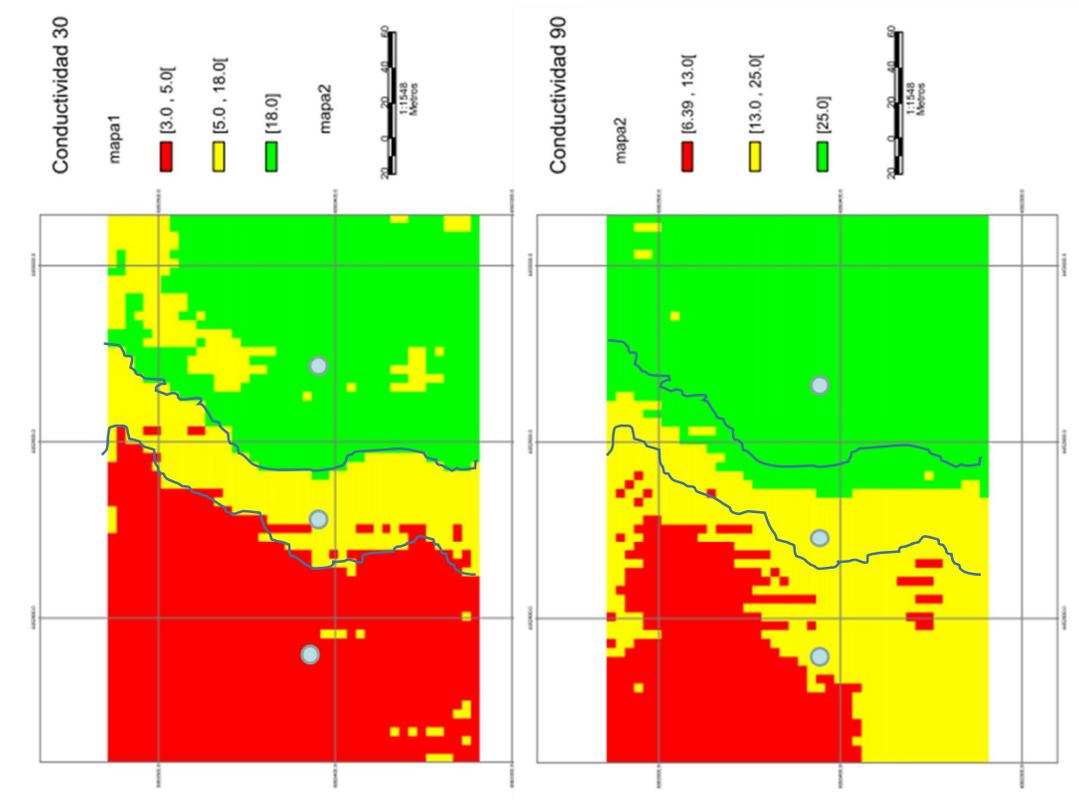


Figura 41. Diferenciación de ambientes en función de CEa en los espesores de 0-30 cm (a) y 0-90 cm (b) a través de la sonda Veris.

El análisis estadístico descriptivo se realizó para conocer la variación de la CEa, y su relación con algunas propiedades de suelo (Tabla 15). La CEa promedio para SS, SM y SI fue de 0,44, 1,53 y 0,69 (dS m^{-1}), respectivamente. Valores similares de CEa entre lotes es atribuible a que están compuestos por los mismos tipos de suelo (Shaner *et al.*, 2008). Peralta *et al.* (2013),

mencionó que diferencias en los valores promedios de la CEa, están asociados a diferentes tipos de suelo, principalmente por la diferencia en el tamaño de partículas del suelo. El CV para cada sección SS, SM, SI fue de 33,1; 37,7 y 33,53%, respectivamente. En términos generales, la información producida por la sonda *Veris* se relacionó con los datos de los suelos de la catena, lo cual confirmó la posibilidad de utilizarla para detectar la variabilidad del suelo, como ya ha sido estudiado en otros países (Corwin *et al.*, 2006; Moral *et al.*, 2010).

6.5. Variabilidad y distribución espacial de las propiedades del suelo

En la Tabla 19 se resumen los estadísticos descriptivos de las propiedades del suelo. Los coeficientes de variación para las distintas variables oscilaron entre 0,85 y 72%, siendo la variable altimetría la que presentó el menor valor y P el mayor valor. Las variables a+l, MOT, pH, CE y el IMO mostraron coeficiente próximos al 40% lo que indica una variabilidad de magnitud intermedia. La variable P no presentó una distribución normal por lo que se le aplicó la transformación logaritmo para su análisis.

Todas las variables presentaron variabilidad espacialmente estructurada y fue modelada mediante un modelo esférico (Figura 46). La magnitud de tal variabilidad fue muy fuerte para las variables altimetría, a+l, MOT mientras que el resto presentó variabilidad espacial pero de menor magnitud. En todos los casos el rango estimado estuvo entre los 70 y 100 m aproximadamente, excepto para P y CE que presentaron un rango menor, lo que indica que los contenidos son más variables a distancias menores. En el lote en estudio se observan (Figura 46) a modo descriptivo diferencias en cuanto a la altimetría, lo que podría definir tres zonas (SS, SM y SI). Tales diferencias en la altimetría están acompañadas por la distribución de las partículas más finas. Con respecto a los niveles de MOT, se observa que tanto en las zonas con mayor altimetría como en las zonas más bajas los contenidos de MOT son mayores. P y CE mostraron los valores más altos en la zona de menor altimetría, y las zonas con mayor valor de pH se corresponden con aquellas donde los niveles de MOT son menores. Estas relaciones concuerdan con los coeficientes de correlación presentados en la Tabla 20. Para la mayoría de las variables existió correlación lineal significativa por lo que es necesario el estudio en conjunto de las mismas.

Tabla 19. Medidas descriptivas de las propiedades del suelo. Numero de muestras (n), Desvio Estándar (D.E), Variación (Var), Coeficiente de variación (CV), Valor Mínimo (Mín) y Máximo (Máx).

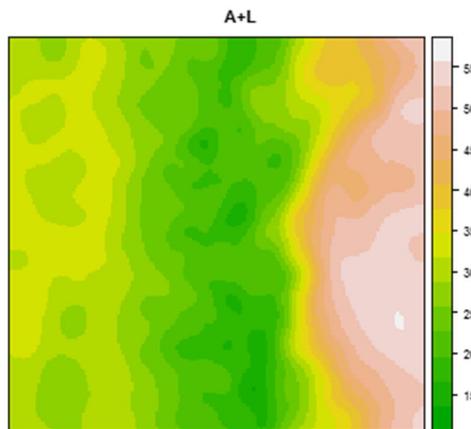
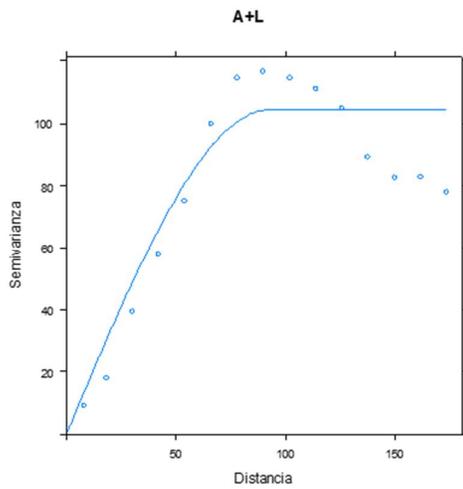
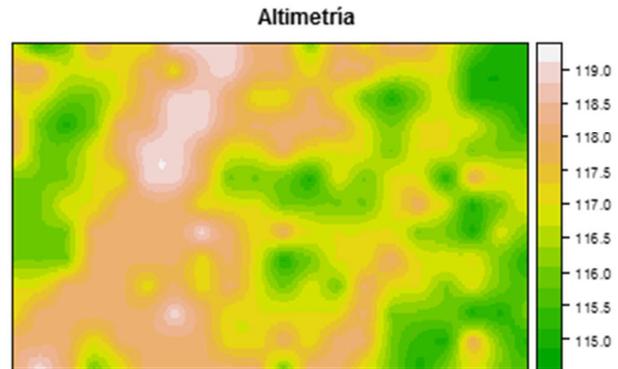
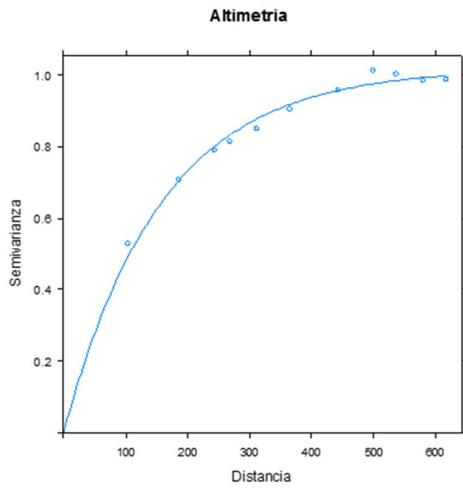
Variable	n	Media	D.E.	Var(n-1)	CV	Mín	Máx
Altimetría	1871	123,4	1,05	1,11	0,85	121,15	125,85
a+l (%)	537	30,7	11,6	134,5	37,74	9,3	60
MOT (%)	537	1,23	0,56	0,32	45,94	0,05	3,16
P (mg kg ⁻¹)	537	20,8	14,95	223,5	71,68	1,3	74
pH	537	6,26	0,83	0,68	13,22	4,4	8,2
CE (dS m ⁻¹)	537	0,55	0,22	0,05	39,68	0,19	1,62
IMO	536	4,09	1,68	2,84	41,24	0,26	12,18

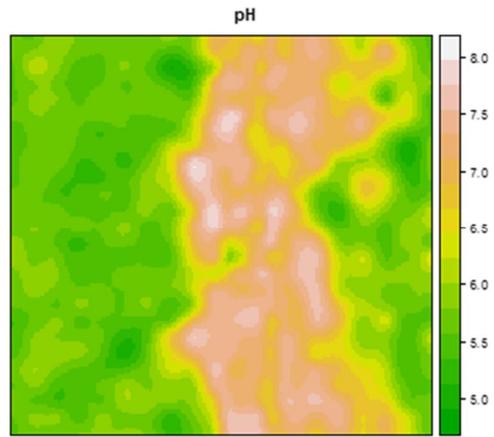
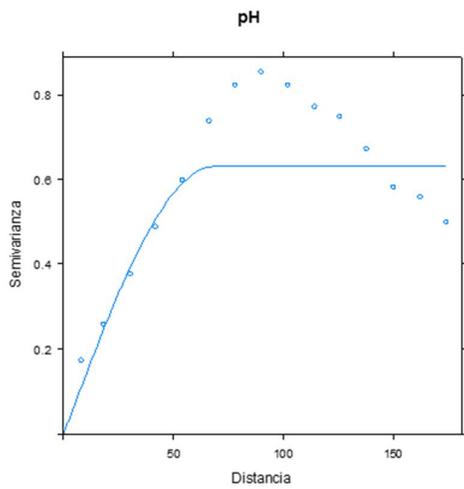
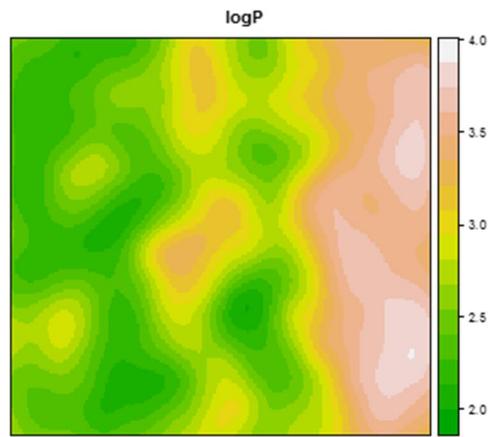
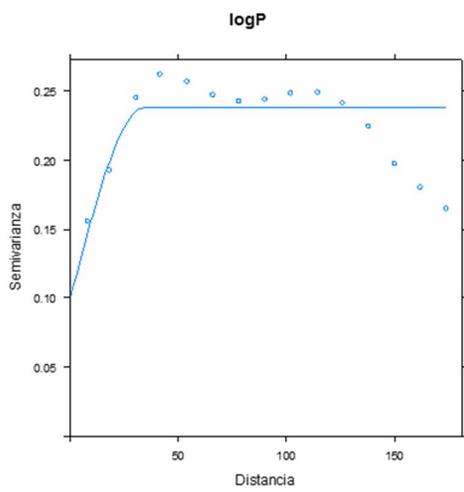
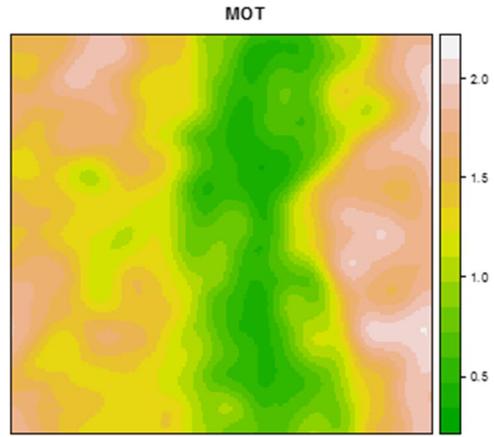
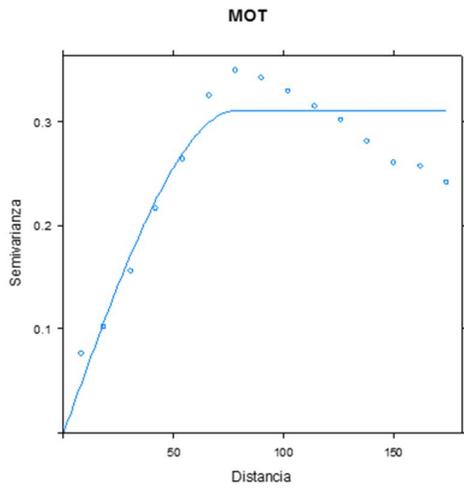
Tabla 20. Coeficiente de correlación lineal entre las variables. arcilla + limo (a+l), materia orgánica total (MOT), fósforo (P), pH, Conductividad eléctrica (CE), Índice de Materia orgánica (IMO).

Variables	a+l	MOT	P	pH	CE	IMO
a+l (%)	1					
MOT (%)	0,63	1				
P (mg kg ⁻¹)	0,60	0,33	1			
pH	-0,39	-0,64	-0,12	1		
CE (dS m ⁻¹)	0,39	0,25	0,52	-0,14	1	
IMO	-0,15	0,62	-0,09	-0,39	-0,02	1

Los indicado en negrita son significativamente distintos de cero ($p < 0,05$).

En la Figura 46 se puede observar la diferencia de altimetría relativa entre sección superior e inferior del orden de los 6 m en 150 m, por medio de interpolación o kriging se realizó el mapa de contorno para altimetría. En este mapa pueden identificarse colores diferentes donde cada uno representa las distintas posiciones del paisaje. El lote aumenta su altura hacia el centro del mismo en sentido oeste (W) a este (E) (colores rosas claro a verde) llegando a una altura máxima que varió de 120 a 126,1 ms sobre el nivel del mar (msnm). Los valores de MO fueron variables entre ambiente, con niveles entre los 0,5 y 2,5% en función de ambiente y sección.





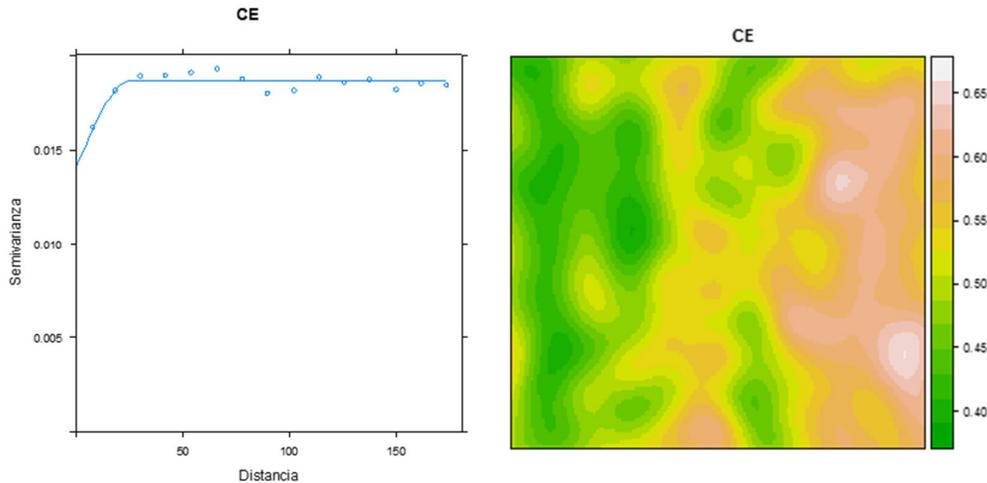


Figura 42. Semivariograma empírico (puntos) y ajustado (línea) y Mapas de la distribución espacial para la altimetría y todas las propiedades edáficas en estudio.

Los valores *nugget* de los semivariogramas indicaron las distancias a partir de las cuales los valores de las variables edáficas presentaron diferencias espaciales significativas, o a partir de las cuales los valores serían independientes. Para la proporción de las partículas finas (a+l) y la concentración de MOT esta distancia fue similar y se determinó en aprox. 80 m, mientras que para la concentración de fósforo disponible (P) y la CE la distancia fue menor (aprox. 40 m). El conocimiento del comportamiento espacial de las propiedades edáficas permite inferir sobre los procesos que han actuado para producir estos patrones de distribución. Se observa una marcada variabilidad espacial en la proporción de a+l entre secciones (Figura 46) donde la SM presenta textura más arenosa, indicando redistribución de partículas finas desde la misma hacia la SI, esto se correlaciona con un patrón similar en la distrución de MOT (Figura 46). En cambio, el P y las sales fueron afectados por procesos a una escala menor, tal vez más influenciados por la solubilización de estas sales y su redistribución de acuerdo a los flujos preferenciales del agua edáfica dentro de cada sección.

CAPÍTULO 7 INTEGRADOR

7.1. La variabilidad espacial de las propiedades físicas y su relación con la textura, mineralogía, relieve y los procesos pedogenéticos

La calidad de los suelos si bien está muy condicionada por las propiedades genéticas de los suelos, el uso del mismo tiene un fuerte impacto sobre ella. Debido a que no puede ser medida directamente debe ser inferida por mediciones de los atributos que sirven como indicadores. En la presente tesis, se utilizaron para caracterizar los suelos a nivel regional un transecta en sentido NO a SE de la provincia de La Pampa combinando los mismo con usos diferentes (bajo vegetación pristina, situación de referencia, con el fin de establecer los valores de línea de base a partir de los valores de las variables indicadoras halladas y suelos agrícolas). Todas las variables presentaron valores medios diferentes entre la situación pristina y uso agrícola. Principalmente las variables compuestas donde MOT/a, agregados >2mm/a y la IIE marcando diferencias importante entre sitios y usos. En tanto que haciendo un zoom por efecto de relieve, siendo este suavemente ondulado marcó diferencia en la altura que fue del orden de los 6m. Es importante destacar que si bien la catena presenta diferentes secciones (superior, media e inferior), asociadas a la misma se encontraron diferencias granulométricas entre las mismas, sin cambios significativos en la mineralogía. Los procesos pedogenéticos han diferenciado los perfiles de los suelos de la catena, y el material parental no fue el factor que ha incidido en los cambios morfológicos en el perfil, ya que no se encontraron diferencias en la mineralogía de arcillas y arenas. El desarrollo de horizontes pedológicos no fue influenciado por las precipitaciones, sino por el factor relieve-drenaje, evidenciado a través de rasgos pedogenéticos de óxido-reducción (presencia de moteados de Fe y Mn). Estos factores descriptos generaron en la catena cambios en el desarrollo de diferentes horizontes en las 3 secciones descriptas (SS, SM y SI), encontrando Haplustoles típicos thapto-frágico (HTTF) con una secuencia (Ap, A2, Bw, BC, 2Btk, 2Btxk) en SS, HTTF con una secuencia (Ap, Bw1, Bw2, 2Btx y 2Btxk) en SM, y un Natracuol típico con una secuencia (Ap, Btn1, Btn2 y Btn3) en SI. Estas características en el desarrollo de horizontes afectan la productividad de los cultivos a través de una menor disponibilidad de agua en SS y SM afectados por la CRA, condicionada por la profundidad de los Btx. Esta limitación se expresaría principalmente en años de escasas precipitaciones sobre el desarrollo y crecimiento de los cultivos. En tanto que, en la SM, por tener influencia del nivel freático cercano, se suma otro proceso que afecta el desarrollo vegetal que es la salinización en superficie o dentro de la zona de exploración radical. Esto último aumenta el potencial osmótico del agua edáfica de la sección media, incrementando su nivel energético lo que afecta el rendimiento de los cultivos. En SI la presencia del nivel freático cercano a la superficie genera anoxia temporaria en el perfil

(oxido-reducción), condicionando el crecimiento y desarrollo del cultivo, sumado al alto riesgo de anegamiento que presenta el mismo (3 de los últimos 5 años y 30% en los últimos 30 años) aumentando el riesgo hídrico en los últimos años posiblemente por el cambio en el uso de la tierra a nivel regional (Kuppel *et al.*, 2015; Nosetto *et al.*, 2015). Estos cambios en el uso de la tierra de pasturas perennes a cultivos anuales con periodos prolongados de barbecho, han modificado el régimen hídrico de esta catena aseverando la proximidad del nivel freático a la superficie provocando procesos de salinización y óxido-reducción en SM y SI. Observaciones realizadas a igual posición en el relieve en relictos de pasturas perennes permanente en ambientes aledaños no han mostrado estas evidencias. Las coberturas perennes en estos paisajes con consumos hídricos mayores a los 1000 mm anuales y cobertura permanente mitigan procesos intensos de halohidromorfismo.

7.2. El efecto del manejo del suelo sobre la calidad física y el contenido de materia orgánica

En las condiciones estudiadas los indicadores más sensibles y sencillos de medir para evaluar calidad de suelos están relacionados a la fertilidad química (MOT) y física (relaciones entre agregados y textura). Los indicadores de calidad pueden definirse como las características y procesos que tienen mayor sensibilidad a cambios en el funcionamiento del suelo y deben correlacionar con los procesos edafo-ecosistémicos (Andrews *et al.*, 2004). Paralelamente, en función de la escala de trabajo fue necesario estudiar los rangos de calidad de suelo usados para caracterizar la línea de base en función de manejo. Se encontraron indicadores sensibles al manejo (eg. MOT), cuyos valores de línea de base fueron tomados bajo situaciones prístinas de carácter regional. Segnestam (2002) señala la importancia de establecer la línea de base o de inicio de una actividad que puede impactar positiva o negativamente sobre el ambiente; y determinar umbrales para controlar o hacer el seguimiento de impactos negativos que no deben exceder un predeterminado nivel y además objetivos o metas que permitan evaluar el impacto de una respuesta. A fin de analizar con mayor detalle lo expuesto se presenta a continuación una síntesis de los principales resultados obtenidos.

La variación de los contenidos de MOT estuvo relacionada principalmente a la posición en la catena. Si bien los valores medios de este indicador en la SS y SI fueron similares, la variación espacial de este parámetro fue mayor en la SI posiblemente afectada por las variaciones de micro-relieve dentro de la misma, asociada a la influencia del nivel freático y/o anegamiento. En tanto que en la SM los niveles de MOT fueron menores, posiblemente

asociados a la concentración de sales que se registra tanto en esta grilla como en el perfil modal, generando un alto CV en este parámetro asociado a la variabilidad intrínseca de esta sección. Los valores de P variaron entre secciones, observándose las menores concentraciones en la SS, posiblemente asociado a una mayor extracción por parte de los cultivos en los últimos 20 años, ya que esta sección de la catena presentó las condiciones más favorables para el desarrollo de los cultivos.

Respecto a las concentraciones medias de CE estas fueron variables entre ambientes, con alta variabilidad dentro de cada sección. Esta magnitud en concentración diferencial entre ambientes, posiblemente esté muy asociada a la presencia del nivel freático cercano y principalmente a la diferencia del frente de ascenso de esta. El movimiento de las sales dentro del perfil del suelo y su acumulación en la superficie están asociados con la concentración salina de las aguas subterráneas o del nivel freático (CE: 2 dS m⁻¹ y pH: 8) (de Oliveira, 1997) y es causada por difusión, convección o ambos procesos simultánea- o sucesivamente (Lavado *et al.*, 1992). Este movimiento provoca gradientes espacio-temporales de salinidad y humedad edáficas, considerándose uno de los factores físicos más importantes en la zonación de la vegetación de los humedales salinos (Álvarez Rogel *et al.*, 2001). Dichos gradientes tienen un componente espacial, al existir zonas con mayor acumulación de sales o inundaciones más prolongadas, pero también temporales, al secarse el suelo y concentrarse las sales en los periodos secos, o diluirse estas en los meses lluviosos.

El indicador compuesto, IMO, tomó los valores más bajos en la SM y SI, posiblemente asociado a los procesos de óxido-reducción y salinización generados a través del nivel freático cercano. Ambos procesos condicionan el desarrollo y crecimiento de los cultivos a través de una reducción en el O₂ en el perfil y la capacidad de respirar las raíces en suelos saturados o semi-saturados y/o por incremento en el potencial osmótico dado el ascenso de sales a la superficie a través de la evaporación directa por menor contenido de rastrojo asociado a los escasos o nulos rendimientos observados durante el estudio.

7.3. Relaciones entre indicadores de calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos

El diagnóstico con fines agronómicos de la capacidad productiva de un suelo permite identificar y evaluar la intensidad de las limitantes del suelo para el crecimiento de cultivos (Rubio & Taboada, 2012). La jerarquización de estas limitantes en orden de importancia constituye la base para diseñar prácticas agronómicas tendientes a la resolución de las

limitantes halladas y para clasificar los suelos según su aptitud productiva. El diagnóstico se basa en la identificación de rasgos morfológicos del perfil del suelo y de características del paisaje que pueden afectar el crecimiento de los cultivos (Etchevehere, 1976). Los indicadores simples como la textura, el tipo de estructura y la profundidad de enraizamiento se encuentran asociados con el rendimiento de los cultivos agrícolas (Mueller *et al.*, 2012). Esta información debe ser complementada con características del clima (*i.e.* régimen de lluvias y temperatura). Los cambios en el régimen hídrico por exceso o déficit han provocado cambios significativos en los rendimientos del cultivo de maíz, variando entre campaña y fecha de siembra en cada sección del perfil. La disponibilidad hídrica asociada a las posiciones en la catena fue mayor en la SI. Sin embargo, en las 2 campañas evaluadas, los excesos hídricos por lluvias abundantes e intensas y el nivel freático cercano a la superficie provocaron anegamiento con pérdida de los cultivos ubicados en SI, y condicionando su desarrollo en la SM principalmente por efecto salino en la superficie. En cambio, en la SS, la disponibilidad hídrica fue menor pero sin saturación, evidenciado en los rindes obtenidos. Sin embargo, los cultivos en esta sección dependen en mayor medida de las lluvias durante el ciclo de crecimiento para lograr producciones aceptables, cuestiones posibles de modificar a través de las prácticas de manejo (eg. fecha de siembra). En síntesis, la productividad del cultivo de maíz fue determinada por el ambiente, reflejándose en indicadores del estado físico-hídrico del suelo, como es EUA, observando los mayores valores en la SS en todas las campañas evaluadas y en fechas de siembras tempranas.

De acuerdo a lo planteado es posible reconocer que en SS, donde la producción del cultivo es posible la mayoría de los años a mayor producción la disponibilidad de nutrientes, sobre todo de P disminuye. Este proceso puede ser relativamente rápido, condicionado por el nivel de extracción de parte de los cultivos y otros procesos de pérdida asociados al uso agrícola, como la erosión eólica e hídrica. En cambio, el proceso de melanización es lento para cuantificar ganancias o pérdidas, por lo cual las diferencias de contenido de MOT entre los perfiles de la catena indicarían que el efecto del uso del suelo ha persistido durante suficiente tiempo para que se manifieste en diferencias de melanización. Por otra parte, hay procesos muy dinámicos (eg. salinización) que dependen de las lluvias al igual que la melanización, pero también de la cercanías del nivel freático a la superficie. Es importante destacar que el impacto del uso de suelo, por ejemplo, una cobertura perenne versus cultivos anuales, generarían un régimen hídrico distinto en el paisaje, afectando los procesos dinámicos y rápidos (eg. salinización y oxido-reducción). Esta variabilidad

espacial en los procesos pedogenéticos en función de las diferencias del régimen hídrico causado por el tipo de vegetación y uso del suelo resulta en la diferenciación de perfiles de suelo en el paisaje determinados por el efecto antrópico. Este mismo fenómeno ha sido conceptualizado recientemente como *fenofomas*, diferencias en el perfil y las propiedades de los suelos en un mismo paisaje y dentro de una misma unidad geomorfológica, daría origen a lo que se denominaría *genoforma* (Rossiter & Bouma, 2018). Este nuevo concepto avanzó sobre lo que Phillips (2017) planteó respecto de la diversidad de los suelos en un mismo ambiente y los procesos pedogenéticos involucrados que producen e intensifican la divergencia de los perfiles de suelos.

CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES

8.1. La variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo está condicionada por la textura y la mineralogía del suelo, y asociadas a la variabilidad climática zonal

Las condiciones climáticas impactan en la variabilidad de propiedades de calidad de suelo y son fuertemente condicionadas en magnitud por la granulometría de los suelos. Esto es importante de aclarar ya que la mayoría de los trabajos son a una escala regional, sin embargo, en escalas menores con similares condiciones climáticas y texturales, estas propiedades son afectadas por la posición en el relieve. Es importante destacar que este factor formador modificó características morfopedogenéticas (eg. secuencia de horizontes entre secciones) y rasgos pedológicos asociados a procesos de rápida transformación como lo son la oxidación y la salinización. Esta evolución divergente estaría asociado al uso del suelo (transición de cobertura perenne a cultivos anuales), dado que en relictos bajo cobertura original en igual posición no presentan la misma intensidad en rasgos pedológicos (moteados, concreciones, etc).

8.2. Las propiedades físicas/químicas del suelo varían de acuerdo al efecto del relieve debido a los diferentes procesos pedogenéticos que han actuado

Las propiedades físico químicas de los suelos han variado en la catena (posición en el relieve) en magnitud y espacialmente, dado por los microrelieves generados dentro de cada sección de la catena. Las propiedades que presentaron mayores variaciones entre secciones fueron MOT, P y CE, principalmente asociadas al efecto de los cultivos por aportes (MOT) y consumo (P); y CE en las diferentes secciones generadas por proximidad del nivel freático a través del aporte que la misma hace por procesos convectivos.

8.3. Las prácticas de manejo teniendo en cuenta las características morfopedogenéticas contribuyen a mejorar la productividad de los suelos

Algunas prácticas de manejo como la fecha de siembra impactan positiva o negativamente dependiendo de la sección dentro de la catena. A través de los resultados de rendimiento que la SS y SM fueron afectadas por esta práctica en las campañas de evaluación. Mejorando la respuesta del cultivo en la SS al adelantar la fecha de siembra y atrasando la fecha de siembra en la SM. Ambos manejos no fueron efectivos para la SI, dado que algunos procesos evidenciados a través de la presencia de moteados podrían afectar la factibilidad que tiene el

cultivo en sucesivas campañas (riesgo hídrico en los últimos 5 años mayores al 60%).

8.4. Existe una relación directa entre el nivel de las variables indicadoras de fertilidad física/química y el rendimiento de los cultivos

No existe una relación directa entre las variables indicadoras utilizadas y el rendimiento de los cultivos. Esto remarca la importancia de conocer las secciones de una transecta y los procesos morfopedogenéticos de la misma. Es importante destacar que por su contenido de agua disponible la SI tendría que ser la posición de la catena con mayor producción, sin embargo, es la de menor producción asociada al riesgo hídrico dado por la cercanía del nivel freático y los volúmenes e intensidad de precipitaciones registrados en los años bajo estudio. Tanto la SS y SM presentaron un horizonte en 2Btxk que limita el desarrollo vegetal, pero se desconoce su origen ya que correspondería a la presencia de un material loésico con un horizonte fragipan subyaciendo a un material eólico.

Por lo expuesto puede inferirse sobre la necesidad de considerar, en futuros estudios, cierto orden jerárquico entre los factores que inciden sobre la productividad de los cultivos y propiedades de Molisoles de las regiones semiárida y subhúmeda pampeana.

Resultaría conveniente realizar estudios sobre nutrición de los cultivos o evaluar los efectos del manejo (Ejemplo: sistemas de labranza, rotaciones) considerando el régimen hídrico de los suelos. El mismo no sólo varía en la región a través del gradiente de precipitaciones (Este-Oeste), sino que es además fuertemente condicionado por el espesor (hasta capas limitantes como calcretas, fragipanes y/o horizontes salinizados) y la composición granulométrica de los suelos, pudiendo variar significativamente entre lotes de un mismo productor. Además estudios morfológicos, mineralógicos y micromorfológicos de los distintos perfiles de la catena permiten determinar la jerarquía de los procesos pedogenéticos, poniendo de manifiesto al factor dominante de los procesos pedogenéticos. Los distintos grados de evolución de los perfiles estudiados se manifiestan en los diferentes efectos sobre la productividad y los parámetros edáficos asociados además a la variabilidad de la profundidad del nivel freático y su aporte de sales. Estudios de esta naturaleza resultarían básicos para el desarrollo de una agricultura de precisión y el manejo sustentable de los recursos naturales de la región.

BIBLIOGRAFIA

- Abbate, PE; JL Dardanelli; MG Cantarero; M Maturano; RJM Melchiori; EE Suero. 2004. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. *Crop Sci.* 483: 4746483.
- Adamchuk, VI; JW Hummel; MT Morgan; SK Upadhyaya. 2004. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 44(1): 71-91.
- Allmaras, RR; HH Schomberg; CL Douglas; TH Dao. 2000. Soil organic carbon sequestration potential of adopting conservation tillage in US croplands. *Journal of Soil and Water Conservation*, 55(3), 365-373.
- Álvarez Rogel J. 1999. Relaciones suelo-vegetación en saladares del SE de España. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. Servicio de Publicaciones Universidad de Murcia. Publicación en CD.España.
- Álvarez Rogel J, F Alcaraz Ariza; R Ortiz Silla. 2000. Edaphic gradients and plant zonation in mediterranean salt-marshes of SE Spain. *Wetlands* 20:357-372.
- Álvarez, C; A Becker; M Grumelli; H Shiavo; R Bagnato; A Quiroga; E Noellemeyer. 2015. Estudio morfopedológico de una catena representativa del noroeste de la provincia de la pampa. II Jornadas Nacionales de Suelos de Ambientes Semiáridos. CD 6pp.
- Álvarez, R & CR Álvarez. 2000. Soil Organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 184-189.
- Álvarez, R. 2004. Análisis del impacto de la fertilidad del suelo y el manejo sobre los rendimientos de trigo y maíz en la pampa ondulada. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Simposio Nacional de Suelos Vertisólicos. CD 10 pp.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2003. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12.400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m m³). ASTM D 698. West Conshohocken. Pa.
- Amiotti, N.; M Blanco; L Sanchez. 2001. Complex pedogenesis related to differential aeolian sedimentation in microenvironments of the southern part of the semiarid region of Argentina. *Catena* 43(2): 137-156.
- Anderson-Cook, CM; MM Alley; JKF Roygard; R Khosla; RB Noble; JA Doolittle. 2002. Differentiating Soil Types Using Electromagnetic Conductivity and Crop Yield Maps. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66(5): 1562-1570.
- Andrade, F; A Cirilo; S Uhart; M Otegui. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Editorial Médica Panamericana. Introducción, pág.2. Requerimientos hídricos. Pág.133. Nutrición mineral. Pág. 147. Fecha de siembra. Pág.193-204. Densidad de plantas. Pág. 233-247.

- Andrade, FH. 2016. Los desafíos de la agricultura. International Plant Nutrition Institute (IPNI), Acassuso.
- Andrews, S; D Karlen & C Cambardella. 2004. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. Soil Sci. Soc. Am. J. 68: 1945-1962.
- Andriani, JM; FH Andrade; EE Suero; JL Dardanelli. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans 1: their effects on dry matter accumulation, seed yield and yield components. Agronomie 11: 737-746.
- Aparicio, V & JL Costa. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. Soil Till. Res.96: 155-165.
- Aragón, RM; EG Jobbágy & EF Viglizzo. 2010. Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). Ecohydrology 4: 433-447.
- Bagnato R, C Álvarez, E Noellemeyer, A Gili; A Becker y A Quiroga. 2014. Efecto del ambiente sobre la productividad del cultivo de maíz en la región semiárida pampeana. Congreso Nacional de suelo. Bahía Blanca. CD
- Baker, JM; TE Ochsner; RT Venterea; TJ Griffis. 2006. Tillage and soil carbon sequestration -What do we really know? Agric. Ecosyst. Environ. 118, 1-5.
- Ball, B; D Campbell & E Hunter. 2000. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. Soil Till. Res. 57:83-91.
- Ballantine, JAC; GS Okin; DE Prentiss; DA Roberts. 2005. Mapping North African landforms using continental scale unmixing of MODIS imagery. Remote Sensing of Environment 97: 470-483.
- Barraco, M. 2011. Productividad de soja [*glycine max (l.) merrill*] según propiedades edáficas de hapludoles de la región de la pampa arenosa. Tesis Maestría. Pág. 199.
- Barshad, I. 1955. Soil development. Chemistry of the Soil. Bear, F. E., Ed. Reinhold Publishing Corporation, New York, 373 pp. pp. 1-52.
- Bauer, A. 1972. Effect of water supply and seasonal distribution on spring wheat yields. North Dakota Agric. Exp. Stn. Bull. 490 pp.
- Bayer, C; J Diekow; TJC Amado; FLF Eltz; FCB Vieira. 2009. Cover Crop Effects Increasing carbon storage in a subtropical no-till sandy Acrisol. Commun. Soil Sci. Plant 40,1499-1511.
- Becker, A. 1987. Génesis de las Series tentativa Spernanzoni y Rodeo Viejo Dpto. Río Cuarto. Provincia de Córdoba. Tesis de Grado. UNRC. 100pp.
- Becker, A. 2006. Evaluación del proceso de Degradación de Suelos por erosión Hídrica en

- una subcuenca representativa del Suroeste de la Provincia de Córdoba, Argentina. Tesis Doctoral. UNRC. 800 páginas.
- Bekele, A; WH Hudnall; JJ Daigle; JA Prudente; M Wolcott. 2005. Scale dependent variability of soil electrical conductivity by indirect measures of soil properties. *Journal of Terramechanics* 42(364): 339-351.
- Bengough, AG; BM McKenzie; PD Hallett; TA Valentine. 2011. Root elongation water stress and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Botany*. 62:59-68.
- Bengough, AG; MF Bransby; J Hans; SJ McKenna; TJ Roberts & TA Valentine. 2006. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *J. Exp. Botany* 57:4376447.
- Benjamin, JG; DC Nielsen; MF Vigil. 2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma* 116: 137-148.
- Berhongaray, G; R Álvarez; J De Paepe; C Caride & R Cantet. 2013. Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. *Geoderma* 192:97-110.
- Besoain, E. 1985. Mineralogía de Arcillas. IICA, serie de libros y materiales educativos No. 60, San José, Costa Rica, 1205 pp.
- Blake, GR & KH Hartge. 1986. Bulk density. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Agronomy Monograph N° 9. Second edition.* 363-376 pp.
- Blum, W & AA Santelises. 1994. A concept of sustainability and resilience based on soil functions. En: Greenland D J, Szboles I (Ed). *Soil Resilience and Sustainable Land use* CAB Int., Wallingford, oxon, UK. 535-542 pp.
- Bongiovanni, MD & JC Lobartini. 2006. Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro-and microaggregates as affected by cultivation. *Geoderma*: 136, 660-665.
- Bouajila, A & T Gallali. 2010. Land use effect on soil and particulate organic carbon, and aggregate stability in some soils in Tunisia. *Afr. J. Agric. Res.* 5(8): 764-774.
- Boulangier, JP J Leloup; O Penalba; M Rusticucci; F Lafon; W Vargas. 2005. Observed precipitation in the Paraná-Plata hydrological basin: Long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections. *Climate Dynamics*, 24:393-413.
- Bouza, P; M Rostagno; C Saín; E Cortés. 2014. Propiedades físico-químicas y mineralógicas en una toposecuencia de ardisoles nordpatagónicos. XXIV Congreso Argentino Ciencia del Suelo. CD 6 pp.
- Bradford, JM. 1986. Penetrability. En: A. Klute (Ed.). *Methods of Analysis. Part 1. Agron.*

- Monog. 9 Am. Soc. Agron. Madison. Wisconsin. EEUU. 463-478 pp.
- Bravo, O. 2013. Factores y procesos pedogenéticos que regulan el almacenamiento de carbono orgánico en suelos de la pampa austral. Tesis Doctoral. Bahía Blanca (UNS). Pág. 164.
- Broquen P; F Candan; JC Lobartini; JL Girardin. 2004. Relaciones entre el carbono orgánico y propiedades edáficas y del sitio en suelos derivados de cenizas volcánicas, sudoeste de Neuquén (Argentina). *Ciencia del Suelo* 22: 73-82.
- Bullock, DS & DG Bullock. 2000. Economic optimality of input application rates in precision farming. *Precis. Agric.* 2:71-101.
- Bullock, DS; N Kitchen; DG Bullock. 2007. Multidisciplinary Teams: A Necessity for Research in Precision Agriculture Systems *Crop Sci.* 47: 1765-1769.
- Burgos, JJ. 1947. A cryokindynoscopic index useful in agroclimatic researches. *Climatological Commission Doc. 17 y Agr. Met. Commission Doc. 30.* I.M.O. Toronto
- Burgos, JJ. 1963. Las Heladas en Argentina. INTA Colección Científica, Buenos Aires, vol3, 388pág.
- Buschiazzo, DE & V Taylor. 1992-1993. Efectos de la erosión eólica sobre algunas propiedades de suelo de la Región Pampeana Central. *Ci. Suelo* 10 -11: 45-53.
- Calviño, PA & VO Sadras. 1999. Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall. Soil depth and crop management. *Field Crops Research* 63: 237-246.
- Cambardella, C & T Elliot. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.
- Cambardella, CA; TB Moorman; JM Novak; TB Parkin; DL Karlen; RF Turco; AE Konopla. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58(5): 1501-1511.
- Camilión, MC & PA Imbellone. 1984. Caracterización de los materiales constituyentes de algunos suelos del Partido de Carlos Tejedor. Provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo* 2, 137-148.
- Campbell C; B McConkey; R Zentner; F Selles; D Curin. 1996. Long-term effects of tillage and crop rotations on soil organic C and total N in a clay soil in southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 76: 395-401.
- Cantú, M.P.; A. Becker; J.C. Bedano. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *CI. Suelo (Argentina)*, 5 (2):173-178.
- Cantú, MP; AR Becker; JC Bedano. 2008. Evaluación de la sustentabilidad ambiental en

- sistemas agropecuarios: desarrollo de la aplicación de la metodología del proyecto REDESAR (PIC-TR439/03). Fundación UNRC. 184 páginas.
- Cantú, MP; AR Becker; JC Bedano; HF Schiavo. 2001. Indicadores e Índices de degradación de suelos en la región centraltemplada húmeda a subhúmeda de la República Argentina. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. CD. Trabajo VII-15, 4 pp.
- Cárcova, J; G Maddonni; C Ghersa. 2000. Long-term cropping effects on maize: crop evapotranspiration and grain yield. *Agronomyjournal* 92: 1656-1665.
- Caride, C; G Piñeiro; J Paruelo. 2012. How does agricultural management modify ecosystem services in the Argentine Pampas? The effects on soil C dynamics. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 154, 23-33.
- Carroll, ZL; MA Oliver. 2005. Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity. *Geoderma* 128(364): 354-374.
- Casagrande, G; G Vergara; Y Bellini. 2006. Cartas agroclimáticas actuales de temperaturas, heladas y lluvia de La provincia de La Pampa (Argentina). *Rev. Fac- Agronomía- UNLPam* Vol. 17 N° ½. 15-22 pp.
- Casanovas, E; H Echeverría; G Studdert. 1995. Materia orgánica del suelo bajo rotaciones de cultivos. Contenido total y de distintas fracciones. *Ciencia del Suelo* 13(1):16-20.
- Cassman, KG. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc. Natl. Academy of Science* 96:5952-9.
- Ceddia, M; SR Vieira; LS Mota; LH Anjos; DF Carvalho. 2009. Topography and spatial variability of soil physical properties. *Sci. Agr.* 66(3): 338-352.
- Changere, A & R. Lal. 1997. Slope position and erosional effect on soil properties and corn production on a Miamian soil in central Ohio. *J. Sustainable Agric.* 11: 5-21.
- Chayes, F. 1965. On correlation between variables of constant sum. *J. Geophys. Res.* 65, 4185-4193.
- Córdoba, MA. 2014. Herramientas estadísticas para el monitoreo y uso de la variabilidad espacial del rendimiento y propiedades de suelo intralote. Tesis Doctorado, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. 201 pp.
- Corwin, DL & SM Lesch. 2005. Apparent electrical conductivity measurement in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 46:11-43.
- Corwin, DL & SM Lesch. 2010. Delineating site-specific management units with proximal sensors. In: M. Oliver, editor, *Geostatistical applications in precision agriculture*.

- Springer, New York. 1396-165.
- Corwin, DL. 2008. Past, present and future trends of soil electrical conductivity measurement using geophysical methods. En: Allred, BJ, Daniels, JJ, Ehsani, M.R. (Eds.), Handbook of Agricultural Geophysics. CRC Press, London. 3616.
- Corwin, DL; SM Lesch; JD Oster; SR Kaffka. 2006. Monitoring management -induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma* 131: 369-387.
- Corwin, DL; SM Lesch; PJ Shouse; R Soppe; JE Ayars. 2003. Identifying Soil Properties that Influence Cotton Yield Using Soil Sampling Directed by Apparent Soil Electrical Conductivity. *Agron. J.* 95(2):352-364.
- Costa, A; JA Albuquerque; AL Mafra; F Rodrigues Da Silva. 2009. Propiedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração agricultura-pecuária. *Rev. Bras. Ci. Solo* 33:235-244.
- Covas, G & A Glave. 1988. Provincia de La Pampa. En: *El Deterioro del Ambiente en la Argentina* (Suelo, Agua, Vegetación, Fauna). Buenos Aires, Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura (FECIC). 109-114.
- Cox, MS; PD Gerard; MC Wardlaw MJ Abshire. 2003. Variability of selected soil properties and their relationships with soybean yield. *Soil. Sci. Soc. J.* 67:1296-1302.
- Damiano, F & R Moschini. 2011. Intervalo hídrico óptimo en suelos argiudoles plantados con eucalyptus dunnii Maiden. *Ciencia del suelo* 29:1-11.
- Dardanelli, J; D Collino; ME Otegui; V Sadras. 2003. En Producción de granos: Bases funcionales para su manejo. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. Ed. FAUBA. 380-381; 405-406.
- Dardanelli, JL; EE Suero; FH Andrade; JM Andriani. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybean. II. Water use and water deficiency indicators. *Agronomie* 11:747-756.
- Day, PR. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. pp. 545-556. En: *Method of Soil Analysis. Parte 1.* C. A. Black (Ed.). American Society of Agronomy. Madison. Wisconsin.
- De Benedetto, D; A Castrignano; D Sollitto; F Modugno; G Buttafuoco; GL Papa. 2012. Integrating geophysical and geostatistical techniques to map the spatial variation of clay. *Geoderma* 171-172(0): 53-63.
- De Boodt, M. & L De Leenheer. 1967. West European methods for soil structure determinations. *The St. Faculty Agric. Sci.* 7. Ghent, 60-62.

- de Oliveira M. 1997. Gênese, classificação e extensão de solos afetados por sais. En: Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada. Ed. H.R. Gheyi, J.E. Queiroz e J.F. de Medeiros. Publicación del XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campina Grande, Brasil. 383 p.
- Delgado, JA & JK Berry. 2008. Advances in Precision Conservation. In Advances in Agronomy, Vol. Volume 98, (Ed L.S. Donald). Academic Press:1-44.
- Deryng, D; D Conway; N Ramankutty; J Price; R Warren. 2014. Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures. Environmental Research Letters 9, Article number 034011.
- Di Rienzo, J.; M Balzarini; L Gonzalez; F Casanoves; M Tablada & W Robledo. 2011. Infostat versión 2011. Grupo infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL:/www.infostat.com.ar.
- Díaz Zorita M & GA Grosso. 2000. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. Soil Till.Res.54:121-126.
- Díaz- Zorita, M; DE Buschiazzo; N Peinemann. 1999. Soil organic matter and wheat production in the semiarid argentinean pampas. Agr. J. 91:276-279.
- Díaz- Zorita, M; GA Duarte; JH Grove. 2002. A review of no-till system and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid pampas of Argentina. Soil Till. Res. 65:1-18.
- Diovisalvi, NV; GA Studdert; GF Domínguez; MJ Eiza. 2008. Fracciones de Carbono y Nitrógeno orgánicos y Nitrógeno anaeróbico bajo agricultura continua con dos sistemas de labranza. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD 6 pp.
- Diovisalvi, NV; GA Studdert; NI Reussi Calvo; GF Domínguez. 2010. Relación entre el contenido de Carbono Orgánico Particulado y Total en suelos con diferentes texturas. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD 4pp.
- Domenech, M. 2013. Caracterización de la variabilidad espacial de propiedades de suelo a partir de la conductividad eléctrica aparente. Tesis Magister en Ciencias Agrarias. UNS.75 pp.
- Domenech, M; M Castro Franco; Cicore; JI Costa; VAparicio. 2013. Spatial variability of the effective depth to petrocalcic horizon using electrical resistivity In the southern Argentina pampas. ASA, CSSA and SSSA International Annual Meetings. Tampa, Florida.
- Doran, JW & TB Parkin. 1996. Quantitative indicators of soil Quality: a minimum data set.

- Pp. 25-37. In: *Methods for assessing Soil Quality*, SSSA Special Publication N° 49, Wisconsin, USA.
- Drewry, JJ; KC Cameron & GD Buchan. 2008. Pasture yield and soil property responses to soil compaction from treading and grazing- a review. *Aust. J. Res.* 46:237-256.
- Duval, M; E de Sa Pereira; JO Iglesias; JA Galantini. 2014. Efecto de uso y manejo del suelo sobre las fracciones decarbono orgánico en un Argiudol. *Ci. Suelo.* 32(1), 105-115.
- Duval, M; J Galantini; J Iglesias; S Canelo; J Martinez; L Wall. 2013. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil Till. Res.* 131: 11619.
- Easterling, DR; GA Meehl; C Parmesan; SA Changnon; TR Karl; LO Mearns. 2000. Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts. *Science.* 289:2068-2074.
- Eghball, B; JS Schepers; M Negahban & MR Schlemmer. 2003. Spatial and temporal variability of soil nitrate and corn yield: multifractal analysis. *Agron. J* 95: 339-346.
- ESRI 2011. *ArcGIS Desktop: Release 10.* (Ed ESRI). Redlands, CA.
- Etchevehere, PH. 1976. *Normas de reconocimiento de suelos.* INTA. Castelar. 211 pp.
- Fabrizzi, KP; A Morón; FO García. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. Nondegraded Mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am.* J.67, 1831-1841.
- Farahani, HJ & RL Flynn. 2007. Map Quality and Zone Delineation as affected by Width of Parallel Swaths of Mobile Agricultural Sensors. *Biosystems Engineering* 96 (2), 1516159.
- Farahani, HJ; GW Buchleiter; MK Brodahl. 2005. Characterization of apparent electrical conductivity variability in irrigated sandy and non-saline fields in Colorado. *Transactions of the ASAE*, 48(1):155-168.
- Fernandez, R; Quiroga, A; Alvarez, C; Lobartini, J.C & E, Noellemeyer. 2016. Volumetric weight of aggregates as an indicator of soil quality. *Ciencia del Suelo, Arg.* 34, 2796-292.
- Ferraris G., F Gutierrez Boem; H Echeverria. 2002. Respuestas a la fertilizacion en el Cultivo de Soja de Primera. *IDIA XXI* (3) 52-58.
- Ferrera, L; G Magra; P Besson; E Rovalevski; F Garcia. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo.* 25 (2) 159-172.
- Florio, EL; JL Mercau; EG Jobbágy; MD Nosetto. 2014. Interactive effects of water-table

- depth, rainfall variation, and sowing date on maize production in the Western Pampas. *Agric. Water Manage.* 146: 75-83.
- Fontana, F; M Paturlane; M. Saks; A Quiroga. 2006. Efecto del espesor de suelo sobre propiedades edáficas y rendimiento de trigo en la región semiárida pampeana. Aspectos de la evolución y el manejo de los suelos en la región semiárida pampeana. *Publ. Téc.* 66:15-22.
- Fraisse, C; K Sudduth; N Kitchen. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Transactions of the ASAE.* 44:155-166.
- Franzluebbers, A. 2013. Pursuing robust agroecosystem functioning through effective soil organic carbon management. *Carbon Management* 4: 43656.
- Friedman, SP. 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 46(163): 45-70.
- Frye, W; S Ebelhar; L Murdock; R Blevins. 1982. Soil erosion effects on properties and productivity of two Kentucky soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 1051- 1055.
- Funaro, D; A Quiroga; R Fernández; E Noellemeyer. 2005. Incidencia de la CRA y el índice de materia orgánica/arcilla más limo en el rendimiento de girasol. Cultivos de cosecha gruesa. Actualización 2005. Estación Experimental Agropecuaria Anguil ñIng. Agr. Guillermo Covasö. *Publicación Técnica* N° 61:5-6.
- Funaro, D; J Garay; R Rivarola; A Quiroga. 2007. Algunos factores determinantes del rendimiento de girasol en la región semiárida central. Pág. 29 a 32.
- Gabaldón-Leal, C; IJ Lorite; MI Mínguez; JI Lizaso; A Dosio; E Sanchez; M RuizRamos. 2015. Strategies for adapting maize to climate change and extreme temperatures in Andalusia, Spain. *Climate Research* 65, 159-173.
- Galantini, J & J Iglesias. 2007. Capacidad de secuestro de carbono y efecto de las prácticas agronómicas en suelos de la Región Pampeana de Argentina. In: Gallardo, J. (Ed.), *Captura de Carbono en Ecosistemas Terrestres de Iberoamérica.* pp. 169-182.
- Galantini, J & R Rosell. 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil Till. Res.* 87: 72-79.
- Galantini, JA & L Suñer. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia* 25(1), 41-55.
- Galantini, JA & RA Rosell. 2006. Long term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils.

- Soil Till. Res. 87, 72679.
- Galantini, JA. 2005. Separación y análisis de las fracciones orgánicas. En: Marban L & S. Ratto (Eds.), Manual de Tecnología en Análisis de Suelos: Alcances a laboratorios agropecuarios de la AACCS. Capítulo IV parte 2, 103-114.
- Galantini, JA; N Senesi; G Brunetti; R Rosell. 2004. Influence of texture on the nitrogen and sulphur status and organic matter quality and distribution in semiarid Pampean grassland soils. *Geoderma* 123,143-152.
- Galmarini, AG. 1961. Caracterización climática de la provincia de La Pampa. CAFADE Operación Carne. Publicación Técnica N° 13. Buenos Aires. 59 pág.
- Genuchten V. 1980. A closed equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.
- Ghani, A; M Dexter; KW Perrott. 2003. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. *Soil Biol. Biochem.* 35,1231-1243.
- Ghironi E; A Corro Molas; A Gili; E Hevia; H Reinoso. 2012. Manejo sitio específico de densidades de cultivos de girasol, maíz y sorgo en la región semiárida pampeana central. En Corro Molas A y E Ghironi. 2012. avances de agricultura por ambiente en la región semiárida pampeana. 21-50.
- Giai, S; R Melchor & A Umazano. (2008): Evidencias sedimentológicas de cambios climático-ambientales en el cuaternario de la provincia de La Pampa. *Huellas* 12:43-55.
- Giai, SB. 1975. Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS). Informe Preliminar. Inédito. Dirección de Aguas Subterráneas de La Pampa, Santa Rosa.
- Gili, A., Trucco, R., Niveyro, S., Balzarini, M., Estelrich, D., Quiroga, A., Noellemeyer, E., 2010. Soil Texture and Carbon Dynamics in Savannah Vegetation Patches of Central Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 647.
- Gili, A. 2013. Modelación de la variación espacial de edáficas y su aplicación en el diseño de planes de muestreo de suelos. Tesis Doctorado, UNC. 193 pp.
- Godwin, RJ; TE Richards; GA Wood; JP Welsh & SM Knight. 2003. An Economic Analysis of the Potential for Precision Farming in UK Cereal Production. *Biosystems Engineering*. Volume 84. Issue 4. April 2003. 533-545.
- Gregorich E Carter; D Angers; C Monreal; B Ellert. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74:367-385.
- Groenevelt, PH; CD Grant; S Semetsa. 2001. A new procedure to determine soil water

- availability. *Aust. J. Soil Res.* 39:577-598.
- Grumelli, M. 2010. Génesis y Relaciones paleoclimáticas de los suelos de la colonia Nueva Sampacho, Departamento Río Cuarto, Córdoba, Argentina. Un aporte al estudio del cambio climático global. Tesis Doctoral. UNRC. 171Pág.
- Grumelli, M; AR Becker; H Schiavo H. 2014. Génesis de suelos aluviales del Pleistoceno Superior-Holoceno en el Suroeste de Córdoba. Argentina. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD 6pp.
- Grumelli, M; M Cantu; H Schiavo; AR Becker. 2008. Rasgos micromorfológicos y caracterización mineralógica de suelos aluviales de la Colonia Nueva Sampacho. Provincia de Córdoba. Argentina. Argentina. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD 10pp.
- Guérif, J; G Richard; C Dürr; JM Machet; S Recous; J Roger-Estrade. 2001. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil Till. Res* 61: 13-32.
- Harrison, DF; KC Cameron; RG McLaren. 1994. Effects of subsoil loosening on soil physical properties plant root growth and pasture yield. *New Zeland J. Agric.Res.* 37:559-567.
- Haynes, R. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. *Adv. in Agron.* 85, 221-268.
- Hildreth, W & RE Drake. 1992. Volcán Quizapu. Chilean Andes. *Bulletin of 842 Volcanology* 54:936125.
- Holzämper, A; P Calanca; J Fuhrer. 2013. Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach. *Agricultural and Forest Meteorology* 168:149-159.
- Horbe, TAN; TJC Amado; AO Ferreira; PJ Alba. 2013. Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. *Precis. Agric.* 14:450-465.
- Howell, TA; JA Tolk; AD Schneider; SR Evett. 1998. Evapotranspiration, yied, and water use efficiency of corn hybrids differing in maturity. *Agron. J* 90: 3-9.
- Huggett, R. 1976. Lateral translocation of soils plasma through a small valley basin in the Northaw great Wood, Hertfordshire. *Earth Surface Processes.* 1:99-109.
- Imbellone, P & C Camilión. 1988. Characterization of a buried tephra layer in soils in 844 Argentina. *Pedologie* 28. 1556171.
- Imbellone, PA & JE Giménez. 1997. Micromorphology of soils in quaternary littoral

- sequences. Northeastern Buenos Aires Province, Argentina. En S. Shoba, M. Gerasimova y R. Miedema (Eds.) *Soil Micromorphology: studies on soil diversity, diagnostic and dynamics*. Moscú-Wageningen. 93-105.
- Imbellone, PA & MA Camilion, 1988. Characterization of the buried tephra layer in soils in Argentina. *Pèdologie* 28:155-171.
- Imbellone, PA; JE Giménez & JL Panigatti. 2010. *Suelos de Región Pampeana. Procesos de formación*. Ediciones INTA. 320 pp.
- INTA. 2010. *Carta de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Hoja Tres Arroyos 3960-9*. 1986.
- Interdecadal and Interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina .Changes in the extreme precipitation seasonal cycle. *Int. J. Climatology*, 24 (12):1565-1580.
- Inventario integrado de recursos de los recursos naturales de la provincia de la pampa. 1980. INTA. Provincia de La Pampa. UNLPam. Buenos Aires. 493 pp.
- Iriondo, M & D. Kröhling. 1996. El sistema eólico Pampeano. *Comunicaciones del Museo Provincial de Ciencias Naturales «Florentino Ameghino»* 5:64 pp.
- Iriondo, M & DM Kröhling. 1996. Los sedimentos eólicos del nordeste de la llanura pampeana (Cuaternario superior). *Actas 13 Congreso Geológico Argentino y 3er Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 4:27-48.
- Iriondo, M. 1990. Map of the South America plains -Its present state. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 6:297-308.
- Irisarri, J.A. & Ferrer, J.A. 2013. Suelos con acumulaciones de yeso en la cuenca del río Colorado, Argentina. En: *Suelos con acumulaciones calcáreas y yesíferas de Argentina*, P.A. Imbellone (ed); pags.185-196. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.
- Isaaks, EH & RM Srivastava. 1989. *An introduction to applied geostatistics*. New York, NY: Oxford University Press. 561 p.
- Iturri A. 2015. *Evidencias de acidificación de suelos loésicos agrícolas de argentina*. Tesis Doctoral, Bahía Blanca. Pág. 198.
- Janzen, HH; CA Campbell; RC Izaurralde; BH Ellert; N Juma; W McGill; R Zentner. 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian Prairies. *Soil Tillage Res.* 47: 181-95.
- Jobbagy, EG & RB Jackson. 2004. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biol.* 10: 1299-1312.

- Jobbágy, EG & RB Jackson. 2007. Groundwater and soil chemical changes underphreatophytic tree plantations. *J. Geophys. Res.* 112.
- Jobbágy, EG; MD Nosetto; C Santoni; G Baldi. 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología Austral* 18: 305-322.
- Johnson, CK; JW Doran; HR Duke; BJ Wienhold; KM Eskridge & JF Shanahan. 2001. Field-Scale Electrical Conductivity Mapping for Delineating Soil Condition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65(6):1829-1837.
- Johnson, CK; KM Eskridge; DL Corwin. 2005. Apparent soil electrical conductivity: applications for designing and evaluating field-scale experiments. *Computers and Electronics in Agriculture* 46(163):181-202.
- Justo C & C Scianca. 2011. Agricultura por ambientes. Estrategias de manejo de maíz en suelos con diferentes aptitudes productivas. *Memoria Técnica* 2011-12. 11-14.
- Kalivas, DP & VJ. Kollias. 2001. Effects of soil, climate and cultivation techniques on cotton yield in Central Greece. Using different statistical methods. *Agronomie*: 21(1):73-89.
- Kapkiyai, J; N Karanj; J Qureshi; P Smithson & P Woomer. 1999. Soil organic matter and nutrient dynamics in a Kenian nitisol under long-term fertilizer and organic input management. *Soil Biol. Biochem.* 31:1773-1782.
- Karlen, DL; MJ Mausbach; JW Doran; RG Cline; RF Harris; GE Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:4610.
- Kay, BD; MA Hajabbasi; J Ying; M Tollenaar. 2006. Optimun versus non-limiting water contents for root growth, biomasa accumulation, gas exchange and the rate of development of maiz (*Zea mays* L.). *Soil Till. Res.* 88:42-54.
- Khosla, R; D Inmann; DG Westfall; RM Reich; M Frasier; M Mzuku; B Koch; AA Hornung. 2008. A synthesis of multi-disciplinary research in precision agriculture: site-specific management zones in the semi-arid western Great Plains of the USA. *Precision Agriculture*, Dordrecht, v.9, n.1, p. 85-100.
- Khosla, R; JA Fleming; T Delgado; M Shaver; DG Westfall. 2002. Use of site-specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture. *Journal of soil and water conservation.* 57(6):513-518.
- Kitchen, NR; KA Sudduth; ST Drummond. 1999. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils. *J. Prod. Agric.* 12:607-617.

- Kitchen, NR; KA Sudduth; DB Myers; ST Drummond; SY Hong. 2005. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture* 46(163): 285-308.
- Kitchen, NR; ST Drummond; ED Lund; KA Sudduth & GW Buchleiter. 2003. Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop system. *Agron. J.* 95:483-495.
- Kosmas, CS; M Gerontidis; M Marathianou; D Detsis; T Zafirou; W Van Mynen; G Gowens; T Quiere; K Van Oost. 2001. The effects of tillage displaced soil on soil properties and wheat biomass. *Soil Tillage Research* 58:31-44.
- Kravchenko, A & DG Bullock. 1999. A Comparative Study of Interpolation Methods for Mapping Soil Properties. *Agron. J.* 91(3):393-400.
- Kravchenko, AN & DG Bullock. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92:75-83.
- Kravchenko, AN; GP Robertson; KD Thelen; RR Harwood. 2005. Management. Topographical, and weather effects on spatial variability of crop grain yields. *Agron. J* 97:514-523.
- Kruger, H; R Agamennoni & M Ripoll. 2005. Siembra directa de trigo en el sur de la región semiárida pampeana. *Boletín Técnico N° 14. INTA Bordenave.* 1-15.
- Krüger, HR; S Venanzi & JA Galantini. 2004. Rotación y cambios en las propiedades químicas de un Hapludol típico del sudoeste bonaerense bajo labranza. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- Kruse, E; JA Forte Lay; JL Aiello; A Basualdo; G Heinzenknecht. 2001. Hydrological processes on large flatlands: case study in the northwestern region of Buenos Aires Province (Argentina). *Remote sensing and Hydrology (Proceeding of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, USA, April 200).* IAHS 267.
- Kucharik, CJ & N Ramankutty. 2005. Trends and variability in US corn yield over the twentieth century. *Earth Interactions.* 9(1):29 pp.
- Kumhálová, J; F Kumhála; M Kroulík; TMMat jková. 2011. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precision Agriculture,* 12(6):813-830.
- Kuppel, S; J Houspanossian; M Noretto; EG Jobbágy. 2015. What does it take to flood the Pampas?: Lessons from a decade of strong hydrological fluctuations. *Water Resources Research* 51, 2937-2950.
- Lapen, DR; GC Topp; Gregorich, EG; WE Curnoe. 2004. Least limiting water range

- indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario. Canada. *Soil Till. Res.* 78:151-170.
- Larson, WE & FJ Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. p. 175- 203. In: *Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Vol. 2: Technical papers*. Bangkok, Thailand: International Board for Research and Management, 1991. IBSRAM Proceedings No. 12(2).
- Larson, WE & FJ Pierce. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: Coleman, D. C., D. F. Bezdicek, & B. A. Stewart (Eds.) *Special Publication No. 35*. SSSA, Madison, Wisconsin. pp:37-51.
- Lavado RS, G Rubio & M Alconada. 1992. Grazing management and soil salinization in two Pampean Natraqualfs. *Turrialba*, 42:500 -508.
- Lawrence, GP. 1977. Measurement of pore sizes in fine-textured soils: a review of existing techniques. *Journal of Soil Sci.* 28: 527-540.
- Leonardi, M. 2012. Comportamiento sitio específico de la soja en el centro sur bonaerense. Tesis para obtener el título de grado en el Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur.
- Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1: 277-294.
- Li, J; GS Okin; L Álvarez & H Epstein. 2008. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities. *Biogeochemistry* 88, 73-88.
- Liebman, B; C Vera; LM Carvalho; IA Camilloni; MP Hoerling; D Allured; VR Barros; J Baez; M Idegain. 2004: An observed trend central South American Precipitation. *J Climate*, 17:4357-4367.
- Lindstrom, MJ; TE Schumacher; GD Lemme; HM Gollany. 1986. Characteristics of a Mollisol and corn (*Zea mays* L.) growth 20 years after topsoil removal. *Soil tillage Res.* 7:51-62.
- Lipiec, J. & I Hakansson. 2000. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. *Soil Tillage Res.* 53:87-94.
- Littell, RC; GA Milliken; WW Stroup; RD Wolfinger. 1996. *SAS System for Mixed Models*, Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Lobartini, JC; C Puricelli; HR Krüger; R Rodríguez. 1998. Relación entre el uso y la degradación química en cuatro Molisoles de la Región PampeanaSubhúmeda/Semiárida.XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.

CD 4 pp.

- Lobell, D; G Bala; A Mirin; T Phillips; R Maxwell; D Rotman. 2009. Regional differences in the influence of irrigation on climate, *J. Clim.*, 22(8):224862255.
- Maddonni, G. 2007. En Acta del Congreso de Aapresid 2007. Bases ecofisiológicas del cultivo para alcanzar altos rendimientos. 279 pp.
- Maddonni, G. 2009. En Acta del Congreso Aapresid 2009. Fecha de siembra como estrategia de manejo de agua en maíz. 195 pp.
- Magrin, GO; MI Travasso; GR Rodríguez. 2005. Changes in Climate and Crop Production during the 20th Century in Argentina *Climatic Change*. Volume 72, Numbers 1-2:229-249.
- Mallarino, AP & DJ Wittry. 2004. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. *Presic. Agric.* 5(2):131-144.
- Mapfumo, E; DS Chanasyk; MA Naeth; VS Baron. 1998. Forage growth and yield components as influenced by subsurface compaction. *Agron. J.* 90:805-812.
- Mccutcheon, MC; HJ Farahani; JD Stednick; GW Buchleiter & TR Green. 2006. Effect of Soil Water on Apparent Soil Electrical Conductivity and Texture Relationships in a Dryland Field. *Biosystems Engineering* 94(1):19-32.
- McKenzie, NJ & PJ Ryan. 1999. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma* 89: 67-94.
- Medeiros, JC; AP Da Silva; CE Pellegrino Cerri; NFB Giarola; GC Figueiredo; FJC Fracceto. 2011. Linking physical quality and CO2 emissions under long time no-till and conventional-till in a subtropical soil in Brasil. *Plant Soil* 338:5-15.
- Méndez, A; D Villarreal; J Massigoge; J Vélez. 2010. Análisis del rendimiento y la calidad de la cebada cervecera en función de la profundidad de tosca en el perfil del suelo. En IX Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola CLIA 2010. XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola CONBEA 2010. 25-29 de Julho 2010. Ed CLIA/CONBEA, Vitória-ES, Brasil.
- Menéndez, FJ; MJ Tamburrino; C Maqueda; JI Alosno; S Guell; A Barattini. 2005. Caracterización de la interacción tecnología X ambiente en la zona Oeste de AACREA. Informe final. Servicio de informaciones de AACREA. 20 pp.
- Micucci, F & M Taboada. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 86(2):152-162.

- Minetti, JL; WM Vargas; AG Poblete; LR Acuna & G Casagrande. 2003. Non-linear trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999. *Atmósfera*, 16:119-135.
- Miretti, M; S Imhoff; A Da Silva; R Lavado. 2012. Soil structure degradation in patches of alfalfa fields. *Scientia Agricola*. 67:604-610.
- Molin, JP & C Nunes de Castro. 2008. Establishing management zones using soil Electrical conductivity and other soil Properties by the fuzzy clustering technique. *Sci. Agric. (Piracicaba, Brazil)*. 65 (6):567-573.
- Moral, FJ; JM Terrón; JRMD Silva. 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil and Tillage Research*. 106(2):335-343.
- Mueller, L; G Shepherd; U Schindler; BC Ball; LJ Munkholm; V Hennings; E Smolentseva; O Rukhovic; S Lukin; C Hu. 2012. Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. *Soil Till. Res.*
- Murphy, GM. 2010. El clima y el crecimiento de la producción agrícola. *El clima*. indd. 13:41.
- Musick, J; OR Jones; B Stewart; D Dusek. 1994. Water-yield relationships for irrigated and dryland wheat in the U. S. Sourthen Plains. *Agron J* 86:980-986.
- Nhantumbo, A., y A. Cambule 2006. Bulk density by Proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. *Soil & Tillage Research*. (87):231-239.
- Noellemeyer, E; AR Quiroga; D Estelrich. 2006. Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *J. Arid Environ*. 65:142-155.
- Noellemeyer, E; F Frank; C Alvarez; G Morazzo; A Quiroga. 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.
- Nosetto, MD; EG Jobbágy; J Mercau. 2010. Ambientación y aplicación variable de insumos en áreas con influencia freática. *AAPRESID. Revista Técnica Especial. Agricultura de precisión y manejo por ambientes*: 15-20.
- Nosetto, MD; EG Jobbágy; AB Brizuela; RB Jackson. 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 154: 2-11.
- Nosetto, MD; EG Jobbágy; RB Jackson; G Sznajder. 2009. Reciprocal influence between crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field*

- Crop Res 113:138-148.
- Nosetto, MD; R Páez; SI Ballesteros; EG Jobbágy. 2015. Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 206:60-70.
- Oliver, MA. 2010. *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Springer. Inglaterra. 337 pp.
- Oliver, MA. 2013. Precision agriculture and geostatics: How to manage agriculture more exactly. *Significance*. 10 (2):17-22.
- Otegui, ME & M Lopez Pereira. 2003. En *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo*. Fecha de siembra. Ed. FAUBA. Pág. 265-273.
- Otegui, ME; J Mercau; F Menéndez. 2002. Guía Dekalb del cultivo de maíz. Bases funcionales de la producción del cultivo de maíz. Pág. 14-18. Estrategias de manejo para la producción de maíz tardío y de segunda. Ed. Servicios y Marketing Agropecuario. 172-178.
- Pachepsky, YA; DJ Timlin; WJ Rawls. 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Agron. J.* 65:1787-1795.
- Palmer, WC. 1965. *Meteorological Drought*. U.S. Dep. Commerce. Wshington D.C. Weather Bureau Res. Paper 45- 58 pág.
- Panigatti, JL& F Mosconi. 1978/79. Arcillas de suelos del centro de Santa Fe y centro este de Córdoba. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. Serie 3, XIV, 137-148.
- Panigatti, JL. 1975. Genetic and induced properties of Mollisols of the northern pampa, Argentina. Tesis Doctoral. Universidad de Michigan, USA. 86 pp.
- Panigatti, JL. 1980. Molisoles del norte de la zona pampeana. I. Génesis y morfología. *Actas IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo*. Paraná. 927-940.
- Panigatti, JL. 1990. Bajos Submeridionales. En: *Manejo de tierras anegadizas*. Ediciones FECIC. Buenos Aires. 344 pp.
- Pántano, V; L Spescha; O Penalba; G Murphy. 2014. Influencia de la variabilidad de temperatura y precipitación en la situación hídrica del suelo, en la región oriental de secano de la Argentina. *Meteorologica* vol.39 no.2 Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Versión on line- ISSN 1850-468X.
- Parry, ML. 1990. *Climate Change and world agriculture*. Earthscan. London. 157 pp.
- Penalba, OC & F Robledo. 2010. Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. *Climatic Change* 98:5316550.

- Penalba, OC. & W Vargas. 2004. Interdecadal and Interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina .Changes in the extreme precipitation seasonal cycle. *Int. J. Climatology*. 24(12):1565-1580.
- Peralta, NR & JL Costa. 2013. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Comp. Electron. Agric.* 99: 218-226.
- Peralta, NR; JL Costa; M Balzarini; H Angelini. 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.
- Peralta, NR; M Castro Franco; L Herber; JL Costa. 2012. La conductividad eléctrica aparente: una herramienta para reducir la escala del mapa de suelos y delimitar zonas de manejo sitio-específico. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD 6pp.
- Percival, H.J.; Parfitt, R.L.; Scott, N.A. 2000. Factors controlling soil carbon level in New Zealand grasslands: is clay content important? *Soil Science Journal*, 64: 1623-1630.
- Pérez, S; EM Sierra; G Casagrande; G Vergara. 1999. Cambios en el régimen de precipitaciones del oeste de la Región Pampeana Argentina 1921-98. XI Congreso Brasileiro de Agrometeorología y II Encuentro Latinoamericano de Agrometeorología. Florianópolis. Brasil. Anales 499 pp.
- Pérez, M; L Pérez; M Díaz-Zorita. 2002. Producción de cultivos de verano según sistemas de labranza en el noroeste bonaerense. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD 6 pp.
- Phillips, J.D. & Marion, D.A. 2005. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas. *Geoderma*. 124: 73-89.
- Phillips, JD. 2017. Soil Complexity and Pedogenesis. *Soil Science o*, 1.doi:10.1097.
- Píccolo, GA; JA Galantini; RA Rosell; AM Miglierina. 1998. Transformaciones de la materia orgánica en un suelo laterítico (Misiones, Argentina): II. Cambios en la materia orgánica particulada y humificada. *Agricultura Técnica (Chile)*.58(2):142-150.
- Pieri, C. 1995. Long-term soil management experiments in semiarid Francophone Africa. *Adv. Soil Sci.* 225-264.
- Pilatti, MA; J de Orellana; S Imhoff; AP Da Silva. 2012. Actualización de los límites críticos del intervalo hídrico óptimo. *CI*. 30(1), 9-21.
- Pizarro, JB & AR Cascardo. 1991. El desarrollo agropecuario pampeano. Cap IV La

- evolución de la agricultura pampeana. Grupo editor latinoamericano. Osvaldo Barsky editor. 799 pp.
- Plant, RE. 2001. Site Specific Management the application of information technology to crop production. *Comp. Electron. Agric.* 30:9-29.
- Podestá, G; CD Messina; M Grondona; G Magrin. 1999. Associations between grain crop yields in Central- Eastern Argentina and El Niño- Sourthen oscillation. *Journal of Applied Meteorology.* (38):1488-1498.
- Proot, A. 2011. Efecto de la fertilización nitrogenada y de la densidad de siembra sobre los rendimientos de maíz. Tesis de grado presentada en la facultad de agronomía UBA. 35 pp.
- Quiroga, A; A Oderiz; M Uhaldegaray; C Álvarez; E Scherger; R Fernández & I Frasier. 2017. Influencia del manejo sobre indicadores físico-hídricos de compactación de suelos. *Semiárida Revista Facultad de Agronomía UNLPam.* 26:21-28.
- Quiroga, A & D Funaro. 2004. Materia orgánica. Factores que condicionan su utilización como indicador de la calidad en Molisoles de las regiones semiárida y subhúmeda pampeana. En: XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD 10 pp.
- Quiroga, A. 1994. Influencia del manejo sobre propiedades físicas de los suelos, su relación con la granulometría y contenido de materia orgánica. Tesis Magister en Ciencias Agrarias. UNSur.
- Quiroga, A.R. 2012. Necesidad de reconocer, jerarquizar y categorizar factores que afectan la producción y sustentabilidad. Pp 569. En: A Corro Molas & E Ghironi (Ed.), *Avances en agricultura por ambientes en la región semiárida pampeana.* Publicación Técnica 90. EEA INTA Anguil.
- Quiroga, A; D Buschiazzo; N Peinemann. 1998. Management discriminant properties in semiarid soils. *Soil Science.* 163:591-597.
- Quiroga, A; D Funaro & O Ormeño. 2003. Aspectos del manejo del agua del suelo para el cultivo de trigo. En *Trigo. Actualización Técnica 2003.* Boletín de divulgación Técnica N° 76. EEA INTA Anguil. 228 pp.
- Quiroga, A; D Funaro; R Fernández. 2004. Factores edáficos y de manejo condicionantes de la eficiencia del barbecho en la región semiárida y subhúmeda pampeana. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. En CD.
- Quiroga, A; D Funaro; R Fernández. 2005. Propiedades edáficas en Molisoles bajo siembra directa. *Boletín de divulgación técnica N° 87:*3-17.
- Quiroga, A; D. Buschiazzo; N. Peinemann. 1999. Soil compaction is related to management

- practices in the semiarid Argentine pampas. *Soil Till Res.* 52: 2128.
- Quiroga, A; O Ormeño; N Peinemann. 1998. Efectos de la siembra directa sobre propiedades físicas de los suelos. Siembra directa, Buschiazzo, D; J Panigatti & F Babinec (Ed.). INTA. 333 pp.
- Quiroga, A; R Fernández; E Noellemeyer. 2009. Grazing effect on soil properties in conventional and no tillsystems. *Soil & Till. Res.* 105:164-170.
- Quiroga, A; R Fernández; D Funaro, N Peinemann. 2008. Materia orgánica en Molisoles de la región semiárida pampeana. Influencia sobre propiedades físicas y productividad. En: J Galantini et al. (Eds.) Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. Pp. 97-116. Editorial UNS.
- Quiroga, AR & DE Buschiazzo. 1988. Relaciones entre algunos parámetros hídricos. Densidad aparente y materia orgánica con la granulometría en suelos de la región semiárida pampeana central. Actas XII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Corrientes. Argentina. 93-94.
- Quiroga, AR; DE Buschiazzo; N Peinemann. 1996. Soil organic matter particle size fractions in soils of the semiarid Argentinian Pampas. *Soil Sci.* 161: 104-108.
- Quiroga, AR; M Díaz-Zorita; DE Buschiazzo. 2001. Safflower productivity as related to soil water storage and management practices in semiarid regions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32(17-18):2851-2862.
- Quiroga, A; D Funaro; E Noellemeyer; N Peinemann. 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research.* 90:63-68.
- Raiesi, F. 2007. The conversion of overgrazed pastures to almond orchards and alfalfa cropping systems may favor microbial indicators of soil quality in Central Iran. *Agric. Ecosyst. Environ.* 121: 3096318.
- Ravelo, C. 1990. PDIMES, balance hídrico seriado, índice de sequía y humedad del cultivo. Manual teórico-operativo. Asoc. Agron. Agrometereología. 8 pp.
- Reeves, D. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Till. Res.* 43:131-167.
- Richards, LA. 1982. PERSONAL DEL LABORATORIO DE SALINIDAD. USA. 1982. Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos. Editor. RICHARDS L.A. Traducción del Handbook N° 60 del USDA. Ed. Limusa. México.
- Riestra, D; E Noellemeyer; A Quiroga. 2012. Soil Texture and Forest Species Condition the Effect of Afforestation on Soil Quality Parameters. *Soil Science.* 177: 279-287.

- Roberto, ZE; G Casagrande; EF Viglizzo. 1994. Lluvias en la Pampa Central: tendencia y variaciones del siglo. Cambio Climático y Agricultura Sustentable en la Región Pampeana. Bol. INTA Centro Regional La Pampa-San Luis.Nº2: 25 pp.
- Rogasik, J & M Smukalski. 1988. Bodenfruchtbarkeit und Winter weizenertrag auf Moränenstandorten. Tag. Berl Akad. Landwirth. Wiss. 269:383-390.
- Rose, G; T Osborne; H Greatrex & T Wheeler. 2016. Impact of progressive global warming on the global-scale yield of maize and soybean. Climatic Change. 134:417-428.
- Ross, F & J Massigoge. 2012. Interacción fertilización nitrogenada y ambiente en cebada cervecera cv. Scarlett: I Rendimiento. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo; XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD 6 pp.
- Rossiter, DG & J Bouma. 2018. A new look at soil phenofoms ó Definition, identificación, mapping. Geoderma. 314, 113-121.
- Rubio, G. & MA Taboada. 2012. Diagnóstico de la capacidad productiva del suelo. En: Fertilización de cultivos y pasturas. Álvarez R, P Prystupa, MB Rodríguez, CR Álvarez (eds). Ed. FAUBA, Buenos Aires. Pp. 3-25.
- SAGYP- INTA. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1: 500000. Proyecto PNUD ARG 85/019. Editado por Secretaría de agricultura. Ganadería y Pesca. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. CIRN. Instituto de Evaluación de Tierras. 472 pp.
- Salina-García J; F Hons; E Motocha. 1997. Long-Term effects of tillage and fertilization and soil organic matter dynamics. Soil Sci. Am. J. 61:152-159.
- Salinity Laboratory, U.S. 1954. Diagnosis and Improvement os Saline and Alkali Soils: USDA Handbook No 60. U.S. Government Printing Office, Washington DC.
- Samper, FJ & J Carrera. 1990. Geostadística: Aplicaciones en Hidrología subterránea. Centro Internacional de Métodos numéricos en Ingeniería, Barcelona. Pp 484.
- Sánchez, MC; OS Heredia; N Bartoloni; C González; N Arrigo. 2006. Secuencias de cultivos y labranzas: efectos sobre las fracciones de carbono del suelo. Resúmenes del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Pagina 168.
- SAS. 2010. SAS 9.1.3 Help and Documentation. Cary, NC.
- Satorre, E. 2008. Actas de Congreso Aapresid 2008. Siembras de maíz tardías y de segunda: bases y oportunidades para su desarrollo. 215 pp.
- Satorre, EH; F Menéndez; G Tinghitella; JL Cavasassi. 2005. TRIGUERO: Un sistema de apoyo a la fertilización nitrogenada de trigo. Convenio AACREA y PROFERTIL S.A. Software de aplicación agronómica.

- Schiavo, H; A Becker; M Cantú. 1995. Caracterización de los Fragipanes de la Depresión de Curapaligue, Córdoba, Argentina. *CI. SUELO*. 13(2):123-130.
- Segnestam, L. 2002. Indicators of Environmental and Sustainable Development. Theories and Practical Experience, Environmental Economic Series, Paper N° 89, 61 pp. World Bank, Washington DC.
- Sena, MM; RTS Frighetto; PJ Valarini; H Tokeshi; RJ Poppi. 2002. Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a multivariate analysis case study. *Soil Till. Res.* 67:171-181.
- Senthilkumar, K; JE Bergez; D Leenhardt. 2015. Can farmers use maize earliness choice and sowing dates to cope with future water scarcity? A modelling approach applied to south-western France. *Agricultural Water Management* 152:125-134.
- Sessevalle, S. 2013. Descripción de un protocolo para determinar profundidad de tosca en la zona sudoeste de la provincia de Buenos Aires. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Universidad Católica Argentina.
- Shaner, DL; R Khosla; MK Brodahl; GW Buchleiter; HJ Farahani. 2008. How Well Does Zone Sampling Based On Soil Electrical Conductivity Maps Represent Soil Variability. *Agron. J.* 100(5):1472-1480.
- Siegel-Issem, CM; JA Burger; RF Powers; F Ponder & SC Patterson. 2005. Seedling root growth as a function of soil density and water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:215-226.
- Sierra, EM; M Conde Prat; S Pérez. 1995. La migración de cultivos de granos como indicador del cambio climático 1941-93 en la Región Pampeana Argentina. *Rev.Fac.Agr.* 15(2-3):171-176.
- Sierra, EM; RH Hurtado; L Spescha. 1994. Corrimiento de las isoyetas anuales medias decenales en la Región Pampeana 1941-1990. *Rev.Fac.Agr.* 14(2):139-144.
- Simón, M; N Peralta; JL Costa. 2013. Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *CI.31*:45-55.
- Singels, A. 1992. Evaluating wheat planting strategies using a growth model. *Agric. Systems* 38:174-184.
- Six, J; R Conant; E Paul; K Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241: 155-176.
- Soil Survey Staff. 1993. Soil survey manual. USDA. Handbook 18. U.S.Gov. Print. Office. Washington. DC. 437 pp.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources

- Conservation Service, Washington, DC.
- Sokal, RR & FJ Rohlf. 1995. *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research*. 3rd edition. W.H. Freeman, New York.
- Soracco, CG; LA Lozano; GO Sarli; RR Filgueira. 2008. Anisotropía en la porosidad del suelo en siembra directa. *Revista de la Facultad de Agronomía. UNLP*. En prensa.
- Spescha, L; G Murphy; R Hurtado; M Fernandez Long. 2009. Evidencias del Cambio Climático sobre las Variables Agrohídricas en la Región Oriental de Secano (Argentina). XVI Congreso Brasileiro de Agrometeorología, septiembre 2009. Belo Horizonte, MG
- Steinbach, HS & R Álvarez. 2004. ¿Afecta el sistema de labranza las propiedades físicas de los suelos de la Región Pampeana? *Informaciones Agronómicas* 33,7-12.
- Steinbach, HS & R Álvarez. 2007. ¿Afecta el sistema de labranza las propiedades físicas de los suelos de la Región Pampeana? *Informaciones Agronómicas* 33: 7-12.
- Stengel, P; J Douglas; J Guerif; M Goss; R Monnier; R Cannell. 1984. Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drill. *Soil Till. Res.* 4:35-53.
- Stevens, L; A Verdejo-García; AE Goudriaan; H Roeyers; G Dom; W Vanderplasschen. 2014. Impulsivity as a vulnerability factor for poor addiction treatment out-comes: A review of neurocognitive findings among individuals with substance use disorders. *Journal of Substance Abuse Treatment*. 47(1), 58672.
- Stoops, G. 2003. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Soil Science of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 174 pp.
- Sudduth, KA; NR Kitchen; WJ Wiebold; WD Batchelor; GA Bollero; DG Bullock, DE Clay; HL Palm; FJ Pierce; RT Schuler; KD Thelen. 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*. 46:2636283.
- Sun, L; H Li; MN Ward; DF Moncunill. 2007. Climate variability and corn yields in semiarid Ceará. *Brazil. J. Appl. Meteor. Climatol*: 46:2266240.
- Taboada, MA; FG Micucci; DJ Cosentino & RS Lavado. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Till. Res.* 49:57663.
- Tan, Z; R Lal; L Owens; RC Izaurralde. 2007. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. *Soil & Tillage Research*. 92:53-59.

- Teixeira, EI; G Fischer; H Van Velthuizen; C Walter; F Ewert. 2013. Global hotspots of heat stress on agricultural crops due to climate change. *Agricultural and Forest 36 CAP. 01 EL MISMO MAÍZ, UN NUEVO DESAFÍO* *Meteorology*.170:206-215.
- Teruggi, ME. 1957. The nature and origin of Argentine Loess. *Journal of Sedimentary Petrology* 27:322-332.
- Thorntwaite & Mather. 1955. The the water balance. Dixel Institute of Technology. *Climatology*. VIII (1):104 pp.
- Trangmar BB; RS Yost; G Euhara. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. In Agron*. 38:45-94.
- Urioste, A; DE Buschiazzo; GG Hevia; EN Hepper; L Ferramolas; A Bono. 2002. Distribución de carbono orgánico, nitrógeno total y fracciones de fósforo en la capa arable de suelos de la región semiárida pampeocentral. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD 4 pp.
- URL:<http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/>.
- Urricariet, S & R Lavado. 1999. Indicadores de deterioro en suelos de la Pampa Ondulada. *CI*. 17(1):37-44.
- Vargas López, J. 1986. Evaluación de cultivaresde sorgo granífero. Ensayo territorial. Anguil, La Pampa (AR): INTA. EstaciónExperimental Agropecuaria Anguil. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/anguil/info/pdfs/boletines/bol37.pdf>Consulta.
- Venanzi, S; A Vallati; H Kruger. 2002. Crecimiento temprano en trigo en función de la densidad aparente del suelo. CD.
- Vepraskas, MJ & LP Wilding. 1983. Aquic Moisture Regimes in soils with and without low chroma colors. *Soil Sci. Am. J.* 47:280-285.
- VERIS TECH. 2001. Frequently asked questions about soil electrical conductivity. Disponible en <http://www.veristech.com/> Salina, Kansas. Last Accessed 20 December 2012.
- Vieira, SR. 2000. Geoestadística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novaris, R. F.; V H Alvarez; G R Schaefer (Ed.) *Tópicos em Ciencia do solo*. Vicosa; Sociedade Brasileirade Ciencia do Solo. 1:1-54.
- Viglizzo, E. & C Filippin. 1993. Cambio climático y su impacto en la Pampa Semiárida. *Rev. Agropecuaria*. 3 (13):30-34.
- Viglizzo, EF; EG Jobbágy; LV Carreño; FC Frank; RM Aragón; L De Oro; VS Salvador. 2009. The dynamics of cultivation and floods in arable lands of central Argentina. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 491-502.

- Viglizzo, EF; FC Frank; LV Carreño; EG Jobbágy; H Pereyra; J Clatt; D Pincén; MF Ricard, M.F. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology*. 17:959-973.
- Visconti, G. 2007. *Sedimentología de la Formación Cerro Azul (Mioceno superior) de la provincia de La Pampa, Argentina*. Tesis doctoral, UBA. 203 pp.
- Vitharana, UWA; M Van Meirvenn; D Simpson; L Cockx; J De Baerdemaeker. 2008. Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. *Geoderma*. 143:2066215.
- Vityakon P. 2007. Degradation and restoration of sandy soils under different agricultural land uses in northeast Thailand: a review. *Land Degrad Dev*. 18:567-577.
- Walkley, A & TA Black. 1934. An examination of the Degtjaerff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci*. 37:29-38.
- Wander, MM & GA Bolero. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:9616971.
- Yang, C; CL Peterson; GL Shropshire; T Ottawa. 1998. Spatial variability of field topography and wheat yield in the Palouse region of the Pacific Northwest. *Tran. ASAE* 41:17-27.
- Yoo, G & M Wander. 2006. Influence of tillage practices on soil structural controls over carbon mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:651-659.
- Zach, A; E Noellemeyer; H Tiessen. 2006. Carbon turnover and ¹³C natural abundance under landuse change in the semiarid La Pampa, Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1541-1546.
- Zappino, O. 2010. *Hidromorfía y condiciones ácuicas en suelos de la llanura aluvial de Tucumán (Argentina)*. *CI*. 28 (1):79-90.
- Zárate, M & A Tripaldi. 2012. The aeolian system of central Argentina. *Aeolian Research*. 3:4016417.
- Zárate, MA & A Blasi. 1993. Late Pleistocene-Holocene deposits of the southern Buenos Aires Province, Argentina: A preliminary model. *Quaternary International*. 17:15-20.
- Zilio, J. 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 Maestría. UNS. 113 páginas.
- Zinck, J. 2012. *Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. Ed. ITC Faculty of Geo-Information Science and Earth

Observation Enschede, The Netherlands.

Zornoza, R; J Mataix-Solera; C Guerrero; V Arcenegui; J Mataix-Beneyto & I Gómez. 2008. Validating the effectiveness and sensitivity of two soil quality indices based on natural forest soils under Mediterranean conditions. *Soil Biol. Biochem.* 40:2079-2087.