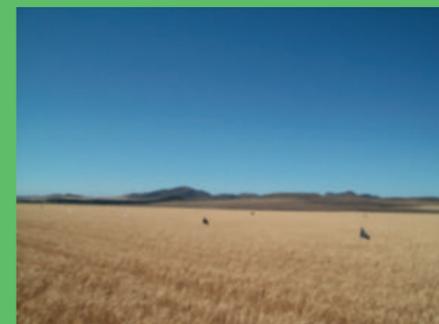


UNIVERSIDADE DA CORUÑA

TESIS DOCTORAL

**FORMAS DE FÓSFORO EDÁFICO COMO INDICADORES DEL
EFECTO DE LAS PRÁCTICAS DE MANEJO EN LA REGIÓN
PAMPEANA ARGENTINA**



FORMAS DE FÓSFORO EDÁFICO COMO INDICADORES DEL EFECTO
DE LAS PRÁCTICAS DE MANEJO EN LA REGIÓN PAMPEANA ARGENTINA

Liliana
Graciela
Suñer

2015

Liliana Graciela Suñer

La Coruña, Octubre 2015



TESIS DOCTORAL

**FORMAS DE FÓSFORO EDÁFICO COMO INDICADORES DEL
EFECTO DE LAS PRÁCTICAS DE MANEJO EN LA REGIÓN
PAMPEANA ARGENTINA**

Liliana Graciela Suñer

**Directores:
Dr. Juan Alberto Galantini
Dr. Jorge Paz Ferreiro**

La Coruña, Octubre 2015

Dedico esta tesis a Carolina y a Santiago

Generadores de inspiración y amor incondicional

Agradecimientos

- ✓ Al Dr Antonio Paz González por ser tan expeditivo cuando le he consultado cuestiones administrativas de la Universidad da Coruña.
- ✓ Al Dr Juan Alberto Galantini por brindarme la libertad de expresar mis ideas y su amistad.
- ✓ En especial a los Ings María Rosa Landriscini, Juan Manuel Martínez, y Matías Duval, amigos y compañeros de tareas, por atender a las múltiples consultas tanto agronómicas, como de datos. En particular a Juan Manuel, por la lectura del manuscrito.
- ✓ A mis compañeros y amigos, personal del Laboratorio de Química de Suelos, Bqca. Mag. Sc. Ana María Miglierina, Ing. Mag. Sc. Gabriela Minoldo Ing. Julio Iglesias, Lic. Mag. Sc. Gabriela Laurent; y personal del Laboratorio de Suelo, Planta y Ambiente (LabSPA), Lic. Juan Carlos Gasparoni, Lic. Alejandra Barrios, Técnica Cecilia Costantino, Prof Silvia Canelo, porque siempre trabajamos en un ambiente de familiaridad.
- ✓ Al Técnico Ramiro García del LabSPA, por su entrega y colaboración en el tamizado de algunos suelos y en el fraccionamiento secuencial de P.
- ✓ A mi compañero, “socio”, de la Cátedra de Física de Suelos Ing. Fernando López por hacer tan amenos los momentos compartidos.
- ✓ Al Ing Gastón Iócoli por su ayuda durante la determinación de los espectros de Infrarrojo.
- ✓ A la Dra Fabiana Limbozzi por facilitarme los mapas GIPS presentados en esta tesis.
- ✓ A mis compañeros del cuarto piso de Agronomía Ings. Juan Carlos Silenzi, Nora Echeverría, Mariana Bouza y los técnicos Martín de Lucía y Martín Sarti, por la convivencia respetuosa.

- ✓ A los productores, pertenecientes a la Asociación Argentina de Siembra Directa, de la región semiárida y subhúmeda pampeana que me permitieron muestrear en sus campos.
- ✓ A la Estación experimental Bordenave del INTA (BA, Argentina), especialmente al Ing. Hugo Kruger y a su equipo de trabajo.
- ✓ A la Chacra Experimental Integrada Barrow, Tres Arroyos (BA, Argentina), por facilitarme el acceso a los ensayos de larga duración en siembra directa, especialmente a los Ings. Horacio Forjan y Lucrecia Manso
- ✓ A Chechu, Gabi L., Corina y Berenice por su energía siempre alentadora y a Yanina por su alegría contagiosa.
- ✓ A la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC).
- ✓ Al Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur y al Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS), lugar donde desarrollo mi tareas.
- ✓ A todos los que de una u otra forma me han apoyado en la realización de este proyecto.

Resumen

En las regiones semiáridas y subhúmedas el diagnóstico de la fertilidad edáfica adquiere un papel relevante, ya que los rendimientos se encuentran limitados por la falta de agua. Cambios en las prácticas de manejo como fertilización, rotaciones y siembra directa, alteran la dinámica de ciclado de la materia orgánica en los suelos e influyen en la disponibilidad de nutrientes. En el sudoeste bonaerense argentino, no existe información disponible sobre la dinámica del P en relación a la productividad, especialmente en sistemas de siembra directa. En esta tesis se evalúan: variables edafoclimáticas en relación a la dinámica de P en el sistema suelo-planta; el efecto de distintas rotaciones de cultivos; la aplicación de fertilizantes; se analiza las formas de P en el suelo y su relación con la textura y por último se estudia la variabilidad espacial de las formas de P y su relación con la disponibilidad. Los resultados mostraron que las diferencias entre las regiones semiárida y subhúmeda se evidencian en mayor medida de acuerdo al año climático, de acuerdo a las diferencias entre las precipitaciones durante el ciclo del cultivo. Tanto el rendimiento en grano como el fósforo asimilado por planta estuvo asociado a todas las formas de P (disponible, orgánica e inorgánica) manifestando la importancia de considerar el equilibrio entre todas las formas de P. La materia orgánica del suelo y sus fracciones, son indicadores de los cambios que se producen por el sistema de manejo, pudiendo ser consideradas para evaluar diferencias en relación a los nutrientes que ciclan. No sólo es importante la cantidad de su aporte sino, específicamente con relación a las formas de P, puede mostrar cambios en su estructura que modificarán la forma en que este nutriente interactúe con la matriz del suelo. Por otra parte se pudo detectar, que la inclusión de pasturas en una rotación mantiene más bajos los niveles de fósforo disponible para las plantas, sin embargo ésta secuencia mantiene altos niveles de P moderadamente lábil, el cuál sería factible que se encuentre disponible durante el ciclo del cultivo. En el sudoeste bonaerense argentino existe un equilibrio sensible entre la disponibilidad de N, P y agua en el suelo que obliga a tener en cuenta los tres factores simultáneamente al momento de diseñar estrategias de fertilización. Al fertilizar suelos deficientes en P se logra hacer más eficiente el uso del agua, contrarrestando los efectos adversos de un año más seco. La evaluación de la eficiencia de uso del fertilizante debe tenerse en cuenta como una herramienta adicional, pero no es un parámetro determinante en la toma de decisiones. La textura determina las reservas P y el equilibrio de sus formas en los suelos de la región bonaerense. El P disponible, predominantemente inorgánico, está vinculado a la fracción fina del suelo. El nivel de P_o es mayor en la fracción gruesa de suelos con un alto contenido de fracciones finas. El de fraccionamiento del suelo por tamaño de partícula y las formas de P pudo simplificarse en un modelo conceptual para una mejor comprensión de los equilibrios de P en el suelo. La siembra directa produce una estratificación de las formas de P, modifica la proporción de las formas orgánicas en las diferentes profundidades y cambia la relación entre las formas orgánicas y las disponibles, y además produce mayor ciclado y exportación del P, manteniendo la fracción ocluida no disponible.

Resumo

Nas rexións semiáridas e subhúmedas o diagnóstico da fertilidade edáfica adquire un papel relevante, xa que os rendementos atópanse limitados pola falta de auga. Cambios nas prácticas de manexo como fertilización, rotacións e sementeira directa, alteran a dinámica de ciclado da materia orgánica nos solos e inflúen na dispoñibilidade de nutrientes. No suroeste bonaerense arxentino non existe información dispoñible sobre a dinámica do P en relación á produtividade, especialmente en sistemas de sementeira directa. Nesta tese avalíanse: variables edafoclimáticas en relación á dinámica do P no sistema solo-planta; o efecto de distintas rotacións de cultivos; a aplicación de fertilizantes; analízanse as formas de P no solo e a súa relación coa textura e, por último, estúdase a variabilidade espacial das formas de P e a súa relación coa dispoñibilidade. Os resultados mostraron que as diferenzas entre as rexións semiárida e subhúmeda evidéncianse en maior medida de acordo ao ano climático, conforme as diferenzas entre as precipitacións durante o ciclo do cultivo. Tanto o rendimento en gran como o fósforo asimilado pola planta estivo asociado a todas as formas de P (dispoñible, orgánica e inorgánica) manifestando a importancia de considerar o equilibrio entre todas as formas de P. A materia orgánica do solo e as súas fraccións son indicadores dos cambios que se producen polo sistema de manexo, podendo ser consideradas para avaliar diferenzas en relación aos nutrientes que ciclan. Non só é importante a cantidade da súa achega senón, especificamente con relación ás formas de P, pode mostrar cambios na súa estrutura que modificarán a forma en que este nutriente interactúe coa matriz do solo. Por outra banda, púidose detectar, que a inclusión de pastos nunha rotación mantén máis baixos os niveis de fósforo dispoñible para as plantas; con todo, esta secuencia mantén altos niveis de P moderadamente lábil, o cal sería factible que se atope dispoñible durante o ciclo do cultivo. No suroeste bonaerense arxentino existe un equilibrio sensible entre a dispoñibilidade de N, P e auga no solo que obriga a ter en conta os tres factores simultaneamente no momento de deseñar estratexias de fertilización. Ao fertilizar solos deficientes en P lógrase facer máis eficiente o uso da auga, contrarrestando os efectos adversos dun ano máis seco. A avaliación da eficiencia de uso do fertilizante debe terse en conta como unha ferramenta adicional, pero non é un parámetro determinante na toma de decisións. A textura determina as reservas de P e o equilibrio das súas formas nos solos da rexión bonaerense. O P dispoñible, predominantemente inorgánico, está vinculado á fracción fina do solo. O nivel de Po é maior na fracción grossa de solos cun alto contido de fraccións finas. O defraccionamiento do solo por tamaño de partícula e as formas de P puido simplificarse nun modelo conceptual para unha mellor comprensión dos equilibrios de P no solo. A sementeira directa produce unha estratificación das formas de P, modifica a proporción das formas orgánicas nas diferentes profundidades e cambia a relación entre as formas orgánicas e as dispoñibles, e ademais produce maior ciclado e exportación do P, mantendo a fracción ocluída non dispoñible.

Abstract

In semiarid and subhumid regions diagnosis of soil fertility acquires a relevant role, as yields are limited by the lack of water. Changes in management practices such as fertilization, rotations and no tillage, alter the dynamic cycling of organic matter in soil and influence nutrient availability. There is no information available about of Southwest of Buenos Aires in Argentina on the dynamics of P in relation to productivity. In this thesis are evaluated: soil and climate variables in relation to the dynamics of P in the soil-plant system; the effect of different crop rotations; fertilizer application; forms of P in soil and its relationship to texture and the spatial variability of the forms of P and for the availability is studied. The results showed that the differences between the semiarid and subhumid regions are evident further year according to climate, according to differences between rainfalls during the crop cycle. Both grain yield and phosphorus assimilated by plant was it associated with all forms of P (available, organic and inorganic) demonstrating the importance of considering the equilibrium between all forms of P. The soil organic matter and its fractions are indicators of changes that are caused by the crop system, which may be considered to evaluate differences relative to the nutrients that cycle. Not only is the amount of your contribution but specifically in relation to the forms of P, may show changes in their structure that will change the way the nutrient interacts with the soil matrix. On the other hand it could be detected, that the inclusion of pasture rotation maintains lower levels of phosphorus available to plants, but this sequence maintains high levels of P moderately labile, which would be likely to be available during the cycle culture. Southwest of Buenos Aires in Argentina there is a sensible equilibrium between the availability of N, P and soil water that entails taking into account the three factors simultaneously when designing strategies fertilization. To fertilize P deficient soils is achieved more efficient water use, offsetting the adverse effects of a dry year. The evaluation of the efficiency of fertilizer use should be considered as an additional tool, but not a determining parameter in making decisions. The texture determines P reserves and balance of its forms in soils. Available P, predominantly inorganic, is linked to the fine fraction of the soil. The level P_o is greater in the coarse fraction of soil with a high content of fine fractions. Fractionating the soil by particle size and forms of P could be simplified into a conceptual model for a better understanding of the balance of P in soil. No tillage produces a stratification forms of P, modifies the proportion of organic forms at different depths and changes the relationship between the organic forms and available, and produces more export P cycling and maintaining the occluded fraction available.

Agradecimientos	iii
Resumen	v
Resumo	vi
Abstract	vii
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xv
Organización de la tesis	1
Capítulo 1: Introducción general	2
1.1. INTRODUCCIÓN	3
1. 1. 1. Fósforo disponible	4
1. 1. 1. 1 Extracciones químicas convencionales.....	4
1. 1. 1. 2. Determinación de fósforo	5
1. 1. 2. Transformación de P	7
1. 1. 2. 1. Formas de fósforo edáfico.....	7
1. 1. 2. 2. Modelo conceptual de la transformación P en el suelo.....	9
1. 1. 3. Impacto del manejo agronómico sobre las fracciones y la transformación del P edáfico.....	10
1. 1. 3. 1. Efectos de la labranza.....	10
1. 1. 3. 2. Efectos de los sistemas de cultivo	11
1. 1. 3. 3. Efectos de la fertilización.....	12
1. 1. 3. 4. Efectos de textura en las fracciones y transformación de P edáfico.....	13
1. 1. 3. 5. Distribución de las fracciones de P en el suelo.....	14
1.2. HIPÓTESIS GENERAL	16
1.3. OBJETIVOS GENERALES	16

Capítulo 2: Dinámica del fósforo en la relación suelo-planta en sistemas productivos del sudoeste bonaerense.....	17
2.1. INTRODUCCIÓN.....	18
2.2. Hipótesis específica.....	21
2.3. Objetivos específicos.....	21
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
2. 4. 1. Sitios experimentales.....	21
2. 4. 2. Determinaciones analíticas.....	23
2. 4. 3. Fraccionamiento físico del suelo.....	24
2. 4. 4. Materia seca y grano.....	26
2. 4. 5. Análisis estadísticos.....	27
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
2. 5. 1. Condiciones climáticas.....	29
2. 5. 2. Variabilidad entre regiones.....	31
2. 5. 3. Análisis de componentes principales.....	33
2.6. CONCLUSIÓN.....	44
Capítulo 3: Formas de fósforo edáfico en secuencias de cultivos bajo siembra directa en el centro sur bonaerense.....	45
3.1. INTRODUCCIÓN.....	46
3.2. Caracterización de la materia orgánica y las sustancias húmicas.....	49
3. 2. 1. Espectroscopia UV-Visible.....	49
3. 2. 2. Espectroscopia IR.....	50
3.3. Hipótesis específica.....	53
3.4. Objetivo específico.....	53
3.5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	53
3. 5. 1. Secuencias de cultivo.....	54
3. 5. 2. Determinaciones analíticas.....	56
3. 5. 3. Análisis de espectros.....	57

3. 5. 3. 1. UV-Visible	57
3. 5. 3. 2. Infrarrojo	58
3.5.4. Análisis estadístico	58
3.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
3. 6. 1. Valores de pH.....	58
3. 6. 2. Contenido de las formas de P.....	59
3. 6. 3. Espectroscopia UV-visible	61
3. 6. 4. Espectroscopia Infrarroja.....	64
3.7. CONCLUSIÓN.....	70
<i>Capítulo 4: Fertilización con P y N en trigo bajo siembra directa en el sudoeste bonaerense argentino</i>	71
4.1 INTRODUCCIÓN	72
4.2. Hipótesis específica.....	73
4.3. Objetivo específico	73
4.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	73
4. 4. 1. Sitio experimental.....	73
4. 4. 2. Determinaciones analíticas.....	75
4. 4. 3. Materia seca y grano	76
4. 4. 4. Parámetros de rendimiento y componentes de calidad	77
4. 4. 5. Análisis estadístico.....	78
4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	78
4. 5. 1. Características generales	78
4. 5. 2. Rendimiento en grano y materia seca	79
4. 5. 3. Parámetros de rendimiento	84
4. 5. 4. Eficiencia aparente de uso del P.....	89
4. 5. 5. Análisis de componentes principales	91
4.6. CONCLUSIÓN.....	99

Capítulo 5: Efecto de la textura sobre los contenidos y distribución del Fósforo edáfico en la región Semiárida Pampeana	100
5.1. INTRODUCCIÓN	101
5.2. Hipótesis específica	103
5.3. Objetivos específicos	103
5.4. MATERIALES Y MÉTODOS	103
5. 4. 1. Sitio experimental	104
5. 4. 2. Determinaciones analíticas	104
5. 4. 3. Determinaciones físicas del suelo	106
5. 4. 4. Análisis estadístico	107
5. 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	107
5. 5. 1. El fósforo en el suelo	107
5. 5. 2. El fósforo en la fracción fina del suelo	108
5. 5. 3. El fósforo en el suelo fracción gruesa	110
5. 5. 4. Relación entre las diferentes formas de P y la disponibilidad	111
5. 5. 5. Un modelo conceptual propuesto	116
5. 6. CONCLUSIÓN	118

Capítulo 6: Estratificación de las formas de fósforo en Siembra Directa y su relación con la disponibilidad para los cultivos	119
6.1 INTRODUCCIÓN	120
6.2. Hipótesis específica	121
6.3. Objetivo específico	121
6.4. MATERIALES Y MÉTODOS	122
6. 4. 1. Sitio experimental	122
6. 4. 2. Determinaciones analíticas	122
6.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	123
6. 5. 1. Contenido de las formas de P	123
6. 5. 2. Efecto de largo plazo sobre el P edáfico	126

6.6. CONCLUSIONES	130
7. CONCLUSIONES GENERALES	131
8. BIBLIOGRAFÍA	134

Índice de Tablas

TABLA 1. PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LOS SITIOS MUESTREADOS PARA LA PROFUNDIDAD DE 0-20 CM Y 0-60 CM PARA NITRÓGENO INORGÁNICO (AÑO 2010)	24
TABLA 2. TIPO DE SUELO, CARACTERÍSTICAS GENERALES Y CLIMÁTICAS (VALORES PROMEDIOS) DE LOS SITIOS MUESTREADOS.....	29
TABLA 3. COMPARACIÓN DE MEDIAS DE LAS REGIONES SEMIÁRIDA Y SUBHÚMEDA PARA CADA VARIABLE ANALIZADA EN LOS TRES AÑOS DE ESTUDIO.....	32
TABLA 4. MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE PARA RENDIMIENTO EN GRANO Y LAS FORMAS DE FÓSFORO	33
TABLA 5. AUTOVALORES ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DATOS ESTANDARIZADOS	35
TABLA 6. AUTOVECTORES ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DATOS ESTANDARIZADOS.....	36
TABLA 7. CORRELACIÓN DE PEARSON: COEFICIENTES\PROBABILIDADES	37
TABLA 8. AUTOVALORES ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	38
TABLA 9. AUTOVECTORES ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	39
TABLA 10. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	40
TABLA 11. AUTOVECTORES ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	40
TABLA 12. AUTOVALORES DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	42
TABLA 13. AUTOVECTORES DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	43
TABLA 14. BANDAS DE IR Y SU ASIGNACIÓN.....	52
TABLA 15. CULTIVOS INTERVINIENTES EN ENSAYO DE CULTIVOS EN SIEMBRA DIRECTA	55
TABLA 16. SECUENCIA DEL FRACCIONAMIENTO Y LA DESIGNACIÓN DE LAS FRACCIONES ANALIZADAS EN EL FRACCIONAMIENTO SECUENCIAL DE HEDLEY	56
TABLA 17. FRACCIONES DE FÓSFORO EN LOS SUELOS ESTUDIADOS	60
TABLA 18. CONTENIDO DE CARBONO TOTAL (C), CARBONO DE ÁCIDO FÚLVICO (CAF), ABSORCIÓN A 280 NM Y RELACIÓN DE ABSORCIÓN (E_4/E_6 Y E_2/E_3).....	63
TABLA 19. RELACIÓN DE LAS INTENSIDADES DE ABSORBANCIA DE LOS PICOS EN LOS ESPECTROS INFRARROJOS OBTENIDOS CON LOS EXTRACTOS ANALIZADOS A DIFERENTES MANEJOS Y PROFUNDIDAD	67
TABLA 20. UBICACIÓN, CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA Y TEMPERATURA DE LOS SITIOS	75
TABLA 21. PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS SUELOS (0-20 CM) Y LLUVIAS DURANTE EL CICLO DEL TRIGO	79
TABLA 22. COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN CUADRÁTICA AJUSTADA (b_0 , b_1 Y b_2), PRODUCTO MARGINAL (PMG), DOSIS PARA RENDIMIENTO MÁXIMO EN GRANOS ($DM_{\text{MÁX}}$) PARA CADA SITIO.	80
TABLA 23. EFICIENCIA DEL USO APARENTE DEL FÓSFORO PARA CADA DOSIS DE P APLICADO SEGÚN CADA DOSIS DE N.....	89

TABLA 24. AUTOVALORES DE COMPONENTES PRINCIPALES EN LAS QUE INTERVIENEN TODAS LAS VARIABLES ANALIZADAS DEL SISTEMA EN ESTUDIO	92
TABLA 25. AUTOVECTORES DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS PARA LOS DOS PRIMEROS COMPONENTES PRINCIPALES.....	92
TABLA 26. AUTOVALORES DE COMPONENTES PRINCIPALES EN LAS QUE INTERVIENEN TODAS LAS VARIABLES EN RELACIÓN AL RENDIMIENTO EN GRANO	94
TABLA 27. AUTOVECTORES DE COMPONENTES PRINCIPALES EN LAS QUE INTERVIENEN TODAS LAS VARIABLES EN RELACIÓN AL RENDIMIENTO EN GRANO.....	94
TABLA 28. AUTOVALORES DE COMPONENTES PRINCIPALES EN LAS QUE INTERVIENEN TODAS LAS VARIABLES EN RELACIÓN AL P EN MATERIA SECA	95
TABLA 29. AUTOVECTORES DE COMPONENTES PRINCIPALES EN LAS QUE INTERVIENEN TODAS LAS VARIABLES ANALIZADAS DEL SISTEMA EN ESTUDIO EN RELACIÓN AL P EN MATERIA SECA	96
TABLA 30. FÓSFORO DISPONIBLE (Pe), TEXTURA Y PH DE LOS SUELOS ESTUDIADOS	106
TABLA 31. VALORES MEDIOS PONDERADOS (0-20 CM) DE LAS FORMAS DE FÓSFORO DISPONIBLES (Pe), ORGÁNICO (Po), INORGÁNICO (Pi) Y TOTAL (Pt) DE LOS SITIOS EXPERIMENTALES ANALIZADOS.....	123
TABLA 32. CONTENIDO DE Po, Pi Y Pt EN UN SUELO BAJO SD Y LC.	127
TABLA 33. DIFERENCIA TOTAL Y ANUAL EN EL CONTENIDO DE Po, Pi Y Pt ENTRE SISTEMAS DE LABRANZA....	128

Índice de Figuras

FIGURA 1. MODELO CONCEPTUAL DE LAS TRANSFORMACIONES DEL P EN EL SUELO (ADAPTADO DE TIESSEN, 1984)	10
FIGURA 2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS SITIOS MUESTREADOS EN EL SUDOESTE BONAERENSE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA	22
FIGURA 3. ESQUEMA DE LA TÉCNICA DE FRACCIONAMIENTO FÍSICO GRANULOMÉTRICO	25
FIGURA 4. PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES DURANTE TODOS LOS AÑOS ESTUDIADOS EN AMBIENTE A) Y B) SEMIÁRIDO Y C) Y D) SUBHÚMEDO	30
FIGURA 5. BI-PLOT DE COMPONENTES PRINCIPALES CP1 Y CP2 PARA TODAS LAS VARIABLES ESTUDIADAS...	34
FIGURA 6. BI-PLOT DE COMPONENTES PRINCIPALES CP1 Y CP3 PARA TODAS LAS VARIABLES ESTUDIADAS...	34
FIGURA 7. BILOT DE COMPONENTES PRINCIPALES EN RELACIÓN AL RENDIMIENTO EN GRANO	38
FIGURA 8. BILOT DE COMPONENTES PRINCIPALES DE TODAS LAS VARIABLES EN RELACIÓN AL FÓSFORO EN MATERIA SECA	41
FIGURA 9. BILOT DE COMPONENTES PRINCIPALES USANDO TODAS LAS VARIABLES Y CARBONO PARTICIONADO SEGÚN SU LABILIDAD EN RELACIÓN AL RENDIMIENTO EN GRANO	41
FIGURA 10. DISEÑO EXPERIMENTAL DEL ENSAYO DE ROTACIONES BAJO SIEMBRA DIRECTA.	54
FIGURA 11. VALORES DE PH A DIFERENTES PROFUNDIDADES Y PARA CADA SITUACIÓN DE MANEJO ANALIZADA.	59
FIGURA 12. ESPECTROS IR DE LOS EXTRACTOS DE PO _{Na} PARA LAS MUESTRAS ESTUDIADAS A LA PROFUNDIDAD DE 0-5 CM	65
FIGURA 13. ESPECTROS IR DE LOS EXTRACTOS DE PO _{Na} PARA LAS MUESTRAS ESTUDIADAS A LA PROFUNDIDAD DE 5-10 CM	66
FIGURA 14. MATERIA SECA TOTAL AÉREA DEL TRIGO EN FUNCIÓN DE LA DOSIS DE P APLICADA, SEGÚN CADA DOSIS DE NITRÓGENO (25, 50, 100 KG N HA ⁻¹)	83
FIGURA 15. FÓSFORO EN MATERIA SECA EN FUNCIÓN DE LA DOSIS DE P APLICADA, SEGÚN CADA DOSIS DE NITRÓGENO (0, 25, 50, 100 KG N HA ⁻¹)	84
FIGURA 16. ESPIGAS POR METRO CUADRADO EN FUNCIÓN DE LA DOSIS DE P APLICADA, SEGÚN CADA DOSIS DE NITRÓGENO (0, 25, 50, 100 KG N HA ⁻¹)	85
FIGURA 17. PESO DE MIL GRANOS EN FUNCIÓN DE LA DOSIS DE P APLICADA, SEGÚN CADA DOSIS DE NITRÓGENO (0, 25, 50, 100 KG N HA ⁻¹)	86
FIGURA 18. GRANOS POR ESPIGAS EN FUNCIÓN DE LA DOSIS DE P APLICADA, SEGÚN CADA DOSIS DE NITRÓGENO (0, 25, 50, 100 KG N HA ⁻¹)	87

FIGURA 19. ÍNDICE DE COSECHA FUNCIÓN DE LA DOSIS DE P APLICADA, SEGÚN CADA DOSIS DE NITRÓGENO (0, 25, 50, 100 KG N HA ⁻¹)	88
FIGURA 20. FÓSFORO EN GRANO EN FUNCIÓN DE LA DOSIS DE P APLICADA, SEGÚN CADA DOSIS DE NITRÓGENO (0, 25, 50, 100 KG N HA ⁻¹).....	90
FIGURA 21. COMPONENTES PRINCIPALES EN LAS QUE INTERVIENEN TODAS LAS VARIABLES ANALIZADAS DEL SISTEMA EN ESTUDIO.....	91
FIGURA 22. COMPONENTES PRINCIPALES EN LAS QUE INTERVIENEN TODAS LAS VARIABLES ANALIZADAS EN RELACIÓN AL RENDIMIENTO EN GRANO	93
FIGURA 23. COMPONENTES PRINCIPALES EN LAS QUE INTERVIENEN TODAS LAS VARIABLES ANALIZADAS DEL SISTEMA EN RELACIÓN AL P EN MATERIA SECA	95
FIGURA 24. ÁRBOL DE REGRESIÓN DE LOS RENDIMIENTOS DE TRIGO, EN GRANO (A), Y EN MATERIA SECA (B), EN FUNCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN EL CICLO DEL CULTIVO. SE INDICA LA VARIABLE EXPLICATIVA Y SU VALOR CRÍTICO Y EL NÚMERO DE DATOS QUE INTEGRA EL GRUPO	97
FIGURA 25. ÁRBOL DE REGRESIÓN DE LOS RENDIMIENTOS EN GRANO DEL CULTIVO DE TRIGO Y EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA, EN FUNCIÓN DE LAS DOSIS DE FÓSFORO APLICADAS. SE INDICA LA VARIABLE EXPLICATIVA Y SU VALOR CRÍTICO Y EL NÚMERO DE DATOS QUE INTEGRA EL GRUPO	97
FIGURA 26. CONTENIDO DE FÓSFORO EXTRAÍBLE (PE, AMARILLO) ORGÁNICO (PO, ROJO), INORGÁNICO (PI, VERDE) Y TOTAL (PT, AZUL) EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE ARCILLA+ LIMO (N=27)	108
FIGURA 27. CONTENIDO DE FÓSFORO ORGÁNICO (PO, ROJO), INORGÁNICO (PI, VERDE) Y TOTAL (PT, AZUL) EN LA FRACCIÓN FINA DEL SUELO (0- 100 μM) FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE ARCILLA+ LIMO (N=27)	109
FIGURA 28. CONTENIDO DE FÓSFORO ORGÁNICO (PO), INORGÁNICO (PI) Y TOTAL (PT) DE LA FRACCIÓN GRUESA (> 100 μM- 2MM) EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE LIMO MÁS ARCILLA.....	111
FIGURA 29. RELACIÓN ENTRE EL P EXTRAÍBLE (PE) Y LOS CONTENIDOS DE P ORGÁNICO (PO), INORGÁNICO (PI) Y TOTAL (PT) DEL SUELO.....	112
FIGURA 30. RELACIÓN ENTRE EL P EXTRAÍBLE (PE) Y LOS CONTENIDOS DE P ORGÁNICO (PO), INORGÁNICO (PI) Y TOTAL (PT) DE LA FRACCIÓN FINA	113
FIGURA 31. RELACIÓN ENTRE EL P EXTRAÍBLE (PE) Y LOS CONTENIDOS DE P ORGÁNICO (PO), INORGÁNICO (PI) Y TOTAL (PT) DE LA FRACCIÓN GRUESA.....	113
FIGURA 32. RELACIÓN ENTRE EL CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT), ASOCIADO A LA FRACCIÓN MINERAL (COM) Y PARTICULADO (COP) Y EL P EXTRAÍBLE (PE)	114
FIGURA 33. COMPONENTES PRINCIPALES EN LAS QUE INTERVIENEN LAS VARIABLES DE FÓSFORO	115
FIGURA 34. MODELO CONCEPTUAL DE FLUJO DE LAS FORMAS DE FÓSFORO EN EL SUELO	117
FIGURA 35. CONTENIDO DEL FÓSFORO DISPONIBLE (PE) EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE SUELO EN CUATRO LOTES DE HOGAR FUNKE	124

FIGURA 36. CONTENIDO DEL FÓSFORO INORGÁNICO (Pi) EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE SUELO EN LOTES DE HOGAR FUNKE.	124
FIGURA 37. CONTENIDO DE FÓSFORO ORGÁNICO (Po) EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE SUELO, EN DOS LOTES DE CUMELÉN	125
FIGURA 38. VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE PE EN FUNCIÓN DE LAS RELACIONES Po/Po+I DE TODOS LOS LOTES ANALIZADOS.....	125
FIGURA 39. CONTENIDO DE P DE LOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS EN LABRANZA CONVENCIONAL (KG/HA) Y FLUJOS RELATIVOS A LA SIEMBRA DIRECTA (KG/HA/AÑO).....	129

Organización de la tesis

La tesis está organizada en capítulos que analizan los diferentes aspectos del fósforo en el sistema suelo-planta, a saber: una introducción general, hipótesis y objetivos del estudio (Capítulo 1); dinámica del fósforo en la relación suelo-planta en lotes del sudoeste bonaerense de Argentina (Capítulo 2), el efecto de la rotación de cultivos en siembra directa sobre los equilibrios de las formas de P (Capítulo 3), ensayos de fertilización fosfórica en combinación con nitrógeno (Capítulo 4). El efecto de la textura sobre las formas de fósforo (Capítulo 5) y el efecto de la estratificación de la siembra directa sobre las formas de P (Capítulo 6); finalmente se presentan las consideraciones finales y las perspectivas del estudio (Capítulo 7). Los capítulos 2, 3, 4, 5 y 6 se redactaron según el siguiente esquema: introducción, materiales y métodos, resultados y discusión, y conclusiones; las fotos que preceden al título de estos capítulos corresponden específicamente a sitios de muestreos analizados en el capítulo donde se encuentra ubicada la foto. Toda la bibliografía consultada en la tesis se encuentra al final de la misma.



CAPITULO 1

Introducción general

1. 1. INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es considerado el más importante de los nutrientes del suelo después del nitrógeno (N) para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que juega un papel relevante en su estructura y en la transformación de la energía. También ha sido reconocido como un contaminante potencial de las aguas (Anderson, 1980). El estudio de la dinámica de P en los suelos y su ciclado en los agroecosistemas ha adquirido creciente interés debido a su contribución a los temas ambientales, agronómicos y económicos actuales (Sharpley & Tunney, 2000). El análisis del P edáfico implica la extracción de P de los suelos con extractantes químicos seguida de una cuantificación de P en la solución de extracción. Se requiere de un análisis del suelo para determinar la cantidad de P que puede contribuir al crecimiento de los cultivos o a la contaminación del agua. Desde el punto de vista de la disponibilidad para las plantas, el P del suelo se puede dividir en fuentes funcionales de diferentes biodisponibilidad (Tiessen *et al.*, 1982). La información sobre la transformación de P en el suelo entre los diferentes pools es útil para predecir la biodisponibilidad del P, así como el riesgo de transferencia del P superficial del suelo a las aguas. Sin embargo, la transformación de P en el suelo no ha recibido, de acuerdo a su relevancia, la atención adecuada. Esto puede ser atribuible a dificultades asociadas con la separación de las fracciones de P inorgánico (Pi) y P orgánico (Po) y la identificación de la composición de pools de Po del suelo. En la actualidad, tal investigación es posible con un mejorado procedimiento de fraccionamiento secuencial y la adopción de técnicas avanzadas como espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN), entre otras.

1. 1. 1. Fósforo disponible

1. 1. 1. 1 Extracciones químicas convencionales

El P disponible es la cantidad de P en los suelos que se pueden extraer o es extraído por las raíces de las plantas y utilizado por la misma para su crecimiento y desarrollo. Es un parámetro cuantitativo y está influenciado por las condiciones del suelo existentes en un momento particular y por la capacidad de la planta para extraer P de la solución del suelo (Raven & Hossner, 1993; Holford, 1997). Sin embargo, se suele usar el P disponible como sinónimo de disponibilidad de P, un parámetro intensivo que no refleja la cantidad o concentración de P disponible (White & Beckett, 1964).

La disponibilidad de P para ser asimilado por la planta no es una función de su concentración en el suelo, sino de su tasa de liberación desde la superficie del suelo a la solución del mismo (Abdu, 2006). El P disponible está compuesto por el P de la solución del suelo y se repone por P que entra a la solución por desorción o disolución de P_i asociada con la fase sólida del suelo o por la mineralización de P_o (Hedley *et al.*, 1982). La medición de P disponible, por tanto, debe tener en cuenta la cantidad y velocidad de liberación de P de la fase sólida. Se han desarrollado muy pocos métodos apropiados para cuantificarlo.

Las técnicas de dilución isotópica (^{32}P) permiten a los investigadores medir teóricamente los procesos de mineralización de P_o , la disolución de minerales insolubles y la desorción de P total, y podrían probablemente ser usadas para este propósito. Pero los errores involucrados en la medición de las tasas de cambio hacen que sea difícil extrapolar la liberación continua (o dilución isotópica) a una escala temporal correspondiente a las épocas de cultivo y a los ciclos de crecimiento en condiciones de campo (Tran *et al.*, 1988; Sharpley *et al.*, 1994). Por lo tanto, se tienen que superar algunas limitaciones para dar resultados que tengan aplicación práctica.

Los análisis de P en el suelo más usados son extracciones químicas que utilizan reactivos para extraer el P disponible en los suelos. El agua es probablemente el primer extractante que se utiliza para medir P en suelos. Las

pequeñas cantidades de P del suelo extraídas por el agua y las dificultades relacionadas con la química de su análisis, llevaron a limitar el uso del agua como agente de extracción. Bray & Kurtz (1945) utilizaron una combinación de HCl y NH_4F para disolver y extraer las formas de P fácilmente solubles en ácido, como Al y Fe-fosfatos. En 1953, Mehlich introdujo una combinación de ácidos HCl y H_2SO_4 (Mehlich 1) para extraer P de los suelos de la región centro-norte de los EE.UU. A principios de 1980, Mehlich modificó su test inicial y desarrolló una extracción multi-elemento (Mehlich 3) que resultó adecuada para extraer P y otros elementos en los suelos ácidos y neutros (Mehlich, 1984). Olsen *et al.* (1954) introdujo bicarbonato de sodio 0,5 M solución (NaHCO_3) a un pH de 8,5 para extraer P de suelos calcáreos, alcalinos neutros.

Los análisis de P edáfico de rutina no dan una idea del nivel de P disponible para la planta ya que los reactivos químicos pueden solubilizar P no lábil. Por ejemplo, los extractantes ácidos Bray & Mehlich I pueden disolver Al y Fe-fosfatos, mientras que el extractante de Olsen elimina P disuelto y adsorbido en carbonato de calcio y óxido de Fe (Mallarino, 1997). Por otra parte, estos extractantes químicos no son aplicables a todo tipo de suelos (Myers *et al.*, 2005).

Los extractantes Bray y Mehlich 3 fueron diseñados para extraer P de suelos no calcáreos, mientras que el método de Olsen lo extrae en suelos no ácidos. Además, esos test convencionales de P edáfico derivado de los suelos minerales no necesariamente son aplicables a los suelos orgánicos, aunque algunas pruebas de P en el suelo se están adoptando para hacer recomendaciones agronómicas de rutina en suelos con estiércol (Castillo & Wright, 2008; Wright, 2009).

1. 1. 1. 2. Determinación de fósforo

Generalmente, el análisis de P extraído se hace por colorimetría, sobre todo el método de Murphy & Riley (1962). Un ion específico reacciona con reactivos de desarrollo de color para formar un colorido complejo (por ejemplo, azul antimonio fosfo-molibdato), entonces la absorción de luz por el complejo se

detecta a una longitud de onda específica. Los procedimientos colorimétricos son sensibles, reproducibles y permiten el análisis automatizado. Además, los métodos pueden ser adaptados a las muestras de agua, soluciones y extractos digeridos (Pierzynski *et al.*, 2008).

La espectrofotometría por plasma de acoplamiento inductivo (ICP) también se utiliza para la determinación de P, sobre todo en los test ofrecidos por laboratorios públicos y/o comerciales.

El uso de ICP se ha vuelto más popular a raíz del incremento del uso de agentes de extracción de múltiples elementos del suelo. Los resultados de ICP no siempre son comparables directamente con los de análisis colorimétricos (Pierzynski *et al.*, 2008), el ICP estima el P total en una solución mientras los procedimientos colorimétricos miden el P que puede reaccionar con los reactivos de desarrollo de color.

Por otra parte, hay ciertas limitaciones que deben ser considerados al evaluar los datos generados por ICP, tales como los efectos de la matriz, la interferencia espectral, etc. (de Boer *et al.*, 1998).

La resonancia magnética nuclear (RMN) es un fenómeno físico basado en la propiedad magnética del núcleo atómico. Los núcleos magnéticos, como ^1H , ^{13}C y ^{31}P , pueden absorber frecuencia de radio cuando se coloca la muestra en un campo magnético con una fuerza específica, que se describe como la resonancia del núcleo. Diferentes átomos de una molécula resuenan a frecuencias diferentes a una intensidad de campo dada. Este es un poderoso método que permite a los investigadores determinar la estructura de los compuestos químicos. El uso de la solución de espectroscopia ^{31}P RMN ha permitido identificar las formas de P en los suelos y en los materiales residuales, y confirmar formas de P estimados por los extractantes químicos usados, tales como esquemas de fraccionamiento secuencial. Esta técnica determina en forma más detallada las formas orgánicas de P en los suelos y materiales residuales (Zhang *et al.*, 1999; Turner & Leytem, 2008). Descripciones de estos enfoques se detallan por Beauchemin *et al.* (2003) y Shober *et al.* (2006). Estos avances analíticos han sido críticos en la obtención

de una más detallada comprensión de la transformación y productos de reacción del P en el suelo después de la aplicación de residuos. Esta información ha ayudado a evaluar el destino, la reactividad, el comportamiento concreto de las formas de P y las implicancias ambientales de la aplicación al suelo de materiales como biosólidos y estiércol de animales (Pierzynski *et al.*, 2008).

1. 1. 2. Transformación de P

1. 1. 2. 1. Formas de fósforo edáfico

Desde el punto de vista de su disponibilidad para las plantas, el P edáfico está dividido en tres fracciones funcionales las cuales incluyen tanto formas inorgánicas como orgánicas: (1) formas de P muy lábiles, (2) P moderadamente lábiles y (3) P escasamente solubles (Tiessen *et al.*, 1982). Debido a las dificultades técnicas relacionadas con el aislamiento de compuestos de P específicas de los suelos, los recursos financieros, la práctica y las limitaciones de seguridad en el uso de radioisótopos de P, y acceso limitado a la espectroscopia de RMN, la mayoría de los estudios de campo sobre la transformación de P en los suelos debe confiar en métodos alternativos para medir los cambios en las fracciones de P edáfico. Una técnica es la separación secuencial del P del suelo en varias fracciones P_i y P_o sobre la base de su biodisponibilidad y asociaciones biológicas. Este método secuencial de extracción fue presentado originalmente por Chang & Jackson (1957) y más tarde fue modificado por Petersen & Corey (1966) y Williams *et al.* (1967). En pocas palabras, este procedimiento secuencial de P del suelo utiliza NH_4Cl para extraer P_i lábil, NH_4F para disolver específicamente el P_i seguido por $NaOH$ para extraer el P_i asociado a Fe y por citrato de ditionito reductor de formas de P_i ocluidas. El HCl disuelve P_i unido al Ca y el residuo final se analiza mediante fusión Na_2CO_3 para estimar el P total. Sin embargo, el procedimiento presenta muchos problemas de interpretación. P_i se vuelve a precipitar durante la extracción con fluoruro, la separación de P_i asociada a Al-Fe y no es confiable y

el reductor soluble o Pi 'ocluido' es un pool mal definido. Además se ignora la fracción Po (Williams *et al.*, 1967).

Un esquema de fraccionamiento de P mejorado fue desarrollado por Hedley *et al.* (1982). Esta extracción secuencial tiene el objetivo de cuantificar Pi lábil, Pi asociado a Ca, Pi asociado a Fe y Al, así como formas lábiles y más estables de Po. Con este procedimiento mejorado, el P del suelo se extrae inicialmente con una resina de intercambio aniónico (resina-P), y luego con NaHCO_3 ($\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ / Po). Resina-P y $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ se supone que son las fracciones fácilmente disponible para las plantas y, en general, es considerado como el P que está adsorbido en carbonatos, sesquióxidos o minerales cristalinos (Mattingly, 1975). El P moderadamente lábil, sorbido en minerales de Fe y Al amorfos, y el "P protegido" que se ocluye dentro de los agregados, se extrae luego con NaOH (NaOHPi /Po). Los minerales de tipo P de apatita escasamente solubles se extraen con HCl (HCl-P), y el P residual se disuelve por un H_2O_2 (o $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) - H_2SO_4 digestión (residual $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-P}$). La fracción $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-P}$, químicamente estable y no fácilmente disponible para las plantas, incluye ya sea formas orgánicas o inorgánicas o ambas. Este enfoque es actualmente el único que evalúa ambos, Pi y Po disponibles en suelos, con un éxito moderado (Tiessen & Moir, 1993), aunque las modificaciones al procedimiento son a menudo específicas de los estudios. Por ejemplo, el uso de agua desionizada en lugar de resinas de intercambio aniónico para extraer fácilmente lábil P. Este método fue probado para establecer la efectos de las prácticas de cultivo a largo plazo sobre Pi y Po fracciones y transformación (O'Halloran *et al.*, 1987a; Richards *et al.*, 1995; Tran & N'dayegamiye, 1995; Zhang & Mackenzie, 1997a, 1997c; Zhang *et al.*, 2004; Zheng *et al.* 2001, 2002, 2004a) y para evaluar el estado de P del suelo en suelos agrícolas (Simard *et al.*, 1995; Beauchemin & Simard, 2000; Zheng *et al.*, 2004b). También fue valioso para cuantificar los cambios en fracciones de P en el suelo en incubaciones a corto plazo (Hedley *et al.*, 1982; Iyamuremye *et al.*, 1996) y en experimentos de efecto invernadero (Ivarsson, 1990). Además, ofrece un índice útil de la importancia relativa de ciclo biológico del P frente a procesos

geoquímicos en los suelos en diferentes etapas de desarrollo (Cross & Schlesinger, 1995).

1. 1. 2. 2. Modelo conceptual de la transformación P en el suelo

La transformación P en los suelos implica complejos procesos mineralógicos, químicos y biológicos (**Figura 1**). El ciclo del P en el suelo es un sistema dinámico bajo la influencia de transformaciones químicas a largo plazo y cambios a corto plazo debido a la absorción por la planta. La lixiviación de bases, la eliminación de carbonatos y el incremento de la actividad Fe y Al que acompañan el desarrollo de los suelos provoca un cambio de formas Pi primarias a secundarias y también influyen en la estabilización de la materia orgánica y su Po asociado (Walker & Syers, 1976). La abundancia y la actividad de las diversas formas Pi y el volumen de ciclado de Po en los suelos controla la reposición de P lábil a la solución después de la absorción por la planta. El Pi superficial amorfo repone el pool de P lábil mientras las especies cristalinas más estables actúan como una fuente o depósito a largo plazo de P, dependiendo de otras propiedades de los suelos tales como pH (Murrman & Peech, 1969). De esta manera, el Pi extraíble con hidróxido o ácido (NaOH o HCl-Pi) puede actuar como el factor de cantidad que amortigua las formas de P más lábiles. El Po puede realizar una función similar controlando los procesos de mineralización-inmovilización (McGill & Cole, 1981). El carbono orgánico del suelo tiene un papel importante de promoción de procesos relacionados en la transformación P, a través de su contribución como fuente de energía para la actividad microbiana (Stevenson, 1988). Los microorganismos están fuertemente involucrados en la transformación de P entres maneras diferentes:

(1) por la descomposición de compuestos de Po, con liberación de Pi disponible;

(2) por la inmovilización de P disponible en el material celular; y

(3) mediante la promoción de la solubilización de formas minerales fijas o insolubles de P, a través de la producción de agentes quelantes.

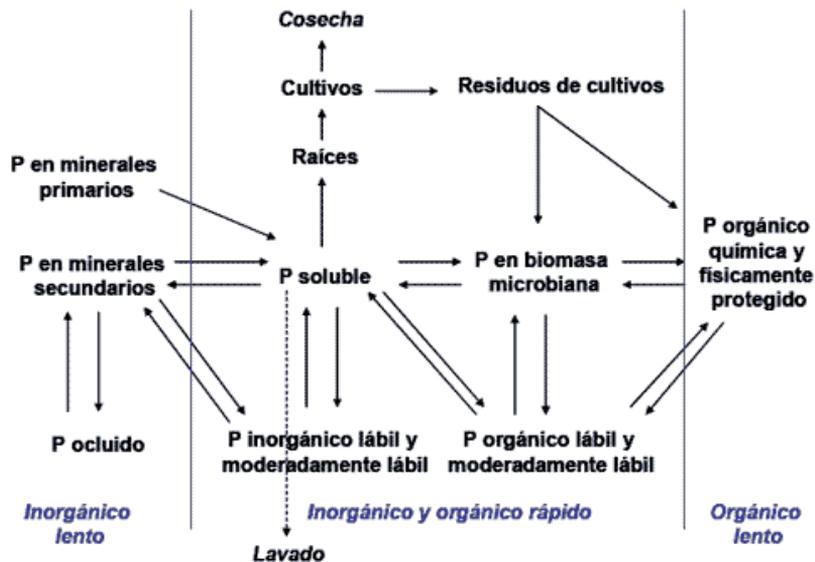


Figura 1. Modelo conceptual de las transformaciones del P en el suelo (Adaptado de Tiessen, 1984)

1. 1. 3. Impacto del manejo agronómico sobre las fracciones y la transformación del P edáfico.

1. 1. 3. 1. Efectos de la labranza

Los impactos de la labranza sobre las formas de P y su disponibilidad han sido objeto de muchas investigaciones. Hubo un aumento en el contenido total y formas lábiles de P en la capa superficial del suelo debido a operaciones de no laboreo (Cruse *et al.*, 1983; Weill *et al.*, 1990; Selles *et al.*, 1997). Esto se atribuye al aumento de la actividad microbiana y a la mineralización de Po en el suelo (Follett & Peterson, 1988) o a una falta de mezcla del P del suelo con el P del fertilizante, así como a la fijación por coloides del suelo (Sweeney, 1993; Selles *et al.*, 1997, 1999). Como resultado, el P extraíble en suelos superficiales aumenta con la siembra directa en comparación con la labranza

convencional. El P_o aumenta generalmente cerca la parte inferior de la capa arable por la labranza debido a la incorporación de residuos de cosecha (Weill *et al.*, 1990). Sin embargo, O'Halloran *et al.* (1987a) no observaron una diferencia significativa en el tamaño de las fracciones de P en el suelo con excepción de NaOH- P_o entre un suelo desnudo y suelos con residuo de rastrojo y prácticas de labranza cero en un suelo de pastizales. Por otro lado, Sharpley *et al.* (1993) encontraron que parcelas sin labranza tendían a tener mayor contenido de humedad del suelo y la temperatura más baja, lo que significa más P disuelto en la escorrentía de las parcelas con labranza convencional. Blevins *et al.* (1990) observaron que el movimiento de P se redujo usando un sistema de arado de cincel en comparación con la siembra directa o el arado convencional. El arado de cincel se asoció con escorrentía reducida después de la dispersión de los fertilizantes en la superficie del suelo. Por lo tanto, con la fertilización, el laboreo puede alterar la distribución de las fracciones de P y afectar la transformación y la transferencia de P en los suelos.

1. 1. 3. 2. Efectos de los sistemas de cultivo

Los sistemas de cultivo también tienen efectos importantes sobre los cambios en las fracciones de P en los suelos. Por ejemplo el cambio de sistemas menos intensivos (es decir, barbecho de cultivos de verano) a secuencias de cultivo más intensivas (por ejemplo, trigo continuo y trigo-trigo-barbecho), alteran la disponibilidad de P en el suelo. La transformación de P en el suelo se vuelve menos predecible a raíz de los mayores contenidos de P_i y P_o a causa de los residuos que se mantienen en la superficie del suelo (O'Halloran, 1987a, b). Wagar *et al.* (1986) encontraron que se produjo una acumulación de P_o con y sin fertilizante fosfórico añadido cuando los sistemas de manejo de trigo-barbecho invierno convencional pasaron a rotaciones más intensivas. Bowman & Halvorson (1997) observaron que un cambio del trigo-barbecho a cultivo continuo de trigo produjo un aumento significativo de las fracciones de P lábiles en los primeros 5 cm de la superficie.

Zheng *et al.* (2001) observaron que la rotación de pastoreo-pastoreo-cebada produjo mayores fracciones de lábil P que el monocultivo de cebada en la capa de 30-60 cm en una arcilla limosa de Labarre después de 10 años de cultivo. Zhang *et al.* (2006) investigaron el estado del P después de 45 años de prácticas de cultivo consistentes en tres sistemas de cultivo: continuo de maíz, rotaciones con maíz y gramíneas continuas. En comparación con el suelo nativo adyacente en los ecosistemas forestales, el estudio mostró que el cultivo continuo sin fertilización con P disminuyó todas las formas de P significativamente a excepción del Po extraíble con agua, con mayor disminución en el Pi lábil y Po moderadamente lábil; el cultivo continuo con fertilización resultó en concentraciones comparables de P total en los sistemas continuo de maíz y rotación con maíz y el aumento de P total en la gramínea continua. El estudio también indicó que el cultivo a largo plazo mejora de forma significativa la tasa de mineralización de Po moderadamente lábil, independientemente de la fertilización fosfórica, especialmente para el sistema de cultivo continuo de maíz. Sin embargo, en comparación con el monocultivo, la rotación de cultivos no mostró ningún efecto sobre el contenido de nutrientes en la capa de 0-20 cm del suelo en un experimento con soja, maíz y trigo en un Oxisol y en un Rhodic Ferralsol (DeMaria *et al.*, 1999).

1. 1. 3. 3. Efectos de la fertilización

Numerosos estudios han investigado los efectos de la adición de fertilizantes en las fracciones y transformación de P. Generalmente, el P-resina, Pi-NaHCO₃ y Pi-NaOH reflejan la diferencia entre P del fertilizante y P removido por los cultivos. Las fracciones estables se ven menos afectadas por los fertilizantes inorgánicos P o la aplicación de estiércol (O'Halloran, 1993; Richards *et al.*, 1995; Tran & N'dayegamiye, 1995; Zhang & MacKenzie, 1997a, 1997c). El Po es una fuente de P para las plantas de fertilizantes cuando el P disponible es insuficiente para satisfacer las necesidades de los cultivos (Zhang & MacKenzie, 1997a, Zheng *et al.*, 2001, 2004b). En muchos casos, el P lábil fácilmente aumenta más cuando las dos fuentes de nutrientes de P se aplican

juntas que cuando sólo se aplica una (Paniagua *et al.*, 1995). En consecuencia, los efectos de la fertilización con P en diferentes formas de P en suelos dependen de la fuente de nutrientes y dosis del fertilizante de P aplicado, químico o estiércol (O'Halloran, 1993; Zhang & MacKenzie, 1997a, 1997b; Zheng *et al.*, 2001, 2002).

A largo plazo los residuos orgánicos o la aplicación de estiércol incrementa la actividad microbiana y la potencial mineralización de la materia orgánica del suelo (N'dayegamiye & Angers, 1990). En consecuencia, puede inducir la transformación de P_o del suelo a fracciones de P_i y aumentar el P disponible en superficie horizontes subsuperficiales del suelo (Sharpley *et al.*, 1984, Tran & N'dayegamiye, 1995, Zheng *et al.*, 2002, 2004a). Esta mineralización de P_o durante la temporada de crecimiento es muy importante para la disponibilidad de P para las plantas. Sin embargo, la aplicación excesiva de estiércol o de enmiendas orgánicas ricas en P juega un papel importante en la disminución de la capacidad de sorción de P en suelos (Sharpley *et al.*, 1993; Simard *et al.*, 1995; Beauchemin *et al.*, 1996; Zheng *et al.*, 2001). La disminución de la capacidad de sorción de P puede aumentar el riesgo de contaminación de los cuerpos de agua receptores.

1. 1. 3. 4. Efectos de textura en las fracciones y transformación de P edáfico

La textura del suelo puede estar relacionada con los cambios y las transformaciones en las fracciones de P. O'Halloran *et al.* (1985) encontraron que hasta el 90% de la variabilidad espacial en el contenido total de P de un Mollisol está explicado por la textura. Un estudio similar mostró que una proporción significativa de la variabilidad de todas las fracciones de P, a excepción de H_2SO_4-P en un suelo franco de Brown chernozem, podría atribuirse a cambios en el contenido de arena (O'Halloran *et al.*, 1987b). El aumento del contenido de arcilla + limo se correlacionó significativamente con un mayor contenido de resina-P, $NaHCO_3-PI / PO$ y $NaOH-PI / PO$. $HCL-P$ se correlacionó positivamente con el contenido de arena (O'Halloran *et al.*, 1987b).

Hay evidencia que la transformación P en los suelos está estrechamente vinculada a la actividad microbiana y a la dinámica de C, las cuales afectan la mineralización e inmovilización de P (Hedley *et al.*, 1982). Por ejemplo, un suelo franco proveía mayor biomasa microbiana que los suelos arenoso francos y arenosos (Cooper & Warman, 1997). Huffman *et al.* (1996) indicó que la textura del suelo tuvo un mayor efecto en la transformación de P que los efectos combinados de la adición de residuos y la adición de nutrientes, porque la textura del suelo afectó los pools de Pi lábil, Po lábil y P de la biomasa microbiana

Por lo tanto, entre estos factores, el tamaño de partícula de las fracciones del suelo tiende a dar cuenta de una mayor proporción de variabilidad en las fracciones de P en el suelo. Teniendo en cuenta estos resultados se enfatiza la importancia de considerar la textura del suelo en la planificación de los estudios sobre los efectos de las prácticas de cultivo sobre las fracciones y transformación del P.

1. 1. 3. 5. Distribución de las fracciones de P en el suelo

Se ha dedicado mucho esfuerzo a investigar los cambios verticales en las formas y distribución de P en el suelo causados por las prácticas de cultivo. Estos cambios en las formas de P se limitan principalmente a la parte superior de 30 cm (O'Halloran, 1993; Sharpley *et al.*, 1993; Bowman & Halvorson, 1997; Selles *et al.*, 1997), o a profundidades de 65 cm (Reddy *et al.*, 1980; Mozaffari & Sims, 1994; Richards *et al.*, 1995) con unos pocos estudios que se extienden a profundidades mayores de 90 cm (Chang *et al.*, 1991; Simard *et al.*, 1995; Beauchemin *et al.*, 1996; Zheng *et al.*, 2001). Estos estudios sugirieron que los impactos de las prácticas de cultivo en fracciones de P del suelo se extendieron a profundidades mayores en el perfil del suelo que la profundidad distribuida por la labranza primaria. El movimiento de Po en suelos era mayor que el de Pi (O'Halloran., 1993; Richards *et al.*, 1995). Esto puede ser debido al hecho de que el Po no fue retenido con tanta fuerza como el Pi mediante la absorción de componentes de la fase sólida, o tal vez que el movimiento de Po era impulsado

por el proceso de mineralización. El Po que emigró al subsuelo pudo ser mineralizado, ya que el Po fue utilizado por los microorganismos como fuente de energía para su metabolismo (Zheng *et al.*, 2001).

La migración de P se asocia con cambios en la capacidad de retención de P del suelo (Reddy *et al.*, 1980). La acumulación de P añadido ha llevado a un aumento en el pool de total P lábil en el horizonte A (0-30 cm), mientras que los pools de P resistentes fueron los principales sumideros de P en el horizontes B (30 a 60 cm) y C (60-90 cm) en suelos agrícolas (Simard *et al.*, 1995; Beauchemin *et al.*, 1996; Zheng *et al.*, 2001). Esta conclusión está acorde con los estudios que sugieren que adiciones repetidas de estiércol produjo la disminución de la capacidad de sorción de P de los suelos y el movimiento acelerado de P hacia abajo en el perfil (Reddy *et al.*, 1980; Sharpley *et al.*, 1993; Mozaffari & Sims, 1994).

1. 2. HIPÓTESIS GENERAL

Las formas orgánicas e inorgánicas de P en el suelo se encuentran en equilibrio dinámico, el cual está regulado por el ambiente edáfo-climático (textura, lluvias, propiedades edáficas) y el manejo agronómico (rotación de cultivos, fertilización, labranza), y se encuentra directamente relacionado con la disponibilidad para los cultivos.

El conocimiento del efecto de los factores naturales y la magnitud de los cambios debidos al manejo agronómico sobre este equilibrio brindarían herramientas para un manejo productivo y ambientalmente eficiente.

1. 3. OBJETIVOS GENERALES

- Evaluar variables de sitio en relación con las formas de P edáfico en el sistema suelo – planta.
- Evaluar la dinámica de las formas de P en suelos con distintas rotaciones de cultivos.
- Evaluar el efecto de la aplicación de P sobre los equilibrios de este elemento.
- Analizar las formas de P en el suelo y su relación con la textura.
- Analizar la variabilidad espacial de las diferentes formas de P en suelos bajo siembra directa

A fin de validar la hipótesis planteada se realizaron estudios tendientes a cuantificar los diferentes aspectos involucrados en el equilibrio del P y su relación con el cultivo. Cada uno de ellos será analizado en un capítulo diferente.



CAPÍTULO 2

Dinámica del fósforo en la relación suelo-planta en sistemas productivos del sudoeste bonaerense

2.1. INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es el segundo nutriente más limitante para la producción de cultivos en las zonas agrícolas (Fageria & Baligar, 2005), especialmente en los cultivos de cereales (Zebarth *et al.*, 2009, Luce *et al.*, 2011) y es importante conocer como es su dinámica, para lograr la sustentabilidad de los sistemas de productivos. En las regiones semiáridas y subhúmedas el diagnóstico de la fertilidad edáfica adquiere un papel relevante, ya que los rendimientos se encuentran limitados por la falta de agua (Zilio *et al.*, 2014).

La disponibilidad de P para los cultivos, depende de variables que intervienen en el ciclo biogeoquímico de este nutriente (Smeck, 1985). La complejidad química y la variabilidad espacial de P en los suelos dificulta la identificación de las diferentes formas de P y la determinación de su disponibilidad para el cultivo (Hsu, 1966; Sawhney, 1973; Webber, 1978; Pierzynski *et al.*, 1990). El contenido de P total del suelo puede ser relativamente alto, desde 200 a 5000 mg kg⁻¹ (Kuo, 1996), pero la capacidad del suelo de proveer P es muy variable. Aun cuando la reserva de P total en el suelo exceda ampliamente los requerimientos del cultivo, éste podría sufrir deficiencias.

Los suelos bajo cultivo pierden P a través de la remoción en los productos de cosecha (granos, frutos, forrajes) y, eventualmente, por erosión. Los primeros efectos se ven en las caídas del P orgánico, ya que la materia orgánica (MO) disminuye rápidamente cuando los suelos se cultivan: un 1% de pérdida de MO puede representar una pérdida de 80-120 kg/ha de P de la capa superficial (Tiessen *et al.*, 1984; Stevenson & Cole, 1999; Vázquez, 2002).

En Argentina se ha incrementado notablemente el uso de nutrientes vía fertilizantes en los últimos 16 años. Sin embargo, los balances de nutrientes siguen siendo negativos para nuestros suelos. La relación aplicación/remoción muestra un balance negativo reponiéndose un 59% del P extraído en grano por los cuatro cultivos principales (soja, maíz, trigo y girasol, García & Ciampitti,

2007). Estas cifras son similares a las que se han observado en los últimos 7-8 años e indican que el fuerte crecimiento en el uso de fertilizantes todavía no alcanza a compensar el crecimiento notable que se ha registrado en la producción de granos.

En la mayoría de los suelos agrícolas, el P orgánico comprende aproximadamente entre un 20-80% del total de P del suelo (Gahoonia & Nielsen, 2004). En la Argentina, el P orgánico representa entre el 78% y 83% del P total en suelos Molisoles del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Diez *et al.*, 2000; Picone & Zamuner, 2002); mientras que en suelos Vertisoles y Alfisoles de la provincia de Entre Ríos oscila entre el 41% y 74% del P total en los horizontes superiores (Boschetti *et al.*, 2000; Pascale *et al.*, 2000). En el oeste de la provincia de Buenos Aires se ha encontrado que el Po representa entre el 29% y el 51% de la reserva total (Galantini *et al.*, 1997). Varios estudios realizados en los suelos de la región pampeana (Hepper, 1996; Vazquez, 2002), evidencian pérdidas importantes de P total, debidas principalmente a las fracciones más lábiles inorgánicas y orgánicas y es aquí donde radica la importancia del Po para determinar la disponibilidad de P del suelo (Andersohn, 1996).

Cambios en las prácticas de manejo y en la calidad-cantidad de residuos, consecuencia de la aplicación de una nutrición balanceada de suelos combinada con rotaciones y sistema de mínima labranza, alteran la dinámica de ciclado de la materia orgánica en los suelos y, como consecuencia, ejercen influencia en la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Zheng *et al.*, 2001)

La mineralización del Po en el suministro de nutrientes disponibles para los vegetales se encuentra bien documentada (Dormaar, 1972; Chater & Mattingly, 1980). En planteos de fertilización continua, incrementos en la cantidad de residuos en la superficie del suelo resultan en una acumulación en el contenido de Po, lo cual hace que la extractabilidad del Pi en el suelo, y consecuentemente la respuesta del cultivo, sea menos predecible (Bowman & Halvorson, 1997). Convencionalmente, los análisis de extracción de P del suelo

no miden la contribución potencial de P del residuo y de las formas orgánicas de mayor labilidad (Six *et al.*, 2002).

Si bien la intensificación de la agricultura en los últimos años ha producido una merma en el contenido de materia orgánica y nutrientes del suelo (Sainz Rozas *et al.*, 2011); en suelos bajo siembra directa (SD) la descomposición de los residuos y de la materia orgánica del suelo debería considerarse al momento de recomendar fertilizantes. En el sudoeste bonaerense, con suelos de texturas gruesas y bajos niveles de materia orgánica, no existe información disponible sobre la dinámica del P, especialmente en estos sistemas de siembra directa.

También es cierto que las modificaciones surgidas por el distinto uso de la tierra pueden variar entre regiones y ambientes diferentes (Villamil *et al.*, 2006). Se ha analizado la respuesta en función del nivel de carbono edáfico y la distribución de agregados por efecto de los diferentes sistemas de labranza y fertilización en soja en suelos con características contrastantes (Novelli *et al.*, 2011). Los cambios edáficos por el uso de la tierra no sólo surgen ante modificaciones del sistema de labranza aplicado, sino que también pueden influir la secuencia y rendimiento de los cultivos implantados (Díaz Zorita *et al.*, 2004; Novelli *et al.*, 2011).

El manejo sustentable de las tierras necesita poder anticipar los efectos de su uso (Echeverría *et al.*, 2012), de manera que cuando el desarrollo de los cultivos agrícolas tienda a ser máximo, al mismo tiempo la degradación del ambiente y del suelo sea mínima (Reynolds *et al.*, 2009). En estos ambientes frágiles la relación costo-beneficio podría ser alta si no se realiza un diagnóstico adecuado. Por otro lado, se podría esperar una mejora del rendimiento si se desarrollan estrategias de recomendación de fertilización precisas para la región del sudoeste bonaerense.

2. 2. Hipótesis específica

Las características edafoclimáticas de los suelos del suodeste bonaerense condicionan la dinámica del fósforo en su relación suelo-planta.

2. 3. Objetivos específicos

Evaluar parámetros edáficos y de productividad en sitios con diferencias edafoclimáticas con el propósito de generar conocimiento que permita comprender mejor la dinámica del fósforo en el suelo con relación a la productividad en SD.

2. 4. MATERIALES Y MÉTODOS

2. 4. 1. Sitios experimentales

Durante los años 2010, 2011 y 2012 se muestrearon 111 lotes de productores, bajo siembra directa, cultivados con trigo (*Triticum aestivum* L.) y con cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.), situados en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina), pertenecientes a las regiones semiárida y subhúmeda (**Figura 2**). Mayores detalles de los lotes fueron presentados por Martínez *et al.* (2015). Se muestrearon entre dos a diez lotes por campo. En el año 2010 se muestrearon un total de 33 lotes en 8 establecimientos agropecuarios, en el 2011 los lotes muestreados fueron 37 en un total de 12 establecimientos, y en el 2012 se muestrearon 11 establecimientos y el número de lotes ascendió a 41. Algunos establecimientos se repiten en los años.

En cada uno de los lotes se seleccionaron tres áreas de muestreo georreferenciadas, homogéneas y uniformes de aproximadamente 50 m², siendo estas representativas de los lotes para reducir la variabilidad espacial. El muestreo se llevó a cabo en esas áreas de muestreo en las profundidades de 0-20 cm, durante el invierno antes de la siembra del cultivo de trigo o cebada.

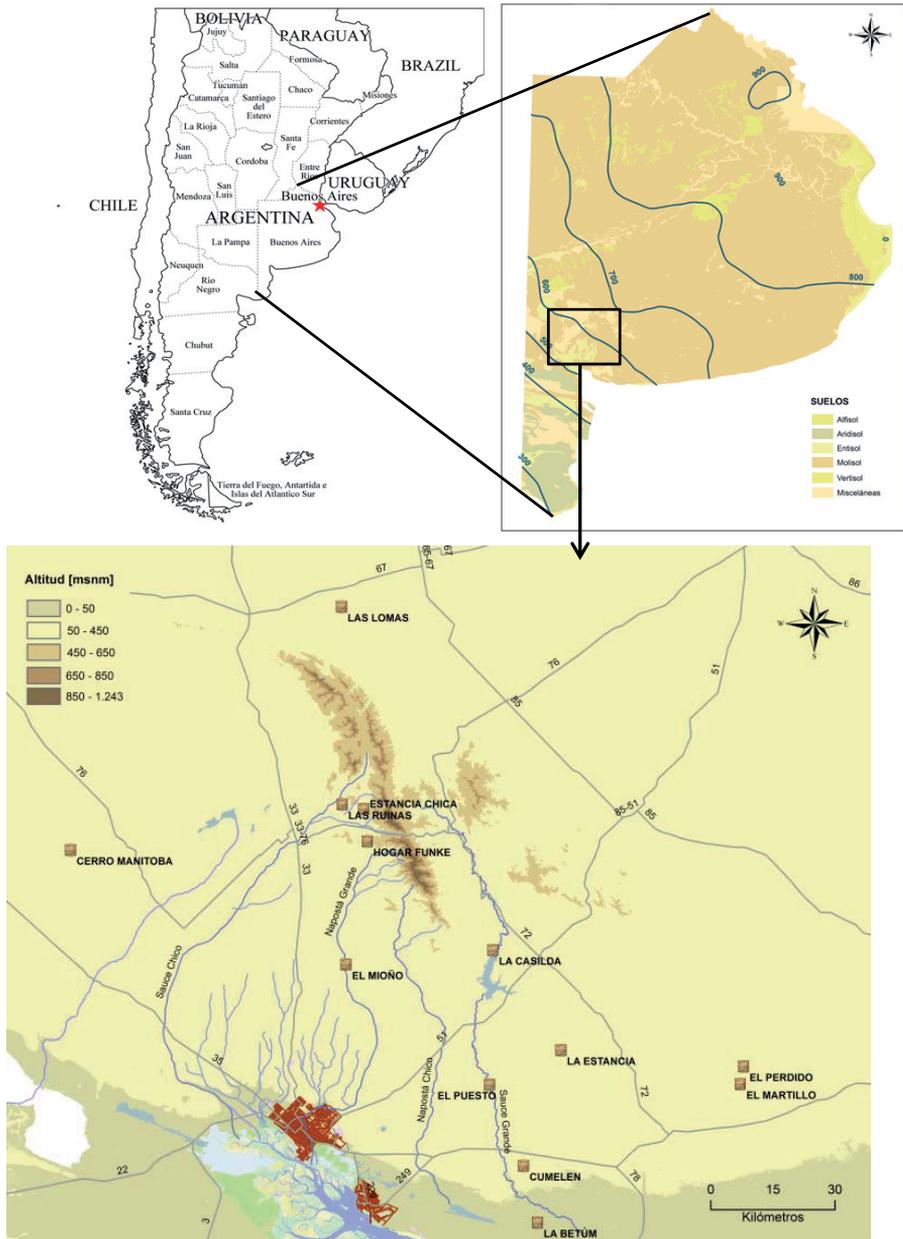


Figura 2. Ubicación geográfica de los sitios muestreados en el sudoeste bonaerense de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

2. 4. 2. Determinaciones analíticas

En las muestras de suelo se determinaron los siguientes parámetros químicos:

- pH (relación suelo:agua 1:2,5)
- Contenido de carbono orgánico total (**C**), por combustión seca mediante analizador automático Leco (Leco Corporation, St Joseph, MI)
- Nitrógeno total (**Nt**, Bremner, 1996)
- P extraíble (**Pe**, Bray & Kurtz, 1945)
- P inorgánico (**Pi**), orgánico más inorgánico (**Po+Pi**), previa calcinación de la muestra a 550°C) y orgánico (**Po**, por diferencia) por el método de Saunders y Williams (1955).
- P total (**Pt**), mediante digestión con ácido perclórico empleando el procedimiento de (Sommers & Nelson 1972).

Además se calculó la relación **Po/Po+Pi**, la cual da idea del “equilibrio” que puede existir entre el Po y el P total del suelo, por ejemplo a mayor relación Po/Po+Pi mayor es el contenido de la fracción orgánica que la inorgánica.

Con respecto a los parámetros físicos se evaluó: textura, por el método de la pipeta (Gee & Bauder, 1986) y densidad aparente (Blake & Hartge, 1986). Posteriormente, se realizó la conversión de unidades para pasar de mg kg^{-1} a kg ha^{-1} utilizando la densidad aparente de cada sitio. Las propiedades edáficas de los sitios muestreados se detallan en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Propiedades químicas y físicas de los sitios muestreados para la profundidad de 0-20 cm y 0-60 cm para nitrógeno inorgánico (Año 2010)

Sitios	N		Pe	pH	Textura			DA
	MO	inorg.			A	L	a	
	g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹			g kg ⁻¹			
1	25	35	20	7,0	414	380	206	1,15
2	24	81	26	7,4	567	399	34	1,26
3	23	34	15	6,7	368	404	228	1,18
4	22	45	19	6,2	751	154	95	1,27
5	28	135	22	6,2	466	321	214	1,25
6	24	46	14	6,4	541	284	176	1,18
7	24	83	26	6,0	615	177	208	1,31
8	58	107	10	7,6	254	538	208	1,13

MO, materia orgánica (g kg⁻¹); N inorg., nitrógeno inorgánico a la siembra en forma de N- nitratos (kg ha⁻¹); Pe, Fósforo extraíble (mg kg⁻¹); pH, potencial Hidrogeno; DA, densidad aparente (Mg m³). Textura: A, Arena; L, Limo; a, arcilla.

2. 4. 3. Fraccionamiento físico del suelo

El suelo se sometió a un fraccionamiento granulométrico (Cambardella & Elliott, 1992; Galantini, 2005) para determinar en cada fracción el CO. Para ello, 50 g de suelo previamente seco al aire y tamizado (2 mm) se dispersó en recipientes de vidrio de 120 ml de capacidad, se le agregó 100 ml de agua destilada. Además, se adicionaron diez bolitas de vidrio (Ø 5 mm) para incrementar la destrucción de los agregados y reducir posibles problemas causados por la sobreestimación de partículas del tamaño de las arenas (Elliott & Cambardella, 1991). Las muestras fueron sometidas a dispersión mecánica a

través de un agitador rotatorio durante aproximadamente 16 horas (40 vueltas por minuto) para desintegrar los agregados. El tamizado se realizó con un par de tamices, uno de 53 μm y otro de 105 μm de abertura de malla, hasta que el agua que salía por el tamiz inferior (53 μm) fuera límpida (**Figura 3**). De esta manera se obtuvieron tres fracciones con características diferentes, fracción gruesa (FG, 105-2000 μm) en la que se encuentra el carbono orgánico particulado grueso ($\text{COP}_{>100}$) y las arenas medias y gruesas; fracción media (FM, 53-105 μm) constituida por el carbono orgánico particulado fino (COP_{50-100}) y las arenas muy finas y la fracción fina (FF < 53 μm) la cual contiene el carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COM) más limo y arcilla.

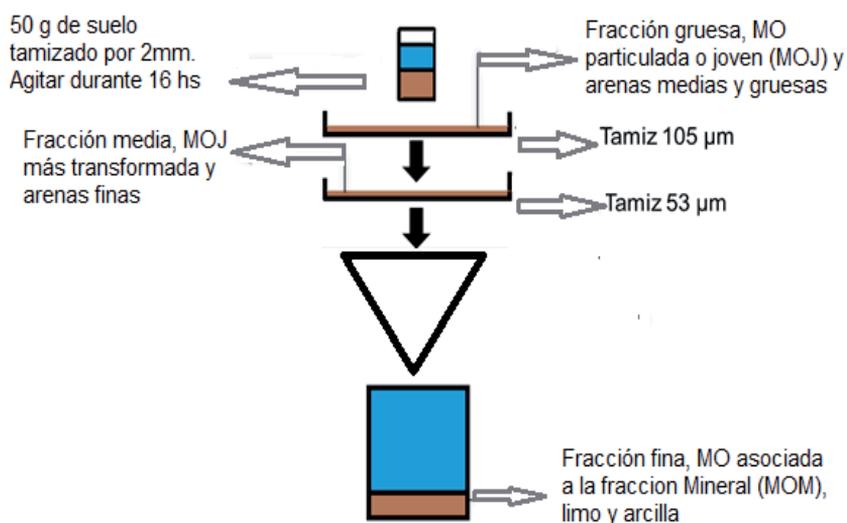


Figura 3. Esquema de la técnica de fraccionamiento físico granulométrico

El material retenido en cada tamiz fue transferido a cápsulas de aluminio, secado a 105°C en estufa durante 24 horas para su posterior pesaje. Los contenidos de C en las fracciones gruesas ($\text{COP}_{>100}$) y media (COP_{50-100}) se determinaron utilizando la misma metodología que el COT:

$$\text{COP}_{>100}(\%) = (\%C \text{ fracción gruesa} * \% \text{fracción gruesa}) / 100,$$

$COP_{50-100}(\%) = (\%C \text{ fracción fina} * \% \text{fracción fina})/100,$

$COM (\%) = \%COT - (\%COP_{>100} + \%COP_{50-100}).$

2.4.4. Materia seca y grano

Para la determinación de materia seca total aérea (**MS**) y rendimiento de grano (**Rgr**), al final del ciclo de cultivo se cosecharon manualmente 2 submuestras de biomasa aérea de 1 m lineal en cada parcela al momento de madurez fisiológica. Las plantas fueron secadas a una temperatura constante de 65 °C, posteriormente se pesaron y se cuantificó el contenido de MS para determinar el rendimiento de la materia seca aérea y el rendimiento en grano.

La determinación analítica del contenido de P en paja y grano se realizó por el método Johnson & Ulrich (1959), mediante digestión acida con nítrico y perclórico a 270°C. Para ello la paja y el grano fueron previamente molidos.

Los fosfatos en solución en los diferentes métodos, tanto en suelo como en planta, fueron medidos por colorimetría de vanadato de amonio (Murphy & Riley, 1962).

La eficiencia de uso del agua, la producción de materia seca por unidad de agua utilizada, se calculó a partir de los datos de precipitación y el cambio en el almacenamiento de agua en el suelo durante los períodos de siembra y cosecha del trigo (Quiroga *et al.*, 2006).

$$\mathbf{EUA: (kg \cdot mm^{-1}) = (kg \text{ de grano}) / (ppcc + HS - HC)}$$

Donde,

ppcc = precipitaciones en el ciclo del cultivo (mm)

HS = humedad del suelo a la siembra (mm)

HC = Humedad del suelo a la cosecha (mm)

Zilio *et al.* (2014), determinaron que del análisis de la relación entre variables meteorológicas y el promedio de los rendimientos de trigo de cuatro secuencias estudiadas surge que la precipitación acumulada durante el ciclo del cultivo (período agosto-noviembre) era la que más influía en los rendimientos. Por otro lado, Martínez *et al.* (2015) indicaron que las lluvias de primavera fueron las más influyentes sobre el rendimiento. Barbieri *et al.* (2008) trabajando en Argiudoles Típicos del Sudeste Bonaerense, indicaron que las precipitaciones registradas durante el ciclo del cultivo fueron las que más afectaron el rendimiento en grano, con un R^2 del 95%. En esta tesis se incluyeron las precipitaciones (período agosto-noviembre) durante el ciclo del cultivo (ppcc).

2. 4. 5. Análisis estadísticos

Los sitios se agruparon de acuerdo a las precipitaciones anuales promedios siendo 600-700 mm (Región semiárida) y 700-800 mm (Región subhúmeda). Para cada año, y para cada variable analizada, se realizó un análisis de la varianza (ANAVA), se aplicó el diseño anidado factor principal fijo considerando "Región" como factor principal fijo y "Sitio" como factor anidado.

Por otro lado, se realizaron modelos de regresión múltiple (backward, $p = 0,05$) para rendimiento en grano (variable dependiente) usando como variables independientes las formas de P (Pe, Po, Pi).

Además, completando el estudio estadístico, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para resumir las características edáficas y de cultivo en los suelos estudiados y así interpretar la asociación entre estas variables. Como las componentes son combinaciones lineales de todas las variables originales, la selección de variables dentro de cada componente, sería deseable cuando el objetivo es seleccionar atributos para ser considerados o medidos en futuros estudios (Argüelles-Cárdenas, 1990; McCabe, 1984). Esta interpretación depende totalmente de la profesionalidad de la persona que realiza el estudio (Aitchison, 1990). El análisis multivariado de componentes

principales construye nuevas variables no correlacionadas o componentes principales, basándose en la matriz de correlación (Balzarini *et al.*, 2008). Permite así analizar la interdependencia de variables y encontrar una representación gráfica óptima de la variabilidad de los datos (Bi-plot), donde pueden visualizarse tanto tratamientos como variables, a fin de estudiar la asociación existente entre ellas. Se trabajó con los datos estandarizados (media=0 y variancia=1) a fin de que todas las variables originales tengan igual importancia, ya que las mismas no fueron medidas en iguales unidades (Manly, 1997; Husson *et al.*, 2011). El ACP permitió reducir el número de variables que ejercen mayor influencia sobre el sistema estudiado, a un número menor de nuevas variables o componentes principales que resumen la mayor parte de la variabilidad. (Chatfield & Collins, 1980 y Pla, 1986).

Luego se evaluó la existencia de agrupamientos entre las propiedades efáticas y de cultivo analizadas en los suelos evaluados y se correlacionaron las variables individuales con el CP1, el CP2 y cuando fue necesario se incluyó un el CP3. Se utilizó la correlación de Pearson para seleccionar aquellas variables significativas que conformaron los vectores de CP.

Quedando definidas las siguientes variables: rendimiento en grano (**Rgr**), Rendimiento en materia seca (**RMS**), fósforo en grano (**Pgr**), P en materia seca (**PMS**). La formas de fósforo **Pe**, **Pi** y **Po**, la relación **Po/Po+Pi** y variables relacionadas con la humedad **ppcc** y **EUA**. Se realizó el análisis de componentes principales de la siguiente manera:

- con todas las variables intervinientes
- analizando las variables en relación al rendimiento en grano; primero se usaron todas las variables, entre ellas el CO, y en un segundo análisis se reemplazó el CO por sus tres fracciones: COPg, COPf y COM
- analizando las variables en relación al P en materia seca

Todos los análisis estadísticos fueron realizados mediante el programa INFOSTAT, (Di Rienzo *et al.*, 2013)

2. 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características edáficas y climáticas se resumen en la **Tabla 2**. Desde el punto de vista edafoclimático (Soil Survey Staff, 2010), el gradiente de precipitación determina un régimen de humedad del suelo údico hacia el lado de la Sierra y ústico hacia los sitios más cercanos a la ciudad de Bahía Blanca, en cercanías del mar.

Tabla 2. Tipo de suelo, características generales y climáticas (valores promedios) de los sitios muestreados

Cantidad de lotes (n)	Localidad más cercana	Región	Clasificación Taxonómica	Temperatura, °C			Precipitaciones	
				media	max	min	Año	Ciclo
							mm	
41	Tornquist	Subhúmeda	Argiudol Típico	14,5	20,9	8,2	695	255
27	Las Oscuras	Semiárida	Argiustol Típico	15,0	21,4	8,6	533	246
20	Cnel Dorrego	Semiárida	Argiustol Típico	14,7	20,9	8,4	648	282
6	Pigue	Subhúmeda	Argiudol Típico	13,8	20,2	7,5	1045	410
17	Saldungaray	Semiárida	Argiustol Típico	14,7	21,0	8,3	694	348

2. 5. 1. Condiciones climáticas

En la región del sudoeste bonaerense en general, la dinámica de las precipitaciones durante el ciclo del trigo difiere de la precipitación anual, principalmente por registrar disminuciones importantes en los meses de octubre y noviembre que coinciden con el período crítico para la definición del rendimiento del trigo (Martínez *et al.*, 2015). La tendencia de largo plazo registra, en este caso, una leve disminución, mientras que los ciclos determinados por la tendencia de plazo mediano son más cortos y regulares, aunque siempre aperiódicos (Zilio *et al.*, 2014).

Particularmente en los años analizados, las precipitaciones promedio de la Región semiárida (RSA) fueron variables entre los diferentes años (**Figura 4a**). En el año 2008, hubo marcados períodos secos durante todo el año incrementándose aún más en los meses de primavera. Durante el año 2010, las precipitaciones evidenciaron una alta variabilidad concentrándose mayormente en el otoño y primavera, con un déficit hídrico severo en agosto. En el año 2011, se observó escasez de agua a partir de julio, que prosiguió de la misma manera hasta el fin del ciclo. Para 2012 se observó una marcada sequía invernal y luego siguió una tendencia muy similar al año 2011 a excepción del mes de agosto. En el 80% de los años (2008, 2010, 2011 y 2012) las precipitaciones durante el periodo de llenado de granos fueron menores que los requerimientos de agua del trigo, en concordancia a lo observado por Paoloni & Vazquez (1985).

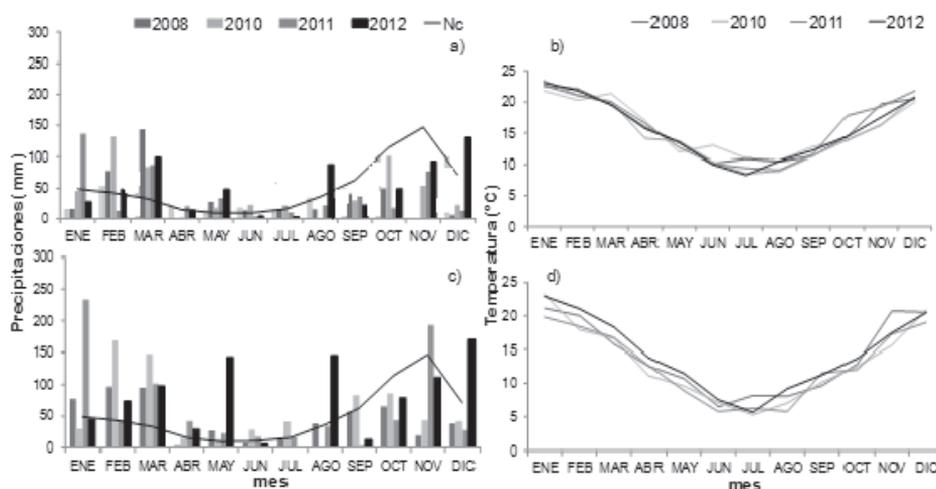


Figura 4. Precipitaciones y temperaturas medias mensuales durante todos los años estudiados en ambiente a) y b) semiárido y c) y d) subhúmedo

Las precipitaciones durante 2008 en los suelos del ambiente subhúmedo (**Figura 4c**), igualaron los requerimientos hasta el mes de setiembre, para luego observarse una marcada caída hasta la cosecha. En 2010 se repitió la tendencia del año 2008, mientras que en el año 2011 lo que ocurrió fue la carencia de precipitaciones en setiembre y octubre, aumentando de manera considerable hacia el mes de noviembre, coincidente con el llenado de granos. En 2012 se observaron déficits muy marcados en setiembre y menor en octubre, mientras que en noviembre las precipitaciones estuvieron acordes a los requerimientos. Las temperaturas en general no registraron grandes variaciones en comparación a las precipitaciones para ambos ambientes (**Figura 4b y d**).

2. 5. 2. Variabilidad entre regiones

El análisis de la varianza de las diferentes variables analizadas se presenta en la **Tabla 3**. En el año 2010 que fue un año con déficit hídrico severo, en ambas regiones no se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en los niveles de las diferentes variables analizadas. En el año 2011, que presentó escasez de agua pero no tan marcada como en 2010, se comienzan a observar diferencias significativas entre ambas regiones en algunas variables como precipitaciones durante el ciclo del cultivo, rendimiento en grano y fósforo disponible. Durante el año 2012 en donde hubo mayores precipitaciones en el mes de agosto y en noviembre se observa una diferencia significativa en la mayoría de las variables analizadas.

Particularmente, teniendo en cuenta las condiciones edafoclimáticas evaluadas de los sitios estudiados, se evidenciaron diferencias estadísticas entre las regiones semiárida y subhúmeda de acuerdo al año climático y proporcional al aporte de lluvias, pero no en los tres años en conjunto.

Tabla 3. Comparación de medias de las regiones semiárida y subhúmeda para cada variable analizada en los tres años de estudio.

Año	Variable	Semiárida	Subhúmeda	Significación
		Media	Media	
2010	C	1,95	1,38	ns
	L+a	51,05	51,85	ns
	pH	6,58	6,57	ns
	Rgr	2508	2327	ns
	PMS	9,71	8,19	ns
	ppcc	212	202	ns
	EUA	13,6	13,56	ns
	Pe	12,1	12,05	ns
	Po	193,9	217,59	ns
	Pi	228,2	229,89	ns
Pt	365,3	449,35	ns	
2011	C	1,82	1,95	ns
	L+a	46,8	54,2	ns
	pH	6,26	6,39	ns
	Rgr	2302	3217	*
	PMS	8,5	9,95	ns
	ppcc	173,3	279,00	**
	EUA	15,3	12,29	ns
	Pe	13,3	8,98	*
	Po	193,7	194,34	ns
	Pi	312,7	270,09	ns
Pt	506,0	464,45	ns	
2012	C	1,45	1,92	**
	L+a	40,1	55,54	**
	pH	6,36	6,57	ns
	Rgr	3284	3408	**
	PMS	11,98	13,18	ns
	ppcc	259,6	370,25	**
	EUA	13,6	9,79	**
	Pe	18,3	7,88	**
	Po	155,1	235,56	**
	Pi	11,2	13,98	ns
Pt	318,4	432,26	**	

C, Carbono (%); L+a, contenido de limo más arcilla (%); pH, potencial Hidrogeno; Rgr, Rendimiento en grano (kg ha^{-1}); PMS, contenido de fósforo en materia seca (%); ppcc, precipitaciones en el ciclo del cultivo (mm); EUA, eficiencia en el uso del agua; Pe, Fósforo extraíble (mg kg^{-1}); Po, Fósforo orgánico (mg kg^{-1}); Pi, Fósforo inorgánico (mg kg^{-1}); Pt, Fósforo total (mg kg^{-1}). ANAVA: Factor Principal fijo: Región, factor anidado: Sitio.

Al aplicar un modelo de regresión múltiple para rendimiento en grano y para todos los sitios analizados, tanto de la región semiárida, como subhúmeda, incluyendo las distintas formas de fósforo que se correlacionaron en forma significativa con el rendimiento (fósforo disponible, orgánico e inorgánico), el modelo obtenido incluye las tres formas de fósforo para determinar la variación en el rendimiento en grano (**Tabla 4**).

Tabla 4. Modelo de regresión múltiple para rendimiento en grano y las formas de fósforo

Variable a dependiente	Variabes regresoras	p-valor	R ²
Rgr	Pe	0.0016	0.47
	Po	0.0420	
	Pi	0.0243	

Si bien el modelo no permite predecir el rendimiento en grano con un alto porcentaje ($r^2=0,47$), evidencia que no sólo el fósforo disponible ejerce influencia en el rendimiento sino también las otras formas de fósforo, poniendo de manifiesto la importancia del equilibrio entre todas las formas de P. Por lo sería necesario considerar el sistema en equilibrio dinámico tanto de las formas orgánicas como las inorgánicas a la hora de predecir la variación en los rendimientos en las zonas analizadas.

2 . 5. 3. Análisis de componentes principales

Del estudio de componentes principales con todas las variables involucradas surge que los dos primeros ejes fueron responsables del 50% de la variabilidad total aportada por los parámetros estudiados (**Figura 5**), y un tercer componente aporta casi un 20% más (**Figura 6**).

Por lo tanto se seleccionaron 3 componentes para la conformación de los vectores (**Tabla 5**). La primera componente seleccionó parámetros de cultivo (Rgr, Rpj y PMS) y de humedad como eficiencia en el uso del agua.

Una segunda componente agrupa las propiedades intrínsecas al suelo, como la granulometría (L+a). De esta manera, sobre el eje positivo del CP2 se ubican los suelos de textura más finas mientras que por debajo del eje cero se ubicarán los suelos con mayor contenido de arena. La CP2 también agrupa C, Pt y Po; cambios en el contenido de C por las prácticas de manejo fueron referenciados en ciertos trabajos (Duval, *et al.*, 2013). Pareciera ser que probablemente estas propiedades son las más sensibles en el cambio en el uso de la tierra.

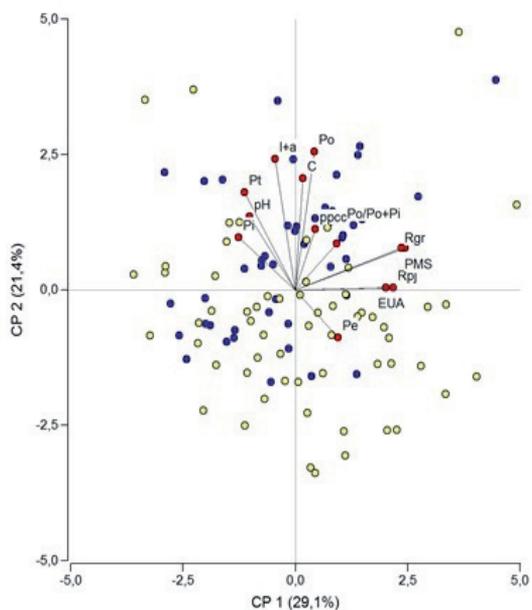


Figura 5. Bi-plot de componentes principales CP1 y CP2 para todas las variables estudiadas.

Puntos amarillos representan a la zona semiárida y puntos azules representan a la zona subhúmeda

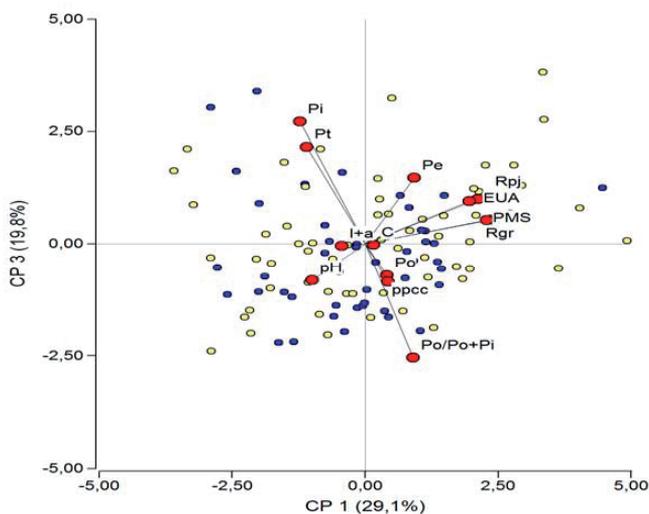


Figura 6. Bi-plot de componentes principales CP1 y CP3 para todas las variables estudiadas.

Puntos amarillos representan a la zona semiárida y puntos azules representan a la zona subhúmeda

Del biplot entre CP1 y CP2 se infiere que los suelos de textura más fina estarían más relacionados a las formas de P total y orgánica (Pt, Po) y en los de textura más gruesas la variable que más influiría sería el Pe. Otros autores (Balesdent *et al.*, 1992; Hassink, 1994; Dessureault-Rompré *et al.*, 2010) han demostrado la importancia de la textura en los procesos de mineralización, asociados principalmente a la protección física de la MO que se produce en suelos más finos.

Hassink (1995) concluyó que la textura del suelo determina la proporción de cada tipo de material orgánico y que los suelos arenosos tienen la materia orgánica fácilmente descomponible, posiblemente son los suelos que se encuentran más asociados al P en la solución del suelo (P disponible). Esto coincide a lo concluido por Hassink *et al.* (1993) que informaron una mayor mineralización neta de la MO en los suelos arenosos con respecto a los arcillosos. Las variables seleccionadas en el análisis de componentes principales se sometieron al análisis de variabilidad espacial para lo cual, previamente, se les confirmaron los supuestos de normalidad y de estacionalidad (Hengl, 2009; Jaramillo Jaramillo, 2009).

Tabla 5. Autovalores análisis de componentes principales datos estandarizados

Lambda	Valor	Proporción	Proporción acumulada
1	3,39	0,26	0,29
2	2,52	0,19	0,51
3	2,19	0,17	0,70
4	1,36	0,10	0,73
5	0,91	0,07	0,80
6	0,83	0,06	0,86
7	0,65	0,05	0,91
8	0,52	0,04	0,95
9	0,31	0,02	0,97

Tabla 6. Autovectores análisis de componentes principales datos estandarizados

Variables	e1	e2	e3
Rgr	0,47*	0,15	0,11
Rpj	0,42*	0,01	0,20
I+a	0,09	0,47*	0,01
C	0,03	0,40*	-3,3E-03
Pe	0,18	-0,17	0,30*
pH	-0,20	0,26	-0,16
Pt	-0,22	0,35*	0,43*
Po	0,08	0,49*	0,14
Pi	-0,24	0,19	0,54*
Po/Po+Pi	0,18	0,17	0,51*
PMS	0,46*	0,15	0,11
EUA	0,39*	0,01	0,19
ppcc	0,08	0,22	0,17

Se analizaron todas las variables en relación al rendimiento en grano a fin de reconocer cuáles de las variables analizadas en los suelos estudiados ejercía mayor influencia sobre ese parámetro de producción. Teniendo en cuenta los autovalores mayores a uno (Sharma, 1996), fueron necesarios al menos tres componentes para conformar el vector de variación en una medida aceptable. En la **Figura 7** se presenta el biplot entre las componentes 1 y 2.

Cada propiedad de suelo está representada por un autovector que queda definido por la correlación que existe entre la propiedad del suelo y la CP considerada (**Tabla 9**). El ángulo existente entre los vectores representa el grado de correlación entre las variables medidas.

Tabla 7. Correlación de Pearson: coeficientes\probabilidades

	ppcc	Rgr	Rpl	I+a	C	Pe	pH	Pt	Po	Pl	Po/Po+Pl	PMS	EUA	CP 1	CP 2	CP 3
ppcc	1,00	***	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	1.3 E-04	***	ns	***	*
Rgr	0,37	1,00	*	ns	ns	*	ns	ns	*	*	ns	**	***	**	ns	***
Rpl	0,05	0,65	1,00	ns	ns	**	***	ns	ns	ns	ns	**	***	**	ns	***
I+a	0,16	2,7E-04	0,09	1,00	***	*	***	***	***	*	ns	ns	ns	ns	*	ns
C	0,10	0,17	0,12	0,33	1,00	ns	*	ns	***	ns	ns	*	ns	ns	*	ns
Pe	-0,15	0,21	0,26	0,19	-0,06	1,00	***	ns	ns	ns	*	*	*	***	***	***
pH	0,11	0,16	0,29	0,34	0,20	0,34	1,00	ns	ns	ns	ns	*	ns	***	**	*
Pt	0,03	0,13	0,09	0,39	0,18	0,03	0,16	1,00	***	**	***	ns	ns	***	***	**
Po	0,10	0,17	0,10	0,48	0,42	0,11	0,16	0,35	1,00	ns	ns	ns	ns	ns	***	*
Pl	0,12	0,17	0,10	0,20	0,14	0,03	0,07	0,90	3,8E-03	1,00	**	ns	ns	***	***	**
Po/Po+Pl	0,12	0,13	0,05	0,07	0,11	0,20	0,01	0,35	0,61	0,63	1,00	DS	ns	***	*	*
PMS	0,36	0,84	0,65	0,03	0,19	0,22	0,19	0,13	0,14	0,15	0,13	1,00	***	ns	*	ns
EUA	0,39	0,65	0,57	0,08	0,10	0,26	0,16	0,12	0,12	0,12	0,09	0,52	1,00	*	ns	***
CP 1	0,16	0,87	0,78	0,16	0,06	0,34	0,36	0,41	0,15	0,45	0,33	0,84	0,72	1,00	1,00	1,00
CP 2	0,34	0,24	0,01	0,74	0,63	0,27	0,42	0,55	0,78	0,30	0,26	0,24	0,01	0,00	1,00	1,00
CP 3	0,25	0,16	0,29	0,01	4,8E-03	0,44	0,24	0,64	0,21	0,80	0,75	0,16	0,28	0,00	0,00	1,00

***, **, *, ns; indican diferencias significativas al 0.001, 0.01, 0.05 y no significativas.

Según las correlaciones de Pearson el CP1 queda definido por las siguientes variables que se resultaron significativas Pt, Pi, PMS y EUA; para el CP2 quedaron seleccionadas L+a, C, Po y Pt. Por otro lado el CP3 seleccionó las variables relacionadas con la dinámica del fósforo Pe, Pt, Po y Po/Po+Pi.

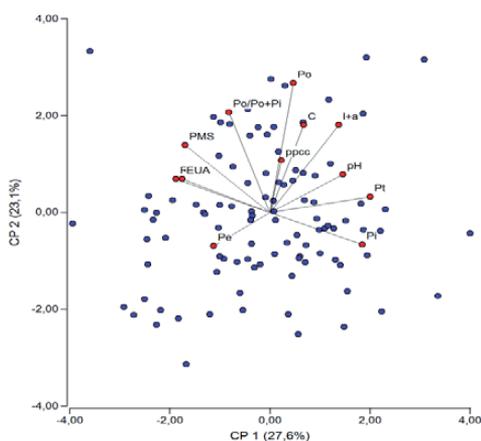


Figura 7. Biplot de componentes principales en relación al rendimiento en grano

Tabla 8. Autovalores análisis de componentes principales

Lambda	Valor	Proporcion	Proporción acumulada
1	2,83	0,24	0,28
2	2,41	0,20	0,51
3	2,10	0,18	0,70
4	1,28	0,11	0,72
5	0,88	0,07	0,79
6	0,82	0,07	0,86
7	0,64	0,05	0,91
8	0,53	0,04	0,96
9	0,27	0,02	0,98

Tabla 9. Autovectores análisis de componentes principales

Variables	e1	e2	e3
ppcc	0,05	0,22	-0,14
l+a	0,28	0,37*	0,10
C	0,14	0,37*	0,13
Pe	-0,23	-0,14	0,37*
pH	0,30*	0,16	-0,18
Pt	0,41	0,47*	0,43*
Po	0,10	0,55**	0,06
Pi	0,38*	-0,14	0,48*
Po/Po+Pi	-0,17	0,23	-0,39*
Rpj	-0,30	0,14	0,33
PMS	-0,37*	0,29	0,26
EUA	-0,36*	0,14	0,32

Por otro lado se analizaron las variables en relación al P en materia seca, siendo éste el P que toma la planta, a fin de tratar de seleccionar aquellas variables que ejercieron mayor influencia en este parámetro.

El análisis de componentes principales resultó en una explicación de la variación total del 69% (**Tablas 10 y 11**). Fueron necesarios tres componentes para conformar el vector del nuevo sistema; un componente principal (CP1) fue el que más explicó esta variación y se encontró altamente influenciado por variables de cultivo, formas total e inorgánica de P y eficiencia en el uso de agua (Rpj, Rgr, Pi Pt, EUA).

El componente CP2 asoció variables de calidad del suelo, prevaleciendo aquellas que ejercen influencia sobre los efectos de la biomasa microbiana (L+a, C, Po, Pt): Y un tercer componente, CP3 que asoció las formas de P (Pe, Pt, Po, Po/Po+Pi) y la EUA (**Figura 8**). Esto pone en evidencia que si bien se considera al Pe como el pool de fósforo edáfico del cual puede asimilar P la planta, en realidad no es específicamente el que regula la absorción del P por el cultivo.

Tabla 10. Análisis de componentes principales

Lambda	Valor	Proporción	Proporción acumulada
1	2,78	0,23	0,27
2	2,43	0,20	0,51
3	2,15	0,18	0,69
4	1,24	0,10	0,72
5	0,92	0,08	0,79
6	0,83	0,07	0,86
7	0,65	0,05	0,92
8	0,53	0,04	0,96
9	0,31	0,03	0,99

Tabla 11. Autovectores Análisis de componentes principales

Variables	e1	e2	e3
ppcc	-0,01	0,23	-0,19
l+a	-0,22	0,42*	0,05
C	-0,09	0,39*	0,08
Pe	0,20	-0,15	0,32*
pH	-0,27	0,21	-0,18
Pt	-0,38*	0,47*	0,43**
Po	0,01	0,55*	0,02
Pi	-0,39*	-0,03	0,49**
Po/Po+Pi	0,23	0,25	-0,37*
Rpj	0,40*	0,11	0,21
EUA	0,40*	0,12	0,33*
Rgr	0,41*	0,26	0,23

La absorción de P por la planta estaría regulada por el contenido Pt, Pi y la relación Po/Po+Pi. Evidenciando los complejos equilibrios del P en el sistema suelo-planta.

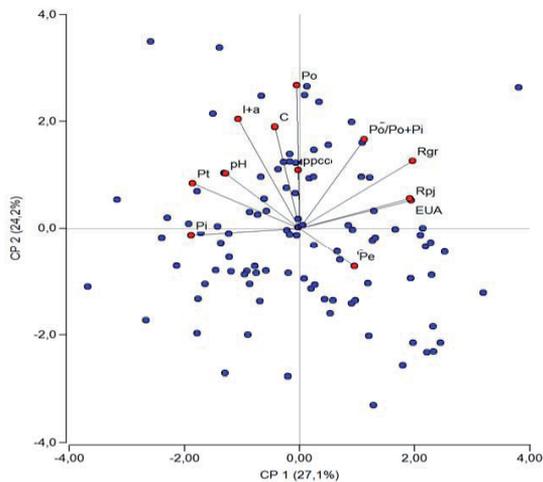


Figura 8. Biplot de componentes principales de todas las variables en relación al fósforo en materia seca

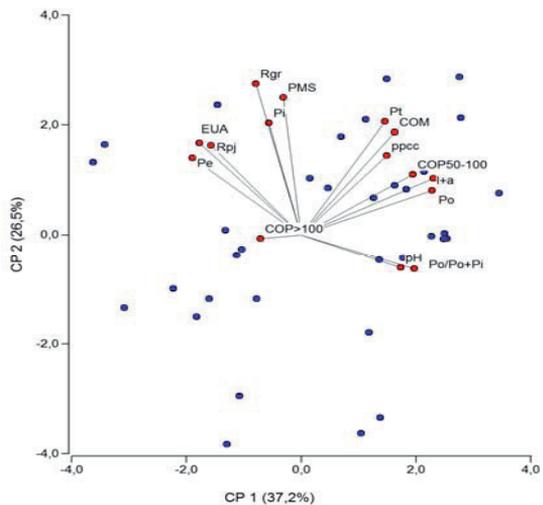


Figura 9. Biplot de componentes principales usando todas las variables y carbono particionado según su labilidad en relación al rendimiento en grano

Se relacionaron todas las variables con el rendimiento en grano, pero en este caso en lugar de incluir en el análisis de componentes principales el carbono orgánico total (C), se incluyeron las 3 formas carbono particulado. Con este nuevo análisis, las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2) explican el 64 % de la variabilidad total, permitiendo la representación gráfica de todas las propiedades medidas en un mismo plano (**Figura 9**). En los suelos estudiados, las fracciones granulométricas tienen gran importancia, sin embargo, para mejorar el ajuste es necesario incluirlo en regresiones múltiples con otros índices y parámetros tanto edáficos como climáticos. Las variables incluidas en el CP1 fueron L+a Pe, Po, Pt y la fracción particulada de COP50-100, esto estaría sugiriendo la importancia de esta fracción lábil en la dinámica del P en SD en el proceso de mineralización. El CP2 está explicado básicamente por 5 variables de mayor influencia, Rgr, PMS, Pi, Pt y COM evidenciando la importancia de esta fracción de C en relación a la dinámica del P y la absorción por el cultivo (**Tablas 12 y 13**).

Tabla 12. Autovalores del análisis de componentes principales

Lambda	Valor	Proporción	Proporción acumulada
1	5,12	0,34	0,34
2	3,53	0,24	0,58
3	1,66	0,11	0,69
4	1,33	0,09	0,78
5	0,94	0,06	0,84
6	0,87	0,06	0,90
7	0,48	0,03	0,93
8	0,34	0,02	0,95
9	0,25	0,02	0,97
10	0,22	0,01	0,98
11	0,16	0,01	0,99

Tabla 13. Autovectores del análisis de componentes principales

Variables	e1	e2
ppcc	0,24	0,23
I+a	0,37*	0,17
Pe	-0,30	0,23
pH	0,28	-0,10
Pt	0,33*	0,33
Po	0,37*	0,13
Pi	-0,09	0,33
Po/Po+Pi	0,30	-0,10
Rpj	-0,25	0,26
EUA	-0,28	0,27
PMS	-0,05	0,40*
COP>100	-0,11	-0,01
COP50-100	0,31*	0,18
COM	0,26	0,30*
Rgr	-0,13	0,44*

2. 6. CONCLUSIÓN

Particularmente las condiciones edafoclimáticas de los sitios evaluados, no mostraron una diferencia entre sitios entre la zona semiárida y subhúmeda. En este caso las diferencias se evidenciaron en mayor medida de acuerdo al año climático, pero no en los tres años en conjunto. En los años de estudio, diferencias estadísticamente significativas entre regiones (semiárida y subhúmeda) estuvieron indicadas por las diferencias en las precipitaciones durante el ciclo del cultivo, las cuáles provocaron diferencias principalmente en el año 2012.

Al aplicar un modelo de regresión múltiple para rendimiento en grano y para todos los sitios analizados, tanto de la región semiárida, como subhúmeda, incluyendo las distintas formas de fósforo (disponible, orgánico e inorgánico), el modelo obtenido, en las situaciones analizadas, incluye las tres formas de fósforo para determinar la variación en el rendimiento en grano.

Las variables que mayor influencia ejercieron en el rendimiento en grano, y en el fósforo asimilado por la planta estuvo relacionado con P_t , P_i y la relación P_o/P_o+P_i . Evidenciando los complejos equilibrios del P en el sistema suelo-planta.

Es necesario considerar el sistema en equilibrio dinámico tanto de las formas orgánicas como las inorgánicas de P, a la hora de considerar este nutriente en la variación de los rendimientos en las zonas analizadas.



CAPÍTULO 3

Formas de fósforo edáfico en secuencias de cultivos bajo siembra directa en el centro sur bonaerense

3. 1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte del fósforo (P) total del suelo no se encuentra disponible para los cultivos (Holford, 1997), sino que está en un equilibrio dinámico entre las formas orgánicas (Po) e inorgánicas (Pi). Las formas lábiles son aquellas que se encuentran disponibles en el corto o mediano plazo para las plantas y los microorganismos del suelo. Este P extraíble (Pe) generalmente es bajo, dadas las características de los materiales originales de los suelos de la región pampeana (Suñer & Galantini, 2012) y su contenido se estima mediante la extracción por métodos clásicos, normalmente Bray-Kurtz u Olsen. La intensificación de la agricultura de las últimas décadas ha acentuado estas deficiencias de nutrientes (Echeverría & García, 2005; Duval *et al.*, 2013), ya que los balances de P son negativos en la mayoría de los sistemas agrícolas y ganaderos argentinos. Actualmente la aplicación de fertilizantes no compensa la exportación que se realiza.

La disponibilidad de P depende tanto de la cantidad disponible inicialmente, como de la capacidad del suelo para reemplazar los iones que son tomados en la vecindad de las raíces. La movilización de las formas menos disponibles hacia la solución del suelo es muy lenta (años) y depende tanto de las características físicas como químicas del suelo, del contenido de las diferentes formas de P y de la actividad biológica.

El P tomado por las plantas es incorporado al suelo en forma de compuestos orgánicos de diferentes características, evolucionando en forma paralela a la materia orgánica del suelo. Tal es así que las formas orgánicas tendrán diferente grado de labilidad, dependiendo de las características del material (desde los residuos de cultivos hasta sustancias húmicas), del ambiente edáfico y de la actividad microbiana.

La labranza del suelo tiende a causar una mayor aireación que estimula la actividad microbiana, conduciendo a la aceleración de la descomposición de la materia orgánica.

La agricultura produce un impacto significativo sobre la disponibilidad del P, por la extracción producida por las cosechas, transformando las formas lábiles en formas de baja solubilidad (Bra *et al.*, 2006, Papiernik *et al.*, 2008) y modificando los equilibrios entre las diferentes formas (Suñer *et al.*, 2014).

Los primeros efectos de la agricultura se observan en las caídas del P orgánico, ya que la materia orgánica (MO) disminuye rápidamente cuando los suelos se cultivan: un 1% de pérdida de MO puede representar una pérdida de 80-120 kg ha⁻¹ de P de la capa superficial (Galantini *et al.*, 2006).

Una agricultura sustentable debería considerar el balance de nutrientes de cada sitio específico. Sin embargo, para el caso del fósforo la intensa interacción con la matriz del suelo no permite predecir fácilmente los efectos de un determinado balance de P en la disponibilidad de este nutriente en el agroecosistema. En tal sentido, los ensayos a campo de larga duración constituyen una herramienta valiosa para estudiar el comportamiento y transformaciones del P del suelo en situaciones contrastantes de rotaciones agrícolas y aporte de fertilizante fosfatado (Suñer *et al.*, 2002).

En planteos de fertilización continua, incrementos en la cantidad de residuos en la superficie del suelo producen una acumulación en el contenido de Po, lo cual hace que la solubilidad del Pi en el suelo, y consecuentemente la respuesta del cultivo, sea menos predecible. Los métodos clásicos de extracción de P del suelo no miden la contribución potencial de P del residuo y de las formas orgánicas de mayor labilidad. La acumulación de Po en los suelos se produce como resultado de aplicaciones de Pi (mediante fertilizantes fosfatados) o fuentes orgánicas debido a una mayor inmovilización neta o un mayor ingreso de residuo vegetal al suelo.

Conocer las formas y la disponibilidad del P en el suelo, resultado del manejo de suelos y residuos, de la aplicación de fertilizantes y la remoción por los cultivos, es esencial para plantear estrategias de fertilización a largo plazo que tiendan a maximizar la eficiencia de uso del fertilizante, asegurar un balance nutricional y garantizar la sustentabilidad de los sistemas agrícolas (Galantini *et al.*, 2000, Suñer & Galantini, 2012).

McKenzie *et al.* (1992) en el sistema trigo-barbecho encontraron que las características de los residuos de las plantas influyen en la mineralización de Po. También se encontró que las rotaciones con leguminosas producen una disminución en los valores de Pe del suelo (Echeverría *et al.*, 1993). Galantini *et al.*, 2007 encontraron que la labranza aumenta significativamente la mineralización de Po e incrementa el P soluble, el que está en relación directa con el aumento de la actividad microbiana (Ohno *et al.*, 2005). La disminución de la concentración de P de la solución del suelo es inmediatamente repuesta a partir de las formas de P lábiles y moderadamente lábiles. Evidentemente, para comprender en forma global la dinámica del P y mejorar la interpretación de los diagnósticos de fertilidad, es necesario conocer las distintas fracciones de P y evaluar el impacto de las diferentes prácticas agrícolas sobre las fracciones orgánica e inorgánica de P.

Se han propuesto varias técnicas de fraccionamiento de P a fin de identificar las diferentes formas en función de su labilidad. Los procedimientos de extracción secuencial de distintas fracciones de Pi y Po desarrollados por Hedley *et al.* (1982) y Tiessen *et al.* (1984) han sido los más utilizados. La asunción implícita es que el P lábil del suelo es removido en principio por extractantes suaves, en tanto las formas menos disponibles del P pueden ser extraídas con ácidos y álcalis fuertes (Buehler *et al.*, 2002). En general, el P lábil es conocido como asimilable para las comunidades vegetales y microbianas en el corto plazo, porque es rápidamente desorbido de las superficies de las partículas del suelo. El P moderadamente lábil incluye el P que es extraído con NaOH, considerado biológicamente asimilable en un lapso intermedio de tiempo. Sería interesante poder relacionar el pool de P orgánico con las características de la materia orgánica comprendida en ese mismo pool a fin de determinar si las diferentes prácticas de manejo producen diferencias en su calidad y cuáles son los cambios que se producen en relación al P, los cuales podrían modificar su interacción con el suelo.

3. 2. Caracterización de la materia orgánica y las sustancias húmicas

La caracterización de la MOS es muy compleja debido a su alta heterogeneidad estructural, caracterizadas por su baja solubilidad y fuertes interacciones físicas y químicas entre sí y con la fracción mineral. Hoy en día son incorporados los estudios que se basan en técnicas espectroscópicas, por ser una herramienta de validez, para obtener información de la elucidación estructural de muchas moléculas que permiten la interpretación de sus propiedades. Entre las técnicas más utilizadas, al ser menos costosas, se encuentran la espectroscopia de absorción **Ultravioleta-Visible (UV-Visible) y la Infrarroja (IR)**.

3. 2. 1. Espectroscopia UV-Visible

La espectroscopia uv-visible en el estudio de las sustancias húmicas (SH), ha sido utilizada para poder discriminar diferencias en su reactividad, origen, tamaño molecular, y grado de humificación y los efectos del manejo sobre la calidad de estas. El espectro de absorción obtenido para las SH, independientemente de su origen, se caracteriza por no presentar máximos definidos, de modo que la absorbancia decrece monótonamente con relación a la longitud de onda. Los parámetros más importantes obtenidos en la espectroscopia UV-Visible aplicada al estudio de las SH son: longitud de onda de máxima absorción y la absorptividad (E) que se puede obtener mediante la ley de Bouger-Lamber-Beer (Dubbs *et al.*, 2009). Absorbancias entre 460-480 nm son indicativas de un material con baja humificación y absorciones a 600-700 nm son indicativas de un material con alto grado de aromaticidad. En el estudio de las SH de diferentes fuentes es común utilizar la relación de los coeficientes ópticos E_4/E_6 que resulta de la relación entre la absorbancia medida a 465 nm y a 665 nm (Rice & MacCarthy, 1991). El procedimiento para su determinación fue descrito por Chen *et al.* (1977). Según Kononova (1966) existe una relación inversa entre la relación E_4/E_6 y el grado de condensación aromática en las SH, por lo que puede emplearse como un índice de humificación. Un índice E_4/E_6

bajo indica alto grado de condensación de los componentes aromáticos mientras que un valor alto es característico de un bajo grado de condensación aromática e indica la presencia de proporciones relativamente altas de estructuras alifáticas. Puede establecerse una relación inversa entre la relación E_4/E_6 y el tiempo medio de residencia del material húmico (Stevenson, 1994); al material con mayor valor de E_4/E_6 le corresponde menor tiempo de residencia, indicando que las sustancias más humificadas y condensadas tienen un origen más antiguo.

Esta relación tanto para AH como para AF se ve afectada por el pH, el tamaño de partícula o peso molecular, la concentración de radicales libres, contenido de O, H, $-CO_2$ H, acidez total y la concentración de grupos cromóforos y auxocromos, dando información acerca del grado de humidificación relacionados con los parámetros absortivos. Stevenson (1994) indicó que en los AF los valores de la relación E_4/E_6 son relativamente mayores (entre 7 y 12) que en los AH (entre 2 y 6).

El otro parámetro importante es el máximo de absorción a 280 nm, puesto que cuanto mayor sea el mismo, indica mayor número de grupos aromáticos condensados. Canellas *et al.* (2010) plantearon que la absorción entre 260-280 nm se debe a grupos de lignino y quinona, por lo que valores altos reflejan un material con mayor grado de aromaticidad y grupos condensados.

3. 2. 2. Espectroscopia IR

Para evaluar la calidad del suelo son muy utilizadas las técnicas de la espectroscopia Infrarroja (IR) pues brindan una solución a bajo costo y en corto tiempo permitiendo mostrar la presencia de ciertos grupos funcionales. Es posible una valiosa caracterización química estructural de estas sustancias, no solo por la presencia de determinados grupos funcionales presentes en la estructura de las SH, sino también por la disposición específica de los mismos. Esta técnica provee información cualitativa de grupos funcionales como R-

COOH, OH-R fenólico, OH- alcohólico, OH- enólico, R-C=O, entre otros, de compuestos estructurales aromáticos y alifáticos.

Para obtener información de los procesos ocurridos sobre el material de estudio es recomendable la comparación de los espectros, pues posibilita además establecer con seguridad las diferencias de dos o más muestras y verificar diferencias naturales a las provocadas por cualquier tipo de manejo (Campitelli & Ceppi, 2008), por lo que los datos obtenidos con los espectros infrarrojos son considerados como un indicador cuantitativo de la composición de la MOS. Así por ejemplo, se establecen como indicadores de la condensación de las moléculas de la MO la relación del contenido de C alifático/C orgánico señales a intervalos de bandas 3000-2800/3100-3000 cm^{-1} , o índices de hidrofobicidad 2920/1050 cm^{-1} , 1660/2920 cm^{-1} , los que indican por ejemplo, que mientras mayores sean sus valores mayor será su resistencia a la degradación microbiana.

La región más interesante de los espectros de IR de las moléculas orgánicas es la comprendida entre 4000 y 400 cm^{-1} . En esta región se encuentran las principales bandas de vibración de los diferentes grupos que forman las moléculas de las SH. En general, puede decirse que los espectros de IR de las sustancias húmicas se caracterizan por su simplicidad y por su parecido (Senesi & Loffredo, 1999).

De todas las bandas que se observan en los espectros de IR de las sustancias húmicas, se suelen escoger las atribuidas a los grupos funcionales más significativos para analizar relaciones entre intensidades y buscar diferencias en composición y reactividad química. Dichas bandas son las que aparecen a 1720 cm^{-1} , 1620 cm^{-1} , 1380 cm^{-1} y 1220 cm^{-1} (Niemeyer *et al.*, 1992).

La relación 1380/1620 se ha empleado con frecuencia para la caracterización de las sustancias húmicas, encontrándose que dicha relación aumenta con el carácter aromático y al disminuir la relación O/C (Johnston *et al.*, 1991). Esta variación indica que la banda a 1380 cm^{-1} tiene una clara

contribución de C aromáticos mientras que a 1620 cm^{-1} predomina la contribución del grupo carboxilato.

En la **Tabla 14** se resumen las principales bandas de absorción IR de las sustancias húmicas y la asignación de las mismas a diferentes grupos funcionales relacionadas con las sustancias orgánicas y el P (Silverstein *et al.*, 1991; Andjelkovic *et al.*, 2006; Song *et al.*, 2001; Amir *et al.*, 2003).

Tabla 14. Bandas de IR y su asignación.

Número de onda (cm^{-1})	Asignación de la banda
775- 975	Bending fuera del plano del C–H aromático
1030- 1080	Estiramiento C–O–C de éteres aromáticos, carbohidratos y polisacáridos
1170	Vibraciones del grupo alcohol
1200- 1260	Estiramiento C–OH de grupos aromáticos y estiramiento C–O–C de éteres arílicos y fenoles
1380-1400	Deformación de los O–H, estiramiento C=O de fenoles, estiramiento anti-simétrico COO- y deformación C–H en alifáticos
1440- 1460	Deformación C–H alifáticos en ácidos grasos
1510- 1540	Estiramiento C–C de aromáticos
1640- 1654	Estiramiento C=C de aromáticos, estiramiento C=O en quinonas, ácidos cetónicos y amidas primarias
2680- 2685	Estiramiento de OH con puentes de H
2840	Estiramiento asimétrico C-H de $-\text{CH}_3$ y $-\text{CH}_2-$ en cadenas alifáticas
2925	Estiramiento C-H alifático (simétrico y asimétrico)
3300- 3500	Vibraciones de los grupos O–H de fenoles, alcoholes y ácidos carboxílicos
1000	Vibraciones de estiramiento P-O-P
1050-970, 830-740	Vibraciones de estiramiento P-O-C (alifático)
1260-1160, 994-855	Vibraciones de estiramiento P-O-C (aromático)
1310-1280	$\text{CH}_3\text{-P}^{\ominus}$
1440-1405	$-\text{CH}_2\text{-P}^{\ominus}$

En Argentina el crecimiento de la siembra directa, ha logrado que el 90% de la superficie agrícola-ganadera del país se desarrolle con este sistema, transformando los sistemas de producción mixtos en agrícolas puros mediante el uso excluyente de la SD (Satorre, 2005). Estos cambios tecnológicos bruscos hacen que no se conozcan detalladamente sus efectos sobre las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo. Esta carencia de información es más evidente en relación a los cambios que se producen en el largo plazo y en el efecto que pueden tener las diferentes secuencias de cultivos, en particular el monocultivo, sobre la sustentabilidad considerando la amplia variedad de condiciones edafoclimáticas.

3. 3. Hipótesis específica

Teniendo en cuenta las diferentes condiciones edáficas y climáticas en la Región Pampeana, las prácticas de manejo producen cambios sobre el contenido y distribución de las formas de P y en la calidad de las fracciones orgánicas a las cuales están asociadas dependiendo de los equilibrios naturales.

3. 4. Objetivo específico

Evaluar el efecto de distintas secuencias de cultivos sobre la dinámica de las diferentes formas de fósforo edáfico y determinar cambios estructurales en suelos bajo SD continua y variable uso agrícola.

3. 5. MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio experimental es un ensayo de larga duración bajo SD ubicado en Chacra Experimental Integrada Barrow (38°19'25" S; 60°14'33" W), cercana a la localidad de Tres Arroyos, en la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

El clima de la zona se clasifica como mesotermal subhúmeda. Las temperaturas máxima, media y mínima promedio anual son 20,4°C, 14,9°C y

7,4°C respectivamente, caracterizando un ambiente templado con un período libre de heladas. Las heladas van desde el 23 de abril hasta el 2 de noviembre (valores medios históricos).

El suelo es un Paleudol petrocálcico, Serie Tres Arroyos. Se utilizó un diseño en bloques (cuatro) completamente aleatorizados (**Figura 8**). En cada parcela se tomaron muestras de suelo (por triplicado) a 0-5, 5-10, 10-20 cm de profundidad y una muestra compuesta a > 20 cm.

Bloque I					Bloque II					Bloque III					Bloque IV				
camino																			
Testigo					Testigo					Testigo					Testigo				

Figura 10. Diseño experimental del ensayo de rotaciones bajo siembra directa.

1 Agrícola conservacionista, 2 Mixto: rotación con pasturas (sin verdeos), 3 Agrícola de invierno (base oleaginosa), 4 Mixto tradicional con verdeos (cultivos de cobertura), 5 Agrícola intenso

3. 5. 1. Secuencias de cultivo

Se trabajó sobre un sistema ya implantado de cinco secuencias iniciado en 1998 (**Tabla 15**), tres exclusivamente agrícolas y dos mixtas, las que incluyeron pastoreo directo.

Las agrícolas respondieron a los siguientes esquemas: **1** Agrícola conservacionista, **3** Agrícola de invierno (para suelos limitados), **5** Agrícola intenso. Las mixtas fueron: **2** Mixto: rotación con pasturas (sin verdeos), **4** Mixto tradicional con verdeos.

El ensayo se llevó a cabo en un lote con menor profundidad de suelo (tosca a 60 cm), intentando representar los suelos regionales con esta característica. Todas las parcelas se fertilizaron con 70 kg ha^{-1} fosfato diamónico en el año de muestreo.

Tabla 15. Cultivos intervinientes en ensayo de cultivos en siembra directa

Secuencia	Ciclo 1					
	Año 1 1998	Año 2 1999	Año 3 2000	Año 4 2001	Año 5 2002	Año 6 2003
1 Agricultura conservacionista	Maíz	Girasol	Trigo	Maíz	Girasol	Trigo
2 Mixto: rotación con pasturas (sin verdes)	Soja	Trigo	pastura	pastura	pastura	Trigo
3 Agricultura de invierno (para suelos limitados)	Girasol	Trigo	Girasol	Trigo	Girasol	Trigo
4 Mixto tradicional con verdes	Trigo	Av/girasol	Trigo	Av/girasol	Trigo	Trigo
5 Agricultura intenso	Trigo	Av/soja	Cz/soja	Ceb/soja	Trigo/soja	Trigo
				Ciclo 2		
Secuencia	Año 1 2004	Año 2 2005	Año 3 2006	Año 4 2007	Año 5 2008	Año 6 2009
1 Agricultura conservacionista	girasol	Trigo	sorgo	Trigo	soja	Trigo
2 Mixto: rotación con pasturas (sin verdes)	soja	Cz/soja	Trigo	sorgo	soja	Trigo
3 Agricultura de invierno (para suelos limitados)	Cz/soja	Trigo	Ceb/soja	Cz/soja	Ceb/soja	Trigo
4 Mixto tradicional con verdes	Av v/soja	Trigo	Av Vi/gira	Trigo	Av Vi/soja	Trigo
5 Agricultura intenso	soja	Ceb/soja	Cz/soja	Ceb/soja	Cz/soja	Trigo
				Ciclo 3		
Secuencia	Año 1 2010	Año 2 2011	Año 3 2012	Año 4 2013	Año 5 2014	Año 6 2015
1 Agricultura conservacionista	Sorgo	Girasol	Trigo	Sorgo	soja	Trigo
2 Mixto: rotación con pasturas (sin verdes)	Trigo	Pastura	pastura	Pastura	Past/soja	Trigo
3 Agricultura de invierno (base oleaginosas)	soja	Cz/soja	soja	CZ/soja	soja	Trigo
4 Mixto tradicional con verdes (cultivos de cobertura)	Av	Trigo	Av	Trigo	Av Vi/soja	Trigo
5 Agricultura intenso	Vi/Girasol	Ceb/soja	Vi/Girasol	soja	Ceb/soja	Trigo

Se utilizó una parcela sin cultivar y sin fertilizar como testigo, anexa al ensayo, en cada bloque se tomó una muestra por profundidad. Las muestras fueron tomadas antes de la siembra de invierno durante el año 4 del tercer ciclo (2013).

3. 5. 2. Determinaciones analíticas

Se realizó el fraccionamiento secuencial de P según Hedley *et al.* (1982) modificado por Tiessen & Moir (1993). En la **Tabla 16** se describen los extractantes utilizados, la denominación y la fracción de P que extraen:

Tabla 16. Secuencia del fraccionamiento y la designación de las fracciones analizadas en el fraccionamiento secuencial de Hedley

Extractante	Denominación	Fracción determinada
H ₂ O	Piag	Pi libremente intercambiable
	Pibic	P lábil inorgánico
NaHCO ₃	Pobic	P lábil orgánico
NaOH	PiNa	P inorgánico moderadamente lábil (ligado al Fe, Al)
	PoNa	P orgánico moderadamente lábil (ligado a los ác. húmicos)
HCl 1M	PHClidil	P asociado al Ca
Residuo de suelo (Digestión)	Pres	P residual

El fósforo disponible para las plantas se estimó mediante el método de Bray-Kurtz (1945).

A raíz de la influencia que tiene el pH sobre la solubilidad de los compuestos de P se determinó el pH; relación suelo: agua 1:2,5 (Jackson, 1964).

El P en todos los extractos fue determinado por el método colorimétrico de vanadato de amonio de Murphy & Riley (1962).

Teniendo en cuenta la estratificación que la SD produce sobre el contenido de nutrientes en el suelo (Suñer *et al.*, 2007), el pH, el Pe y los resultados del fraccionamiento secuencial de P, se analizaron a diferentes profundidades.

En los suelos de todas las muestras de suelo se determinó el carbono total por combustión seca mediante un analizador automático LECO (LECO Corporation, St Joseph, MI)

3. 5. 3. Análisis de espectros

El extracto obtenido durante el fraccionamiento secuencial de Hedley para la extracción del fósforo orgánico relacionado a los ácidos húmicos, extraído con NaOH (PoNa), fue analizado por espectrometría. Se realizaron análisis con uv-visible e IR a los efectos de caracterizar los compuestos orgánicos en esta fracción y relacionarlos con el P orgánico obtenido.

3. 5. 3. 1. UV-Visible

Se utilizó un espectrofotómetro de UV-Visible T60 PG instruments para determinar las absorbancias a:

- 465 y 665 nm para determinar el valor de la relación E_4/E_6
- el máximo de absorción a 280 nm
- 250 nm (E_2) y a 365 nm (E_3), para determinar el valor de la relación E_2/E_3

Determinación de contenido carbono de Ácido Fúlvico

El contenido de carbono de Ácido fúlvico en los extractos de PoNa de las muestras estudiadas se calculó según la siguiente ecuación

$$\text{CAF (ppm)} = 625 \cdot \text{Abs}_{410} + 125 \quad (\text{Zalba et al., 1996})$$

Dónde: Abs_{410} es la absorbancia de la muestra medida a 410 nm

3.5.3.2. Infrarrojo

Se realizó el espectro de IR de las muestras provenientes de la fracción de PoNa en la región $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$. Para ello una gota del extracto se dejó secar sobre KBr, posteriormente se sometieron las sales a la acción de una prensa para obtener las pastillas de KBr al 1%. Para confirmar la presencia de los picos principales asociados a la sustancias orgánicas se procedió a lectura de las pastillas con un espectrofotómetro Thermo Scientific Nicolet iS50 FT-IR. Finalmente se compararon las relaciones entre las intensidades de los principales picos. Las relaciones consideradas fueron: 1650/2920, 1650/1540, 1720/2920, 1380/1620, 1511/2920, 1400/1450, 1440/1210, 1034/2920, 1034/1540.

3.5.4. Análisis estadístico

Se realizó el análisis de varianza (ANAVA) y el test de diferencia de medias significativas (DMS) entre los contenidos de P en los extractos de las diferentes fracciones, usando el software estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2013).

3. 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. 6. 1. Valores de pH

Todas las tratamientos produjeron una disminución del pH, en relación con el suelo de referencia, especialmente este descenso fue mayor en las secuencias 3 y 5. La secuencia 5 (agrícola intensa) fue la que presentó mayor disminución de pH con respecto al testigo, esto se observó tanto en 0-5 como

en 5-10 cm. La secuencia 2 (mixta sin verdeos) fue la que permitió mantener los valores de más cercanos al testigo (**Figura 9**). Este comportamiento podría estar relacionado con la variación en el contenido de MO (Galantini *et al.*, 2000).

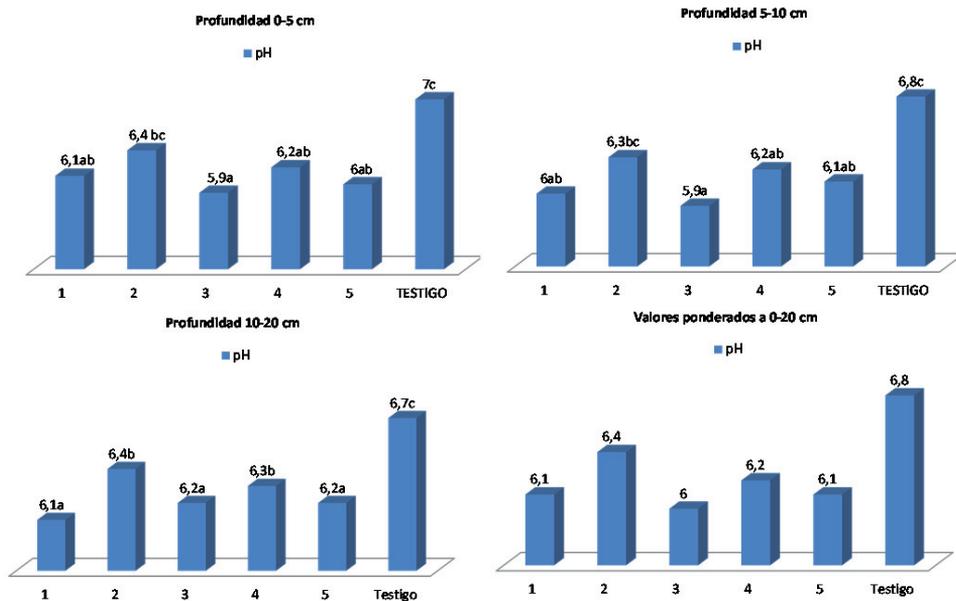


Figura 11. Valores de pH a diferentes profundidades y para cada situación de manejo analizada.

1 Agrícola conservacionista, 2 Mixto: rotación con pasturas (sin verdeos), 3 Agrícola de invierno (base oleaginosa), 4 Mixto tradicional con verdeos (cultivos de cobertura), 5 Agrícola intenso. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.001$) entre los tratamientos para cada profundidad.

Si se considera la profundidad de 10-20 cm, las secuencias agrícolas (1, 3 y 5) mantuvieron los valores más bajos de pH, mientras que las secuencias mixtas (2 y 4) fueron las que menos disminuyeron los valores de pH con respecto al testigo.

3.6.2. Contenido de las formas de P

En general, todas las formas de P presentan una disminución en función de la profundidad de muestreo. Las diferencias significativas más importantes entre las secuencias de cultivo se observaron a los 0-5 cm de profundidad

(Tabla 17). A los 5-10 cm, en cambio, las diferencias encontradas fueron menores y en 10-20 las únicas formas de P las cuáles presentaron diferencias significativas ($p < 0.01$) entre los tratamientos fueron Pe y P unido al Ca.

Tabla 17. Fracciones de fósforo en los suelos estudiados

Prof cm	Manejo	Pe	Piag	Pibic	PiNa	PHCl dil	Pobic	PoNa	Pres	Pi/Po
		ppm								
0-5	1	65,9c	24,5c	37,4b	66,6ab	76,9b	243,0b	270,6a	319,7b	128,5
	2	27,2a	6,3a	14,1a	35,2a	57,9a	144,2a	650,7b	323,4b	55,7
	3	64,1c	16,6b	28,7ab	74,4b	63,3ab	199,9b	548,7ab	379,0c	119,9
	4	35,6b	12,2b	24,9ab	52,3ab	73,5b	165,2ab	287,5ab	232,5a	89,6
	5	59,8c	16,0b	35,7b	55,6ab	64,6ab	227,0b	609,8b	490,8d	107,3
	Testigo	43,9b	17,6bc	46,5b	54,0ab	65,4ab	145,0a	125,3a	179,2a	112,2
5-10	1	37,2c	12,4bc	17,4ab	47,4ab	53,0ab	198,8c	311,1	220,7a	77,3
	2	14,2a	5,76a	4,6a	24,0a	41,78a	108,3ab	403,3	289,6b	34,3
	3	38,5c	9,5abc	13,1ab	37,6ab	47,9ab	168,2abc	460,4	504,8d	60,3
	4	16,0a	7,4ab	17,4ab	32,0ab	62,0bc	73,7a	238,1	288,04b	57,0
	5	25,8b	7,1a	28,2b	63,3b	51,1ab	152,6abc	432,8	400,14c	98,8
	Testigo	18,6ab	14,6c	22,6ab	38,2ab	74,9c	191,8bc	224,4	231,9a	75,6
10-20	1	14,1c	3,8a	9,7a	19,3a	39,0ab	83,4a	303,3	246,67c	32,8
	2	6,0a	2,9a	4,8a	13,0a	32,4a	84,7a	516,9	339,4d	20,8
	3	15,0c	5,2a	13,6a	13,9a	38,0ab	91,8a	665,6	453,6e	32,8
	4	6,6a	2,3a	6,6a	11,8a	39,0ab	71,5a	411,2	277,8b	20,7
	5	10,11b	4,7a	14,9a	12,3a	36,1a	105,0a	496,9	341,5d	32,0
	Testigo	8,86ab	5,2a	14,95a	16,6a	49,8b	78,2a	485,8	193,3a	36,9
0-20 (Valores pondera- dos)	1	32,8	11,1	18,6	38,1	52,1	152,2	297,0	209,4	67,9
	2	13,3	4,5	7,1	21,3	41,1	105,5	521,9	323	32,9
	3	33,1	9,2	17,3	35,0	46,7	137,9	585,0	448	61,4
	4	16,2	6,1	13,9	27,0	53,6	95,5	337,0	269	47,0
	5	26,4	8,1	23,4	35,9	47,0	147,4	509,1	477	67,5
	Testigo	20,1	10,7	24,7	31,4	60,0	123,3	330,3	244	66,9

1 Agrícola conservacionista, 2 Mixto: rotación con pasturas (sin verdes), 3 Agrícola de invierno (base oleaginosa), 4 Mixto tradicional con verdes (cultivos de cobertura), 5 Agrícola intenso. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.001$) entre los tratamientos para cada profundidad y para cada forma de P determinada.

A los 0-5 cm de profundidad la secuencia 2 (con pastura) produjo una disminución de las formas de P disponible y de las formas lábiles, tanto orgánicas como inorgánicas. También en ésta secuencia se produjo un aumento significativo en el fósforo orgánico ocluido en los microagregados (PoNa), favorecido posiblemente por la mayor actividad biológica en la pastura cultivada (Wick *et al.*, 1998). La fracción lábil extraíble (Pibic) desciende en el

suelo cultivado posiblemente debido al aprovechamiento que hicieron del mismo las plantas y por las transformaciones que sufrió hacia formas inorgánicas más resistentes (Tiessen, 1995). Si bien se esperaría que el P proveniente del fertilizante influiría sobre las fracciones de Pi moderadamente lábiles (PiNa, Buehler *et al.*, 2002), en este caso no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$).

En las secuencias 3 y 5 se observó un aumento del Pe; esto estaría en concordancia con el hecho que a pH más bajos empieza a aparecer la forma divalente HPO_4^{2-} que es la forma de P más asimilable por las plantas (Holford, 1997).

A la profundidad de 5-10 cm, la secuencia 2 presentó los valores más bajos de Pe en relación a los demás tratamientos.

No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para la mayoría de las formas de P analizadas en la profundidad de 10-20 cm.

La fracción de P orgánica moderadamente lábil (extraíble con NaOH), fue la fracción predominante en todos los tratamientos y profundidades. Los ensayos mixtos disminuyeron la proporción de Pi en relación al Po. Esta caída es mucho mayor en el tratamiento con pasturas (secuencia de manejo 2), donde la cantidad de Po aumentó significativamente (Po moderadamente lábil). En otros estudios (Suñer *et al.*, 2013) se ha observado que durante el período con pastura disminuyó el P disponible en favor de la acumulación de formas orgánicas. Esto posiblemente está asociado al incremento de materia orgánica que se observa durante el período ganadero. El Po lábil fue más bajo en los sistemas ganaderos y más alto en los agrícolas.

3.6.3. Espectroscopia UV-visible

La **Tabla 18** muestra los valores de E_4/E_6 , cociente entre las absorbancias a 465 nm sobre el valor a 665 nm, calculados a pH 7 para todas las muestras según la diferente profundidad. Dicho parámetro es muy utilizado en la caracterización de la materia orgánica disuelta y en la comparación de SH

de diferentes orígenes. Este cociente es independiente de la concentración de la sustancia húmica en la solución.

La absorbancia a mayores longitudes de onda es indicativa de la presencia de moléculas de mayor tamaño, por lo que los valores del cociente E_4/E_6 se correlacionan inversamente con el peso molecular de las SH (These, 2005) y con el contenido de anillos aromáticos (Lguirati *et al.*, 2005).

Se observaron diferencias en cuanto a las relaciones E_4/E_6 y la profundidad. A los 0-5 cm de profundidad presentan la siguiente tendencia: $2>3>1>4>5>6$. Existe un incremento del grado de polimerización con la disminución de la relación E_4/E_6 . El orden observado se asocia con el incremento en la condensación molecular y la aromaticidad, las que son proporcionales al grado de humificación y maduración del sistema estudiado ya que la que presentó menor por grado de condensación fue la rotación que incluyó mayor números de pasturas (secuencia 2), en cambio el testigo presentó menor relación E_4/E_6 , indicativo de una mayor aromaticidad posiblemente por ser un sistema que presenta mayor tiempo de estabilización, ser más evolucionado y mayor tiempo de maduración las que son proporcionales al grado de humificación del sistema estudiado (Stevenson, 1994).

Se ha observado que el horizonte superficial presenta un valor bajo de esta relación en el manejo que incluye mayor número de pasturas (secuencia 2). En general, debería observarse una disminución de este parámetro con la profundidad debido a la presencia de materiales más degradados, es decir, con un tiempo de residencia mayor, y así se observa para las demás profundidades. En 5-10 el orden de las relaciones E_4/E_6 fue $3>2>1>4>5>6$ se sigue observando que los sistemas que presentan mayor grado de aromaticidad son los manejos 6 y 5, y los que presentan menor grado de aromaticidad son el 2 y el 3. El hecho que el manejo 5 presente mayor grado de carácter aromático estaría sugiriendo que este sistema logra una mejor estabilización. Teniendo en cuenta que es un sistema que incluye un cultivo de invierno (trigo o cebada y soja), la mayor estabilización del sistema sería atribuible a un período largo de

barbecho, recordando que el muestreo se realizó al finalizar la etapa de barbecho.

Tabla 18. Contenido de Carbono total (C), Carbono de Ácido Fúlvico (CAF), Absorción a 280 nm y relación de absorción (E_4/E_6 y E_2/E_3)

Prof	Manejo	C	CAF	E_{280}	E_4/E_6	E_2/E_3
%						
0-5	1	3,41	0,344	70,5	3,44	2,59
	2	3,74	0,293	60,74	3,73	2,56
	3	3,26	0,225	48,99	3,63	2,64
	4	3,61	0,297	68,20	3,41	2,64
	5	3,82	0,320	73,99	3,4	2,66
	Testigo	3,75	0,239	62,25	3,21	2,5
5-10	1	2,98	0,326	82,6	3,36	2,57
	2	2,73	0,266	60,41	3,61	2,64
	3	2,94	0,273	57,649	3,71	2,65
	4	3,59	0,290	75,17	3,42	2,68
	5	3,04	0,300	81,60	3,33	2,71
	Testigo	3,23	0,293	83,34	3,14	2,65
10-20	1	2,80	0,379	66,0	3,47	2,61
	2	4,31	0,347	69,55	3,53	2,66
	3	3,19	0,247	47,582	3,54	2,59
	4	2,57	0,248	67,52	3,45	2,55
	5	2,76	0,285	64,07	3,40	2,70
	Testigo	3,02	0,236	64,87	3,33	2,54

Al analizar los valores de E_{280} se observa que los mayores valores de E_{280} fueron obtenidos para la secuencia de manejo 5 lo que indica que este sistema tiene un alto grado de aromaticidad y dobles enlaces en su estructura, el orden de todos los sistemas fue $5 > 6 > 1 > 4 > 2 > 3$. Es decir los sistemas 5 y 6 en general parecerían estar más estabilizados, los sistemas 1 y 4 presentan un comportamiento intermedio y por otro lado, los manejos 2 y 3 presentarían los

menores niveles de aromaticidad, coincidentemente con lo encontrado al analizar las relaciones E_4/E_6 .

Los valores de las relaciones E_2/E_3 de los extractos analizados, fueron comparables a los encontrados por Kloster *et al.* (2013) en suelos Haplustoles de Argentina. La relación E_2/E_3 es inversamente proporcional a la presencia de especies poco condensadas, de bajo peso molecular (Chilom *et al.*, 2009). Una variación en la relación E_2/E_3 indica una variación en el tamaño de las moléculas. En el caso de los sistemas estudiados los valores obtenidos fueron bastante semejantes, con una ligera variación en la relación E_2/E_3 en el orden $5>3>4>1>2>6$.

3.6.4. Espectroscopia Infrarroja

En la **Figuras 10 y 11** se muestran los espectros de absorción IR obtenidos para las muestras de los extractos de PoNa de los distintos manejos realizados, para las profundidades 0-5 cm y 5-10 cm respectivamente.

La comparación de los espectros IR, de las muestras analizadas, indica que las bandas más afectadas por el manejo serían: la banda de absorción IR que se centra alrededor de los 3400 cm^{-1} y corresponde al estiramiento del enlace O-H de los grupos alcohol alifático, fenol o ácido carboxílico (Andjelkovic *et al.*, 2006). Las bandas a 2920 y 2850 cm^{-1} características de los estiramientos de los enlaces C-H (Stevenson, 1994; Song *et al.*, 2001). La absorción a 1720 cm^{-1} se asigna al estiramiento del enlace C=O de los grupos COOH. Las bandas que aparecen entre 1600 y 1650 cm^{-1} son debidas al estiramiento del enlace C=O en carboxilatos, cetonas y ácidos carboxílicos. El pico a 1400 cm^{-1} es debido a la deformación del enlace C-H alifático y al estiramiento asimétrico del COO-. Las bandas en 1511 y 1540 cm^{-1} son debidas al estiramiento del enlace C=C. Las relaciones entre los principales picos de IR para ácidos húmicos son indicativas de los grados de aromaticidad y policondensación (Amir *et al.*, 2003).

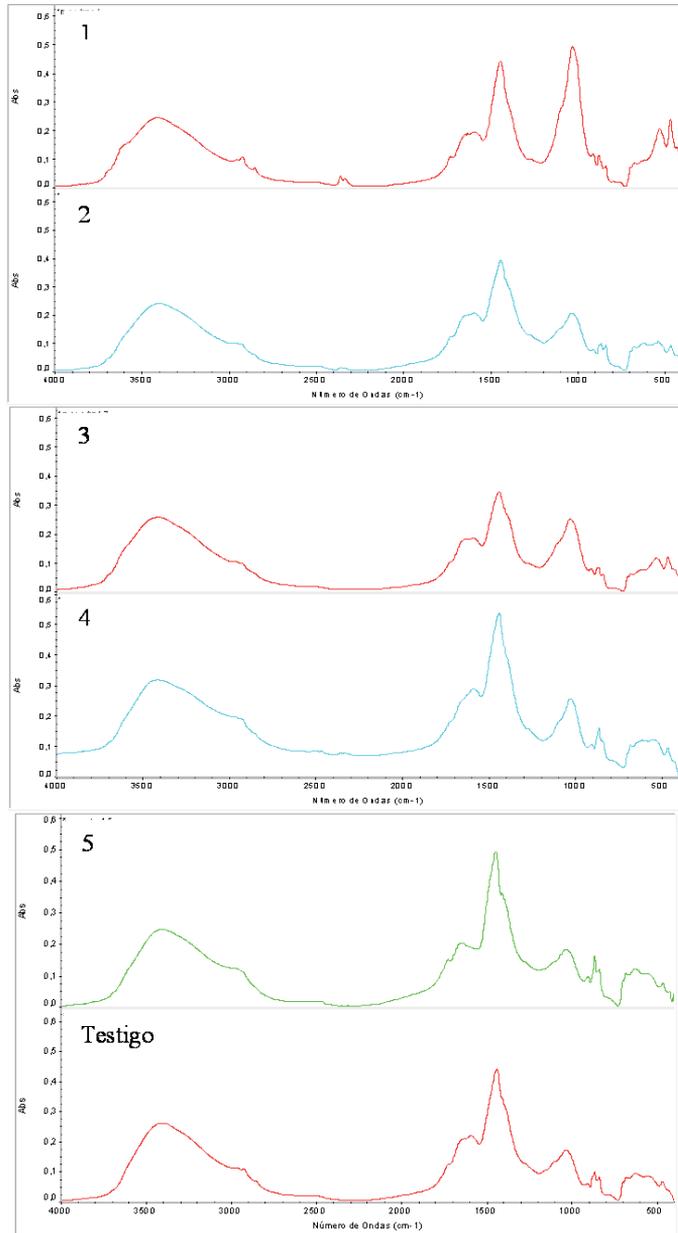


Figura 12. Espectros IR de los extractos de PoNa para las muestras estudiadas a la profundidad de 0-5 cm
 1 Agrícola conservacionista, 2 Mixto: rotación con pasturas (sin verdes), 3 Agrícola de invierno (base oleaginosas), 4 Mixto tradicional con verdes (cultivos de cobertura), 5 Agrícola intenso

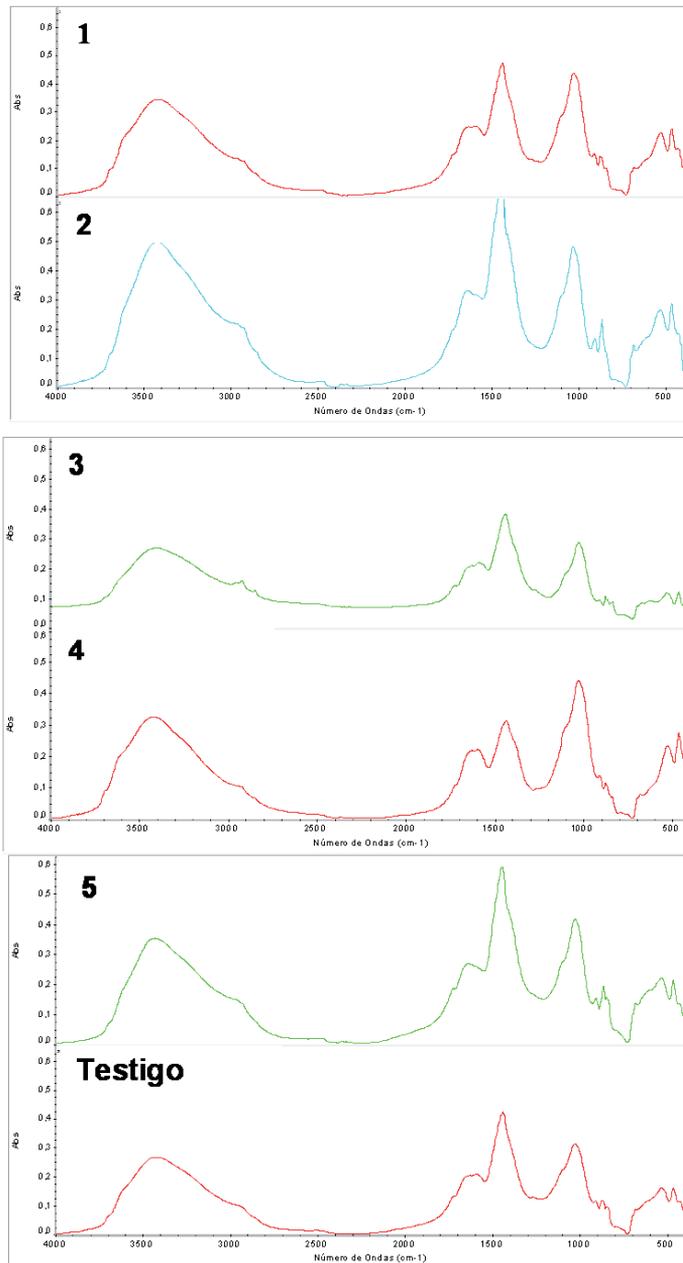


Figura 13. Espectros IR de los extractos de PoNa para las muestras estudiadas a la profundidad de 5-10 cm

1 Agrícola conservacionista, 2 Mixto: rotación con pasturas (sin verdes), 3 Agrícola de invierno (base oleaginosa), 4 Mixto tradicional con verdes (cultivos de cobertura), 5 Agrícola intenso

A partir de la intensidad de los principales picos del espectro de IR de las sustancias húmicas encontrados en la bibliografía (Silverstein *et al.*, 1991) en el presente trabajo se determinaron las relaciones 1650/2920, 1650/1540, 1720/2920, 1380/1620, 1511/2920, 1400/1450, 1440/1210, 1034/2920, 1034/1540.

Tabla 19. Relación de las intensidades de absorbancia de los picos en los espectros infrarrojos obtenidos con los extractos analizados a diferentes manejos y profundidad

Prof	Manejo	1650/ 2920	1650/ 1540	1720/ 2920	1380/ 1620	1511/ 2920	1400/ 1450	1440/ 1210	1034/ 2920	1034/ 1540
0-5	1	1,25	1,07	1,07	1,08	1,25	0,90	1,94	1,14	0,98
	2	1,20	0,97	0,81	1,21	1,48	0,81	2,41	1,29	1,09
	3	1,3	1,04	0,74	1,20	1,56	0,76	2,27	2,47	1,98
	4	1,23	1,04	0,80	1,20	1,55	0,86	1,94	1,49	1,09
	5	1,3	1,18	0,73	1,22	1,14	0,91	1,56	1,73	1,66
	6	1,41	1,07	0,92	1,16	1,29	0,82	1,88	1,18	1,05
5-10	1	1,20	1,10	0,95	1,10	1,16	0,92	1,54	1,53	1,40
	2	1,30	1,04	0,84	1,22	1,40	0,85	2,22	1,42	1,14
	3	1,22	1,02	1,07	1,17	1,32	0,88	1,75	1,46	1,23
	4	1,30	1,04	0,78	1,22	1,44	0,84	2,05	1,43	1,14
	5	1,31	1,03	0,76	1,20	1,45	0,81	2,28	1,79	1,40
	6	1,43	1,09	0,91	1,06	1,39	0,93	1,44	2,22	1,69

1650/2920C=O(COO-)/C-H;1720/2920C=O(COOH)/C-H;1034/2920C-O-C/C-H

1 Agrícola conservacionista, 2 Mixto: rotación con pasturas (sin verdes), 3 Agrícola de invierno (base oleaginoso), 4 Mixto tradicional con verdes (cultivos de cobertura), 5 Agrícola intenso

Los valores del grado de aromaticidad (relación de absorbancia 1650/2920) y del grado de policondensación (1034/2920 y 1034/1540) (Amir *et al.*, 2003) medidas en los extractos de PoNa a diferentes manejos se muestran en la **Tabla 19**. El pico a 1650 se debe principalmente al estiramiento de los dobles enlaces conjugados de los compuestos aromáticos. Los picos a 1540, 2920 cm^{-1} se deben a los compuestos alifáticos, y sirven de referencia del contenido de C alifático. El pico en 1034 cm^{-1} se asigna fundamentalmente a la presencia de estructuras aromáticas policondensadas del tipo de las ligninas (Amir *et al.*, 2003).

La secuencia del grado de aromaticidad (1650/2920) obtenida a partir de la relaciones de absorbancia de los espectros IR de las muestras analizadas fue la siguiente 6>5>1>4>3>2. La secuencia del grado de policondensación

(1034/1540) obtenida a partir de las relaciones de absorbancia de los espectros IR de las muestras analizadas fue la siguiente 3 >5>4>2>6>1.

Según lo analizado hasta el momento los sistemas de manejo más contrastantes son el 2 y el 3, por lo tanto se esperaría que los parámetros evaluados resultaran en valores diferentes. Sin embargo al analizar el grado de aromaticidad ambas secuencias presentaron valores similares (baja aromaticidad), pero la 3 presentó mayor grado de policondensación que la 2.

Dada la complejidad de las sustancias analizadas no se pueden hacer demasiadas conjeturas acerca de la naturaleza exacta de su estructura a partir de los espectros IR. Pero es posible inferir la presencia o no de núcleos aromáticos, así como la presencia de determinados grupos funcionales.

Por otro lado, ¿Cómo es posible explicar el comportamiento similar que parecieran tener los manejos 2, 3 y 5 con respecto a la dinámica del PoNa? Las tres secuencias presentan el pool de PoNa más importante de los manejos analizados, siendo la relación Pi/Po mucho menor en el manejo 2.

Al analizar las relaciones 1380/1620 se observó que justamente esos manejos son los que muestran la mayor cercanía. La relación 1380/1620 resultó en el orden 2>5>3>4>6>1 para todos los sistemas de manejo analizados, se trata de las bandas correspondientes a los distintos modos de vibración del mismo grupo funcional, carboxilato. Los valores de dicha relación resultan, ligeramente superiores en la rotación que incluye mayor número de pasturas (secuencia 2).

Teniendo presente que estas tres secuencias de manejo presentaron altos valores de PoNa, y de estos, la secuencia 2 tenía valores más bajos de Pe, ¿cuál podría ser la diferencia en cuanto a la calidad química de la molécula que en la secuencia 2 mantendría los niveles de fósforo disponible más bajos?. Del análisis de los espectros IR surge que si se estudia la relación 1050/1260, que relaciona un éster alifático con un éster aromático, vemos que la 2 tiene una relación de 1,3 y la 5 tiene una relación de 0,94, es decir que el tipo de éster que predomina mayormente en el manejo 2 es alifático y en la 5 los esteres que tendrían mayor preponderancia son los de tipo aromático. La

presencia de fosfatos inorgánicos en solución puede ser explicada por la baja hidrólisis de P orgánico o más probablemente por la pérdida de ortofosfato asociado con materiales húmicos (Levesque & Schnitzer, 1967, Gerke & Hermann, 1992).

Posiblemente la especie monoester fosfato monoester podría ser una de las especies dominantes en la secuencia 2; esto está de acuerdo con el punto de vista que los monester son la especie orgánica más resistente a la mineralización (Guggenberger *et al.*, 1996). Esto podría explicar el hecho de que la secuencia de manejo 2 no libera P a la solución del suelo, manteniendo los niveles de Pe más bajos.

En nuestro estudio las muestras de las secuencias 3 y 5 (de las tres que tuvieron altos valores de PoNa) tuvieron los porcentajes más altos de P inorgánico extraíble con NaOH (PiNa). Esto puede indicar que la distribución de la especies de P principalmente está controlado por las “proporciones” de las especies de P respectivas en el extracto alcalino total, a partir del cual se precipitan y sólo una parte de P está en asociación libre con ácidos húmicos (Bedrock *et al.*, 1994) En consecuencia, esta parte de P no sería necesariamente altamente resistente.

3. 7. CONCLUSIÓN

La materia orgánica del suelo (MOS) y sus fracciones, específicamente los ácidos húmicos, son indicadores físico, químico y biológico de los cambios que se producen entre los sistemas, pudiendo ser consideradas para evaluar diferencias en relación a los nutrientes que ciclan. No sólo es importante la cantidad de su aporte sino, específicamente con relación a las formas de P, puede mostrar cambios en su estructura que modificarán la forma en que este nutriente interactúe con la matriz del suelo.

La inclusión de pasturas en una rotación mantiene más bajos los niveles de fósforo extraíble o disponible para las plantas, sin embargo ésta es la secuencia que mantiene más altos los niveles de P moderadamente lábil (PoNa) el cuál sería factible que se encuentre disponible durante el ciclo del cultivo.



CAPÍTULO 4

Fertilización con P y N en trigo bajo siembra directa en el sudoeste bonaerense argentino

4.1 INTRODUCCIÓN

El predominio de los sistemas agrícolas han incrementado la tasa de extracción de P, aumentando el área con baja disponibilidad de P asimilable, ya que las dosis de aplicación de fertilizantes han sido muy inferiores a la exportación (García & Ciampitti, 2007). Para mantener los niveles de producción, el P debe ser añadido al sistema suelo-planta como fertilizante mineral para reponer lo que se extrae con la cosecha de granos (Vlek *et al.*, 1997). En particular, en el sudoeste bonaerense el nitrógeno (N) y el fósforo (P) son los nutrientes con mayor deficiencia comprobadas (Loewy & Sewald, 1980; Loewy & Puricelli, 1982). El P presenta interacciones con otros nutrientes, las cuales pueden ser de naturaleza antagónica como el caso de zinc (Zn) o positivas como con N, S, K, y otros nutrientes. Así de este modo, deficiencias de nutrientes como por ejemplo N o S, limitan la respuesta a P. El trigo (*Triticum aestivum* L.) es el cultivo que ocupa la mayor superficie en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires. En esta región se cultivan aproximadamente 1 millón de hectáreas anuales (Galantini, 2014), lo que representa el 20% de la superficie nacional. Los rindes promedios de la zona oscilan entre 1600 y 1900 kg ha⁻¹ (Zillio *et al.*, 2014). La principal característica que define a la zona semiárida es la erraticidad de las precipitaciones. Ello implica la variabilidad de las mismas, tanto en la distribución como en la cantidad (Zilio *et al.*, 2014) afectando la disponibilidad de agua. Una consecuencia directa de ello es la disparidad de los rendimientos interanuales de los cultivos.

En general, la adecuada nutrición del cultivo presenta un impacto positivo sobre la eficiencia en el uso del agua (EUA), atribuido a una mejora en el crecimiento y en el rendimiento del cultivo. Algunos autores han observado, que el P incrementa la EUA y la tolerancia de los cultivos a la sequía a través del desarrollo temprano del cultivo que reduce la evaporación del agua del suelo, favoreciendo la transpiración del cultivo, y por la mayor proliferación (exploración del suelo) y actividad de las raíces (Micucci, 2002).

Actualmente, cerca del 90% del área de cultivo de granos de Argentina se realiza bajo siembra directa (SD) (Aapresid, 2012). Con la expansión de este sistema conservacionista, surgieron cuestionamientos referidos a los criterios para la recomendación de fertilización con P (Rehm *et al.*, 1995), los cuales, en general, se basan en experimentos de larga data realizados con labranzas (Ron & Loewy, 1990). La falta de perturbación del suelo y el aporte de nutrientes en un suelo bajo sistemas de SD continuos produce cambios en la dinámica de los nutrientes que podrían alterar el diagnóstico de fertilidad fosfatada. Por lo tanto, bajo estas condiciones el diagnóstico de fertilidad debería ajustarse a los equilibrios de este nuevo ambiente edáfico, principalmente en esta zona semiárida donde la incertidumbre de las precipitaciones hace necesario conocer adecuadamente el sistema para optimizar la toma de decisiones.

4.2. Hipótesis específica

La fertilización fosfórica en la zona del sudoeste bonaerense produce modificaciones en el sistema suelo - planta que altera la dinámica del P y en consecuencia la productividad del cultivo de trigo.

4.3. Objetivo específico

Evaluar la variabilidad del rendimiento y del P asimilado por la planta teniendo en cuenta el efecto de la fertilización fosfatada en combinación con N sobre la productividad cultivo de trigo y la eficiencia de uso del nutriente fosfórico.

4. 4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.4.1. Sitio experimental

Durante los años 2008, 2010, 2011 y 2012 se realizaron ensayos de fertilización con dosis combinadas de fósforo (P) y nitrógeno (N) sobre el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.). Durante el año 2008, se realizaron dos ensayos

de fertilización uno en el establecimiento Las Ruinas de la localidad de Tornquist (Pcia Buenos Aires, Argentina), y otro en el establecimiento Cumelén cercano al paraje Las Oscuras (Pcia Buenos Aires, Argentina), y durante los años 2010, 2011 y 2012 se aplicó el mismo diseño de ensayo, en diferentes lotes en el sitio Las Oscuras. Los lotes seleccionados tenían una historia de SD continua de al menos 10 años. Las lluvias promedios correspondientes a las zonas donde se realizaron los ensayos han sido presentadas en el capítulo 2, Figura 4a, (zona semiárida) para el sitio Cumelén y Figura 4c (zona subhúmeda) para el sitio Las Ruinas. La ubicación de los sitios y características generales y climáticas se detallan en la **Tabla 20**.

El diseño experimental fue de bloques completamente aleatorizados, con tres bloques y 3 réplicas por parcela. El tamaño de las parcelas fue de 9m x 4m (36 m²).

En el año 2008 en Las Ruinas las dosis aplicadas fueron: 0, 8, 16, 20 y 30 kg P ha⁻¹ y en Cumelén: 0, 7, 11, 15, 18 kg P ha⁻¹. En los años 2010, 2011 y 2012 se utilizó 0, 7, 12, 16 kg P ha⁻¹. Las dosis se establecieron considerando las suministradas por el productor, según la aplicación que habitualmente realizaba en su establecimiento. En todos los caso el P se aplicó en la línea de siembra junto con las semillas. Simultáneamente, en todas las parcelas se aplicó N al voleo, en forma de urea (46-0-0). El N aplicado se calculó de acuerdo al N aportado por el fertilizante fosforado de manera que se, con la suma de ambos, se alcancen las dosis de N de 0, 25, 50 y 100 kg N ha⁻¹.

Se extrajeron muestras de suelo compuestas por 30 submuestras en cada bloque previo a la aplicación de los fertilizantes (profundidad: 0-20 cm). Barbagelata & Melchiori (2008) observaron, que a pesar de la marcada estratificación de P encontrada, la profundidad de muestreo de 0-20 cm tenía un mayor poder predictivo de la respuesta a la fertilización con P que la capa de suelo más superficial (0-5 cm).

Tabla 20. Ubicación, clasificación taxonómica y temperatura de los sitios

Año	Sitios	Localidad	Clasificación Taxonómica	Temperatura, °C		
				media	max	min
2008	Las Ruinas Lote 3 38 ° 00'24,6" S 62°39'32,5" O	Tornquist	Argiudol Típico	14,3	20,7	8,0
2008	Cumelén Lote 1 38 ° 46'47,8" S 61°39'19" O	Las Oscuras	Argiustol Típico	15,0	21,4	8,6
2010	Cumelén Lote 5 38°48'29" S 61°37'7" O	Las Oscuras	Argiustol Típico	15,0	21,4	8,6
2011	Cumelén Lote 2 38 ° 47'12"S 61°39'35,5" O	Las Oscuras	Argiustol Típico	15,0	21,4	8,6
2012	Cumelén Lote 3 38 ° 47'52,7"S 61°38'45,2" O	Las Oscuras	Argiustol Típico	15,0	21,4	8,6

4. 4. 2. Determinaciones analíticas

En las muestras de suelo (previamente secadas al aire y pasadas a través de un tamiz de 2 mm) se determinó:

- N inorgánico en forma de nitratos (N-NO₃.) por el método de Bremner & Mulvaney. (1982),
- N total (Nt) por el método de Kjeldahl (Bremner, 1996),

- pH (relación suelo-agua 1, 2,5),
- fósforo extraíble (Pe) por el método de Bray & Kurtz 1 (1945),
- fósforo orgánico e inorgánico (Po y Pi) por el método de Saunders & Williams (1955).
- Se determinó Carbono total (COT) por combustión seca (1500°C) con un analizador automático de C LECO (LECO Corporation, St Joseph, MI)

El valor de materia orgánica se estimó considerando que un 58% de la misma es C es decir utilizando un factor de 1,724.

Además se calculó la relación $Po/Po+Pi$ de la misma manera que fue calculada en el capítulo 2. Recordando, que es aquella relación que da idea del “equilibrio” que puede existir entre el Po y el P total del suelo, por ejemplo a mayor relación $Po/Po+Pi$ mayor es el contenido de la fracción orgánica respecto de la inorgánica.

4. 4. 3. Materia seca y grano

Para la determinación de materia seca total aérea (MS) y rendimiento de grano, se cosecharon manualmente 2 submuestras de biomasa aérea de 1 m lineal en cada parcela al momento de madurez fisiológica. Las plantas fueron secadas a una temperatura constante de 65 °C, posteriormente se pesaron y se cuantificó el contenido de MS.

Para la determinación analítica del contenido de P, la paja y el grano fueron previamente molidos, y la concentración de fósforo total (Pt) se determinó mediante digestión ácida con nítrico y perclórico a 270°C. (Johnson & Ulrich, 1959). En la solución el digesto fueron medidos los fosfatos por colorimetría de vanadato de amonio (Murphy & Riley, 1962).

4. 4. 4. Parámetros de rendimiento y componentes de calidad

En los años 2010, 2011, 2012 se determinaron los componentes del rendimiento: índice de cosecha (IC); espigas por unidad de superficie (esp m^{-2}), granos por espiga (g esp^{-1}), peso de 1000 granos.

Se probaron diferentes modelos entre los datos de rendimiento y las dosis de P aplicadas. Se seleccionó el de mejor ajuste, correspondiendo el mismo a la ecuación de regresión polinómica $Y = b_0 + b_1 P + b_2 P^2$, donde P es la dosis de fósforo aplicada e Y el rendimiento en grano, ambos en kg ha^{-1} . El coeficiente b_0 representa el rendimiento para la dosis testigo de P. Se derivó la ecuación seleccionada para obtener el producto marginal (PMG) y se obtuvo la dosis de máximo rendimiento (DMáx).

Se calculó la eficiencia aparente de uso de fósforo (EUP) como:

$$\text{EUP} = (\text{PMS}_f - \text{PMS}_0) / P_f$$

Dónde;

PMS_f = fósforo de la materia seca total aérea, a una determinada dosis

PMS_0 = fósforo de la materia seca total aérea del testigo

P_f = fósforo del fertilizante

La eficiencia de uso del agua, la producción de materia seca por unidad de agua utilizada, se calculó a partir de los datos de precipitación y el cambio en el almacenamiento de agua en el suelo durante los períodos de siembra y cosecha del trigo.

$$\text{EUA: } (\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1}) = (\text{kg de grano}) / (\text{ppcc} + H_s - H_c)$$

Donde,

ppcc= precipitaciones en el ciclo del cultivo (mm)

H_s = humedad del suelo a la siembra (mm)

H_c = Humedad del suelo a la cosecha (mm)

4.4.5. Análisis estadístico

Se realizó un ANAVA doble (dosis de P *dosis de N) comprobándose que existió interacción entre las dosis de ambos nutrientes. Por lo tanto, los datos de rendimiento y MS se analizaron en función de las dosis de P en cada dosis de N.

Para el análisis estadístico de los datos de parámetros de rendimiento, se realizó comparación de medias por DMS de Fisher ($p < 0,05$).

Por otro lado, quedando definidas las siguientes variables, Dosis de nitrógeno (**dN**), dosis de P (**dP**), rendimiento en grano (**Rgr**), Rendimiento en materia seca (**RMS**), fósforo en grano (**Pgr**), P en materia seca (**PMS**), precipitaciones en el ciclo del cultivo (**ppcc**). La formas de fósforo **Pe**, **Pi** y **Po**, la relación **Po/Po+Pi** y variables relacionadas con la humedad **ppcc** y **EUA**. Se realizó el análisis de componentes principales de la siguiente manera:

- con todas las variables intervinientes
- utilizando como variable de clasificación rendimiento en grano
- utilizando como variable de clasificación P en materia seca

Se realizaron correlaciones de Pearson entre las variables seleccionadas y los componentes a fin de confirmar su participación en el nuevo vector.

Se realizaron arboles de regresión múltiples en ambas regiones, teniendo en cuenta a las precipitaciones citadas para observar los umbrales en los cuales se maximizaría el rendimiento de MS y grano, utilizándose como medida de heterogeneidad dentro de los nodos a la suma de cuadrados corregida.

Todos los análisis estadísticos se hicieron utilizando el software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2013),

4. 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. 5. 1. Características generales

La **Tabla 21** muestra las propiedades químicas de los suelos utilizados y las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo de trigo. Los años de

estudio, fueron particularmente secos, con niveles de precipitaciones medias anuales muy por debajo de los valores históricos (650-700 mm). En cuanto a las propiedades químicas edáficas, la mayoría de los suelos presentaron niveles aceptables de disponibilidad de N a la siembra para el cultivo de trigo en la zona. También los niveles de MO se mantuvieron cercanos a los valores generales zonales (Landriscini *et al.*, 2015), siendo mayores en el suelo de Las Ruinas.

Tabla 21. Propiedades químicas de los suelos (0-20 cm) y lluvias durante el ciclo del trigo

Año	Localidad	N-NO ₃ ⁻ (kg ha ⁻¹)	Nt (%)	MO	pH	Pe	Po (ppm)	Pi	Lluvia ciclo (mm)	Lluvia anual	EUA
	Las Ruinas	60	0,157	3,7	6,4	28	208	360	191	530	7
2008	Cumelén	84	0,114	2,4	7,2	17	192	170	137	530	12
2010	Cumelén	8,4	0,09	2,4	7,4	16	182	166	246	533	11
2011	Cumelén	86,3	0,121	2,38	5,8	6,2	231	144	153	470	5,5
2012	Cumelén	65,8	0,12	2,47	6,2	16	314	197	252	624	5

N-NO₃⁻: Nitrógeno de nitratos, Nt: Nitrógeno total, MO: Materia orgánica, Pe: Fósforo extraíble; Po: Fósforo orgánico e inorgánico, Pi, EUA: Eficiencia del uso del agua para el lote sin aplicación de fertilizantes.

4. 5. 2. Rendimiento en grano y materia seca

Los rendimientos del testigo en todos los lotes estudiados promediaron los 1915 kg ha⁻¹. Al analizar las ecuaciones de respuesta al agregado de P en cada nivel de fertilización nitrogenada se observaron resultados variables (Tabla 22). Para la dosis testigo de P (b0), el rendimiento del trigo en la mayoría de los casos disminuyó a medida que aumentó la dosis de N.

En cambio en Las Ruinas (2008) el modelo de respuesta cuadrática sólo fue significativo cuando la adición de P se realizó en combinación con 50 kg N ha⁻¹. La DMáx (7,8 kg P ha⁻¹) resultó cercana a las mínimas ensayadas. Los bajos o nulos niveles de respuesta en este sitio se atribuyeron principalmente a la combinación de una baja demanda de P en un suelo con provisión media de P y a la escasez de agua en el año de estudio.

Tabla 22. Coeficientes de la ecuación cuadrática ajustada (b0, b1 y b2), Producto Marginal (PMG), Dosis para Rendimiento Máximo en granos (DMáx) para cada sitio.

Año	Sitio	Dosis (kg N ha ⁻¹)	b ₂	b ₁	b ₀	R ²	PMG	DMáx (kg P ha ⁻¹)
2008	Las Ruinas	0	-0,036	-0,295	1483	0,76 ^{ns}	-	-
		25	0,232	-16,934	1458	0,83 ^{ns}	-	-
		50	-0,424	6,620	1347	0,91 ^{**}	6,62-0,85P	7,8
		100	0,017	-7,140	1369	0,38 ^{ns}	-	-
	Cumelén	0	-4,525	131,170	1915	0,77	131,2-9,1P	14,5
		25	-5,367	21,170	1824	0,90 [*]	121,2-11P	11,3
		50	-6,045	160,480	1684	0,98 [*]	160,5-2,1P	13,3
		100	-4,306	128,410	1845	0,88 [*]	128,4-8,6P	14,9
2010	Cumelén	0	-1,135	-91,78	3104	0,96 [*]	-91,8-2,2P	-
		25	-1,515	-68,21	3221	0,99	-68,2-3P	-
		50	-7,79	85,36	2843	0,98	85,4-5,6P	5,5
		100	-2,845	-2,945	2971	0,65	-3-5,69P	-
2011	Cumelén	0	2,23	-38,63	1227	0,97	-38,6+4,5P	-
		25	-2,24	42,80	1059	0,87	42,8-2,48P	9,6
		50	-3,6	63,41	1119	0,86	63,4-7,2P	8,8
		100	-4,96	100	1173	0,97	-56,9+7,2	7,9
2012	Cumelén	0	-1,77	43,7	1797	0,99	43,7-3,54P	12,3
		25	1,7	-26	1739	0,87	-26+3,4P	-
		50	-4,38	77,75	1801	0,70	77,75-8,8P	8,9
		100	7,9	-135,4	2138	0,91	-135+16P	-

En el ensayo emplazado en Cumelén (2008), los modelos de respuesta cuadráticos resultaron significativos para todas las combinaciones de N y P con valores de R² entre 77 - 98 %. Las DMáx para la mínima (0 kg N ha⁻¹) y máxima (100 kg N ha⁻¹) dosis de N resultó ser de aproximadamente 14,5 kg P ha⁻¹.

En Cumelén (2010) sólo se observaron retornos decrecientes con la dosis de 50 kg N ha¹ y la dosis para el máximo rendimiento fue 5,5 kg P ha⁻¹, en este caso hubo una adecuada provisión de P, pero la lluvia durante el ciclo del cultivo fue mayor, hubo una mejor EUA, por lo que se infiere que el cultivo no necesitó mayor aplicación de P para la EUA. En Cumelén (2011) la aplicación de P produjo efectos positivos sobre el rendimiento del trigo, evidenciando que el P podría encontrarse primero en el orden de deficiencias respecto al N, hecho que podría explicarse en base a los valores de Pe por debajo a los críticos de respuesta probable de la región (Ron & Loewy, 1990). No se observaron retornos decrecientes a la aplicación de P cuando no se aplicó de N (**Tabla 22**, b₂=2,3). Sin embargo, hubo respuesta a la aplicación de P a las diferentes dosis de N aplicadas; en esos casos la Dosis para el máximo rendimiento osciló entre 7,9 y 9,6 kg P ha⁻¹. La baja provisión de P del lote de este ensayo requirió la aplicación de P, a mayores dosis de N fue necesaria la aplicación de P para cubrir los requerimientos del cultivo.

En Cumelén 2012, la aplicación de P sólo produjo retornos decrecientes a la aplicación de 50 kg N ha⁻¹. Si bien es un suelo bien provisto de P disponible, el hecho que haya sido un año con buena disponibilidad de agua, principalmente durante el ciclo del cultivo, produjo la necesidad de mayor aporte de N para cubrir los requerimientos del cultivo. La dosis para el máximo rendimiento fue de 8,9 kg P ha⁻¹.

En Las Ruinas, con alta disponibilidad inicial de Pe en el suelo y 25 kg N ha⁻¹, la curva de regresión no mostró aumentos en la MS por el agregado de P inorgánico (**Figura 14**), es decir, que ese Pe del suelo fue suficiente para alcanzar la máxima producción. Cuando se adicionaron 50 kg N ha⁻¹, la necesidad de P para llegar al nivel máximo de producción fue en aumento. En concordancia con lo observado para el rendimiento en grano, en un año con escasa disponibilidad de agua como lo fue el 2008, la dosis más adecuada para aumentar la producción de MS seca resultó ser la de 50 kg N ha⁻¹. Posiblemente debido a que existía una buena provisión de P. La dosis de 100 kg de N acentuó el efecto negativo de la falta de agua, por lo que no se reflejó

en la producción de MS la cual fue ligeramente inferior a la producida con 50 kg de N.

En Cumelén (2008) donde en el suelo existió una baja disponibilidad inicial de P los incrementos que se produjeron en la MS durante el ciclo del cultivo fueron mayores. Si bien las tendencias fueron siempre positivas al aumentar la dosis de P, las respuestas reflejaron valores similares a las del trigo en Las Ruinas. Con 25 kg N ha⁻¹ la producción de MS fue inferior, 100 kg de N fueron excesivos y 50 kg N ha⁻¹ fue la dosis más adecuada en función a la disponibilidad de agua de ese año en particular. En estas condiciones, se evidenció claramente como al aumentar la dosis de P aumenta la MS, es decir que aumentaría la eficiencia de utilización del N disponible.

En Cumelén (2010), al analizar la materia seca en función de la dosis de P aplicada se observa la interacción N-P-agua sobre la producción de materia seca del cultivo de trigo. A dosis bajas de P no se encontraron diferencias en la producción de MS. Con 12,1 kg de P, se puso en evidencia el efecto diferencial de este nutriente sobre la eficiencia en el uso del agua, donde con el aumento de la dosis de N la materia seca producida era mayor.

Con dosis de P más altas el efecto de este nutriente sobre todas las dosis de N es adverso. En este sentido, el N favorecería la producción de materia seca, el P la eficiencia en el uso del agua y el agua limitaría la productividad. Un desbalance de N generará una mayor demanda de agua, la cuál sería difícil de satisfacer. Un desbalance en P también produjo un efecto adverso.

En Cumelén (2011), un lote con deficiente provisión de P, se evidencian diferencias de las dosis de N cuando no se ha aplicado fertilizante fosfórico, tampoco existen diferencias entre las dosis de N cuando se aplican 7 kg P ha⁻¹. Sin embargo, la aplicación de 12 kg P ha⁻¹ produjo un efecto diferencial, al igual que en 2010, de este nutriente sobre la EUA donde con el aumento de la dosis de N la MS producida es mayor. Con 16 kg P ha⁻¹, si bien los valores MS disminuyen, se sigue manteniendo esta diferenciación entre las dosis de N.

En situaciones de estrés en la etapa final del cultivo, dentro de la región semiárida bonaerense, se ha encontrado que la MS en el momento de madurez fisiológica puede ser hasta 2600 kg ha⁻¹ menor que la presente en anthesis (Minoldo, 2010). En el mencionado estudio, la pérdida de MS representó una pérdida de más del 30% de la materia seca, junto con sus nutrientes. En Cumelén 2012, un año con mayor humedad durante el ciclo del cultivo y una adecuada provisión de P edáfico se observa diferenciación entre las dosis de N a la menor dosis de P (7 kg P ha⁻¹), aumentando la dosis de P las diferencias de los valores de MS entre las dosis de N disminuyen y a la mayor dosis de P (16 kg P ha⁻¹) ya no se manifiestan (Figura 14).

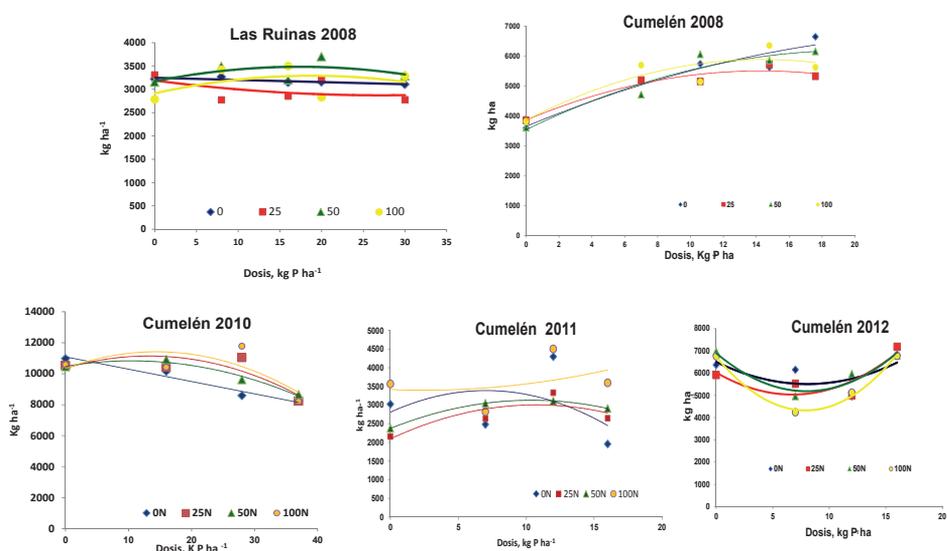


Figura 14. Materia seca total aérea del trigo en función de la dosis de P aplicada, según cada dosis de nitrógeno (25, 50, 100 kg N ha⁻¹)

Nótese que las diferencias encontradas en la MS no fueron detectadas cuando se analizó el rendimiento en grano, consecuencia de la insuficiente cantidad de agua disponible. Salvo en el año 2011, el cual fue un año con buena humedad durante el ciclo del cultivo, en que las diferencias entre las distintas dosis de N se mantuvieron. Se observó una tendencia general a disminuir la cantidad de P en la MS en la medida que se incrementó la dosis de

P aplicada (**Figura 15**). Esto estaría indicando eficiencias negativas para todas las dosis (P) y combinación de dosis (N-P). Esta pérdida de P en los cultivos que tuvieron mayor disponibilidad no estaría asociada a excesos en la disponibilidad del nutriente, ya que en algunas situaciones se observó mayor producción de MS.

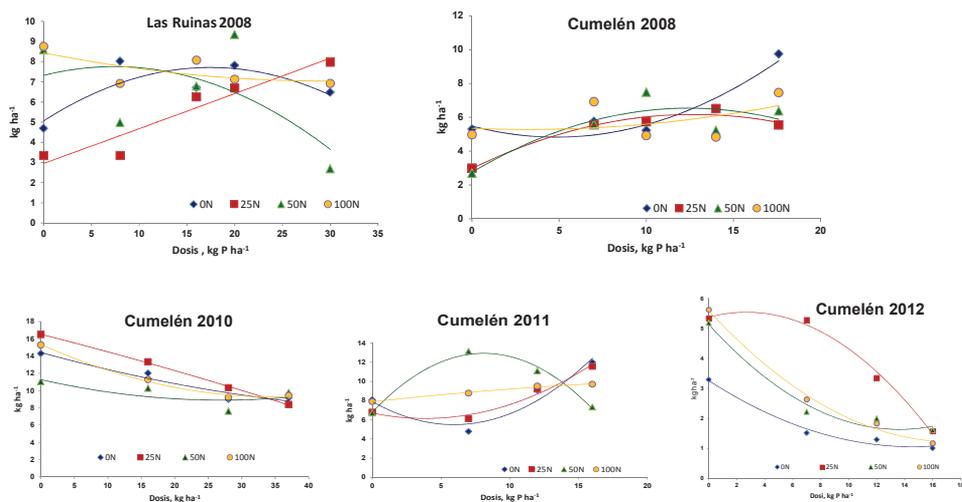


Figura 15. Fósforo en materia seca en función de la dosis de P aplicada, según cada dosis de nitrógeno (0, 25, 50, 100 kg N ha⁻¹)

4.5.3. Parámetros de rendimiento

Analizando el número de espigas (**Figura 16**), se observa que con 50 kg de N la dosis óptima de P para el máximo rendimiento estaría cercana a la primera dosis de 7 kg (5,5 kg ha⁻¹). Las bajas precipitaciones durante la etapa inicial del cultivo, en la mayoría de los años, no produjeron diferencia en el número de espigas. Existió una fuerte interacción N - P - agua. El agregado de P favorece a usar más eficientemente el agua pero tiene que ir acompañado con una adecuada combinación de N de acuerdo a la condición de disponibilidad de agua.

Analizando el peso de mil granos se observa que sin N el agregado de P tiene un efecto adverso sobre el cultivo (**Figura 17**).

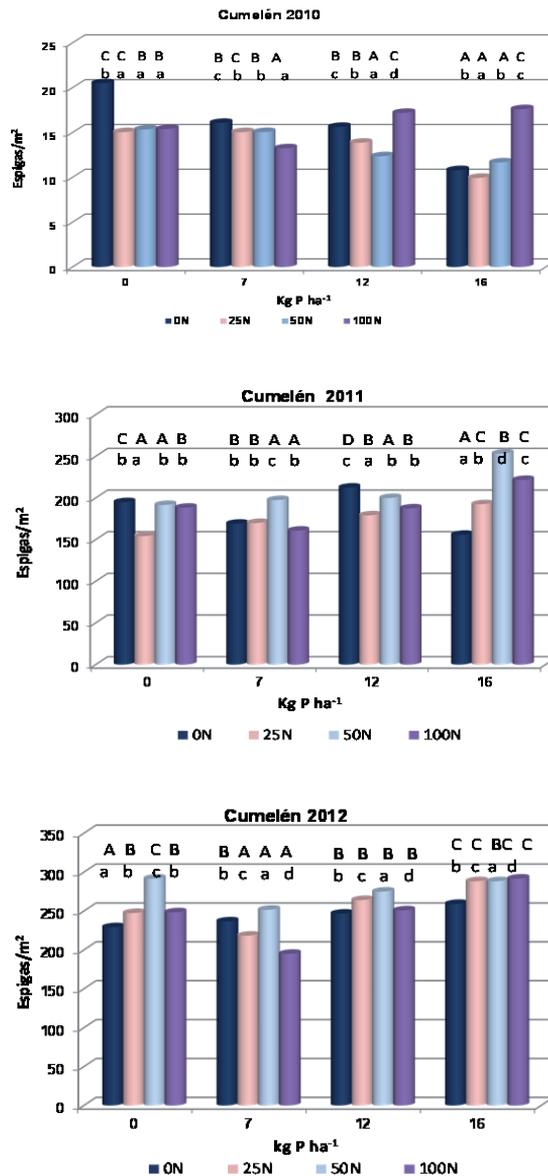


Figura 16. Espigas por metro cuadrado en función de la dosis de P aplicada, según cada dosis de nitrógeno (0, 25, 50, 100 kg N ha⁻¹)
 Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,001$) entre las dosis de P a una misma dosis de N. Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,001$) entre las dosis de N a una misma dosis de P.

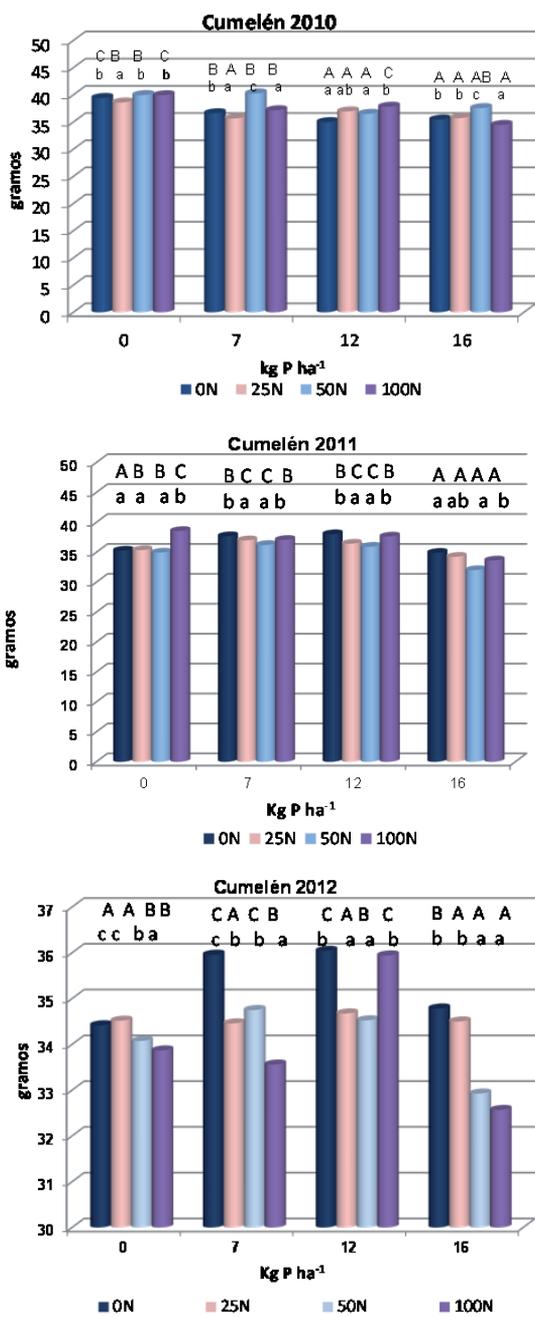


Figura 17. Peso de mil granos en función de la dosis de P aplicada, según cada dosis de nitrógeno (0, 25, 50, 100 kg N ha⁻¹)

Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p < 0,001$) entre las dosis de P a una misma dosis de N. Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p < 0,001$) entre las dosis de N a una misma dosis de P.

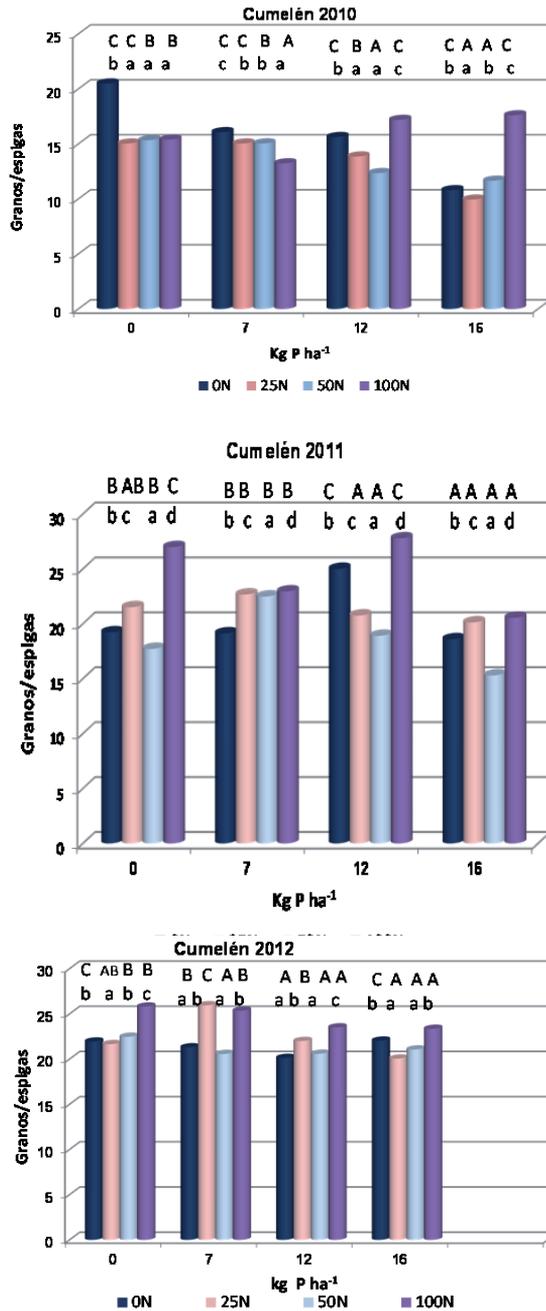


Figura 18. Granos por espigas en función de la dosis de P aplicada, según cada dosis de nitrógeno (0, 25, 50, 100 kg N ha⁻¹)

Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,001$) entre las dosis de P a una misma dosis de N. Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,001$) entre las dosis de N a una misma dosis de P.

Los componentes de rendimiento pueden dar una noción del período del ciclo donde el cultivo sufrió algún tipo de estrés (Martinez *et al.*, 2015). El peso individual de los granos dependerá básicamente de la tasa de crecimiento de los mismos y de la duración del período de llenado (Egli, 2006), los cuales son afectados principalmente por factores ambientales como la temperatura y la disponibilidad hídrica durante su crecimiento (Sofield *et al.*, 1977).

La baja disponibilidad de P afecta el número de granos por la disminución de la radiación interceptada debido a una menor expansión foliar (Lázaro & Abbate, 2001). En el ensayo realizado no se observó una diferencia estadística en el número de granos, aunque se vio una tendencia a aumentar el número de granos por espigas, por el incremento de la fertilización nitrogenada, sobre todo en el año 2012 (**Figura 18**).

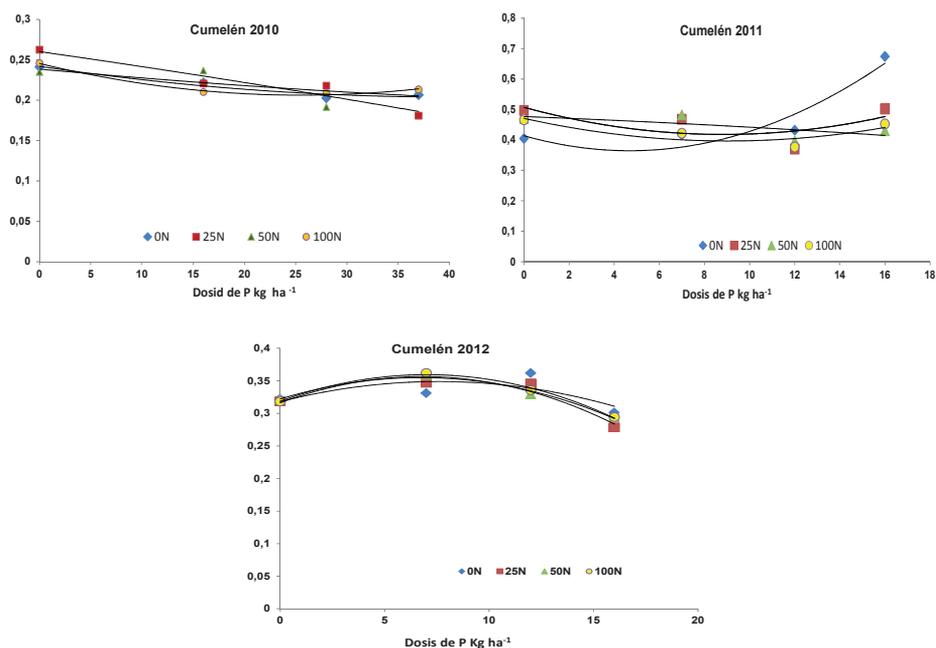


Figura 19. Índice de cosecha función de la dosis de P aplicada, según cada dosis de nitrógeno (0, 25, 50, 100 kg N ha⁻¹)

En general, los Índices de cosecha (**Figura 19**) fueron bajos consecuencia del déficit de agua durante la etapa final del cultivo. A mayor disponibilidad de P, el

índice de cosecha disminuyó poniendo en evidencia que el fertilizante generó mayor MS y por lo tanto una mayor necesidad de agua.

4.5.4. Eficiencia aparente de uso del P

La **Tabla 23** muestra los valores de eficiencia aparente de uso del P del fertilizante para la producción de MS del trigo, en función de las dosis de N también ensayadas.

Tabla 23. Eficiencia del uso aparente del fósforo para cada dosis de P aplicado según cada dosis de N

Año	Sitio	Dosis (kg P ha ⁻¹)	EUP (%)			
			Dosis (kg N ha ⁻¹)			
			0	25	50	100
2008	Las Ruinas	8	4,2	-	-	-
		16	15,5	-	0,5	8,4
		20	13,0	-	7,6	-
		30	5,9	4,9	-	1,47
	Cumelén	7	6,6	-	-	16,5
		11	-	4,8	21,1	-
		15	8,6	0,1	-	-
		18	25,3	-	-	-
2010	Cumelén	7	-	-	0,4	-
		12	-	-	0,2	-
		16	-	-	0,2	-
2011	Cumelén	7	-	-	9,5	12,4
		12	35,3	25,4	-	6
		16	-	14,5	-	1,2
2012	Cumelén	7	-	-	-	-
		12	-	-	-	-
		16	8	9,5	15,9	49,8

En Cumelén (2008), la EUP aumentó con la dosis de fertilización. La mayor eficiencia se obtuvo con 0 kg N ha⁻¹ y 17,6 kg P ha⁻¹ y con 50 kg N ha⁻¹ y 10,6 kg P ha⁻¹. En general con las dosis más altas de N y P se dieron las menores EUP.

En los casos en que se agregó N, las eficiencias más altas se lograron con aumentos de la dosis de P. Por el contrario cuando se agregó N la mayor eficiencia de uso aparente del fertilizante aplicado se logró con las menores dosis de P. Por otro lado, cuando la disponibilidad inicial de P fue mayor, como en el caso del suelo de las parcelas en Las Ruinas (2008), se obtuvieron eficiencias máximas con dosis bajas de P.

La utilización del fertilizante por el cultivo, es decir, la absorción del fertilizante aplicado, varió según la dosis, mostrando muy bajas eficiencias de utilización del fertilizante. El rendimiento de grano dependió de la absorción de fósforo por la planta. Maske *et al.* (2001) informaron que la mayor eficiencia en el uso del P (EUP), en diferentes variedades y en ambientes con deficiencias en este nutriente, se asoció con una mayor eficiencia de absorción del P. Si bien la eficiencia de absorción del P para los diferentes ensayos en general no fue importante, sí aumentó la cantidad total de P absorbido según la dosis de fertilizante.

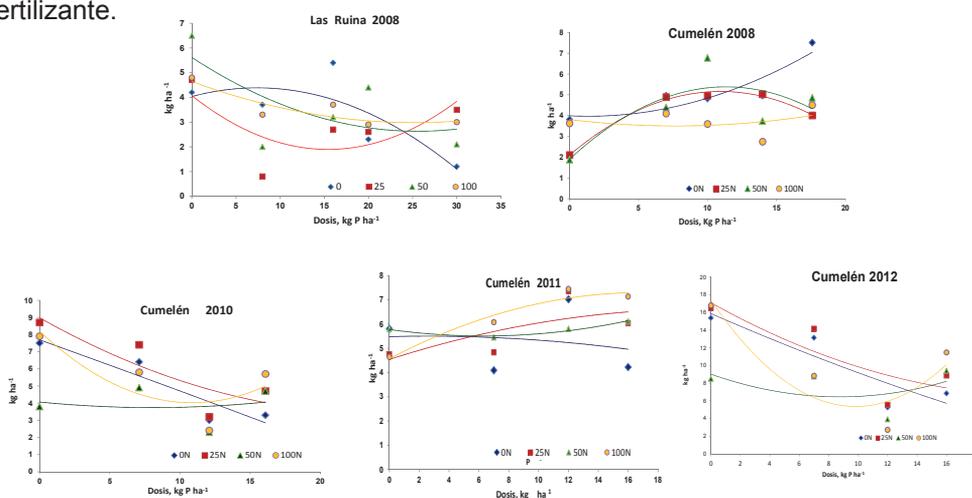


Figura 20. Fósforo en grano en función de la dosis de P aplicada, según cada dosis de nitrógeno (0, 25, 50, 100 kg N ha⁻¹).

Además de aumentar la concentración de fósforo en grano (**Figura 20**), en los tratamientos fertilizados la fertilización también aumentó el rendimiento, por lo que la extracción de fósforo fue mayor. Sólo el agregado de P combinado con 50 kg de N ha⁻¹ presentó EUP en todos los años.

4.5.5. Análisis de componentes principales

Analizando el sistema evaluado mediante el análisis de componentes principales (CP), incluyendo todas las variables analizadas (**Figura 21**), se lograron obtener dos componentes, el CP1 explicó el 43,2% y el CP2 el 24,8%, y ambos en conjunto explicaron el 68% de la variabilidad del sistema en estudio (**Tabla 24**). Las variables con significativas seleccionadas para formar el CP1 fueron: P en grano y en MS, rendimiento en grano y MS, EUA y las lluvias del ciclo del cultivo. Para el CP2, las variables con mayor contribución fueron formas de P disponible, inorgánico, orgánica y la relación Po/Po+Pi (**Tabla 25**). Con la información aportada por el biplot y la tabla de correlación se puede inferir que la CP1 logró asociar variables del cultivo y humedad. En tanto la CP2 asoció las variables relacionadas con las formas de P.

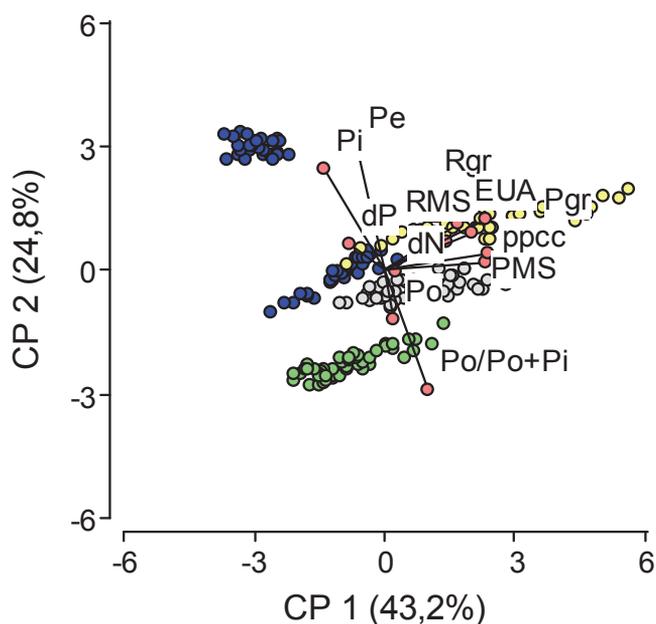


Figura 21. Componentes principales en las que intervienen todas las variables analizadas del sistema en estudio.

(Puntos azules corresponden al año 2008, amarillos 2010, grises 2011, verdes 2012).

Tabla 24. Autovalores de componentes principales en las que intervienen todas las variables analizadas del sistema en estudio

Lambda	Valor	Proporción	Proporción acumulada
1	3,19	0,43	0,43
2	2,98	0,25	0,68
3	1,46	0,12	0,8
4	1	0,08	0,89
5	0,68	0,06	0,94

Tabla 25. Autovectores de los parámetros analizados para los dos primeros componentes principales

Variables	CP1	CP2
d P	0,10	0,06
d N	0,01	-0,02
P gr	0,33**	0,04
P MS	0,34**	0,10
R gr	0,40**	0,03
R MS	0,40**	0,13
Pe	-0,16	0,33**
Po	0,05	-0,45**
Pi	-0,23	0,49**
EUA	0,34**	0,17
ppcc	0,31**	0,21
Po/Po+Pi	0,19	-0,49**

Relación con el rendimiento en grano y el P en materia seca

Al analizar el sistema utilizando todas las variables respecto al rendimiento de grano la mayor variabilidad de este parámetro se puede explicar con sistema de dos CP que en conjunto suman un 65% de explicación de la

variabilidad (**Figura 22**). Una primera separa parámetros de absorción de P (Pgr y PMS) y formas de P (Pi, Pe y Po/Po+Pi) y una segunda que incorpora EUA y ppcc (**Tabla 26 y 27**).

Cuando se consideraron todas las variables respecto al P en MS, la variabilidad total fue de 62% (**Figura 23**). Un CP1 que selecciona como variables RMS, EUA y ppcc, y por otro lado un CP2 que selecciona Pi, Pe y Po/Po+Pi (**Tablas 28 y 29**). Lo que sugeriría que no sólo es importante el fósforo disponible en la solución del suelo sino también el resto de las formas de P, y sobre todo el equilibrio de las formas orgánicas con el P total (Po+Pi). Fernández *et al.* (2005) han demostrado el importante papel de la actividad de los microorganismos en el ciclo de los nutrientes, especialmente el P. Por tanto, el contenido de MO del suelo puede estar relacionado con la disponibilidad de P en virtud de su importancia como fuente de alimento para los microorganismos, no en virtud de su contenido en este nutriente (Needelman *et al.*, 1999). En este trabajo el análisis de los resultados ha demostrado que el fósforo que asimila la planta depende no sólo del P disponible para el cultivo. Sino también del Pi, y del equilibrio de las formas orgánicas con el total del suelo (Po+Pi).

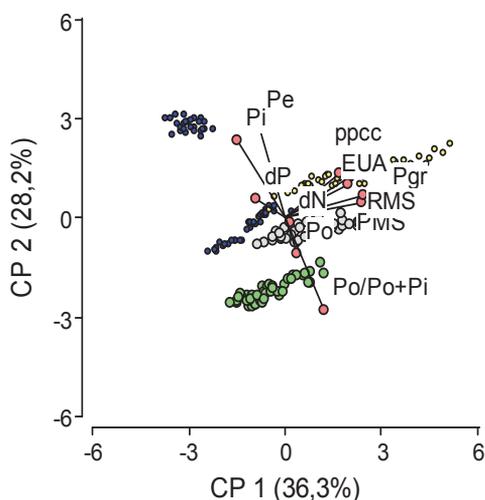


Figura 22. Componentes principales en las que intervienen todas las variables analizadas en relación al rendimiento en grano

Tabla 26. Autovalores de componentes principales en las que intervienen todas las variables en relación al rendimiento en grano

Lambda	Valor	Proporción	Proporción acumulada
1	3,47	0,32	0,36
2	2,88	0,26	0,65
3	1,61	0,15	0,73
4	1,01	0,09	0,82
5	0,95	0,09	0,9
6	0,51	0,05	0,95
7	0,34	0,03	0,98
8	0,16	0,01	0,99

Tabla 27. Autovectores de componentes principales en las que intervienen todas las variables en relación al rendimiento en grano

Variables	e1	e2
dP	0,21	1,90E ⁻⁰³
dN	0,03	0,01
Pgr	0,42**	0,29
PMS	0,41**	0,33
Rgr	0,22	0,26
Pe	-0,34*	0,46
Po	0,12	-0,17
Pi	-0,41**	0,32
EUA	0,28	0,30
ppcc	0,21	0,36
Po/Po+Pi	0,39*	-0,42

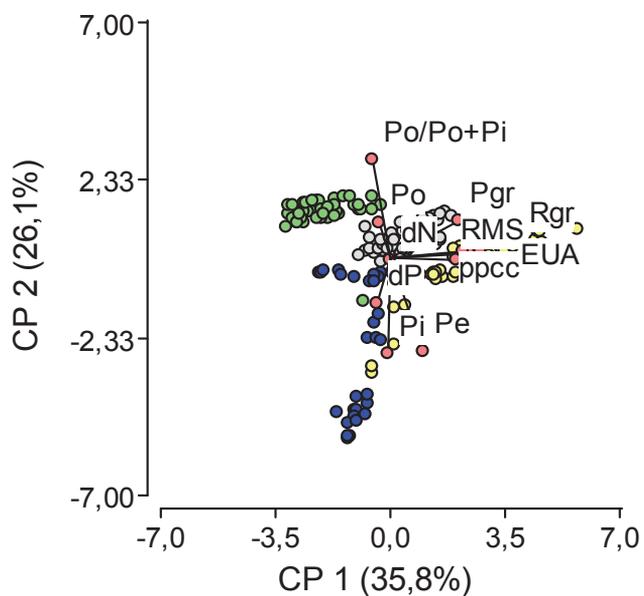


Figura 23. Componentes principales en las que intervienen todas las variables analizadas del sistema en relación al P en materia seca

Tabla 28. Autovalores de componentes principales en las que intervienen todas las variables en relación al P en materia seca

Lambda	Valor	Proporción	Proporción acumulada
1	3,09	0,34	0,36
2	2,25	0,25	0,62
3	1,5	0,17	0,76
4	1	0,11	0,87
5	0,87	0,1	0,97
6	0,22	0,02	0,99

Tabla 29. Autovectores de componentes principales en las que intervienen todas las variables analizadas del sistema en estudio en relación al P en materia seca

Variables	e1	e2
dP	-0,08	-0,24
dN	1,40E ⁻⁰³	-0,01
Pgr	0,3	0,21
Rgr	0,41*	0,04
RMS	0,41	0,04
Pe	0,18	-0,51*
Po	-0,06	0,2
Pi	-0,02	-0,53*
EUA	0,46*	0,04
ppcc	0,38*	-9,80E ⁻⁰⁴
Po/Po+Pi	-0,1	0,55*

Zilio *et al.* (2014) encontraron que las precipitaciones durante el ciclo fue la variable meteorológica que más explicó la variabilidad de los rendimientos. Mediante el uso de árboles de regresión se pudo detectar el efecto de las precipitaciones durante el ciclo, generando umbrales que predicen a los parámetros evaluados. Este análisis resulta robusto ante la presencia de outliers, colinealidad, heterocedasticidad o problemas de distribución de los datos (Aitchison, 1990).

Como puede observarse en la **Figura 24** tanto para rendimiento en grano y rendimiento en MS la primera separación de grupos de casos, se da para 228 mm en el ciclo de cultivo. En los cinco ensayos estudiados, precipitaciones menores a 228 mm durante el ciclo del cultivo permitieron rendimientos del orden de los 1600 Kg ha⁻¹ y precipitaciones mayores a 228 mm posibilitaron rendimientos que promediaron los 2100 Kg ha⁻¹.

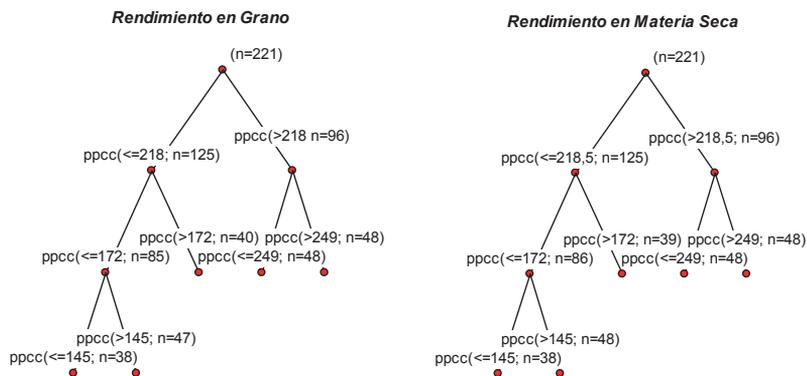


Figura 24. Árbol de regresión de los rendimientos de trigo, en grano (a), y en materia seca (b), en función de las precipitaciones en el ciclo del cultivo. Se indica la variable explicativa y su valor crítico y el número de datos que integra el grupo

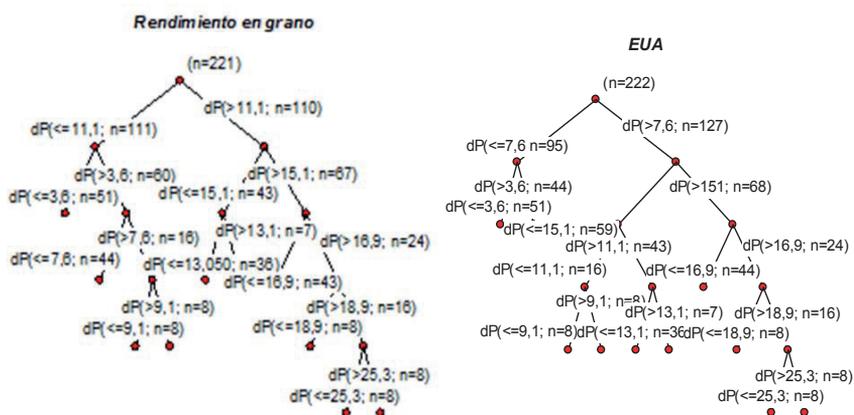


Figura 25. Árbol de regresión de los rendimientos en grano del cultivo de trigo y Eficiencia en el uso del agua, en función de las dosis de fósforo aplicadas. Se indica la variable explicativa y su valor crítico y el número de datos que integra el grupo

Se utilizó la dosis de fósforo como variable en arboles de regresión (Figura 25) para rendimiento en grano pudiendo separar en umbrales según la dosis aplicada. En los ensayos evaluados, los umbrales iniciales que separaron el rendimiento en grano fue de 11 Kg P ha⁻¹. Así mismo como durante el

análisis de los resultados se vio el efecto de las dosis de P sobre la EUA, se utilizó la dosis de P como variable regresora en arboles de regresión para EUA pudiendo separar en umbrales de eficiencia según la dosis aplicada, en los ensayos evaluados, los umbrales iniciales que separan la eficiencia del uso del agua fue de $7,6 \text{ Kg P ha}^{-1}$.

4. 6. CONCLUSIÓN

Cuando la disponibilidad de agua para el cultivo es muy inferior a su requerimiento, la efectividad en la aplicación de fertilizantes se evalúa más acertadamente a partir de la cuantificación de la producción materia seca total del trigo y no del aumento de su rendimiento.

Existe un equilibrio dinámico y sensible entre la disponibilidad de N, P y agua en el suelo que obliga a tener en cuenta los tres factores simultáneamente al momento de diseñar estrategias de fertilización.

La fertilización fosfórica logra hacer más eficiente el uso del agua, contrarrestando los efectos adversos de un año más seco.

La evaluación de la eficiencia de uso del fertilizante debe tenerse en cuenta como una herramienta adicional, pero no es un parámetro determinante en la toma de decisiones.

La absorción de fósforo por el cultivo de trigo está asociada a “todas” las formas de P, no sólo al fósforo disponible para las plantas sino también al inorgánico y a la relación del orgánico con el total. Dicha absorción es posible aumentarla con la fertilización fosfatada, pero también se necesitarían estrategias de manejo que mantengan altos niveles de P_o . Por último, el rendimiento del cultivo de trigo está relacionado con la absorción de fósforo por el cultivo.



CAPÍTULO 5

Efecto de la textura sobre los contenidos y distribución del Fósforo edáfico en la región Semiárida Pampeana

Los resultados de siguiente capítulo han sido presentados en:

International Journal of Plant & Soil Science 7(2):109-120, 2015

“Texture Influence on Soil Phosphorus Content and Distribution in Semiarid Pampean Grasslands”

Autores: Liliana Suñer & Juan Alberto Galantini

IJPSS.2015.136 ISSN: 2320-7035

5.1. INTRODUCCIÓN

La textura del suelo influye en el microambiente del suelo y en la mineralización de la materia orgánica (SOM) de diferentes maneras. Se ha informado de que a mayor contenido de arcilla, mayor es la estabilización de la materia orgánica (Balesdent, *et al.* 2000). La textura del suelo afecta la disponibilidad N y P influyendo sobre la acumulación de MOS (Schimel *et al.*, 1986; Kuhn, 2012), la actividad microbiana del suelo (Hassink *et al.*, 1993) y los equilibrios físico-químicos (McDowell *et al.*, 2003). La textura del suelo afecta el ciclado de la MOS a través de mecanismos directos e indirectos, la MOS total no puede ser un predictor universal de la calidad del suelo (Galantini *et al.*, 2004; Kuhn & Armstrong, 2012; Plante *et al.* 2006). La naturaleza exacta de los efectos de la textura del suelo sobre la dinámica y la disponibilidad de P aún es desconocida (Salas *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2003; Kooijman *et al.*, 2005). La textura del suelo puede modificar el equilibrio y la disponibilidad de P como consecuencia de sus propiedades minerales y fisicoquímicas, su influencia en los procesos de adsorción-desorción-difusión de fosfato, y por medio de la mineralización-inmovilización de la MOS por la actividad microbiana (Schimel *et al.*, 1985; Hassink *et al.* 1993).

La cantidad y la labilidad de P inorgánico (Pi) dependen de la distribución de los diferentes tamaños de las partículas del suelo, su material parental y el grado de meteorización. Aunque el P es mucho menos móvil que los otros nutrientes en el suelo, como nitratos o sulfatos, el impacto directo de la textura del suelo sobre la disponibilidad de P es muy relevante para la producción de cultivos (Barber, 1995). En suelos arenosos, la difusión de fosfato hacia las raíces del cultivo es menor (Bolland & Allen, 2003); en suelos arcillosos, la fijación puede ser mayor, disminuyendo así la provisión de P. Diferentes texturas de suelo, por tanto, generan una amplia gama de comportamientos del P en el suelo (Kirby *et al.*, 1997; MacKauchlan 2006).

El efecto de la textura del suelo en la estabilización de las fracciones de materia orgánica en los suelos de la región semiárida pampeana ha sido estudiado por varios autores (Buschiazzo *et al.*, 1998; Hevia *et al.*, 2003; Zheng

& Zhang, 2012). Hay información sobre la dinámica de las formas P (Salas *et al.*, 2003) y sobre la disponibilidad de P para los cultivos (Zheng & Zhang, 2012) pero se conoce menos acerca de la influencia del tamaño de las partículas del suelo sobre la dinámica del P (Makarov *et al.*, 2004). Se han desarrollado procedimientos de fraccionamiento químico complejo (Hedley *et al.*, 1982; Olsen & Sommers, 1982) para evaluar la cantidad, la disponibilidad y la dinámica de las principales formas de P en el suelo. Estos procedimientos arrojan luz sobre las diferencias en la resistencia química y la susceptibilidad a la degradación biológica, dando lugar a modelos descriptivos extremadamente detallados (Parton & Stewart, 1988). Sin embargo, más recientemente, los métodos de fraccionamiento físico basado por tamaño de partícula separan fracciones orgánicas con muy diferentes características y dinámicas (Andriulo *et al.*, 1990; Christensen, 1992; Cambardella & Elliot, 1994; Janssen, 1984). Por tanto, ahora es posible distinguir entre MOS asociada a las fracciones finas o gruesas del suelo, que muestran su diferente estructura y función. La fracción fina de suelo (arcilla, limo) corresponde a minerales asociados a la materia orgánica (MOM), y la fracción gruesa menos transformada (diferentes tamaños de arena) lábil, joven (Janssen, 1984; Andriulo *et al.*, 1990) o liviana (Janzen *et al.*, 1992) o materia orgánica particulada (residuos de cultivos orgánicos en diferentes etapas de transformación), MOP, (Cambardella & Elliot, 1994; Galantini & Suñer, 2008). La MOM es la principal responsable de la unión con los minerales del suelo, la generación de los complejos órgano-minerales básicos para la formación de microagregados que determinan la estructura del suelo. La MOP por el contrario es el componente más dinámico, jugando un papel activo en los flujos de nutrientes y, por tanto, se encuentra estrechamente relacionada con la disponibilidad de nutrientes para los cultivos (Lützwow *et al.*, 2002; Galantini *et al.*, 2005; Duval *et al.*, 2013; Galantini & Rosell 2006).

Dado que ambas fracciones son relevantes para la fertilidad del suelo, es importante para establecer el contenido de fósforo orgánico (Po) e inorgánico (Pi) y relacionarlas con la textura del suelo.

Podría esperarse diferencias entre el contenido de P en ambas fracciones de tamaño de partícula:

En la fracción fina es esperable que el Po sea más estable y el Pi más disponible; en la fracción gruesa Po es probable que sea lábil o moderadamente lábil, con la presencia de Pi en los minerales más grandes, presumiblemente con menos posibilidad de transformarse en fosfatos en el corto plazo.

5. 2. Hipótesis específica

La textura del suelo modifica los equilibrios de las diferentes formas de P en los suelos de la región pampeana semiárida, principalmente a través de la estabilización en las formas orgánicas resistentes en suelos de textura fina y acumulación en las formas orgánicas lábiles en suelos arenosos.

5. 3. Objetivos específicos

- Determinar el contenido y la distribución de las principales formas de P en suelos de textura diferentes y relacionar con la disponibilidad de P.
- Proponer un modelo conceptual para identificar los cambios de P debido a las características de textura del suelo.

5. 4. MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio de muestreo se encuentra en Bordenave, Argentina (63° 01'20 " W; 37° 51'55" S), y es representativo de la región pampeana semiárida centro-sur. El clima es semiárido templado continental (Csb) (Kottek *et al.*, 2006). La temperatura media anual y las precipitaciones son de 15,2 ° C y 667 mm (1928-2005), respectivamente.

5.4.1. Sitio experimental

Los suelos predominantes en esta región son Haplustoles Enticos y Entisoles (Soil Taxonomy), el cual posee una textura mixta, limosos a arenosos, con una secuencia de horizonte A-AC-C-CCA, y con una capa de tosca a una profundidad media de 0,6 a 1,5 m (Gómez *et al.*, 1981). Al momento del muestreo la vegetación dominante en estos suelos eran especies de pastos nativos (*Stipa* spp, *Bromus* spp, y *Medicago* polimorfa L.), que anteriormente, y durante más de dos décadas, estaban cubiertas por pastos mixtos (*Medicago sativa* L., *Phalaris* sp L. y *Festuca arundinacea* Schreb).

La zona de muestreo fue un sector relativamente pequeño (alrededor de 12 ha) que se caracteriza por un micro-heterogeneidad natural de la textura. Esta elección se hizo con el fin de evaluar la influencia de la textura de MOS y distribución de nutrientes en fracciones de tamaño de partículas del suelo evitando otros efectos debido a la mineralogía, pH, las condiciones climáticas, las poblaciones microbianas y manejo.

Se contaba con un muestreo realizado en diciembre de 1992, en el cual muestras compuestas de suelo (horizonte A, 0-15 cm de profundidad) se recogieron al azar de 27 sitios que ofrecían una textura diferente en el área de estudio (**Tabla 30**).

5. 4. 2. Determinaciones analíticas

- Carbono (COS) por combustión seca mediante un analizador automático LECO (LECO Corporation St Joseph, MI),

Se determinaron las siguientes formas de P:

- extraíble (Pe) por Bray-Kurtz 1 (Bray & Kurtz, 1945): extracción con ácido clorhídrico (HCl) 0,025 M y fluoruro de amonio (NH₄F) 0,03 M (pH 2,9) ratio, suelo / solución 1: 7, agitando tiempo 1 min, este método está

indicado para suelos con pH neutro a ligeramente ácido (Zalba & Galantini, 2007). Pe no se determinó en las fracciones debido a la separación física de partículas podría lavar algunas formas de P disponible.

- Total extraíble (Pte) (Sommers & Nelson, 1972), con una digestión con ácido perclórico a 270°C;
- Total (Pt) con carbonato de sodio (Jackson, 1958), 0,1-1 g de muestra se agitó en carbonato de sodio (Na_2CO_3) a 900 °C seguido de la desintegración de la masa fundida en ácido clorhídrico (HCl)
- orgánico (Po) e inorgánico (Pi) por el Método de Saunders y Williams (1955): extracción con ácido sulfúrico (H_2SO_4) 1 N, tiempo de agitación 16 horas; Po se determina por diferencia entre una muestra calcinada suelo (en mufla a 550 °C) y otro sin calcinar.
- El P ocluido (Pocl) se calculó como la diferencia entre Pt - (Po + Pi). Algunos autores consideran que Pocl está fuertemente adsorbido o precipitado y tiene una disponibilidad para la planta muy lenta (Giuffré, 2005). En este trabajo, consideramos que la Pocl es el P químicamente no extraído por el método de Williams (1955) y Saunders.
- En todos los extractos el P inorgánico se determinó por el método colorimétrico de vanadato amonio (Murphy & Riley, 1962). Todos estos métodos se describen completamente por Sparks *et al.* (1996).
- El pH del suelo fue determinado con un electrodo de vidrio en una relación suelo: agua 1: 2,5 (Thomas, 1996).

Tabla 30. Fósforo disponible (Pe), textura y pH de los suelos estudiados

Suelo	Pe $\mu\text{g g}^{-1}$	%		pH
		arcilla+limo	Arena	
1	16,4	14,5	85,1	6,5
2	16,1	14,1	85,8	6,6
3	14,1	31,7	68,3	6,8
4	38,9	65,6	24,4	6,8
5	10,8	26,6	73,4	6,8
6	23,1	38,0	62,0	6,8
7	34,4	38,2	61,8	7,7
8	22,6	39,5	60,5	7,1
9	30,8	57,3	42,7	7,2
10	16,8	14,8	85,2	6,8
11	25,0	14,3	85,7	6,7
12	19,4	29,2	70,8	6,9
13	53,9	59,9	40,1	6,8
14	12,3	29,4	70,6	6,8
15	35,2	35,2	64,8	6,6
16	20,9	36,8	63,2	7,6
17	21,5	45,7	54,3	7,0
18	30,1	55,5	44,5	7,2
19	18,7	13,9	86,1	6,7
20	12,3	14,9	85,1	6,7
21	22,8	31,7	68,3	6,8
22	62,9	62,6	37,4	6,6
23	12,7	27,3	72,7	6,7
24	34,4	34,3	65,7	6,7
25	36,5	37,1	62,9	7,1
26	15,5	45,2	54,8	7,0
27	30,4	54,0	46,0	7,2
LSD	13	15	20	0,2

5.4.3. Determinaciones físicas del suelo

Para el fraccionamiento por tamaño de partícula, se utilizó el tamizado en húmedo del suelo (Andriulo *et al.*, 1990; Christensen 1992). Para el cual, 50 g de suelo, previamente secado al aire y tamizado (2 mm), se dispersó en recipientes de vidrio de 120 ml, y se mezcló con 100 ml de agua destilada. Se añadieron perlas de vidrio (5 mm de diámetro) para aumentar la destrucción total y reducir los potenciales problemas creados por diferentes contenidos de arena (Cambardella & Elliot, 1994). Las muestras fueron sometidas a dispersión mecánica a través de un agitador rotatorio durante aproximadamente 16 h

(durante la noche a 40 rpm) para desintegrar los agregados. El cribado se realizó con un tamiz de 140 mesh, haciendo movimientos de ida y vuelta hasta que el agua que salió por el tamiz estuvo límpida. Se obtuvieron dos fracciones de tamaño de partículas: la fracción fina (0-100 micras) y el grueso (100-2000 m) ambas fracciones se secaron a estufa a 65°C. La fracción fina contenía arcilla, limo, muy finas arenas y humificados o mineral asociado materia orgánica (MOM). La fracción gruesa tenía arena y materia orgánica menos transformada también llamada joven o materia orgánica particulada (MOP). Los mismos métodos químicos descriptos anteriormente también se aplican para determinar Pte, Po y Pi en ambas fracciones

5. 4. 4. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el análisis de la varianza (ANAVA) y las diferencias mínimas significativas (LSD), el análisis de regresión, y componentes principales utilizando el software InfoStat (Di Renzo, 2013).

5. 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. 5. 1. El fósforo en el suelo

Hubo una correlación positiva entre el contenido de formas de P y el contenido de limo y arcilla del suelo (**Figura 26**). La reserva total P (Pt), que va desde 300 hasta 600 mg g⁻¹, dependiendo de sedimentos del suelo y el contenido de arcilla ($R^2 = 0.70$, $p < 0.001$). Mayor contenido de arena provoca “dilución” del contenido de P, lo que disminuye la reserva total de P en suelos arenosos. Un comportamiento similar se observó para el resto de las formas de P estudiadas. Sin embargo, cuando se analizaron las formas más disponibles, las correlaciones decrecientes siguiendo el orden Pi ($R^2 = 0,65$, $p < 0,01$)> Po ($R^2 = 0,61$, $p < 0,05$)> Pe ($R^2 = 0.50$, $p < 0.05$) muestran que otros factores intervienen en la modificación de los equilibrios. Teniendo en cuenta el hecho de que las condiciones del clima y la vegetación fueron similares, se infiere que

de la textura del suelo explica más del 50% de la variabilidad de los contenidos de P.

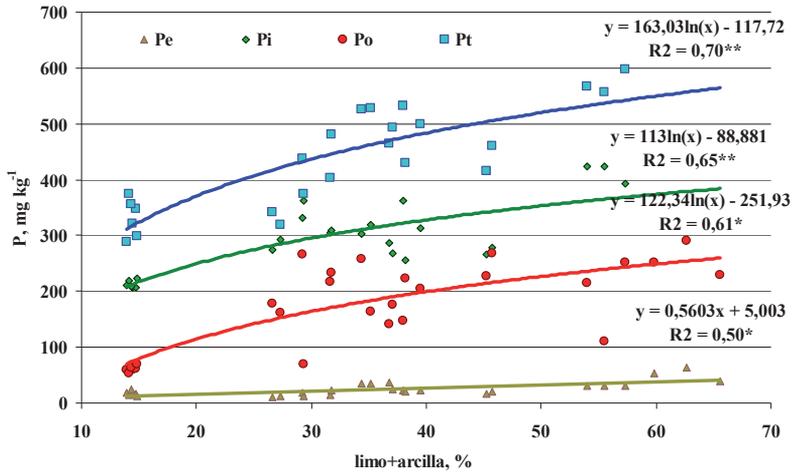


Figura 26. Contenido de fósforo extraíble (Pe, amarillo) Orgánico (Po, rojo), inorgánico (Pi, verde) y total (Pt, azul) en función del contenido de arcilla+ limo (n=27)

5. 5. 2. El fósforo en la fracción fina del suelo

En la fracción fina, se observó una correlación positiva entre las formas de fósforo y el contenido de arcilla y limo del suelo (Figura 27). Pt y Pi tenían las pendientes más marcadas y los coeficientes más altos, mientras que Po mostró mayor variabilidad. La diferencia entre Pt y (Po + Pi), o P ocluido, fue mayor en los suelos de textura más fina, lo que sugiere que en estos suelos el tamaño de partícula más fino proporciona una mayor protección.

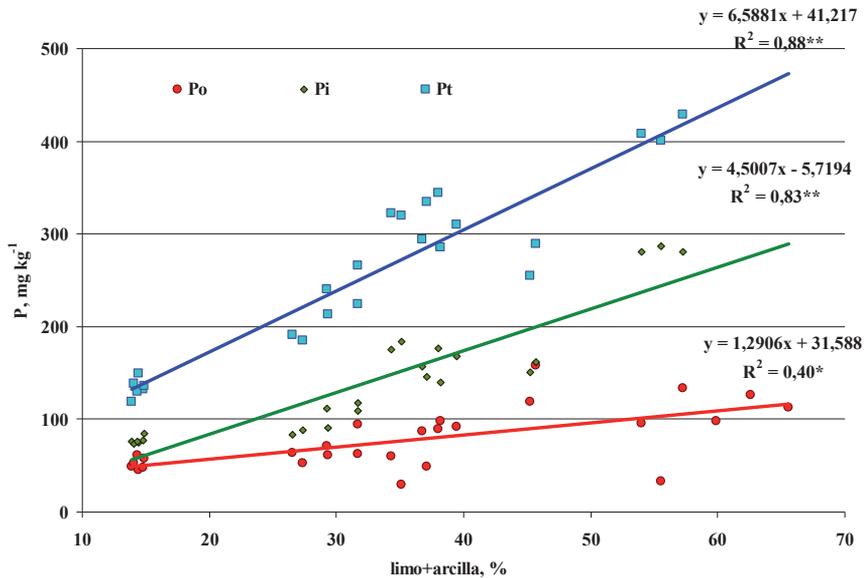


Figura 27. Contenido de fósforo Orgánico (Po, rojo), inorgánico (Pi, verde) y total (Pt, azul) en la fracción fina del suelo (0- 100 µm) función del contenido de arcilla+ limo (n=27)

Esto demuestra la importancia de la fracción mineral más pequeña para equilibrios P y también podría indicar un mayor nivel de precipitación (Suñer & Galantini, 2013), la fijación y otros procesos físico-químicos. Además, las diferentes pendientes en las ecuaciones obtenidas de Pi y Po podrían indicar que la relación entre las diferentes formas de P varía con las diferencias en la textura del suelo. Así, la relación de Po: Pi fue menor para los suelos arenosos que en suelos de textura fina, como se observa en las fracciones orgánicas (Galantini *et al.*, 2004). En suelos predominantemente arenosos el Po contribuyó significativamente al total, mientras que en las texturas más finas la reserva de Pi fue la más alta. La influencia en la fertilidad real y potencial es que los suelos arenosos son más dependientes en gran medida de los ciclos de mineralización MOS y que la pérdida excesiva de MOS podría tener un alto impacto en la sostenibilidad. Si la mineralización biológica de P orgánico es el mecanismo principal, el equilibrio natural de P en suelos de textura fina se

puede restaurar mediante el suministro de fertilizantes inorgánicos, pero en suelos arenosos a través del aporte de residuos orgánicos. Se observó una estrecha correlación entre la fracción fina y la materia orgánica asociada, pero no así en el caso de contenido de Po. Como fue corroborado por los valores de P determinados sin tener en cuenta el contenido de la fracción fina de P (datos no mostrados), estos resultados indicaron que MOM (asociado con la materia fina <0,1 mm) contiene menos P cuando la textura del suelo era más fina. Otro estudio llevado a cabo en los mismos suelos mostró que el suelo arenoso, a pesar de su contenido MOS inferior, era más rico en contenido de nitrógeno y azufre (Galantini *et al.*, 2004). Se refería, aunque el contenido de MOM es menor en suelos arenosos, puede ser más rico en N, S y P. La cantidad de estos nutrientes liberados durante la mineralización podría ser proporcionalmente mayor, con lo que para la cantidad más baja de SOM.

5. 5. 3 El fósforo en el suelo fracción gruesa

Se observaron diferencias en la relación entre las diversas formas de P y la textura en la fracción gruesa. Pt fue menor en suelos de textura más fina, Po fue mayor y Pi mostró gran variabilidad sin ninguna tendencia definida (**Figura 28**). La mayor cantidad de partículas gruesas (> 0,1 mm) en suelos arenosos correspondió principalmente a minerales con un aporte no significativo de P a esta fracción. Por otro lado, se observó una correlación significativa entre la materia orgánica particulada (MOP) y la textura en estudios anteriores, que representan el Po mayor en suelos con fracciones más finas (Galantini *et al.*, 2004).

Estos resultados mostraron el cambio en la importancia relativa de cada una de estas fracciones en suelos con diferente textura. Pi contenido en la fracción gruesa era muy variable y no mostró ninguna tendencia definida, variando alrededor de 150 mg kg⁻¹, mientras que el contenido Po aumentó con el aumento de cantidades de materia fina (Zheng *et al.*, 2003).

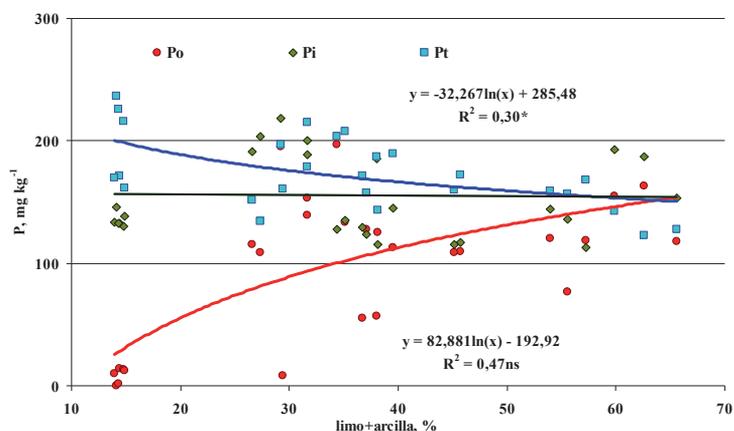


Figura 28. Contenido de fósforo orgánico (Po), inorgánico (Pi) y total (Pt) de la fracción gruesa (> 100 μm - 2mm) en función del porcentaje de limo más arcilla

Dado que mayor contenido de fracción fina significa menor contenido de fracción gruesa, los presentes hallazgos podrían indicar enriquecimiento en Po en la fracción gruesa de los suelos de textura más fina, como posteriormente fue corroborado por el análisis de los resultados no ponderados de las formas de P del suelo.

Tal enriquecimiento da lugar a mejorar la retención de humedad y suministro de nutrientes a los cultivos por los minerales más pequeños (limo y arcilla) y su materia orgánica asociada (Hevia *et al.*, 2003).

5. 5. 4 Relación entre las diferentes formas de P y la disponibilidad

La contribución de cada una de las fracciones de suelo se midió correlacionándolas con Pe, que es la herramienta de diagnóstico más frecuentemente utilizada en la región de estudio para evaluar la disponibilidad de P (**Figura 29**). La correlación entre el suelo y el Pi Po y Pe fue baja ($R^2 = 0,24$ y $R^2 = 0,19$, respectivamente, $p < 0,05$); el contenido de Pt representó el

60% de la variación en P. Aunque el contenido de Pt es uno de los factores determinantes de la disponibilidad de Pe, no todas las fracciones contribuyen de una manera similar. El Pi en la fracción fina mostró una correlación significativa a Pe ($R^2 = 0,50$; $p < 0,01$) (**Figura 30**). Estudios anteriores han demostrado que P extraído por el método de Bray y Kurtz (1945) podría tener un origen predominantemente inorgánico (Baravalle *et al.*, 1995). Los resultados del presente estudio confirman esta observación e incluso son capaces de identificar el origen preciso: fracción inorgánica $< 0.1\text{mm}$.

El Pe aumenta de forma concomitante con el aumento de Po, en particular en la fracción gruesa (**Figura 31**). Las correlaciones fueron bajas debido a la dispersión de los datos, lo que podría ser debido a la variabilidad de las partículas de materia orgánica (residuos en distintas etapas de descomposición), la variabilidad de la determinación de Po, y el efecto de textura en el contenido de P en el MO. El Po del suelo representó el 19% de la variabilidad en Pe, que corresponde principalmente a la fracción gruesa.

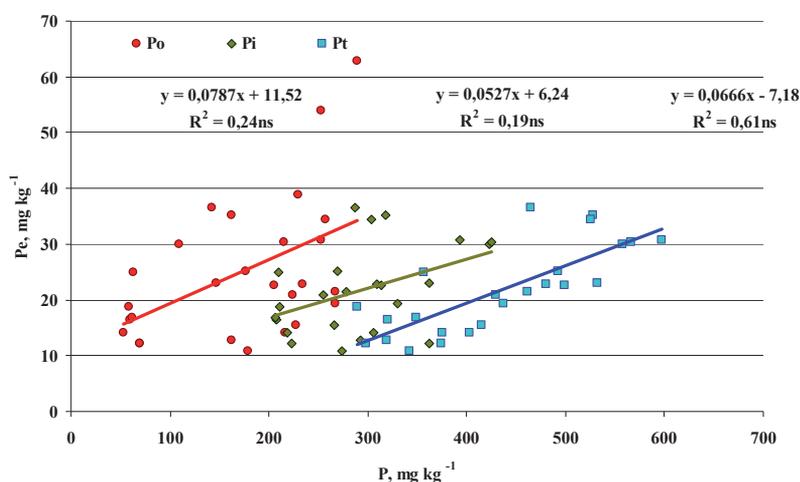


Figura 29. Relación entre el P extraíble (Pe) y los contenidos de P orgánico (Po), inorgánico (Pi) y total (Pt) del suelo

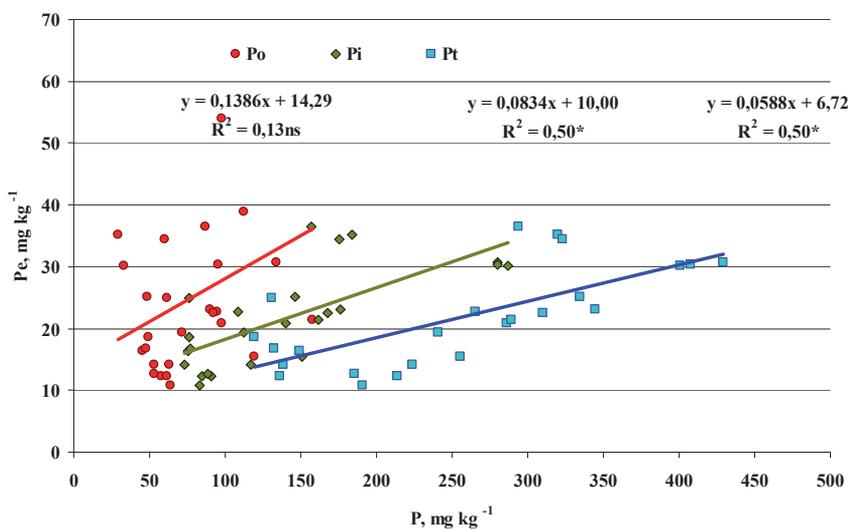


Figura 30. Relación entre el P extraíble (Pe) y los contenidos de P orgánico (Po), inorgánico (Pi) y total (Pt) de la fracción fina

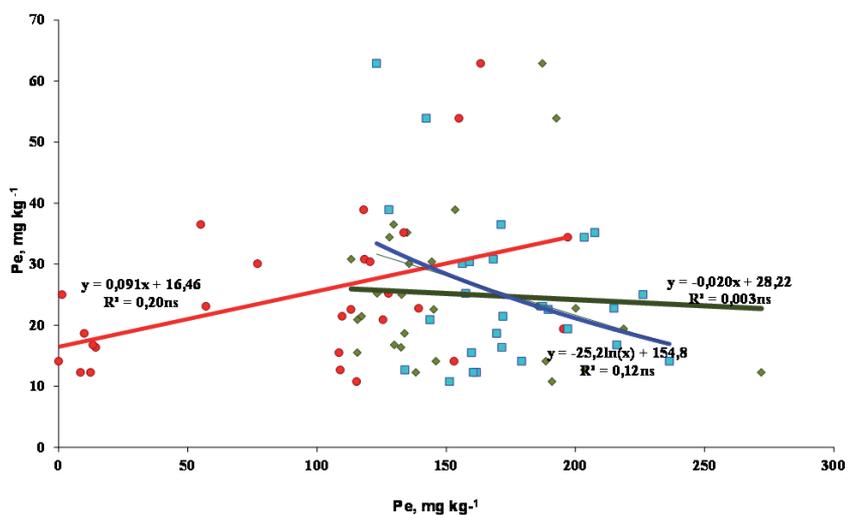


Figura 31. Relación entre el P extraíble (Pe) y los contenidos de P orgánico (Po), inorgánico (Pi) y total (Pt) de la fracción gruesa.

El Carbono orgánico del suelo (COS) asociado con MOM y MOP correlaciona mejor con Pe que en el caso de sus respectivos contenidos de P (Po en las fracciones finas y gruesas, respectivamente, **Figura 32**).

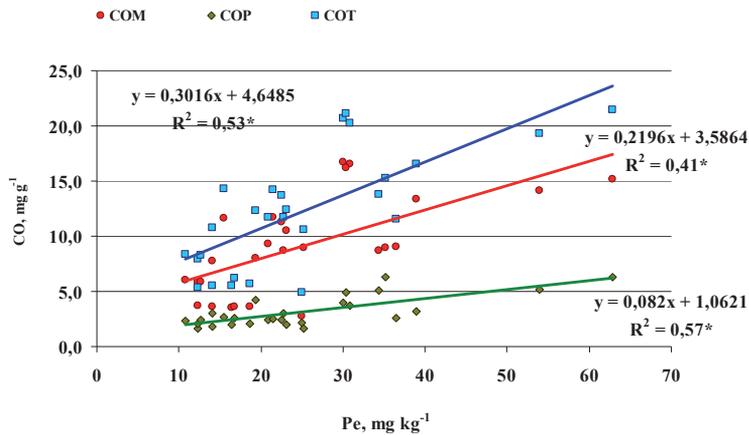


Figura 32. Relación entre el carbono orgánico total (COT), asociado a la fracción mineral (COM) y particulado (COP) y el P extraíble (Pe)

Las diferencias observadas podrían ser la consecuencia de la variabilidad anteriormente mencionado en la determinación de Po. Además, no hay paralelismo entre la mineralización de Po y COS como la hay entre CO y N (Salas *et al.*, 2003), y los mecanismos de estabilización de P en MOS son diferentes de las de los otros elementos (Galantini *et al.*, 2004; Suñer & Galantini 2013).

Las correlaciones entre el presente Po en las fracciones finas y gruesas y Pe eran bajas, lo que sugiere una contribución baja por el P presente en MOS a la disponibilidad de este elemento, especialmente en suelos de textura más fina. Sin embargo, hubo una correlación significativa entre Pe y las fracciones orgánicas asociadas con las fracciones finas y gruesas ($R^2 = 0,41$ y $R^2 = 0,57$, respectivamente $p < 0,01$).

Estos resultados aparentemente contradictorios sugieren que la disponibilidad de P no depende del contenido de P en el SOM, sino en el

contenido de las fracciones orgánicas. Estudios anteriores han demostrado el importante papel de la actividad de los microorganismos en el ciclo de los nutrientes, especialmente P. Por tanto, el contenido de MOS puede estar relacionado con la disponibilidad de P en virtud de su importancia como fuente de alimento para los microorganismos, no en virtud de su contenido en este nutriente (Needelman *et al.*, 1999).

A pesar de que Pe se utiliza ampliamente como un estimador de la disponibilidad de P en el sistema de producción argentino, su estrecha correlación con fracciones inorgánicas podría subestimar la contribución de las fracciones orgánicas durante la mineralización principalmente en suelos arenosos.

Utilizando un modelo de componentes principales llega a conclusiones similares (**Figura 33**).

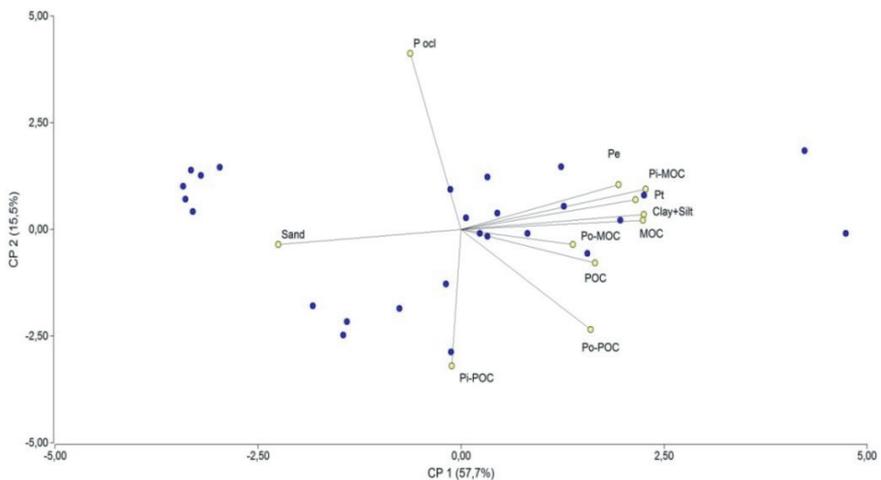


Figura 33. Componentes principales en las que intervienen las variables de fósforo

El componente principal 1 (CP1) es el que está vinculado al componente textura del suelo, lo que explicaría la mayor parte de la variabilidad de las formas de P en el suelo. Por lo tanto la mayor variabilidad entre el contenido de diferentes formas de P se explican por variables arena o arcilla + limo. El

contenido de arena, sin P, fue responsable de P del suelo y el equilibrio entre las diferentes fracciones de P. El contenido P_e , P_o - y P_i -MOC, del mismo modo que COM está más asociado con el contenido de arcilla y limo. Por otro lado el P_i -POC no está asociado con ninguna variable.

El Componente principal 2 (CP2) indica que el P_{ocl} tiene comportamiento opuesto de MOP, mayor es el contenido de P_{ocl} en el suelo será menor la cantidad de P presente en la MO.

5. 5. 5. Un modelo conceptual propuesto

Muchas investigaciones muestran que el fraccionamiento físico por tamaño de partícula es útil para el estudio de la estructura química de la materia orgánica del suelo y su dinámica. Fracciones orgánicas del suelo y su contenido de P, dentro de la fracción gruesa se asignan al pool y suelos lábiles fracciones en fracciones limo y arcilla al pool de formas moderadamente lábiles o no lábiles (Lützow *et al.*, 2002; Suñer *et al.*, 2014). Por otro lado, los minerales inorgánicos de la fracción gruesa se pueden considerar un pool no lábil de P, mientras que el P presente en la fracción fina representa un grupo activo.

De acuerdo con este hallazgo, se puede proponer un modelo conceptual (**Figura 34**), donde P podría estar relacionado con esquemas de fraccionamiento de la MOS.

Los principales flujos en este modelo son: a) procesos fisicoquímicos y de meteorización, que producen la reducción de tamaño de los minerales secundarios, cuando las partículas minerales alcanzan un tamaño inferior a 50 micras están incluidas en la fracción fina; b) humificación, insumos orgánicos se transforman a moléculas más complejas con un tamaño inferior; c) la mineralización, la descomposición de MOP y MOM produce la liberación de nutrientes, lábil P de la MO podría ser una fuente importante para las plantas que no se detectaría por Bray y Kurtz método d) el equilibrio físico-químico, e) absorción de la planta de la solución del suelo; f) reciclado de P, residuos de cultivos regresan al suelo puede aumentar Po por un aumento del MOP.

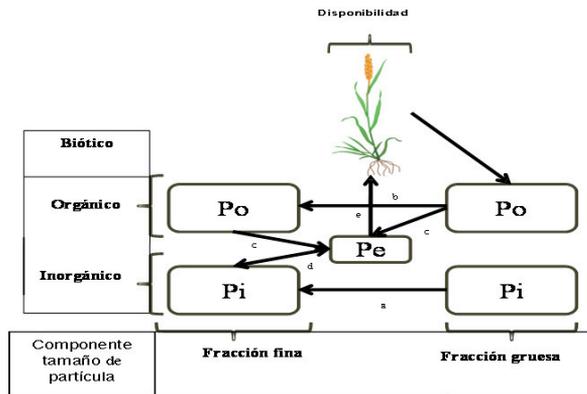


Figura 34. Modelo conceptual de flujo de las formas de fósforo en el suelo

5. 6. CONCLUSIÓN

La textura determina las reservas P y el equilibrio de sus diferentes formas en los suelos de la región en estudio.

El P disponible, estimado con P_e , está asociado predominantemente al pool de P inorgánico y vinculado a la fracción fina del suelo.

El nivel de P_o es mayor en la fracción gruesa de suelos con un alto contenido de fracciones finas.

El contenido de fósforo en sus diferentes formas se asocia estrechamente con fracciones de tamaño del suelo. El fraccionamiento por tamaño de partícula y las formas de P puede resumirse en un modelo conceptual para una mejor comprensión de los equilibrios de P en el suelo.



CAPÍTULO 6

**Estratificación de las formas de fósforo en
Siembra Directa y su relación con la
disponibilidad para los cultivos**

6.1 INTRODUCCIÓN

La falta de perturbación del suelo y el aporte de los residuos en siembra directa (SD) producen grandes cambios en la dinámica y distribución de la materia orgánica y en los nutrientes asociados a ella, en especial los poco móviles como es el caso del P (Franzluebbbers, 2002). La acumulación superficial de residuos y la aplicación de fertilizantes fosfatados provoca una marcada estratificación de este nutriente, aumentando la concentración de sus formas disponibles en superficie (0-10 cm), (Calviño *et al.*, 2000). Además existe en SD mayor variabilidad espacial de nutrientes derivada de la falta de homogeneización de la mezcla fertilizante-suelo producida por el laboreo y por aplicaciones localizadas. Esta estratificación en SD, principalmente del P, genera algunas dudas en cuanto al muestreo del suelo y al diagnóstico del requerimiento de fertilizante. ¿Es necesario redefinir la profundidad y la cantidad de submuestras dentro del muestreo de suelos? ¿Es necesario considerar otras formas de P disponibles para las plantas? (Essington & Howard, 2000). Se ha sugerido una profundidad de muestreo menor a la convencional (0-7,5 cm) como forma de no subestimar la disponibilidad para los cultivos. Pero al cambiar la profundidad de muestreo es necesario proceder a calibrar estos valores para interpretarlos correctamente en términos de disponibilidad para el cultivo y redefinir niveles críticos. Sin embargo, Zamuner *et al.* (2004) encontraron que a pesar de las diferencias en la estratificación del P extraíble (P_e), los niveles críticos en SD coincidieron con aquellos para labranza convencional (LC).

Así como otros nutrientes, el reciclaje de P a través de la biomasa microbiana es influenciado por los cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo bajo SD. El mayor contenido de agua, de C y de N orgánicos que hay en SD se refleja en una mayor población microbiana con respecto al suelo en LC. El contenido de P en la biomasa microbiana es mayor en lo suelos bajo SD (Six *et al.*, 2002). En los suelos altamente meteorizados con deficiencia de P, la disponibilidad para las plantas puede depender más del reciclaje del P orgánico (P_o) de la biomasa microbiana que del P inorgánico (Tiessen, Shang,

1998). Estudios realizados en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, mostraron incrementos significativos en el P de la biomasa microbiana a 0-20 cm de profundidad después de 8 años de SD en un suelo Argiudol Típico (Zamuner *et al.*, 2004). Al incrementarse la actividad biológica en el suelo con SD, comienzan a predominar las fracciones orgánicas de P. En general, se observa que del P total edáfico, en suelos tropicales entre el 50 y 75 % corresponde a fracciones orgánicas (Moraes Sá, 2004), en cambio en suelos de regiones templadas entre el 30 y 40% del P total es orgánico (Suñer *et al.*, 2005). Ferrari (2005) mostró una interesante contribución del fósforo orgánico para nutrir al cultivo de soja. El Po puede ser aprovechado por las plantas, pero sólo una pequeña parte es cuantificada por el método de Bray-Kurtz, el cual es el análisis de suelo más utilizado para el diagnóstico de la fertilización con P. Asumida la variabilidad climática natural de la región, y en consecuencia, la necesidad de variar las estrategias productivas según sus ciclos, es necesario desarrollar y adaptar nuevas tecnologías alternativas para cada situación. Un objetivo fundamental es el desarrollo de sistemas de monitoreo climático que, por sobre la variabilidad de corto plazo, tengan la capacidad de detectar los cambios de ciclo y permitan activar un sistema de alerta regional.

La toma de conciencia respecto de las verdaderas capacidades de los recursos productivos de la región y de la naturaleza cíclica del clima, es un primer paso hacia el diseño de sistemas con mayor resiliencia que de esta manera se aproximen al ideal de la sustentabilidad.

6. 2. Hipótesis específica

La siembra directa produce cambios en los diferentes horizontes que influyen en el equilibrio entre las diferentes formas de P:

6. 3. Objetivo específico

Evaluar los equilibrios y estratificación de las diferentes formas de P en suelos en siembra directa y su relación con el Pe.

6. 4. MATERIALES Y MÉTODOS

6. 4. 1. Sitio experimental

Se muestrearon 50 lotes al momento de la siembra de trigo, pertenecientes a productores de la regional Bahía Blanca de AAPRESID, a las profundidades 0-1, 0-5, 5-10 y 10-20 cm. La ubicación de los sitios de muestreo se encuentra descrita en el capítulo 2, Figura 2.

6. 4. 2. Determinaciones analíticas

En las muestras de suelo se determinó:

- Fósforo extraíble (Pe) por Bray-Kurtz 1 (Bray & Kurtz, 1945): extracción con ácido clorhídrico (HCl) 0,025 M y fluoruro de amonio (NH₄F) 0,03 M (pH 2,9) ratio, suelo / solución 1: 7, agitando tiempo 1 min.

- Fósforo orgánico (Po) e inorgánico (Pi) por el Método de Saunders y Williams (1955): extracción con ácido sulfúrico (H₂SO₄) 1 N, tiempo de agitación 16 horas; Po se determina por diferencia entre una muestra calcinada suelo (en mufla a 550 °C) y otro sin calcinar.

- El P ocluido (Pocl) se calculó como la diferencia entre Pt - (Po + Pi). Algunos autores consideran que Pocl está fuertemente adsorbido o precipitado y tiene una disponibilidad para la planta muy lenta (Giuffré, 2005). En este trabajo, consideramos que Pocl es el P químicamente no extraído por el método de Saunders y Williams (1955)

En todos los extractos el P inorgánico se determinó por el método colorimétrico de vanadato amonio (Murphy & Riley, 1962). Todos estos métodos se describen completamente por Sparks *et al.* (1996).

6. 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6. 5. 1. Contenido de las formas de P

En la **Tabla 31** se observan los valores medios ponderados para la profundidad 0-20 cm de cada forma de fósforo en cada uno de los sitios.

La **Figura 35** presenta la variación de Pe con la profundidad para cuatro de los suelos estudiados. La acumulación superficial de residuos produjo niveles más altos de Pe en superficie; un comportamiento similar fue observado en suelos de Bordenave (Rausch *et al.*, 2001).

Tabla 31. Valores medios ponderados (0-20 cm) de las formas de fósforo disponibles (Pe), orgánico (Po), inorgánico (Pi) y total (Pt) de los sitios experimentales analizados

Sitio	Pe	Po	Pi	Pt
			ppm	
Las Ruinas	31	197	344	948
El Deslinde	7	184	149	576
La Julieta	4	196	282	782
La Estancia	5	169	212	743
El Mioño	9	108	241	632
Cumelén	7	151	161	564
Hogar Funke	18	243	354	928
Las Lomas	6	367	221	956
Emilia	7	272	206	797
Cerro Manitoiva	8	288	354	880
La Constancia	6	305	194	772
media	9,8	225,4	247,1	779,8
máximo	31	367	354	956
mínimo	4	108	149	564

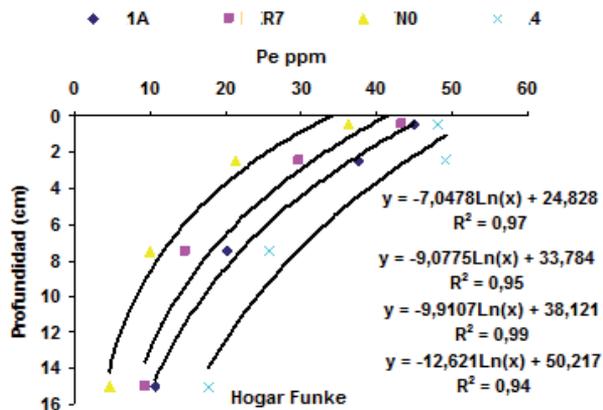


Figura 35. Contenido del fósforo disponible (Pe) en función de la profundidad de suelo en cuatro lotes de Hogar Funke

El contenido de Pi disminuyó en forma menos marcada con la profundidad que el Pe (Figura 36).

El contenido de Po en superficie (0-1 cm) presentó dos comportamientos diferentes, uno con un aumento respecto a los valores en profundidad y otro con una disminución, como consecuencia de una diferencia en la cantidad de residuos en ambos lotes (Figura 37).

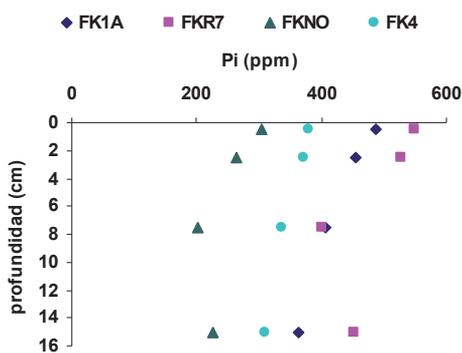


Figura 36. Contenido del fósforo inorgánico (Pi) en función de la profundidad de suelo en lotes de Hogar Funke.

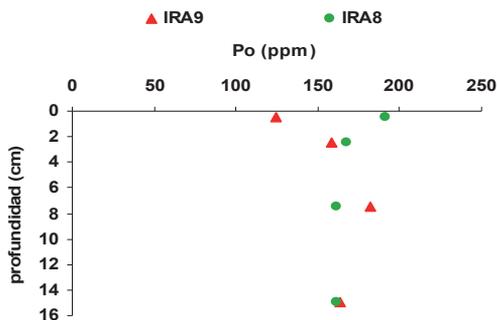


Figura 37. Contenido de fósforo orgánico (Po) en función de la profundidad de suelo, en dos lotes de Cumelén

Las relaciones $Po/Po+Pi$ estuvieron de acuerdo con el contenido de Pe de los suelos, ajustándose una ecuación logaritmo natural para explicar este comportamiento (**Figura 38**). Cuanto mayor fue la proporción de Po del suelo menor fue el Pe. Tal situación podría deberse a que el aumento del Po implica una disminución del Pi, siendo la fracción inorgánica de P lábil la principal fuente de Pe.

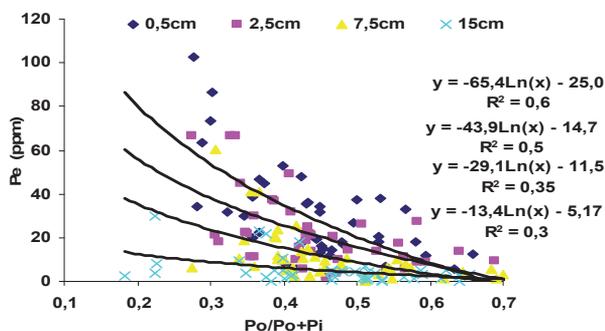


Figura 38. Variación del contenido de Pe en función de las relaciones $Po/Po+Pi$ de todos los lotes analizados

El equilibrio de la relación Pe y $Po/Po+Pi$ cambió en las diferentes profundidades. Para una misma proporción de Po, el nivel de Pe observado aumentó en la medida que consideramos capas más superficiales. Por ejemplo, para el conjunto de los suelos analizados, el nivel de Pe esperado en un suelo

con una relación de 0,4 (i.e., 40% del P_o es orgánico) será aproximadamente: 39, 28, 18, y <10 para las profundidades 0-1, 0-5, 5-10 y 10-20 cm, respectivamente.

Estos resultados indicarían que en superficie el P_o realiza un aporte significativamente mayor al P_e que en profundidad. Esto podría asociarse a la mayor actividad microbiana y a la mayor cantidad de productos orgánicos de fácil descomposición. Evidentemente, el método Bray-Kurtz está fuertemente asociado a la fracción inorgánica del P y si bien una pequeña parte de la fracción orgánica está incluida, en siembra directa, este método no reflejaría la verdadera disponibilidad para los cultivos. Las diferencias serán mayores en la medida que mayor sea el tiempo bajo SD y mayor sea la reserva de P en la fracción más lábil de la materia orgánica (materia orgánica particulada o asociada a la fracción gruesa del suelo). En estudios previos (Suñer *et al.*, 2005) se estudió la dinámica del P del suelo; la mayor parte del P contenido en la materia orgánica joven o particulada (asociada a la fracción gruesa del suelo) fue transformado en el proceso de mineralización de la MO. En siembra directa se observó que el contenido de P de la fracción gruesa es el que sufre mayores cambios, para incorporarse a la fracción fina del suelo por la acción de los microorganismos, o a la solución del suelo. Es decir que cuantificar el P_o asociado a la fracción gruesa podría ser un indicador complementario de la fertilidad fosfórica potencial del suelo.

6. 5. 2. Efecto de largo plazo sobre el P edáfico

Se analizaron los datos obtenidos de un ensayo formado por dos parcelas, una bajo labranza convencional y otra bajo siembra directa (Galantini *et al.*, 2007). Luego de 18 años con labranzas diferentes, LC produjo una disminución neta de todas las formas de P analizadas.

Las diferencias en los contenidos P_o , P_i y P_t , para el horizonte A, en los dos sistemas de labranza fueron 63, 31, y 169 kg ha⁻¹ respectivamente (**Tabla 32**). La magnitud de los cambios y su redistribución en las profundidades

estudiadas fue diferente para P_o que para el P_i . El cambio en el contenido de P_o (63 kg P ha^{-1}) fue el doble que el de P_i (31 kg P ha^{-1}). Las formas inorgánicas del P del suelo se encuentran en forma relativamente lábil (P_i) y en formas y/o lugares muy poco disponibles. Estas formas no disponibles en el corto plazo u ocluidas (P_{ocl}) lentamente pasan a P_i .

Tabla 32. Contenido de P_o , P_i y P_t en un suelo bajo SD y LC.

Profundidad	P_e	P_o	P_i	P_t
cm	kg ha ⁻¹			
SD				
0-5	32,9	155,5	216,6	408,0
5-10	21,1	120,1	225,4	498,9
10-15	6,7	123,7	169,2	468,1
15-20	6,6	123,6	169,2	468,1
Horizonte A	69,9	572,5	848,0	2030,4
LC				
0-5	16,2	140,6	198,0	316,5
5-10	16,6	100,1	215,8	465,8
10-15	6,3	112,1	169	450
15-20	6,3	112,1	168	449,7
Horizonte A	47,9	509,8	816,9	1861,6

Al considerar el cambio en el P_t (169 kg P ha^{-1}) se vio que la labranza puso disponible una gran parte del P_{ocl} (75 kg P ha^{-1} , $P_t - (P_o + P_i)$) que finalmente se perdió del sistema. El cambio en el contenido de P_o (63 kg P ha^{-1}) fue el doble entre sistemas de labranza que el de P_i (31 kg P ha^{-1}). Sin embargo cuando se comparó con el cambio en el P_t (169 kg P ha^{-1}) se vio que fue

significativamente menor, indicando que existió una pérdida de formas difícilmente accesibles o P_{ocl} , las que las labranzas pondrían en condición de entrar al ciclo más dinámico del P edáfico.

Desde el punto de vista del cambio anual de las formas de P en el horizonte A, las diferencias fueron alrededor de 3,5; 1,7 y 9,4 $kg\ ha^{-1}año^{-1}$ para P_o , P_i y P_t respectivamente (**Tabla 33**). El cambio en el P_{ocl} fue 4,2 $kg\ ha^{-1}año^{-1}$, lo que estaría indicando una transferencia de las formas inorgánicas resistentes de P a las más lábiles, y aun así la reserva de P_i disminuyó a razón de 1,7 $kg\ ha^{-1}$.

Tabla 33. Diferencia total y anual en el contenido de P_o , P_i y P_t entre sistemas de labranza.

Profundidad	P_e	P_o	P_i	P_{te}
cm	$kg\ ha^{-1}$			
0-5	16,6	14,9	18,6	91,5
5-10	4,5	20,0	9,6	33,2
10-15	0,35	11,6	1,3	18,4
15-20	0,35	11,5	1,2	18,4
Horizonte A	22,0	62,7	31,1	168,8
	$kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$			
0-5	0,92	0,83	1,03	5,08
5-10	0,25	1,11	0,53	1,85
10-15	0,02	0,64	0,07	1,02
15-20	0,02	0,64	0,07	1,02
Horizonte A	1,22	3,48	1,73	9,38

Contenido de P ($kg\ ha^{-1}$) de los diferentes compartimentos en LC, flujos relativos a SD entre compartimentos (entre paréntesis (SD-LC)/18 en $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$). El origen del cambio del P_i indica las pérdidas relativas en las profundidades 0-1, 1-5, 5-10 y 10-20 cm

En la **Figura 39** se presentan esquemáticamente los resultados obtenidos en las **Tablas 32 y 33**. Las cajas representan los contenidos (kg ha^{-1}) de los diferentes compartimentos estudiados en el sistema LC y las flechas llenas los principales flujos entre ellos. Los valores entre paréntesis son el cambio promedio anual respecto de SD, calculado como $(P_{xSD} - P_{xLC}) / 18$ en $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La LC estimuló los flujos desde el P_{ocl} y P_o al P_i , así como las pérdidas de P_i , principalmente desde los primeros 0-5 cm de suelo (65+22%). Por otro lado, la SD estimuló el aumento del P_e , así como el reciclado (P en los residuos de cosecha y exportación (P en grano).

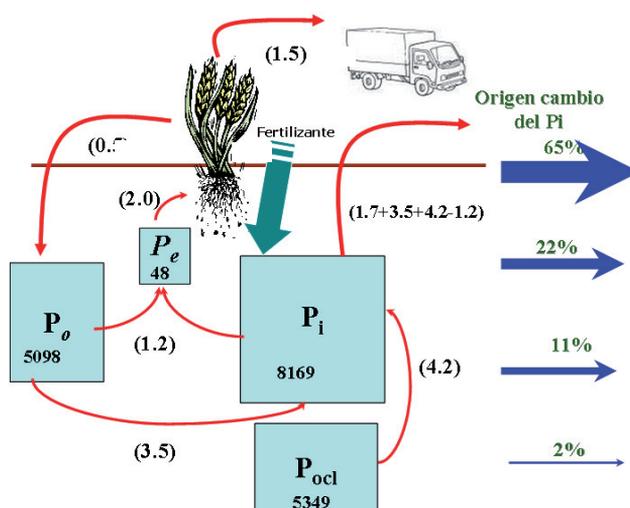


Figura 39. Contenido de P de los diferentes compartimentos en labranza convencional (kg/ha) y flujos relativos a la siembra directa (kg/ha/año)

6. 6. CONCLUSIONES

La siembra directa produce una estratificación de las formas de P, modifica la proporción de las formas orgánicas en las diferentes profundidades y cambia la relación entre las formas orgánicas y las disponibles.

La SD produce mayor ciclado y exportación del P, manteniendo la fracción ocluida no disponible. El aumento de la MO en superficie hace que el Pe aumente en los primeros centímetros del suelo. La SD disminuye los flujos del P de las formas menos disponibles a las de mayor labilidad, y disminuye las pérdidas de las formas inorgánicas en superficie (por erosión) y de las orgánicas en la profundidad laboreada (por mineralización de la MO).

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSIONES GENERALES

Se han planteado objetivos tendientes a validar la siguiente hipótesis general: “Las formas orgánicas e inorgánicas de P en el suelo se encuentran en equilibrio dinámico, el que está regulado por el ambiente edafoclimático (textura, lluvias, propiedades edáficas) y el manejo agronómico (rotación de cultivos, fertilización, labranza), y se encuentra directamente relacionado con la disponibilidad para los cultivos. El conocimiento del efecto de los factores naturales y la magnitud de los cambios debidos al manejo agronómico sobre este equilibrio brindarían herramientas para un manejo productivo y ambientalmente eficiente.

Con lo expuesto durante el desarrollo de esta tesis, la Hipótesis general ha sido aceptada, a saber:

Particularmente bajo las condiciones edafoclimáticas de los sitios evaluados, no se observó una diferencia entre sitios de la zona semiárida y subhúmeda. En este estudio las diferencias se evidenciaron en mayor medida de acuerdo al año climático, pero no en los tres años estudiados en conjunto. En los años de estudio, diferencias estadísticamente significativas entre regiones (semiárida y subhúmeda) estuvieron indicadas por las diferencias entre las precipitaciones durante el ciclo del cultivo, principalmente en el año 2012.

Al aplicar un modelo de regresión múltiple para rendimiento en grano y para todos los sitios analizados, tanto de la región semiárida, como subhúmeda, incluyendo las distintas formas de fósforo: disponible, orgánica e inorgánica, el modelo obtenido incluye las tres formas de fósforo para determinar la variación en el rendimiento en grano. Evidenciando la importancia del equilibrio entre todas las formas de P; por lo que sería necesario considerar el sistema en equilibrio dinámico tanto de las formas orgánicas como las inorgánicas de P y no

solo tener en cuenta el P disponible para la planta. El rendimiento del cultivo de trigo estaría relacionado con la absorción de fósforo por el cultivo.

Tanto el rendimiento en grano como el fósforo asimilado por planta estuvo asociado a todas las formas de la dinámica del fósforo P_e , P_t , P_o y P_o/P_o+P_i . con P_t , P_i y la relación P_o/P_o+P_i . Evidenciando nuevamente los complejos equilibrios del P en el sistema suelo-planta.

La materia orgánica del suelo (MOS) y sus fracciones, específicamente los ácidos húmicos, son indicadores físico, químico y biológico de los cambios que se producen entre los sistemas, pudiendo ser consideradas para evaluar diferencias en relación a los nutrientes que ciclan. No sólo es importante la cantidad de su aporte sino, específicamente con relación a las formas de P, muestran cambios en su estructura que modificarán la forma en que este nutriente interactúe con la matriz del suelo.

Por otra parte se pudo detectar, que la inclusión de pasturas en una rotación mantiene más bajos los niveles de fósforo extraíble o disponible para las plantas, sin embargo ésta es la secuencia que mantiene más altos los niveles de P moderadamente lábil, el cuál sería factible que se encuentre disponible durante el ciclo del cultivo.

En el sudoeste bonaerense argentino, cuando la disponibilidad de agua para el cultivo es muy inferior a su requerimiento, la efectividad en la aplicación de fertilizantes se evalúa más acertadamente a partir de la cuantificación de la producción materia seca total del trigo y no del aumento de su rendimiento. Existe un equilibrio dinámico y sensible entre la disponibilidad de N, P y agua en el suelo que obliga a tener en cuenta los tres factores simultáneamente al momento de diseñar estrategias de fertilización. La fertilización fosfórica hace más eficiente el uso del agua, contrarrestando los efectos adversos de un año más seco.

La evaluación de la eficiencia de uso del fertilizante debe tenerse en cuenta como una herramienta adicional, pero no es un parámetro determinante en la toma de decisiones.

La absorción de fósforo por el cultivo de trigo está asociada a “todas” las formas de P, no sólo al fósforo disponible para las plantas sino también al inorgánico y a la relación del orgánico con el total. Dicha absorción es posible aumentarla con la fertilización fosfatada, pero también se necesitarían estrategias de manejo que mantengan altos niveles de P_o .

La textura determina las reservas P y el equilibrio de sus diferentes formas en los suelos de la región en estudio. El P disponible, estimado con P_e , está asociado predominantemente al pool de P inorgánico y vinculado a la fracción fina del suelo. El nivel de P_o es mayor en la fracción gruesa de suelos con un alto contenido de fracciones finas. El contenido de fósforo en sus diferentes formas se asocia estrechamente con fracciones de tamaño del suelo. El contenido de fósforo en sus diferentes formas se asocia estrechamente con fracciones de tamaño del suelo. El fraccionamiento por tamaño de partícula y las formas de P puede resumirse en un modelo conceptual para una mejor comprensión de los equilibrios de P en el suelo.

La siembra directa produce una estratificación de las formas de P, modifica la proporción de las formas orgánicas en las diferentes profundidades y cambia la relación entre las formas orgánicas y las disponibles.

La SD produce mayor ciclado y exportación del P, manteniendo la fracción ocluida no disponible. El aumento de la MO en superficie hace que el P_e aumente en los primeros centímetros del suelo. La SD disminuye los flujos del P de las formas menos disponibles a las de mayor labilidad, y disminuye las pérdidas de las formas inorgánicas en superficie (por erosión) y de las orgánicas en la profundidad laboreada (por mineralización de la MO).

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abdu, N. 2006. Soil-phosphorus extraction methodologies: A review. *Afr. J. Agric. Res.* 1:159-161.
- Aitchison, J. 1990. Relative variation diagrams for describing patterns of compositional variability. *Mathematical Geology.* 22 (4), 487-511
- Amir, S.; Hafidi M.; Bailly, J. R.; Revel, J. C. 2003. Characterization of humic acids extracted from sewage sludge during composting and of their Sephadex® gel fractions. *Agronomie*, **23**: 269 - 275.
- Andersohn, C. 1996. Phosphate cycles in energy crop systems with emphasis on the availability of different phosphate fractions in soil. *Plant and Soil* 184: 11- 21.
- Anderson, G. 1980. Assessing organic phosphorus in soils. p. 411-431. In F.E. Khasawneh et al. (eds.) *The role of phosphorous in agriculture*. ASA, Madison, WI.
- Andjelkovic ,T., Perovic, J.; Purenovic, M.; Blagojevic, S.; Nikolic, R.; Andjelkovic, D.; Bojic A. 2006. Spectroscopic and potentiometric studies on derivatized natural humic acid. *Analytical Sciences*, **22**: 1553 - 1558
- Andriulo, A.; Galantini, J.A.; Pecorari, C.; Torioni, E. 1990. Materia orgánica del suelo en la región pampeana. I. Un método de fraccionamiento por tamizado. *Agrochimica (Italia)*.34: 475-489.
- Balesdent, J.; Chenu, C.; Balabane, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till. Res* 53: 215-230.
- Balzarini, M.G.; González, L.; Tablada, M.; Casanoves, F.; Di Rienzo, J.A.; Robledo, C.W. 2008. *Infostat. Manual del Usuario*, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina
- Baravalle, R.A.; Rosell, R.A.; Migliarina, A.M., Maiza, P. 1995. Soil fixation and availability of phosphate fertilizer. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*.26:2157-2165.
- Barbagelata, P.A.; Melchiori, R.J.M. 2008. Diagnóstico de la fertilización fosfatada para trigo en siembra directa en Entre Ríos. *Actas del XXI Congreso de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*. San Luis, Argentina.
- Barber, S. A. 1995. *Soil Nutrient Bioavailability: A mechanistic Approach*. 2nd Edition Harcover.384 pp.
- Barbieri, P.A.; Sainz Rozas, H.R.; Echeverría; H. E. 2008. El modelo de simulación CERES Trigo como herramienta para evaluar el manejo de la fertilización nitrogenada en el sudeste bonaerense. *Actas CD XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. San Luis. AACCS.

- Beauchemin, S.; Simard, R.R.; Cluis, D. 1996. Phosphorus sorption-desorption kinetics of soil under contrasting land uses. *J. Environ. Qual.* 25:1317-1325.
- Bedrock, C. N.; Cheshire, M.V.; Chudek, J.A.; Goodman, B. A.; Shande, C.A. 1994. use of ^{31}P -MNR to study the forms of phosphorus in peat soils. *Sci. Total Environ.* 152, 1-8
- Blevins, R.L.; Frye, W.W.; Baldwin, P.F.; Robertson, S.D. 1990. Tillage effects on sediment and soluble nutrient losses from a Maury silt loam. *J. Environ. Qual.* 19:683-686.
- Boschetti, N.G.; Valenti, R.; Vesco, C.; Sione M. 2000. Contenido de fósforo total en suelos con características vérticas de la provincia de Entre Ríos. *Revista Facultad de Agronomía* 20: 53-58.
- Bowman, R.A.; Halvorson, A.D. 1997. Crop rotation and tillage effects on phosphorus distribution in the Central Great Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1418-1422.
- Bra, C.; Torren, L.; Giralde, J.; Gon, P.; Ordone.R. 2006. Long- term effect of tillage on phosphorus forms and sorption in a Vertisol of southern Spain. *European journal of Agronomy.* 25:264-269.
- Bray, R.H.; Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorous in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Bremner, J.M.; Mulvaney, C.S. 1982. Nitrogen total. In: Page et al. (Eds.) *Methods of Soils Analysis. Part 2. Agronomy* 9.2nd edition. Madison. Wisconsin. USA. Pp. 595-624.
- Bremner, JM. 1996. Nitrogen- Total. En: Sparks, DL (ed.). *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods. Chapter 37.* Pp. 1085-1121. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America y Crop Science Society of America, Madison. Wisconsin, Estados Unidos.
- Buehler, S; Oberson, A.; Rao, IM; Friesen, D.K.; Frossard, E. 2002. Sequential Phosphorus Extraction of a ^{33}P -Labeled Oxisol under Contrasting Agricultural Systems. *Soil Sci Soc Am J.* 66(3): 868-877.
- Buschiazzo, D.E.; Hevia, G.; Hepper, E.; Urioste, A.; Bono, A. Organic C, N and P in size fractions of virgin and cultivated soils of the semiarid Pampa of Argentina. 1998. CD-16 *Congres Mundial de Sience du Sol Montpellier Francia.* Sym N° 7 N° 869.
- Cambardella, C.A.; Elliott, E.T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. *Soil Science Society of American Journal.* 1994. 58:123-130.
- Campitelli, P.; Ceppi, S. 2008. Effects of composting technologies on the chemical and physicochemical properties of humic acids. *Geoderma*, 144: 325-333.

- Canellas, L.; Piccolo, A.; Dobbss, L.; Spacini, R.; Zandonadi, D.; Facanha, A. 2010 Chemical composition and bioactivity propiers of seze-fractions separated from a vermicompost humic acid. *Chemosfere* 78
- Castillo, M.S.; Wright, A.L. 2008. Soil phosphorus pools for Histosols under sugarcane and pasture in the Everglades, USA. *Geoderma* 145:130–135.
- Chang, C.; Sommerfeldt, T.G.; Entz, T. 1991. Soil chemistry after eleven applications of cattle feedlot manure. *J. Environ. Qual.* 20:475-480.
- Chater, M. & Mattingly, G.E.G. 1980. Changes in organic phosphorus contents of soil form long-continued experiments at Rothamsted and Saxmundham. Rothamsted Experiment Station Report for 1979, Part 2. 41-61 pp.
- Chatfield, C.; Collins, A. J. 1980. Introduction to Multivariate analysis. Chapman and Hall. New York. 246 p.
- Chen Y., N. Senesi, y M. Schnitzer. 1977. Information provided on humic substances by E4/E6 ratios. *Soil Science Society of America Journal*, 41:352 - 358.
- Chilom, G.; Bruns, A.S.; Rice, J.A. 2009. Aggregation of humic acid in solution: contributions of different fractions. *Organic Geochemistry*. 40:455-460.
- Christensen, BT. 1992. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Adv. Soil Sci.*; 20: 2-90.
- Cross, A.F.; Schlesinger, W.H. 1995. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in the natural ecosystems. *Geoderma* 64:197-214.
- Cruse, R.M.; Yakle, G.A.; Colvin, T.C.; Timmons, D.R. 1983. Tillage effects on corn and soybean production in farmer managed, university-monitored field plots. *J. Soil Water Conserv.* 38:512-514.
- De Boer, J.L.M.; Kohlmeyer, U.; Breugem, P.M.; van der Velde-Koerts T. 1998. Determination of total dissolved phosphorus in water samples by axial inductively coupled plasma emission spectrometry. *J. Anal. Chem.* 360:132-136.
- De Maria, I.C.; Nnabude, P.C.; de Castro, O.M. 1999. Long-term tillage and crop rotation effects on soil chemical properties of a Rhodic Ferralsol in southern Brazil. *Soil Tillage Res.* 51:71-79.
- Dessureault-Rompré, J.; Zebarth, B.J.; Burton, D.L.; Sharifi, M., Cooper, J.; Grant, C.A.; Drury, C.F. 2010. Relationships among mineralizable soil nitrogen, soil properties, and climatic indices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74: 1218-1227.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada; CW Robledo. 2013. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

- Díaz-Zorita, M; Álvarez, C.; Barraco, M. 2004. Efectos de doce años de labranzas en un Hapludol del Noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo* 22(1): 11-18.
- Diez, A.; Zamuner, E.; Picone, L.; Berardo, A. 2000. Efecto de la aplicación de dosis única o fraccionada de fertilizante fosfatado sobre el fósforo del suelo. En *Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACs. Mar del Plata.
- Dormaer, J.F. 1972. Seasonal pattern of soil organic phosphorus. *Canadian Journal of Soil Science* 52: 107-112.
- Dubbss, B.; Rumjaneck, M.; Velloso, X.; Canellas, L. 2009..Caracterizacáo química e espectroscópica de ácidos húmicos e fúlvicos isolados de camada superficial de latossolo brasileiros. *R.Bras. Cien. Solo*, 33(1): 23-31
- Duval, M.E.; Galantini, J.A.; Iglesias, J.O.; Canelo, S.; Martínez, J.M.; Wall, L. 2013. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil and Tillage Research* 131: 11-19.
- Echeverría, H.E.; García, F.O. (eds). 2005. *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Echeverría, N.; Grossi, T.; Purricelli, C.A.; Pelta, H. 1993. Evolución de cuatro parámetros del suelo en dos manejos contrastados., *Actas XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. p305.
- Echeverría, N.; Querejazu, S.; De Lucia, M.; Silenzi, J; Forjan, H.; Manso, L. 2012. Estabilidad y carbono orgánico de agregados bajo rotaciones en siembra directa. *XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata.
- Egli, D.E. 2006. The role of seed in the determination of yield of grain crops. *Australian Journal of Agriculture Research* 57: 1237-1247.
- Elliott, E.T. & Cambardella, CA. 1991. Physical separation of soil organic matter. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 34: 407-419.
- Fageria, N.K.; Baligar, V.C. 2005. Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. *Adv. Agron.* 88: 97-185.
- Ferrari, M. 2005. Fósforo en soja: el aporte de la fracción orgánica lábil del suelo". *Actas XIII Congreso Nacional de Aapresid*, Rosario, Santa Fe.
- Follett, R.F.; Peterson, G.A. 1988. Surface soil nutrient distribution as affected by wheat fallow tillage systems. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 52:141-147.
- Franzluebbers, A.J. 2002 Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage Research* 66: 95-106.
- Gahoonia, T.S. & Nielsen, N.E. 2004. Roots traits as tools for creating phosphorus efficient crop varieties. *Plant and Soil* 260: 47-57

- Galantini, J.A. 2014. Ciencia y experiencia para una siembra directa sustentable en ambientes frágiles del S y SO bonaerense. *Revista Aapresid*.
- Galantini, J. A. 2005. Carbono orgánico. Separación y fracciones orgánicas. *Tecnologías en análisis de suelos*. Marbán L. y Ratto S. (Eds) 92-103.
- Galantini, J.A.; Iglesias, J.O.; Maneiro, C.; Santiago, L.; Kleine, C. 2006. Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense. Efectos de largo plazo sobre las fracciones orgánicas y el espacio poroso del suelo. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA –INTA)* 35: 15 -30.
- Galantini, J.A.; Landriscini, M.R.; Iglesias, J.O.; Miglierina, A.M.; Rosell, R.A. 2000. The effects of crop rotations and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina. 2. Nutrient balance, yield and grain quality. *Soil Tillage Research* 53:137-144.
- Galantini, J.A.; Landriscini, M.R.; Miglierina, A.M.; Iglesias, J.O.; Rosell R.A. 1997. Formas de fósforo en Agroecosistemas de La Pampa. Argentina. VIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. La Serena. Chile.
- Galantini, J.A.; Rosell, R. 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid pampean soils. *Soil & tillage Research*.84:75-79.
- Galantini, J.A.; Senesi, N.; Brunetti, G.; Rosell, R. 2004. Influence of texture on organic matter distribution and quality and nitrogen and sulphur status in semiarid Pampean grassland soils of Argentina. *Geoderma*.123:143-152
- Galantini, J.A.; Suñer, L. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: Análisis en los suelos de la Argentina. *Revisión. AgriScientia XXV* (1): 41-55.
- Galantini, J.A.; Suñer, L.; Iglesias, J.O. 2007. Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense: efectos de largo plazo sobre las formas de fósforo en el suelo. *Revista Investigaciones Agropecuarias (RIA – INTA)* 36 (1): 63-81.
- Galantini, J.A.; Suñer, L.; Kruger, H. 2005. Dinámica de las formas de P en un Haplustol de la región semiárida pampeana durante 13 años de trigo continuo. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. 34: 13-31.
- Garcés, N.; Hernández, A.; Caro, I.; Arteaga, M. 2009. El humus de los suelos cubanos en ecosistemas tropicales y conservados. *Terra Latinoamericana*, 27(2): 85-97.
- García, F. & Ciampitti, I. 2007. Requerimientos nutricionales y balances de nutrientes *Agromercado temático Año 27 BsAs Argentina* 2-6 pp
- Gee, G. W.; Bauder, J. W. 1986. Particle-size Analysis. In: *Methods of Soil Analysis* (Ed. A. Klute) Part 1 Madison. Wisconsin. USA.
- Gerke, J; Hermann, R. 1992. Adsorption of orthophosphate to humic Fe complexes and to amorphous Fe-oxide. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 155: 233-236
- Gómez, L.; Nakama, V.; Puricelli, C. 1981. Carta detallada de suelos, EEA INTA

- Bordenave, escala 1:10 000, Informe interno INTA.
- Guggenberger, G.; Haumaier, L.; Thomas, R.J.; Zech, W. 1996 Assessing the organic phosphorus status of an Oxisol under tropical pastures following native savanna using ^{31}P RMN spectroscopy. *Biol.Fertil. Soil.* 23:332-339
- Hassink, J. 1994. Active organic matter fractions and microbial biomass as predictors of N mineralization. *Eur. J. Agron.* 3:257-265.
- Hassink, J. 1995. Decomposition rate constants of size and density fractions of soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:1631–1635.
- Hassink, J.; Bouwman, L.A.; Zwart, K.B.; Bloem, J.; Brussaard, L. 1993. Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralization in grassland soils. *Geoderma* 57(1): 105-128.
- Hedley, MJ; Stewart, J.; Chauhan, B. 1982. Changes in Inorganic and Organic Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46(5): 970-976.
- Hengl, T. 2009. A practical guide to geostatistical mapping. 2nd ed. Amsterdam: University of Amsterdam, 291p.
- Hepper, G.; Hevia, G.; Buschiazzo, D.E.; Urioste, A.M.; Bono A. 1996. Efectos de la agricultura sobre fracciones de fósforo en suelos de la región semiárida pampeana central. *Ciencia del Suelo* 14 (2): 96-99.
- Hevia, G.G.; Buschiazzo, D.; Hepper, E.N.; Urioste, A. M., Antón, E.L. 2003. Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effects of climate, soil texture and management. *Geoderma.* 116: 265-277.
- Holford, I.C.R. 1997. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Australian journal of soil research* 35:227-240.
- Hsu, P.H. 1966. Formation of Gibbsite from Aging Hydroxy-Aluminum Solutions. *Soil Science Society of America Journal* 30: 173-176.
- <http://dx.doi.org/10.1155/2014/532807>
- Huffman, S.A.; Cole, C.V.; Scott, N.A. 1996. Soil texture and residue addition effects on soil phosphorus transformation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1095-1101.
- Husson, F; Lê, S.; Pagès, J. 2011. Exploratory multivariate analysis by example using R. Computer science & data analysis series. Taylor & Francis Group/CRC Press. Boca Raton, 228 p.
- Ivarsson, K. 1990. The long-term soil fertility experiments in southern Sweden. IV. Changes in inorganic and organic soil phosphorus after a pot trial. *Acta Agric. Scand.* 40: 205-215.

- Iyamuremye, F.; Dick, R.P.; Baham, J. 1996. Organic amendments and phosphorus dynamics: II. Distribution of soil phosphorus fractions. *Soil Sci.* 161:436-443.
- Jackson, M. L. 1958. Soil chemical analysis. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- Janssen BH. A simple method for calculating decomposition and accumulation of "young" soil organic matter. 1984. *Plant Soil.* 76: 297-304.
- Janzen, H.H.; Campbell, C.A.; Brandt, S.A.; Lafond, G.P., Townley-Smith, L. 1992. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1799-1806.
- Jaramillo Jaramillo, D.F. 2009. Variabilidad espacial de las propiedades ándicas de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 62: 4907-4921.
- Johnson, C. M.; Ulrich, A. 1959. II Analytical methods. For use in plant analysis. 26-77. California Agricultural Experimental Station Bulletin 766.
- Johnston, C.T.; Davis, W.M.; Erickson, C.; Delfino, J.J.; Cooper, W.T. 1991. Characterization of humic substances using Fourier Transform Infrared Spectroscopy, en: *Humic Substances in the Global Environment and Implications on Human Health*, Senesi N., Miano T.M. (Eds.) *Elsevier Science B.V., Amsterdam*
- Kirkby, C.A.; Smythe, L.J.; Cox, J.W. 1997. Chittleborough DJ. Phosphorus movement down a toposequence from a landscape with texture contrast soils. *Australian Journal of Soil Research.* 35:399-418.
- Kloster, N. S.; Brigante, M.; Zanini, G.; Avena, M.J. 2012. Agregación de ácidos húmicos: efecto del pH y la concentración de calcio. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata.
- Kononova, M. M. 1966. Soil organic matter. Its nature, its role in soil formation and in soil fertility. 544 páginas. Pergamonn Press, Oxford, UK.
- Kooijman, A. M.; Jongejans, J.; Sevink, J. 2005. Parent material effects on Mediterranean woodland ecosystems in N.E. Spain. *Catena.* 59 55-68.
- Kuhn, N; Armstrong, E. 2012. Erosion of organic matter from sandy soils: solving the mass balance. *Catena.* 98:87-95
- Kuo, S. 1996. Phosphorus, pp 894-895, in D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helme, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston and M. E. Sumner, eds., *Methods of soil Analysis, Part 3- Chemical Methods.* American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Lázaro, L.; Abbate, P.E. 2001. Deficiencias de fósforo como determinantes del número de granos en trigo. *Actas del V Congreso Nacional de Trigo.* Villa Carlos Paz, Córdoba. 84

- Levesque, M.; Shnitzer, M. 1967. Organo-metallic interactions in soils, 6. Preparation and properties of fulvic acid-metal phosphates. *Soil Sci.* 103: 183-190.
- Lguirati, A.; Ait Baddi, G. ;El Mousadik, A. ;Gilard, V.; Revel J.-C. ;Hafidi M. 2005. Analysis of humic acids from aerated and non-aerated urban landfill composts. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 56: 8 - 16.
- Loewy T., Puricelli C.A. 1982. Disponibilidad de Fósforo en suelos del área de la E. E. A. Bordenave. Informe Técnico nº 28.
- Loewy T., Sewald H. A. 1980. Fertilidad nitrogenada para trigo en suelos del SO bonaerense. IX Reunión Argentina de la ciencia del suelo II: 533-536.
- Luce, M.S.; Whalen, J.K.; Ziadi, N.; Zebarth, B.J. 2011. Nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. *Adv. Agron.* 112:55-102.
- Lützw, M von; Leifeld, J.; Kainz, M.; Kögel-Knabner, I.; Munch, J.C. 2002. Indications for soil organic matter quality in soils under different management. *Geoderma*. 105: 243-258
- Mallarino, A.P. 1997. Interpretation of soil phosphorus tests for corn in soils with varying pH and calcium carbonate content. *J. Prod. Agric.* 10:163-167.
- Manly, BFJ. 1997. Multivariate statistical methods. A primer. Second Ed. Chapman & Hall, London. 216 p.
- Martínez, J.M.; Galantini, J.A.; Landriscini. M.R. 2015. Eficiencia en el uso del nitrógeno del trigo en la región semiárida de la provincia de Buenos Aires (Argentina): efectos del momento de aplicación. *Agriscientia* 32 (1): 15-27.
- Maske G.G.B.; Ortiz-Monasterio, J.I.; Van Ginkel, M.; Gonzales, R.M.; Fischer, R.A.; Rajaram, S.; Vlek, P.L.G. 2001. Importance of P uptake efficiency versus P utilization for wheat yield in acid and calcareous soils in Mexico. *European Journal of Agronomy*, 14: 261-274.
- Mattingly, G.E.G. 1975. Labile phosphate in soils. *Soil Sci.* 119: 369-375.
- McCabe, GP. 1984. Principal Variables. *Technometrics*, 26 (2): 137-144.
- McDowell, R.W.; Mahieu, N.; Brookes, P.C.; Poulton, P.R. 2003. Mechanisms of phosphorus solubilisation in a limed soil as a function of pH. *Chemosphere*. 51: 685-692.
- McGill, W.B.; Cole, C.V. 1981. Comparative aspects of C, N, S and P cycling through soil organic matter during pedogenesis. *Geoderma*. 26:267-286.
- Mckenzie, R. H.; Stewart J.W. B., Domaar, J.F.; Schaalje, G.B. 1992. Long - term crop rotation and fertilizer effects on phosphorus transformations: In a Chernozemic soil. *Can. J. Soil Sci.* 72: 581-589.

- McLaughlan, K. 2006. Effects of soil texture on soil carbon and nitrogen dynamics after cessation of agriculture. *Geoderma*; 136(1):289-299. DOI:10.1016
- Mehlich, A. 1984. Mehlich no.3 extractant: A modification of Mehlich no.2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15:1409-1416.
- Micucci, F.; Álvarez, C. 2002. Impacto de las prácticas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua en los cultivos extensivos de la región pampeana argentina. *Archivo Agronómico N° 6, Informaciones Agronómicas del Cono Sur N° 15.* INPOFOS Cono Sur, Argentina
- Minoldo G. 2010. Impacto de largo plazo de diferentes secuencias de cultivo del sudeste bonaerense sobre algunas propiedades químicas del suelos, y la productividad del trigo. Tesis Magister en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur. 153 p Bahía Blanca.
- Moraes Sá J.C. 2004. Adubação fosfatada no sistema plantio direto. In: Fósforo na Agricultura Brasileira (eds.) T.Yamada & Abdalla, S. R. S., São Pedro-SP, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e Fosfato, Piracicaba-SP, p. 201-222, 726 p.
- Morales Vallejo, P. 2013. El Análisis Factorial en la construcción e interpretación de tests, escalas y cuestionarios. Universidad Pontificia Comillas, Madrid. Fecha último acceso: 15/09/2013. <http://www.upcomillas.es/personal/peter/investigacion/AnalisisFactorial.pdf>
- Mozaffari, M.; Sims, J.T. 1994. Phosphorus availability and sorption in an atlantic coastal plain watershed dominated by animal-based agriculture. *Soil Sci.* 157:97-107.
- Murphy, J.; Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal.Chim.Acta.* 27:31-36.
- Murrman, R.P.; Peech, M. 1969. Relative significance of labile and crystalline phosphates in soil. *Soil Sci.* 107:149-155.
- Myers, R.G.; Sharpley, A.N.; Thien, S.J.; Pierzynski, G.M. 2005. Ion-sink phosphorus extraction methods applied on 24 soils from the continental USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 511-521.
- N'dayegamiye, A.; Angers, D.A. 1990. Effets de l'apport prolongé de fumier de bovins sur quelques propriétés physiques et biologiques d'un loam limoneux Neubois sous culture de maïs. *Can. J. Soil Sci.* 70:259-262.
- Needelman, B.A.; Wander, M.M.; Bollero, G.A.; Boast, C.W.; Sims, G.K.; Bullock, D.G. 1999. Interaction of Tillage and Soil Texture: Biologically active soil organic matter in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1326-1334.
- Niemeyer, J.; Chen, Y.; Bollag J.-M. 1992. Characterization of humic acid, composts, and peat by diffuse reflectance Fourier-transform infrared spectroscopy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 135-140

- Novelli, L.E.; Caviglia, O.P.; Melchiori, R.J.M. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma* 167-168: 254-260.
- O'Halloran, I.P. 1993. Effect of tillage and fertilizer on the inorganic and organic phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* 73:359-369.
- O'Halloran, I.P.; Kachanoski, R.G.; Stewart, J.W.B. 1985. Spatial variability of soil phosphorus as influenced by soil texture and management. *Can. J. Soil Sci.* 65:475-487.
- O'Halloran, I.P.; Stewart, J.W.B.; De Jong E. 1987a. Changes in P forms and availability as influenced by management practices. *Plant Soil* 100:113-126.
- O'Halloran, I.P.; Stewart, J.W.B.; Kachanoski, R.G. 1987b. Influence of texture and management practices on the forms and distribution of soil phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* 67:147-163.
- Ohno, T.; Griffin, T. S., Liebman, M.; Porter, G. A. 2005. Chemical characterization of soil phosphorus and organic matter in different cropping systems in Maine, U.S.A. *Agriculture, ecosystems and environment* 105:625-634
- Olsen, S.R.; Cole, C.V.; Watanabe, F.S.; Dean, L.A. 1954. Estimation of available phosphorus by extraction with sodium bicarbonate. *USDA Circ.* 939, U.S. Govt.
- Olsen, S.R.; Sommers, L. E. 1982. Phosphorus. P.403-430. In A. L. Page et al., (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2.2nd ed.* Agron. Monogr. 9 ASA and SSSA, Madison, WI.
- Paniagua, A.; Mazzarino, M.J.; Hass, D., Szott, L.; Fernandez C. 1995. Soil phosphorus fractions under tropical agro-ecosystems on a Volcanic Soil. *Austr. J. Soil Res.* 33: 311-320.
- Paoloni, JD; Vazquez, R. 1985. Necesidades teóricas de los cereales de invierno y probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones como base para el balance hídrico. Pp. 1545-1556. *Anales de Edafología y Agrobiología XLIV.*
- Papiernik, S. K.; Lindstrom, M. J., Schumacher, T. E.; Schumacher, J. A.; Malo, D. D.; Lobb, D.A. 2007. Characterization of soil profiles in a landscape affected by long-term tillage. *Soil and tillage research* 93:335-345.
- Parton, W.J.; Stewart, J.W.B.; Cole, C.V. 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry* 5:109-131.
- Pascale, C.; Heredia, O.; Giufre, L. 2000. Distintas fracciones de P en suelos de Entre Ríos. *Revista Facultad de Agronomía* 20: 59-62
- Petersen, G.W.; Corey, R.B. 1966. A modified Chang and Jackson procedure for Routine fractionation of inorganic soil phosphates. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30: 563-565.

- Picone, L.I.; Zamuner, E.C.; Berardo, A.; Marino, M.A. 2003. Phosphorus transformations as affected by sampling date, fertilizer rate and phosphorus uptake in a soil under pasture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 67: 225–232
- Pierzynski, G.M.; Logan, T.J.; Traina, S.J. 1990c. Phosphorus chemistry and mineralogy in excessively fertilized soils: Solubility Equilibria. *Soil Science Society of America Journal* 54: 1589–1595.
- Pierzynski, G.M.; Logan, T.J.; Traina, S.J.; Bigham, J.M. 1990. Phosphorus chemistry and mineralogy in excessively fertilized soils quantitative analysis of P rich particles. *Soil Science Society of America Journal* 54: 1576– 1583.
- Pla, L. 1986. Análisis Multivariado: Método de Componentes Principales. Instituto Interamericano de Estadística. Sec. General de la OEA Washington, D.C.89 p.
- Plante, A.F.; Conant, R.T.; Stewart, C.E.; Paustian, K.; Six, J. 2006. Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*; 70: 287-296.
- Quiroga, A.; Funaro, D.; Noellemeyer, E.; Peinemann, N. 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in Pampas Argentina. *Soil Tillage Research* 90 63-68
- Rausch, A.; Galantini, J.; Iglesias, J.; Albin, A.; Barreiro M., Venanzi S., Kruger H. 2001. Sistemas de labranzas: 2. Disponibilidad del P. V Congreso Nacional de Trigo, Carlos Paz, Córdoba.
- Raven, K. P.; Hossner, L.R. 1993. Phosphate desorption quantity-intensity relationships in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1505-1508.
- Reddy, K.R.; Overcash, M.R.; Khaleel, R.; Westerman, P.W. 1980. Phosphorus adsorption desorption characteristics of two soils utilized for disposal of animal waste. *J. Environ. Qual.* 9: 86-92.
- Rehm, G.W.; Randall, G.W.; Scobbie, A.J.; Vetsch, J.A. 1995. Impact of fertilizer placement and tillage system on phosphorus distribution in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1661-1665.
- Reynolds, W.D.; Drury, C.F.; Tan, C.S.; Fox, C.A.; Yang, X.M. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152: 252-263
- Rice, C.W.; Havlin, J.L. 1994. Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendations.. In J.L. Havlin et al (ed.) *Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendation*. SSSA Spec. Publ. No. 40. SSSA. Madison, WI. Pp. 1–13.
- Richards, J.E.; Bates, T.E.; Sheppard, S.C. 1995. Change in the forms and distribution of soil phosphorus due to long-term corn production. *Can. J. Soil Sci.* 75:311-318.

- Ron, M. M.; de Bussetti, S.G.; Loewy T. 1995. Uso de un índice de sorción como complemento del fósforo extraíble para la fertilización del trigo. *Ciencia del suelo* 13: 35-37.
- Ron, M.M.; Loewy, T. 1990. Fertilización fosfórica del trigo en el sudoeste bonaerense. I. Modelos de la respuesta. *Ciencia del Suelo*, 8(2): 187-194
- Sainz Rozas, H.; Echeverria, H.E. 2008. Relevamiento de la concentración de fosforo asimilable en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo "Semiárido: Un desafío para la Ciencia del Suelo". 13-16 de Mayo de 2008, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.
- Salas, A.M., Elliot, E.T., Westfall, D.G.; Cole, C.V.; Six, J. 2003. The role of particulate organic matter in Phosphorus cycling. *Soil Sci. Soc. Am J.* 67:181-189.
- Saunders, W. M. H.; Williams, E. G. 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soil. *J. Soil Sci.* 6:254-267
- Sawhney, B.L. 1973. Electron Microprobe Analysis of Phosphates in Soils and Sediments. *Soil Science Society of America Journal* 37: 658-660
- Scheiner, J. D.; Lavado, R. S. 1998. The role of Fertilization o phosphorus stratification in no-till soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29: 2705-2711.
- Schimmel, D.; Stillwell, M.; Woodmansee, R. 1985. Biochemistry of C, N, and P in a soil catena of the shortgrass steppe. *Ecology.*; 66:276-282.
- Selles, F.; Kochann, R.A.; Denardin, J.E.; Zentner, R.P., Faganello, A. 1997. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. *Soil & Tillage Res.* 44:23-34.
- Selles, F.; McConkey, B.G; Campbell C.A. 1999. Distribution and forms of P under cultivator and zero-tillage for continuous- and fallow-wheat cropping systems in
- Senesi, N. ; Loffredo, E. **1999**. The chemistry of soil organic matter. Pág. 239 - 370. En: *Soil Physical Chemistry*. Editado por D. L. Sparks. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Sharma, S. 1996. *Applied Multivariate Techniques*. 512 pages. ISBN: 978-0-471-31064-8
- Sharpley, A.N.; Sims, J.T.; Pierzynski, G.M. 1994. Innovative soil phosphorus availability indices: assessing inorganic phosphorus. p. 116-142. In *Soil testing: prospects for improving nutrient recommendations*, SSSA special publication 40. SSSA, Madison, WI.
- Sharpley, A.N.; Smith, S.J., Bain, W.R. 1993. Nitrogen and phosphorus fate from longterm poultry litter applications to Oklahoma soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1131-1137.

- Sharpley, A.N.; Smith, S.J.; Stewart, B.A.; Mathers, A.C. 1984. Forms of phosphorus in soil receiving cattle feedlot waste. *J. Environ. Qual.* 13:211-215.
- Sharpley, A.N.; Tunney, H. 2000. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of 21st century. *J. Environ. Qual.* 29:176-181.
- Shober, A.L.; Hesterberg, D.L.; Sims, J.T.; Gardner, S. 2006. Characterization of phosphorus species in biosolids and manures using XANES spectroscopy. *J. Environ. Qual.* 35:1983-1993.
- Simard, R.R.; Cluis, D.; Gangbazo, G.; Beauchemin, S. 1995. Phosphorus status of forest and agricultural soils from a watershed of high animal density. *J. Environ. Qual.* 24:1010-1017.
- Six, J.; Feller, C.; Denef, K.; Stephen, H.; Moraes Sá, Albrecht, A. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils- Effects of no tillage. *Agronomie* 22 755-775.
- Sofield, I.; Evans, T.; Cook, M.; Wardlaw, I. 1977. Factors influencing the Rate and Duration of Grain Filling in Wheat. *Australian Journal of Plant Physiology* 4: 785-797.
- Soil Survey Staff. 2003. Keys to soil taxonomy. Washington, D.C: United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, 11ed. 332 p.
- Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy, 11th Edición. Pp. 374. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington DC, Estados Unidos.
- Sommers, L. E.; Nelson, D. D.W. 1972. Determination of total phosphorus in soil. *Soil Science Society of American Proceeding* 36:902-904.
- Song, Z.; Chouparova, E.; Jones, K.W.; Feng, H.; Marinkovic, N.S. **2001**. FTIR Investigation of Sediments from NY/NJ Harbor, San Diego Bay, and the Venetian Lagoon. NSLS Activity Report, Z-112- Z-116. <http://www.pubs.bnl.gov/nsls01/pdf/section%202/>
- Sparks, D. L.; Page, A.L.; Helme, P.A.; Loeppert, R. H., Soltanpour P.N.; Tabatabai, M.A.; Johnston, C.T., Sumner, M.E. *Methods of Soil Analysis Part 3- Chemical methods*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA. 1996.
- Stevenson F. J. **1994**. *Humus Chemistry. Genesis, Composition, Reactions*. 512 páginas.
- Stevenson F.J. (1994). *Humus Chemistry. Genesis, Composition, Reactions*. 2ª edición, *John Wiley & Sons*, Nueva York.
- Stevenson, F.J. 1988. *Cycles of Soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients*. John Wiley and Sons, New York, NY.

- Stevenson, F.J.; Cole, M.A. 1999. Cycles of soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. John Wiley & Sons, Nueva York, EE.UU. 2a edición. 427 pp.
- Suñer, L.; Galantini J. 2012. Fertilización fosforada en suelos cultivados con trigo de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 30(1) 57-66.
- Suñer, L.; Galantini, J.; Minoldo, G. 2014. Dynamics of soil P forms in wheat-based crop sequences in the semiarid region of Argentina. *Applied and Environment Soil Science*. 6 pages.
- Suñer, L.; Galantini, J.; Varela, P.; Rosell, R. 2007. Estratificación de las formas de fósforo en Siembra Directa y su relación con la disponibilidad para los cultivos. En "La siembra directa en los sistemas productivos del S y SO Bonaerense", Revista Técnica Especial AAPRESID, CIC, CERZOS y UNS. Eds. Galantini et al. 28-31.
- Suñer, L.G.; Galantini, J.A.; Rosell, R.A. 2005. Cambios del fósforo en suelos bajo diferentes rotaciones de cultivos. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur INPOFOS* N° 25.
- Suñer, L.G.; Galantini, J.A.; Rosell, R.A.; Chamadoira, M.D. 2002. Cambios en el contenido de las formas de fósforo en suelos de la región semiárida pampeana cultivados con trigo (*Triticum aestivum*). *Rev. Fac. Agron., La Plata* 104(2): 105-111.
- Suñer, L.; Galantini, J. 2013. Dinámica de las formas del P en suelos de la región sudoeste pampeana: estudio de la incubación con fertilizante fosfatado. *Ciencia del suelo.*; 31:33-44
- Sweeney, D.W. 1993. Fertilizer placement and tillage effects on grain sorghum growth and nutrient uptake. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:532-537.
- These, A. **2005**. Strukturelle Charakterisierung von Fulvinsäure-Molekülen mittels LCMS/ MS: Hinweise zu Quellen, Bildung und Reaktivität. Tesis Doctoral de la Technical University of Berlin, Alemania.
- Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity, pp 475-490, in D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helme, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston and M. E. Sumner, eds., *Methods of soil Analysis, Part 3- Chemical Methods*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Tiessen, H (ed.). 1995. Phosphorus in the Global Environment: Transfers, Cycles, and Management. John Wiley & Sons, New York. 462 pp.
- Tiessen, H.; Moir, J. 1993. Characterization of available P by sequential extraction. En: *Soil sampling and Methods of analysis*. Carter, M.R. (Ed). Boca Raton. USA. Lewis publishers. Pp 75-86
- Tiessen, H.; Stewart, J.W.; Cole C.V. 1984. Pathways of phosphorus transformation in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:853-858.

- Tiessen, H.; Stewart, J.W.B.; Bettany, J.R. 1982. Cultivation effect on the amounts and concentration of carbon, nitrogen and phosphorus in grassland soils. *Agron. J.* 74:831-835.
- Tiessen, H; Shang, C. 1998. Organic matter turnover in tropical land use systems. 1-14. In *Carbon and nutrient dynamics in natural and agricultural tropical ecosystems*. CAB International.
- Tran, T.S.; N'dayegamiye, A.. 1995. Long-term effects of fertilizers and manure application on the forms and availability of soil phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* 75:281- 285.
- Tran, T.S; Fardeau, J.C.; Giroux, M. 1988. Effects of soil properties on plant-available P determined by the isotopic dilution P-32 method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1382-1390.
- Turner, B.L.; Leytem, A.B. 2008. Phosphorus speciation in soils and manures by solution ³¹P NMR spectroscopy. p. 95-101. In J.L. Kovar and G.M. Pierzynski (eds.) *Methods for phosphorus analysis for soils, sediments, residuals and waters*. 2nd Edition. Southern Cooperative Series Bulletin No. 408.
- Vazquez, M.E. 2002. Balance y fertilidad fosforada en suelos productivos de la región pampeana. *Informaciones Agronómicas* 16: 3-7. IPNI Cono Sur. Acassuso, Bs. As., Argentina.
- Villamil, M.B.; Bollero, G.A.; Darmody, R.G.; Simmons, F.W.; Bullock, D.G. 2006. No-Till Corn/Soybean Systems Including Winter Cover Crops: Effects on Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am J.* 70: 1936-1944.
- Wagar, B.I.; Stewart, J.W.B.; Moir, J.O. 1986. Changes with time in the form and availability of residual fertilizer phosphorus on Chernozemic soils. *Can. J. Soil Sci.* 66:105-119.
- Walker, T.W.; Syers, J.K. 1976. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma* 15:1-19.
- Webber, P.J. 1978. Spatial and temporal variation of the vegetation and its productivity, Barrow, Alaska. *En: L.L. Tieszen (ed.) Vegetation and production ecology of an Alaskan Arctic tundra*. New York: Springer-Verlag. 37-112 pp. SMECK, N.E. 1985. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. *Geoderma* 36(3-4): 185-199.
- Weill, A.N.; Mehuys, G.R.; McKyes, E. 1990. Effect of tillage reduction and fertilizer type on soil properties during corn production. *Soil & Tillage Res.* 17:63-76.
- White, R.E.; Beckett, P.H.T. 1964. Studies on the phosphate potentials of soils. 1. The measurement of phosphate potential. *Plant and Soil* 20:1-16.
- Wick, B.; Kühne, R.F.; Vlek, P.L.G. 1998. Soil microbiological parameter as indicators of soil quality under improved fallow management systems in south-western Nigeria. *Plant and Soil*. 202: 97-107

- Wright, A.L. 2009. Phosphorus sequestration in soil aggregates after long-term tillage and cropping. *Soil & Tillage Res.* 103:406-411.
- Zalba, P.; Galantini, J.A. 2007. Modified Soil-Test Methods for Extractable Phosphorus in Acidic, Neutral, and Alkaline Soils', *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 38:11, 1579 – 1587.
- Zamuner, E.; Picone, L.I.; Echeverría, H.E. 2004. Formas de fósforo en un suelo bajo labranza convencional y siembra directa. XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo. Paraná (ER).
- Zebarth, B.J.; Dury, C.F.; Tremlay, N.; Cambouris, A.N. 2009. Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada: A review. *Can. J. Soil Sci.* 89: 113–132.
- Zhang, T.Q.; MacKenzie, A.F. 1997a. Changes of soil phosphorus fractions under longterm corn monoculture. *Soil Sci.Soc. Am. J.* 61:485-493.
- Zhang, T.Q.; MacKenzie, A.F. 1997b. Phosphorus in zero-tension soil solution as influenced by long-term fertilization of corn. *Can. J. Soil Sci.* 77:685-691.
- Zhang, T.Q.; Mackenzie, A.F.; Liang, B.C.; Drury, C.F. 2004. Soil test phosphorus and phosphorus fractions with long-term phosphorus addition and depletion. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 68:519-528.
- Zhang, T.Q.; Mackenzie, A.F.; Sauriol, F. 1999. Nature of soil organic phosphorus as affected by long-term fertilization under continuous corn (*Zea mays* L.): A ³¹P NMR study. *Soil Sci.* 164:662-670.
- Zhang, T.Q.; Tan, C.S.; Drury, C.F.; Reynolds, W.D. 2006. Long-term (≥43 years) fate of soil phosphorus as related to cropping systems and fertilization. World Congress of Soil Science. Philadelphia, USA. July 9-16.
- Zheng, Z., J.A. MacLeod, and J. Lafond. 2004b. Phosphorus status of a Humic Cryaquept profile in frigid continental climate as influenced by cropping practices. *Biol. Fertil. Soils* 39:467-473.
- Zheng, Z.; MacLeod, J.A.; Sanderson, J.B.; Lafond, J. 2004a. Soil phosphorus dynamics during 10 annual applications of manure and mineral fertilizers: fractionation and path analyses. *Soil Sci.* 169:449-456.
- Zheng, Z.; Simard, R.R.; Lafond, J.; Parent, L.E. 2001. Changes in phosphorus fractions of a Humic Gelysol as influenced by cropping systems and nutrient sources. *Can. J. Soil Sci.* 81:175-183.
- Zheng, Z.; Simard, R.R.; Lafond, J.; Parent, L.E. 2002. Pathways of soil phosphorus transformations after 8 years of cultivation under contrasting cropping practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:999-1007.
- Zheng, Z.M.; Zhang, T.Q. 2012. Soil Phosphorus Tests and Transformation Analysis to Quantify Plant Availability: A Review. In *Soil Fertility Improvement and Integrated Nutrient Management - A Global Perspective*. Edited by Joann K. Whalen; ISBN 978-953-307-945-5, 318 pages, under CC BY 3.0 license DOI: 10.5772/1401

- Zheng, Z.; Parent, L.E.; MacLeod, J.A. 2003. Influence of soil texture on fertilizer and soil phosphorus transformations in Gleysolic soils. *Canadian Journal of Soil Science*. 83: 395-403.
- Zillio, J.; Frolla, F.; Kruger, H. 2014. Varialibidad climática, fertilidad edáfica y rendimientos de trigo en zona semiárida. En AACS (Ed) *Acas XXIV Congreso de la Ciencia del Suelo (en CD)*. Bahía Blanca