

**TRANSPORTE VERTICAL DE FÓSFORO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS DEL
NOROESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

Trabajo Final de Grado de la alumna

REIXACHS CAROLINA

**Este trabajo ha sido presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Agrónomo**

Carrera

Ingeniería Agronómica



Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires

Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales

Pergamino, 03/04/2023

**TRANSPORTE VERTICAL DE FÓSFORO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS DEL
NOROESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

Trabajo Final de Grado

del alumno

REIXACHS CAROLINA

(Araujo Patricia)

(Caprile Ana Clara)

(Ferraris Gustavo)

Evaluador

Evaluador

Evaluador

Ing. (PhD) Silvina I. Portela, Ing. (MSc) Ana P. Giannini, Bioq. (MSc) María J. Torti

Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales

Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires

Pergamino, 07/07/2023

ÍNDICE

Contenido

Resumen.....	5
Palabras claves.....	5
Introducción.....	6
Formar de P en el suelo.....	6
Pérdidas de P en los sistemas agrícolas.....	7
Cambios en los sistemas agrícolas de la Región Pampeana.....	10
Hipótesis.....	11
Objetivos.....	11
Materiales y métodos.....	12
Descripción del experimento y sitio en estudio.....	12
Mediciones.....	16
Análisis estadístico.....	17
Resultados.....	18
Lluvia y drenaje.....	18
Lixiviación de P.....	21
Rendimiento y producción de biomasa de los cultivos de cobertura.....	22
Discusión.....	23
Conclusión.....	26
Bibliografía.....	27
Anexo.....	32

Figuras

Figura 1. El ciclo de fósforo (P) en el sistema suelo-planta (Giannini, 2019).....	7
Figura 2. Sistemas de drenaje artificial en Estados Unidos.....	8
Figura 3. Esquema del flujo de agua en dos suelos pampeanos de diferente textura. El Argiudol típico (Serie Pergamino) con flujo preferencial y el Hapludol	

típico	(Serie	Junín)	sin	flujo	
preferencial.....					10
Figura 4. Foto y esquema del corte transversal de los lisímetros.....					14
Figura 5. Línea de tiempo correspondiente a las rotaciones de cultivo e incorporación de los cultivos de cobertura (CC) en cada caja lisimétrica.....					15
Figura 6. Precipitación anual y de los períodos de cultivo de verano (maíz y soja) y de cobertura (avena y avena+vicia). Las cajas y bigotes muestran mediana, cuartiles, mínimo y máximo del registro histórico (1910-1922) y los símbolos (cruces) las del período de estudio (2014-2022) para cada categoría (anual, avena+vicia, maíz, avena y soja).....					19
Figura 7. Drenaje profundo durante los períodos de intercultivo y de cultivo de verano para la rotación maíz-soja sin (M-S) y con cultivos de cobertura (M-CC-S). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).....					19
Figura 8. Figura 8. Correlación entre la lluvia y el drenaje diario para cada tipo de suelo en lisímetros con CC (A) y sin CC (B) aplicando desfases crecientes entre las series de tiempo.....					20
Figura 9. Figura 9. Concentración de PRS del drenaje (a) y cantidad de P lixiviado por período de cultivo o intercultivo (b) para cada tipo de suelo (P: Argiudol típico serie Pergamino y J: Hapludol típico serie Junín) y rotación (M-S y M-CC-S). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).....					21
Figura 10. Producción normalizada de grano de los cultivos de verano y biomasa aérea de los CC en función de la lluvia de cada período.....					23

Tablas

Tabla 1. Características físicas y químicas de los suelos contenidos en los lisímetros: un Argiudol típico serie Pergamino y un Hapludol típico serie Junín. Las concentraciones de Carbono (C), N y P corresponden a 2008.....13

Tabla 2. Calendario de cultivos, precipitaciones y fertilización.....16

Tabla 3. Rendimiento de los cultivos principales. En el caso de maíz el rendimiento se expresa con 14,5% humedad y en soja con 13,5%.....22

Tabla 4. Biomasa de los cultivos de cobertura.....23

RESUMEN

La pérdida de fósforo (P) de suelos agrícolas hacia cursos de agua es un factor importante de degradación ambiental. Por mucho tiempo se consideró que estaba asociada, exclusivamente, al escurrimiento superficial. Sin embargo, en los últimos años, surgieron registros de pérdidas de P por transporte vertical. El objetivo de este trabajo/estudio fue evaluar el efecto del tipo de suelo y la inclusión de cultivos de cobertura (CC) en una rotación maíz-soja sobre el transporte vertical de P. Se utilizaron seis lisímetros (3,3 x 3,3 x 1,4 m de profundidad) rellenos con suelos típicos de la Región Pampeana, un Argiudol típico de textura franco limosa serie Pergamino y un Hapludol típico de textura franco arenosa serie Junín (tres de cada uno), cultivados entre 2014 y 2022 con una rotación maíz-soja sin (M-S) y con CC (M-CC-S). Después de cada lluvia que produjo drenaje se midió su volumen y concentración de P reactivo total (PRT) para calcular las pérdidas de P por este flujo. El volumen de agua drenado fue similar entre suelos y mayor en la rotación M-S con respecto a M-CC-S (148 vs 96 mm, $p < 0,05$) durante los periodos de intercultivo (es decir, entre dos cultivos de verano). La correlación entre la lluvia y el drenaje diario fue mayor para Pergamino que para Junín al considerar eventos del mismo día ($r = 0,44$ vs $0,26$) y disminuyó para Pergamino, pero no para Junín con un día de desfase entre series ($r = 0,29$ vs $0,25$). La cantidad de PRT perdida fue mayor para Pergamino que para Junín en la rotación M-S ($0,32$ vs $0,11$ kg ha⁻¹ por período de cultivo o intercultivo, $p < 0,05$). Los resultados sugieren que: 1) el agua fluye a través de diferentes canales en cada suelo, el flujo rápido de Pergamino después de la lluvia probablemente ocurre a través de canales de flujo preferencial (macroporos) mientras que el flujo más lento de Junín posiblemente esté asociado a la porosidad de la matriz, y 2) la pérdida de P está relacionada con el tipo de flujo (Pergamino > Junín), no así con el tipo de rotación (M-S = M-CC-S).

PALABRAS CLAVE: textura del suelo, cultivos de cobertura, drenaje, flujo preferencial, lisímetros.

INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es un elemento central para el crecimiento y desarrollo de las plantas, además es el segundo nutriente limitante de la productividad luego del nitrógeno (N). En la planta, interviene en la transferencia metabólica de energía a través del ATP, es un componente esencial de los ácidos nucleicos, los fosfolípidos que conforman las membranas celulares y la fitina de reserva en las semillas. Presenta baja solubilidad y es poco móvil en el suelo. Su ciclo es relativamente cerrado, es decir que está fuertemente retenido en el sistema suelo-planta y sujeto a pocas pérdidas durante la mayor parte del tiempo, siendo las principales salidas la exportación por cosecha, la erosión y el escurrimiento (Andriulo *et al.*, 2010).

La principal fuente de P es la corteza terrestre y, debido a su escasa disponibilidad en el material originario, su deficiencia es común en suelos agrícolas, debiendo ser aportado mediante fertilizantes minerales o enmiendas orgánicas. Su concentración en la solución del suelo es relativamente baja y, depende de la solubilización y precipitación de los fosfatos unidos al calcio, hierro y aluminio, la desorción o adsorción a los coloides del suelo y la mineralización e inmovilización del P orgánico (Lombi *et al.*, 2004).

Formas de P en el suelo

En el suelo se pueden distinguir dos fracciones de P que interactúan entre sí: el P orgánico (Po) y el P inorgánico (Pi). La mayor parte del Po proviene de la descomposición de residuos vegetales y animales y, una pequeña parte es de origen microbiano. El contenido de Po en el suelo se relaciona con los procesos de formación y descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS), es decir que cuanto mayor sea el contenido de MOS, mayor será la mineralización y el suministro de P a las plantas (Suñer *et al.*, 2008; Rossi, 2011). En suelos templados, se estima que la mineralización del Po puede aportar entre 5 y 20 kg P ha⁻¹ por año (Álvarez *et al.*, 2010).

El Pi está representado por diferentes fracciones: el presente en los minerales primarios, el adsorbido a las arcillas, el que se encuentra en solución y el precipitado u ocluido (García *et al.*, 2006) (Figura 1). Su disponibilidad depende de

últimos años, surgieron algunos registros de pérdida vertical de P en campos artificialmente drenados del Centro Oeste de Estados Unidos (Reid *et al.*, 2018) (Figura 2).



Figura 2. Sistemas de drenes artificiales en que permiten eliminar el exceso de agua y profundizar la napa freática, creando un ambiente adecuado para las raíces y los organismos del suelo.

Cabe señalar que, aunque es común referirse al movimiento vertical de P como “lixiviación”, se trata de un proceso con características y consecuencias diferentes a la lixiviación de nitrato. La lixiviación de P hacia acuíferos profundos no representa un riesgo directo para la salud humana como ocurre con el nitrato. Sin embargo, la descarga natural o a través de drenes artificiales sobre cursos de agua superficiales se asocia al proceso de eutrofización (Fernández Marcos, 2011). Por otro lado, estas salidas representan la pérdida de un nutriente escaso, y cuyas fuentes para producir fertilizantes podrían verse gravemente afectadas en las próximas décadas (Giannini, 2022). Hacia fines de 1980, suelos pampeanos no erosionados ya habían perdido el 42% de las reservas de P total (PT) de la capa arable (Andriulo *et al.*, 1996).

Tanto el P_i disuelto como el asociado a partículas interactúa con la matriz del suelo retardando su pasaje, de modo que, el transporte vertical de P ocurre principalmente a través de macroporos o canales de flujo preferencial (Radcliffe et al., 2015). Llamamos macroporos a aquellos canales estructurales en los que el agua no está influenciada por fuerzas capilares y, por consiguiente, su pasaje es más rápido que a través de la matriz del suelo circundante y con escaso o nulo intercambio (Beven y Germann, 1982). Por otro lado, el flujo del agua y solutos a través de la matriz del suelo (flujo masal) es un movimiento relativamente lento y parejo que explora todo el espacio poroso, obedeciendo a la teoría de la dispersión convectiva que supone que el agua sigue una trayectoria de flujo promedio a través del suelo (Bond, 1998).

La importancia relativa de cada flujo depende principalmente del tipo de suelo y de la intensidad de la lluvia. La textura interviene en la formación de macroporos de manera directa, ya que los suelos de texturas finas son más propensos a formar grietas por expansión y contracción de las partículas de arcilla, o indirectamente favoreciendo la abundancia y actividad de lombrices, las cuales cumplen un rol importante en la estructura/estabilidad de los suelos (Reid et al., 2018).

Por lo tanto, el principal determinante del movimiento vertical de P sería la división del agua de lluvia entre el flujo a través de macroporos, con una concentración de P relativamente alta, y el flujo por la matriz del suelo con menor concentración de P (Reid *et al.*, 2018). El tipo de flujo que interviene en la migración vertical de P también influye sobre la fracción transportada; en el caso del flujo masal predomina el P disuelto mientras que en el caso del movimiento por macroporos predomina el P asociado a partículas (Fernández Marcos, 2011). Además, Fernández Marcos (2011) afirma que la lixiviación de P se produce cuando se satura la capacidad de adsorción del suelo; es decir, que el riesgo de lixiviación aumenta cuando su concentración es superior a un valor umbral de saturación de P . Esto puede atribuirse a que en ese punto se saturan los sitios de adsorción de alta energía, de modo que el P empieza a ser adsorbido en sitios de menor energía (con uniones más lábiles) y el riesgo de lixiviación es mayor.

La Pampa Ondulada es una de las regiones más productivas de la Argentina. Sus suelos pertenecen al orden de los Molisoles. En el noreste predominan los Argiudoles, con texturas franco arcillo limosas y arcillo limosas. Hacia el sudoeste, en la zona de transición hacia la Pampa Interior, aparecen los Hapludoles, con texturas franco arenosas (INTA, 1972a,b). Caprile *et al.* (2017) explican que en los dos tipos de suelo el movimiento de agua se produce por flujo masal o pistón y que el flujo preferencial ocurre predominantemente en Argiudoles cuando las precipitaciones son intensas y el suelo presenta poca humedad antecedente (Figura 3).

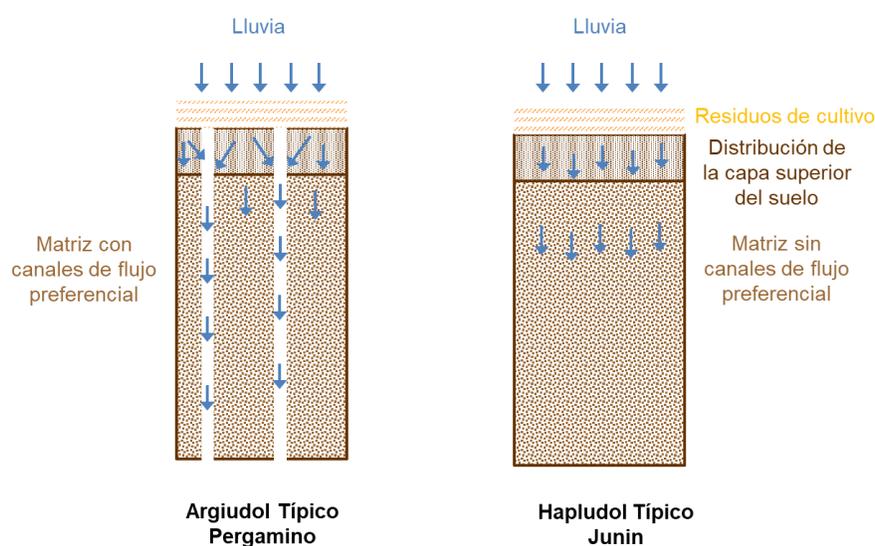


Figura 3. Esquema del flujo de agua en dos suelos pampeanos de diferente textura. El Argiudol típico (Serie Pergamino) con flujo preferencial y el Hapludol típico (Serie Junín) sin flujo preferencial.

Cambios en los sistemas agrícolas de la Región Pampeana

A principios de los años 90 la siembra directa (SD) tuvo una respuesta positiva muy importante sobre el suelo, su adopción permitió conservar la humedad, mantener la MO y protegerlo de la erosión (Alapin, 2008; Cap, 2010). Los diferentes sistemas de labranza pueden afectar la dinámica del P en el suelo debido a la distribución diferencial de residuos y las pérdidas por erosión. La SD produce una estratificación del P y la MO en los primeros centímetros del suelo, mientras que, en los suelos labreados, estos se distribuyen más homogéneamente a lo largo del perfil (Melgar, 1998; Murage *et al.*, 2007). La

adopción de prácticas de labranzas conservacionistas, particularmente la SD, ha sido identificada como una de las principales formas de reducción de pérdida de suelo.

En las últimas tres décadas, la intensificación agrícola avanzó hacia sistemas de producción simplificados con especies de ciclo primavero estival, fundamentalmente soja y secundariamente maíz, y largos períodos de barbecho. Estos sistemas de cultivo simplificados son poco eficientes en la captura anual de las precipitaciones (Caviglia et al., 2004). El predominio de soja en las rotaciones favorece la formación de una estructura laminar continua cercana a la superficie del suelo, debido al bajo aporte de residuos rápidamente degradables. Esto reduce la tasa de infiltración del agua de lluvia, favoreciendo el escurrimiento superficial y la pérdida de P en suelos con pendiente (Sasal et al., 2006; Sasal et al., 2010). Actualmente se promueven rotaciones más intensificadas a partir de la introducción de cultivos de cobertura (CC) otoño-invernales entre dos cultivos de cosecha. La incorporación de CC presenta numerosos efectos positivos, como el secuestro de carbono en el suelo, el aumento de la estabilidad estructural (Restovich et al., 2019), la reducción de las pérdidas de nutrientes por escorrentía y lixiviación (Portela et al., 2016; Sasal et al., 2010) y el control de malezas (Kaspar & Singer, 2011).

Sin embargo, algunos trabajos sugieren que los CC podrían aumentar las pérdidas de P porque sus residuos presentan una elevada tasa de liberación del mismo elemento (Speir et al 2022; Varela et al. 2017). Así, el P que aportan los residuos de CC podría perderse, tanto por escorrentía superficial como por flujo vertical particularmente donde existe una conectividad significativa entre la superficie y el suelo profundo a través de vías preferenciales (Lozier et al., 2017).

HIPÓTESIS

- 1) La cantidad de P transportado verticalmente por el drenaje es mayor en suelos de texturas finas que en suelos de texturas gruesas por la tendencia de los primeros a formar canales de flujo preferencial.
- 2) La cantidad de P transportado verticalmente está directamente asociada al volumen drenado que, a su vez, disminuye a medida que se intensifica la rotación.

Entonces, las predicciones de este trabajo son que la pérdida vertical de P: 1) será mayor en el Argiudol típico de la serie Pergamino que en el Hapludol típico de la serie Junín y 2) será mayor en la rotación maíz-soja sin CC que con CC.

OBJETIVOS

- 1) Cuantificar el drenaje y transporte vertical de P en dos suelos de la Región Pampeana de características contrastantes: un Argiudol típico serie Pergamino y un Hapludol típico serie Junín.
- 2) Cuantificar el drenaje y transporte vertical de P en dos secuencias de cultivo con distinto nivel de intensificación: maíz-soja con y sin CC otoño invernal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del experimento y sitio de estudio

Se utilizaron seis lisímetros de relleno (3,3 x 3,3 x 1,4 m de profundidad) construidos en la Estación Experimental Agropecuaria Pergamino del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria entre 1969 y 1970 y rellenos con dos suelos de textura contrastante característicos de la Región Pampeana: un Argiudol típico serie Pergamino y un Hapludol típico serie Junín (tres de cada uno) (INTA, 1972a,b) (Figura 4). Los lisímetros son microecosistemas artificiales con límites conocidos que permiten realizar un balance casi completo de entradas y salidas y pueden generar información importante sobre los procesos del ciclo de nutrientes, que generalmente no se pueden determinar a partir de enfoques de ecosistemas completos a gran escala (Lajtha, 2000). Sin embargo, plantean limitaciones estructurales (por ejemplo, el tiempo que tarda el suelo en volver a su estructura natural o el número limitado de repeticiones) y conceptuales (representación estrecha del ecosistema), que, en este estudio, se superaron al permitir que los suelos restauraran su estructura natural a través de >30 años de cultivo y utilizando series de tiempo largas (9 años).

El clima es templado húmedo sin estación seca, con temperatura media de 9,2 y 23,5 °C durante el mes más frío y más cálido, respectivamente (Hall et al., 1992). La precipitación media anual para el período 1910-2022 fue de 982 mm, con un coeficiente de variación del 23% para las lluvias anuales del mismo período y una

ocurrencia del 67% del total de precipitaciones entre octubre y marzo (primavera y verano) (Base de datos de la Red Agroclimática de INTA).

Los suelos pertenecen al orden de los Molisoles. Los Argiudoles predominan en la Pampa Ondulada; son suelos profundos, bien desarrollados y bien drenados, con una secuencia de horizontes A-B-C bien definida y un horizonte Bt fuertemente argílico. Los Hapludoles son característicos de la zona de transición hacia la Pampa Interior; son suelos bien drenados, con un horizonte B con menor proporción de arcilla y estructura más débil que los Argiudoles (Moscatelli, 1991). Las características físicas y químicas de estos suelos se presentan en la Tabla 1. En cada lisímetro se reconstruyó el perfil de suelo hasta 1,2 m de profundidad, colocando secuencialmente cada horizonte y compactándolo hasta su densidad original sobre una capa de 0,12 m de arena y 0,04 m de grava que deriva el drenaje profundo hacia un tubo colector ubicado a 1,4 m de profundidad.

Tabla 1. Características físicas y químicas de los suelos contenidos en los lisímetros: un Argiudol típico serie Pergamino y un Hapludol típico serie Junín. Las concentraciones de Carbono (C), N y P corresponden a 2008.

		Argiudol típico				Hapludol típico			
Profundidad	m	0-0,05	0,05-0,30	0,30-1,00	1,00-1,20	0-0,05	0,05-0,30	0,30-1,00	1,00-1,20
Horizonte		A + BA		Bt	BC	A		B	C
Arcilla	% (w/w)	21,6	20,6	38,8	19,0	10,5	19,2	18,0	10,4
Limo		58,4	55,6	43,5	55,9	39,5	31,8	33,4	30,6
Arena		20,0	23,8	17,7	25,1	50,0	49,0	48,6	59,0
Textura		franco limosa		franco arcillo limosa	franco limosa	franco arenosa			
Densidad aparente	g/cm ³	1,1	1,3	1,35	1,25	1,1	1,21	1,29	1,25
CC	% (w/w)	28,9	27,0	27,6	25,4	23,8	23,5	19,8	15,7
PMP		14,6	15,4	18,5	13,9	10,9	8,9	9,5	9,0
pH _{agua} (1:2.5)		6,2	6,6	6,9	7,6	6,3	6,4	6,7	7,4
C orgánico	g/kg	26,3	15,8	5,5	4,3	23,1	14,6	5,6	2,4
N orgánico		2,34	1,51	0,94	0,88	2,09	1,37	0,89	0,53
P extractable	mg/kg	30,0	30,0	22,3	11,3	29,0	29,0	24,0	19,7
T	cmol/kg	21,0	20,4	30,8	25,6	14,4	15,0	13,1	12,0

CC y PMP: contenido de agua en capacidad de campo y punto de marchitez permanente, respectivamente; T: capacidad de intercambio catiónico.

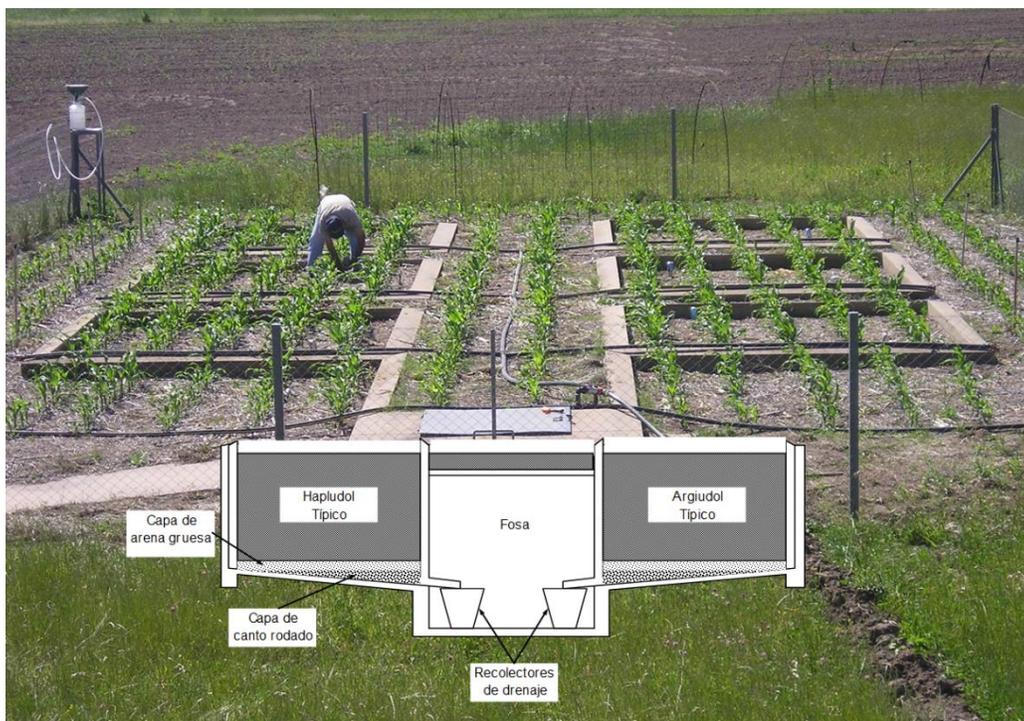


Figura 4. Foto y esquema del corte transversal de los lisímetros.

Los lisímetros estuvieron bajo agricultura continua durante 30 años, permitiendo a los suelos recuperar su estructura natural. En 2001, se inició una rotación maíz-soja bajo SD, utilizando las prácticas agronómicas típicas de la región. En 2014 se incorporaron CC entre los cultivos de verano: un lisímetro con cada suelo para la rotación con CC y dos para la rotación sin CC (Figura 5). En 2016 se incorporaron CC en un segundo lisímetro de cada tipo de suelo. Se cultivó avena (*Avena sativa* L.) como CC antecesor de soja y una consociación de avena y vicia (*Vicia sativa* L.) como antecesor de maíz. Los CC se sembraron en línea bajo SD utilizando densidades de 80 kg semilla ha⁻¹ y de 20 + 40 kg semilla ha⁻¹, para avena y avena + vicia, respectivamente. La vicia fue inoculada con *Rhizobium leguminosarum biovar viceae*, inmediatamente antes de la siembra. Los CC no se cosecharon, ni pastorearon, ni incorporaron al suelo y su ciclo se interrumpió químicamente con 3-4 L ha⁻¹ de glifosato (48% principio activo) hasta 2021-2022 cuando se decretó la ordenanza municipal. La fecha de secado se definió en función de la fecha de siembra del cultivo siguiente y de la distribución de las lluvias: antes de soja se secaron en primavera (octubre), durante la etapa reproductiva, y antes de maíz se secaron en invierno (agosto), en estado vegetativo. Los barbechos de los

tratamientos sin CC se mantuvieron libres de malezas con aplicaciones de glifosato en las mismas dosis utilizadas en el secado de los CC.

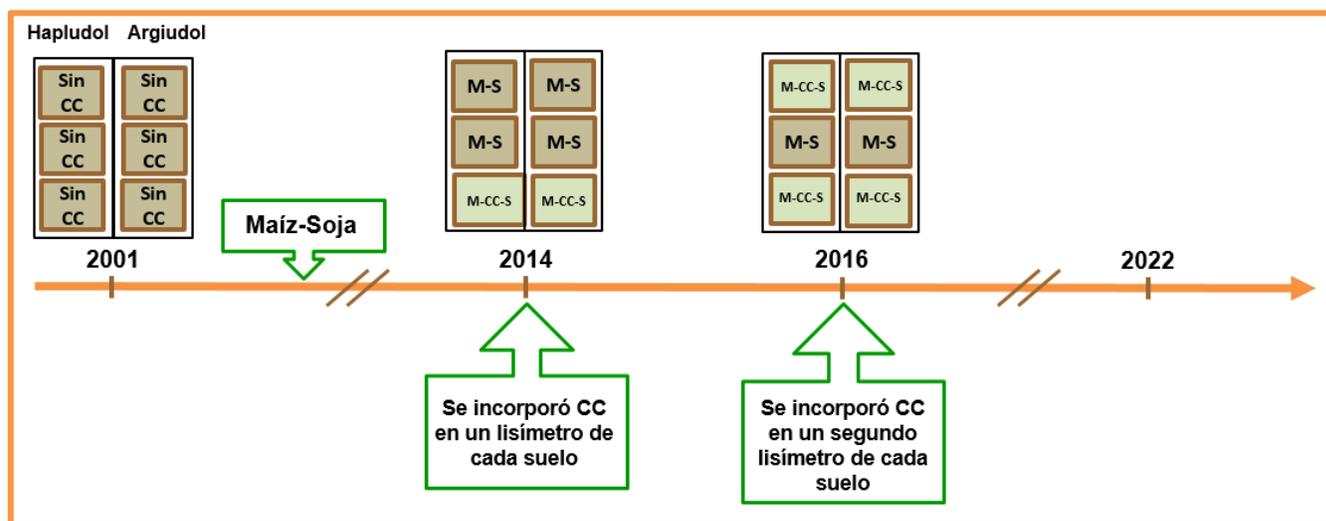


Figura 5. Línea de tiempo correspondiente a las rotaciones de cultivo e incorporación de los cultivos de cobertura (CC) en la rotación maíz-soja (M-S) para cada caja lisimétrica.

El maíz (*Zea mays* L.) DK 747 se sembró en líneas separadas a 0,60 m y con 0,20 m entre plantas (~80.000 plantas ha⁻¹). En pre siembra se extrajeron muestras de suelo para definir la fertilización del cultivo de maíz. No se fertilizó con P porque la provisión superaba el umbral de 15-16 mg P kg⁻¹ suelo (a 0-20 cm de profundidad), a partir del cual se considera necesario fertilizar (Zamuner et al., 2006). En V₄₋₅, se fertilizó con urea al voleo definiendo la dosis a partir del método del balance (Tabla 3). En la última campaña (2021-2022) se fertilizó con efluente proveniente de la planta de Bio Gas de porcinos del INTA, ya que los lisímetros se encontraban bajo la zona de exclusión, establecida en la ordenanza municipal N° 8126/14 decretada en 2019. Se aplicaron 54 m³ de efluente ha⁻¹ que proveyeron el equivalente de 2 kg P ha⁻¹ y 60 kg N ha⁻¹. Las malezas se controlaron en pre-emergencia con atrazina y acetochlor (2 kg ha⁻¹ de cada uno) y en post-emergencia con halosulfuron (130 g ha⁻¹) y foramsulfuron (120 g ha⁻¹). El cultivo siguiente de la rotación fue soja (*Glycine max* (L) Merr.) var. Don Mario 5009, sembrada en líneas espaciadas a 0,52 m (~500.000 plantas ha⁻¹). La soja se inoculó con *Bradyrhizobium* sp. y no se fertilizó. En la campaña 2017-2018, el

maíz presentó fitotoxicidad como consecuencia del efecto residual de una aplicación de herbicida y se debió reemplazar por soja.

Tabla 2. Calendario de cultivos, precipitaciones y fertilización.

Cultivo	Siembra	Cosecha o secado ³	Precipitación (mm) ⁴	Fertilización (kg N ha ⁻¹)
Maíz 2013-2014	7 oct	18 mar	898	57-84 ⁵
Avena 2014 ¹	7 may y 18 jun ²	17 oct	320 (732)	-
Soja 2014-2015	7 nov	22 abr	817	-
Avena+vicia 2015 ¹	24 abr	24 ago	477 (562)	-
Maíz 2015-2016	5 oct	22 mar	705	57-84
Avena 2016 ¹	22 abr	28 oct	273 (437)	-
Soja 2016-2017	11 nov	28 abr	893	-
Avena+vicia 2017 ¹	10 may	6 sep	247 (539)	-
Soja 2017-2018	21 dic	10 may	454	-
Avena 2018 ¹	17 may	29 oct	185 (429)	-
Soja 2018-2019	18 nov	16 abr	775	-
Avena+vicia 2019	25 abr	28 ago	198 (225)	-
Maíz 2019-2020	8 oct	5 mar	511	46-61
Avena 2020	20 abr	30 oct	264 (497)	-
Soja 2020-2021	12 nov	23 abr	476	-
Avena+vicia 2021	5 jul	16 sep	144 (169)	-
Maíz 2021-2022	7 oct	7 mar	616	60-60

¹ Solamente en los lisímetros con la rotación con cultivos de cobertura.

² Siembra y resiembra, respectivamente.

³ para los cultivos de cosecha y de cobertura, respectivamente.

⁴ el valor entre paréntesis corresponde a la lluvia del período de barbecho completo.

⁵ para el Argiudol típico y Hapludol típico, respectivamente.

Mediciones

La precipitación se registró diariamente en la estación meteorológica de la Estación Experimental ubicada a 30 m de los lisímetros (Tabla 3). Después de cada evento de lluvia que produjo drenaje, se midió diariamente y hasta que cesó el flujo el volumen recolectado en los recipientes ubicados a la salida de los tubos colectores de cada lisímetro. De cada drenaje diario se extrajo una muestra de 200 ml que se conservó refrigerada hasta su análisis en el laboratorio. Se determinó PRT mediante el método colorimétrico del ácido ascórbico (APHA,

1989) y PT a partir de una digestión con ácido nítrico - ácido sulfúrico y, posteriormente, el método colorimétrico del ácido ascórbico (APHA, 1989). Al inicio del experimento, se encontró que la concentración de PRT y PT eran similares, es decir, que todo el P de las muestras se encontraba en la fracción reactiva. Por lo tanto, en las evaluaciones siguientes se midió solamente PRT. Las pérdidas diarias por lixiviación se calcularon para cada recolección como el producto del volumen drenado por su concentración de PRT y se expresaron en kg P ha⁻¹. Luego se calculó la sumatoria de la lixiviación diaria para cada período de cultivo o intercultivo. La concentración media de P se calculó para cada período de cultivo o intercultivo como el cociente entre la sumatoria del P lixiviado y del drenaje acumulado, y se expresó en mg P l⁻¹.

En el momento del secado de los CC se midió su biomasa aérea cosechando 0,25 m² por lisímetro. El rendimiento de maíz y de soja se obtuvo a partir de la cosecha de la biomasa aérea total de cada lisímetro (10 m²). El material cosechado se secó a estufa a 65°C y se determinó el peso seco. Después de trillado, todo el material vegetal, excepto el grano, se devolvió a los lisímetros distribuyéndolo sobre su superficie. El rendimiento y la producción de biomasa de CC se normalizaron a una escala 0-1 para cada cultivo de cosecha o de cobertura por separado usando la siguiente ecuación:

$$Y_{norm} = \frac{Y}{Y_{media} * 2}$$

Donde Y_{norm} es el valor del rendimiento o biomasa normalizado, Y es el valor del rendimiento o biomasa de una determinada campaña e Y_{media} es el promedio del rendimiento o la producción de biomasa de cada cultivo de cosecha (maíz o soja) o de cobertura (avena o avena+vicia) a lo largo de los años evaluados.

Análisis estadístico

El efecto del tipo de suelo (Argiudol y Hapludol típico), rotación (M-S y M-CC-S) y período (cultivo o intercultivo) sobre el drenaje y la lixiviación de P se analizó mediante modelos lineales mixtos. En el caso del drenaje, se incluyó a la lluvia como co-variable en el modelo, y en el caso de la lixiviación de P se incluyó al drenaje como co-variable. En ambos modelos, se incluyó al lisímetro como efecto aleatorio, para contemplar la correlación temporal entre mediciones. Se evaluó la homogeneidad de la varianza y la normalidad de los residuos de cada variable y la

matriz de varianza-covarianza de los errores se ajustó cuando la varianza fue heterogénea. Cuando hubo diferencias significativas entre las medias ($p < 0,05$) se realizaron los test de comparaciones múltiples (LSD Fisher) correspondientes ($p < 0,05$). La concentración de P se analizó mediante la Prueba de Kruskal Wallis.

También se analizó la correlación entre la lluvia y el drenaje diario utilizando desfases (lags) de 1-15 días (“cross-correlation”) entre las series. Cuando dos series de tiempo mantienen una relación causal (una es considerada la entrada a un sistema y la otra la salida) el tipo de correlación entre ellas sirve para comprender las propiedades del sistema que convierten a la entrada en salida. En este caso, donde la lluvia (entrada) es un proceso no autocorrelacionado, el drenaje (salida) que genera es por impulsos (Larocque et al., 1998; Padilla y Pulido-Bosch, 1995). El tiempo que es necesario desfasar las series para obtener correlaciones significativas entre ellas puede interpretarse como la velocidad de transferencia del estrés del sistema.

El rendimiento de los cultivos principales y la biomasa de los CC también se analizó mediante modelos lineales y mixtos. Se evaluó la homogeneidad de la varianza y la normalidad de los residuos de cada variable y la matriz de varianza-covarianza de los errores se ajustó cuando la varianza fue heterogénea. Cuando se presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las medias se realizaron los test de comparaciones múltiples (LSD Fisher) correspondientes ($p < 0,05$).

Para los análisis descriptos anteriormente se utilizó el paquete estadístico InfoStat Versión 2020 (Di Rienzo et al. 2020).

RESULTADOS

Lluvia y drenaje

A lo largo de 9 años de experimento, la precipitación anual osciló entre 698 y 1695 mm. Este período abarcó dos años muy lluviosos (2014 y 2015 con 1693 y 1407 mm, respectivamente) y tres años consecutivos de extrema sequía (2020, 2021 y 2022 con 732, 730 y 698 mm, respectivamente) (Figura 6).

Durante el período de estudio (2014-2022), las precipitaciones ocurridas durante los períodos entre dos cultivos de verano (intercultivo) variaron entre 169 y 732 mm, de los cuales entre 144 y 477 mm ocurrieron durante el crecimiento de los CC

(Tabla 3). Durante los cultivos principales (maíz o soja), las precipitaciones variaron entre 454 y 898 mm (Tabla 3 y Figura 6).

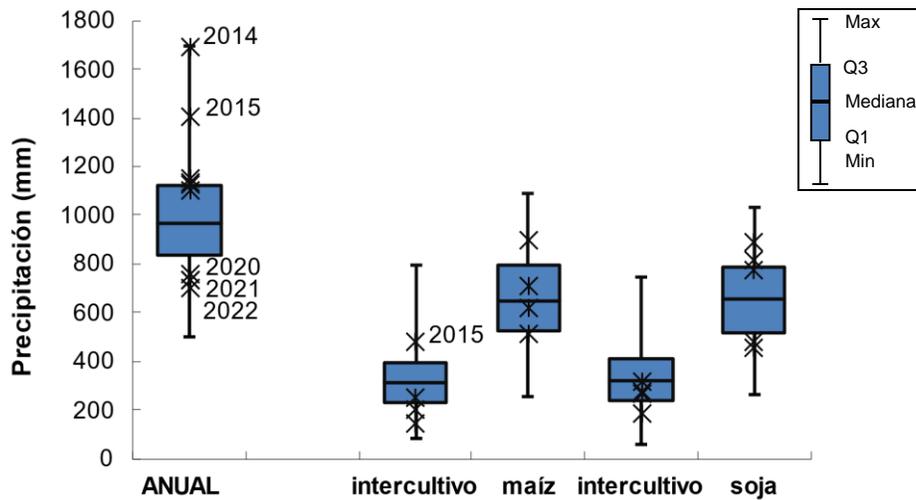


Figura 6. Precipitación anual y de los períodos de cultivo de verano (maíz y soja) e intercultivo. Las cajas y bigotes muestran mediana, cuartiles, mínimo y máximo del registro histórico (1910-2022) y los símbolos (cruces) las del período de estudio (2014-2022) para cada categoría (anual, intercultivo, maíz y soja).

El drenaje acumulado varió con la lluvia ($p < 0,01$), fue similar entre suelos y difirió entre rotaciones con y sin CC en los periodos de intercultivo ($p < 0,05$). En promedio, la rotación M-S drenó 55% más que la rotación M-CC-S (148 vs 96 mm, $p < 0,05$) (Figura 7).

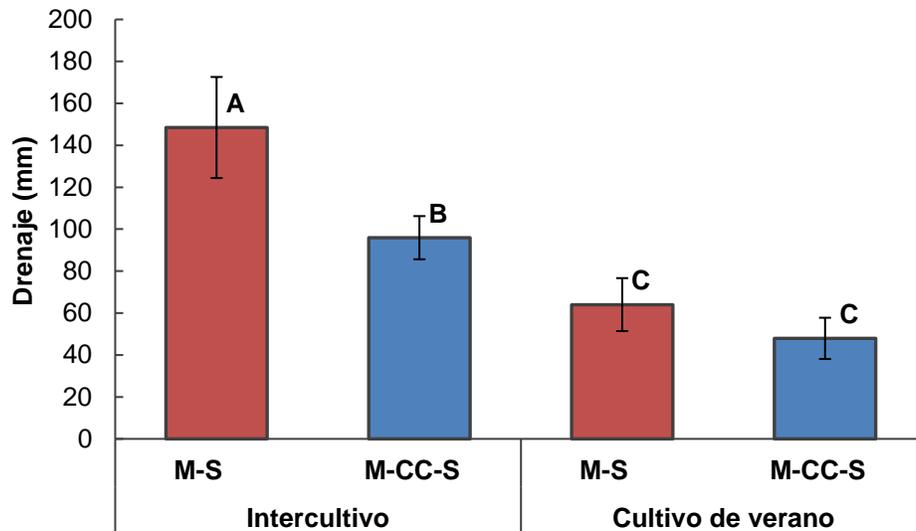
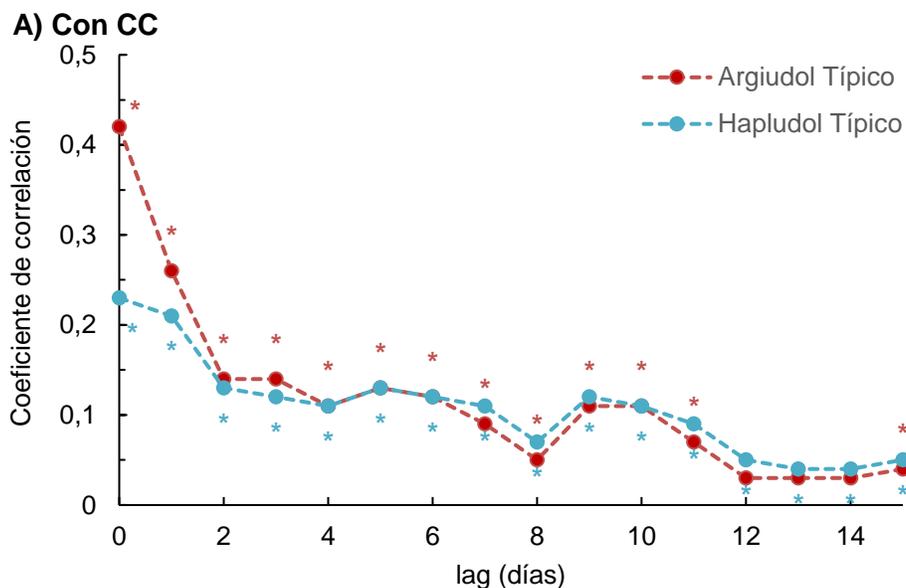


Figura 7. Drenaje profundo durante los períodos de intercultivo y de cultivo de verano para la rotación maíz-soja sin (M-S) y con cultivos de cobertura (M-CC-S). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

La correlación entre la lluvia y el drenaje diario fue mayor para Pergamino que para Junín al considerar eventos ocurridos el mismo día ($\text{lag}=0$) ($r=0,44$ vs $0,26$) y disminuyó para Pergamino, pero no para Junín con 1 día de desfase entre series ($\text{lag}=1$) ($r=0,29$ vs $0,25$) (Figura 8). Este comportamiento se observó tanto en las rotaciones con CC como en las sin CC.



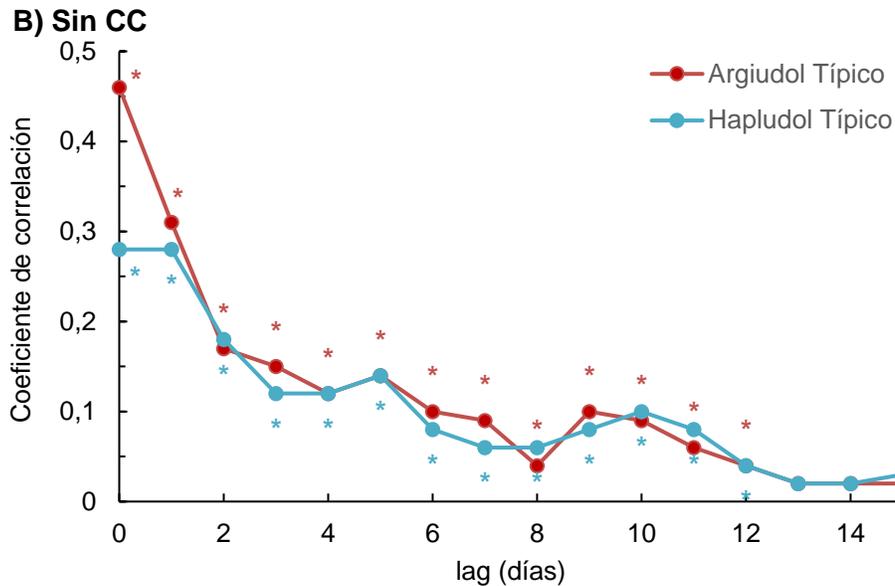


Figura 8. Correlación entre la lluvia y el drenaje diario para cada tipo de suelo en lisímetros con CC (A) y sin CC (B) aplicando desfases crecientes entre las series de tiempo. Se utilizaron asteriscos para indicar que los coeficientes de correlación son significativos ($p < 0,05$).

Lixiviación de P

La concentración media de PRT del drenaje varió entre 0,04 y 1,55 mg l⁻¹. El Argiudol típico serie Pergamino presentó concentraciones medias de PRT mayores que el Hapludol típico serie Junín independientemente del periodo y la rotación ($p < 0,05$). (Figura 9a).

Durante las campañas comprendidas entre 2014 y 2022, la cantidad de PRT lixiviada por período de cultivo o intercultivo varió con el drenaje ($p < 0,01$) y difirió entre tipos de suelo en la rotación M-S pero no en la rotación M-CC-S ($p < 0,05$). Los lisímetros rellenos con el Argiudol típico (serie Pergamino) perdieron más P que los rellenos con el Hapludol típico (serie Junín) en la rotación M-S: 0,32 vs 0,11 kg ha⁻¹ por período ($p < 0,05$) (Figura 9b).

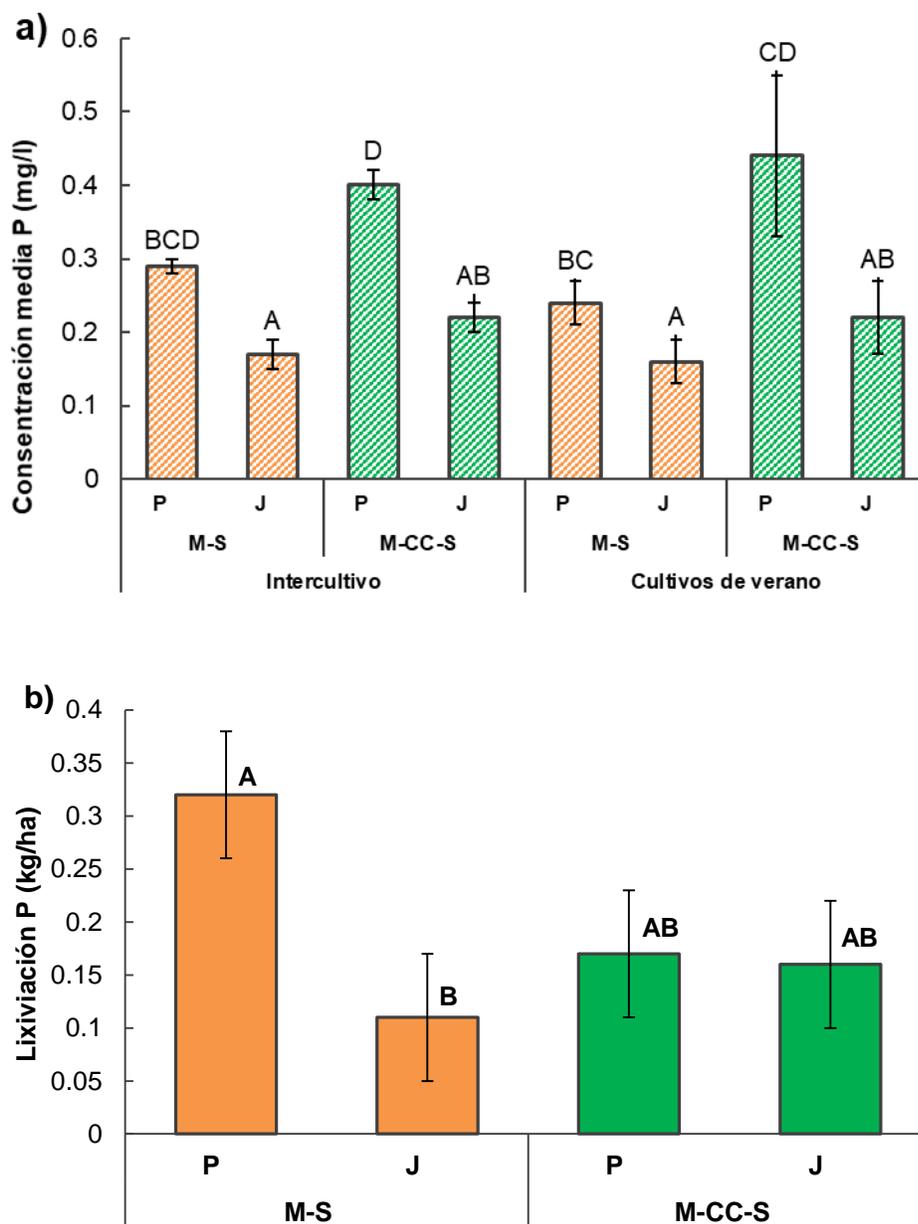


Figura 9. Concentración media de PRT (a) y cantidad de P lixiviado por período de cultivo o intercultivo (b) para cada tipo de suelo (P: Argiudol típico serie Pergamino y J: Hapludol típico serie Junín) y rotación (M-S y M-CC-S). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Rendimiento de los cultivos de verano y producción de biomasa de los cultivos de cobertura

El rendimiento de los cultivos de verano, maíz y soja, varió con la lluvia de la campaña ($R^2=0,78$, $p < 0,01$) y fue similar entre suelos y rotaciones con y sin CC

(Tabla 3 y Figura 10). La producción de biomasa de los CC al momento del secado varió entre 2900 y 10820 kg ha⁻¹ y también dependió de la lluvia del período ($R^2=0,68$, $p<0,01$) (Figura 10). En promedio, los CC produjeron 8300 kg ha⁻¹ cuando se sembró avena y 4575 kg ha⁻¹ cuando se sembró avena+vicia, sin diferencias entre suelos (Tabla 4).

Cultivo de verano	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
Maíz 13-14	12170
Soja 14-15	5040
Maíz 15-16	10207
Soja 16-17	4338
Soja 17-18	1270
Soja 18-19	5137
Maíz 19-20	8330
Soja 20-21	1091
Maíz 21-22	6460

Tabla 3. Rendimiento de los cultivos principales. En el caso de maíz el rendimiento se expresa con 14,5% humedad y en soja con 13,5%.

Cultivo de cobertura	Biomasa (kg ha ⁻¹)
Avena 2014	8640
Avena+Vicia 2015	7160
Avena 2016	10820
Avena+Vicia 2017	4320
Avena 2018	7180
Avena+Vicia 2019	2900
Avena 2020	6560
Avena+Vicia 2021	3920

Tabla 4. Biomasa de los cultivos de cobertura.

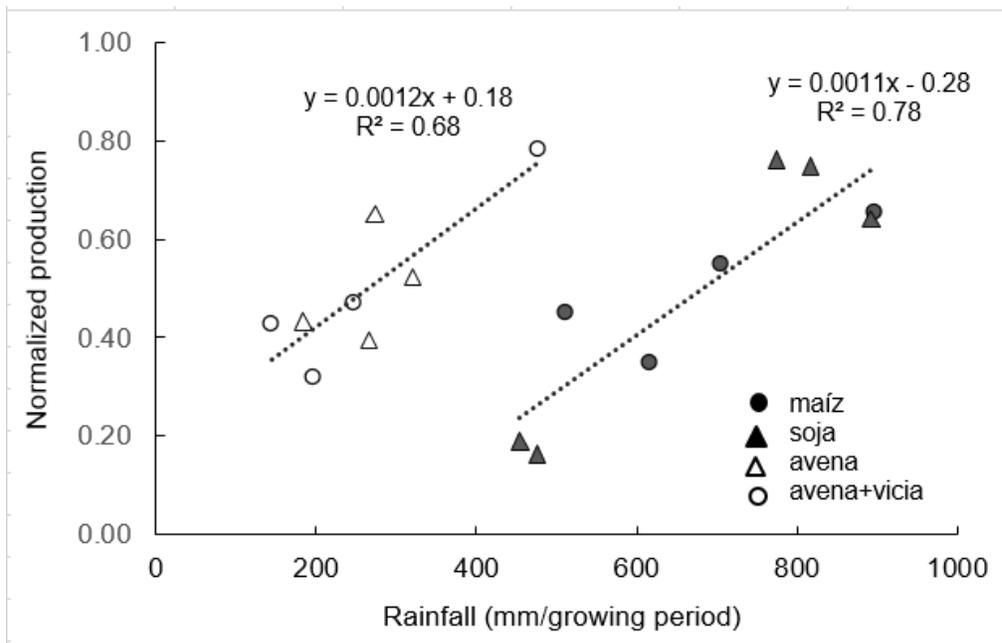


Figura 10. Producción normalizada de grano de los cultivos de verano y biomasa aérea de los CC en función de la lluvia de cada período.

DISCUSIÓN

Los resultados de este trabajo muestran que la cantidad de P transportada por drenaje profundo es mayor en el Argiudol típico que en el Hapludol típico y que esto estaría asociado al tipo de canal por el cual se mueve el agua en cada suelo. En el Hapludol típico (serie Junín) predomina el flujo masal o de la matriz mientras que en el Argiudol típico (serie Pergamino) hay, además, flujo por macroporos o preferencial. Beven y German (1982) definieron el flujo por macroporos, como el pasaje de agua a través de un sistema de poros que permite altas velocidades y produce el bypass de la matriz no saturada del suelo. La macroporosidad puede ser causada por la contracción de arcillas del suelo, por los relictos de las raíces de las plantas o por acción de la fauna del suelo. Caprile et al., (2017) demostraron la ocurrencia de flujo masal en ambos suelos, donde los volúmenes de drenaje fueron algo superiores en el Hapludol típico por la textura más gruesa en relación al Argiudol típico. Por otro lado, el flujo preferencial sólo fue observado en el Argiudol típico. En línea con esto, Eastman et al. (2010) encontraron una marcada tendencia al flujo por macroporos en suelos de textura fina en relación a los de textura gruesa debido al rol que juegan las arcillas por su capacidad de

expansión y contracción, y porque los suelos de textura fina están más estructurados. Fernández et al. (2019) encontraron valores promedio de contracción/expansión de arcillas de 2,58 % para un Hapludol y 3,84% para un Argiudol. Estos valores son moderados en relación a los de los Vertisoles, que poseen un valor de 15%. No obstante, Weinzettel y Usunoff (2001) afirman que el flujo preferencial puede ocurrir en un amplio rango de texturas y estructuras de suelo en diferentes condiciones climáticas.

En este trabajo se analizó el PRT, que comprende principalmente iones fosfato, incluyendo fracciones disueltas y suspendidas (P adsorbido en partículas coloidales, compuestos orgánicos de P). Sin embargo, el drenaje también puede transportar P en forma particulada (Radcliffe et al., 2015). Fernández Marcos (2011) afirma que las pérdidas en forma de fósforo reactivo soluble suponen habitualmente una proporción importante de las pérdidas de P en los suelos agrícolas. Otros autores, encontraron que en los suelos de textura fina predominan las pérdidas de P como partículas, mientras que en suelos arenosos predomina la fracción soluble o disuelta (Eastman et al., 2010., Radcliffe et al., 2015).

Los resultados de esta tesis también muestran una mayor concentración media de P en el Argiudol típico en relación al Hapludol típico. En línea con esto, Gächter et al. (1998) demostraron en un suelo limoso que cuando los macroporos conducen agua, la concentración de P es elevada en las paredes de los macroporos y baja en la matriz del suelo, indicando que la concentración de P del agua que fluye por los macroporos es mayor que la del agua que pasa lentamente a través de la matriz. Entonces, se podría decir, que los valores más altos hallados corresponden al transporte vertical del P a través del flujo preferencial y los valores más bajos al flujo masal. Las concentraciones observadas coinciden con las halladas en aguas subterránea de la Región Pampeana por Galindo et al. (2006).

Con respecto a la inclusión de los CC, los resultados muestran que el drenaje del período entre dos cultivos de verano disminuye con la incorporación de CC. Estos resultados coinciden con Portela et al. (2016) que demostraron que la inclusión de los CC disminuye la pérdida de agua durante períodos de excesos hídricos. Sin

embargo, la reducción del drenaje no estuvo asociada a una disminución del transporte vertical de P con CC. Más aun, la inclusión de CC en la rotación, “borró” el efecto suelo, es decir que el Argiudol típico serie Pergamino perdió más P que el Hapludol típico serie Junín solamente en la rotación maíz–soja, y esta diferencia no se observó con la reducción del drenaje producida en la rotación con CC. Speir et al. (2022) encontraron que las pérdidas de P fueron menores con CC que sin CC, con reducciones anuales entre 7 y 59%. Sin embargo, autores como Lozier et al., 2017, afirman que la incorporación de CC, puede aumentar las pérdidas de P y que esto puede deberse a la liberación de P de los residuos vegetales que quedan en la superficie del suelo. En línea con esto, Bechman et al. (2005) y Sharpely (1981) informaron una mayor pérdida de P por escorrentía en parcelas que contenían CC en comparación con parcelas de suelo desnudo. Esto sugiere que los CC tienen el potencial de retener P mientras estén vivos y de ser una fuente importante de P cuando se secan. Los residuos de los CC y los del cultivo de cosecha pueden presentar cantidades significativas de P (Lal, 2005; Damon et al., 2014). La calidad del material vegetal y la humedad del suelo afectan en diferente medida a las funciones biológicas relacionadas a la descomposición del rastrojo y a la dinámica del P edáfico. Serri et al. (2017) encontraron que el residuo de un CC de vicia generó mayor actividad fosfatasa, mayor liberación de P al suelo y perdió mayor proporción de P de sus tejidos en todas las condiciones de humedad estudiadas, en comparación con los residuos de trigo y trigo-vicia. Varela et al. (2017) encontraron, en condiciones de campo, que los residuos de avena y centeno liberan cantidades agrónomicamente significativas de P durante el período de crecimiento de soja, y que esto está asociado a que los residuos de CC contienen ~50% del P en forma inorgánica, lo que permite que sea fácilmente liberado. Si bien esto representa una ventaja para el reabastecimiento de P biodisponible del suelo para los cultivos siguientes (Serri et al., 2017), también implica una potencial pérdida de P para los sistemas agrícolas. En este estudio, no encontramos cambios en el transporte vertical de P a partir de la inclusión de CC. Sin embargo, es un tema que amerita seguir siendo estudiado, ya que, existe bibliografía que afirma esta relación.

CONCLUSIÓN

Este trabajo demostró que los suelos y las rotaciones típicas de la Región Pampeana pierden P a través del drenaje profundo. Si bien el volumen de drenaje fue similar entre el Argiudol típico (serie Pergamino) y el Hapludol típico (serie Junín), la correlación temporal entre la lluvia y el drenaje sugiere que el agua fluye a través de diferentes canales en cada tipo de suelo. El flujo rápido del suelo de la serie Pergamino después de una lluvia ocurre a través de canales de flujo preferencial (macroporos), mientras que el flujo más lento del suelo de la serie Junín está asociado a la porosidad de la matriz. Esto sugiere que la lixiviación de P está relacionada con el tipo de flujo. Entonces, según las hipótesis planteadas al comienzo de este trabajo, se afirma que la cantidad de P transportado verticalmente por el drenaje es mayor en suelos de texturas finas que en suelos de texturas gruesas por la tendencia de los primeros a formar canales de flujo preferencial. Por otro lado, la inclusión de CC en la rotación M-S disminuyó el drenaje durante el periodo de intercultivo. Si bien, la cantidad de P transportado verticalmente estuvo positivamente asociada al volumen drenado, la inclusión de los CC no modificó la pérdida de P entre rotaciones. En conclusión, si bien la principal pérdida de P es a través del escurrimiento superficial, en este trabajo demostramos que también existe el transporte vertical, particularmente importante a tener en cuenta cuando el suelo presenta canales de flujo preferencial.

BIBLIOGRAFÍA

Alapin, H. 2008. Rastrojos y algo más: Historia de la siembra directa en Argentina. Teseo. Pp 12-13.

Álvarez, R., Rubio, G., Álvarez, C.R. & Lavado R.S. 2010. Fósforo: dinámica de y evaluación en agroecosistemas. Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía, Buenos Aires, pp. 331-336.

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Pollution Control Federation (WPCF). 1989. Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Trad. S.A. Díaz de Santos. APHA-AWWA-WPCF (ed.). 17ª edición. Madrid. España. 1268 pp.

Andersson, H. 2016. The role of subsoil properties for phosphorus leaching in agricultural soil. Doctoral Thesis. Swedish University of Agricultural Science. Uppsala, Suecia. 57 pp.

Andriulo, A., Galantini, J., Abrego, F. & Martínez, F. 1996. Exportación y balance edáfico de nutrientes luego de 80 años de agricultura continua. XIII Congreso Latinoamericano Ciência do Solo, Aguas de Lindóia, San Pablo, Brasil.

Andriulo, A. E., Reynoso, L., Portela, S., Irizar, A., Restovich, S., & Bortolato, M. 2010. Guía de Buenas Prácticas para el Manejo de Nutrientes N y P en la Pampa Ondulada. Grupo Medio Ambiente–EEA INTA Pergamino.

Bechmann, ME, Kleinman, PJ, Sharpley, AN y Saporito, LS (2005). Efectos de congelación y descongelación sobre la pérdida de fósforo en la escorrentía de suelos abonados y cultivos intermedios. Revista de calidad ambiental , 34 (6), 2301-2309.

Beven, K., Germann, P. 1982. Macropores and water flow in soils. Water Resources Research 18(5):1311-1325.

Bond, W. 1998. Soil physical methods for estimating recharge. CSIRO Publishing, Victoria, Australia. 17 pp.

- Cap, E.J. 2010. El impacto económico de la siembra directa en la Argentina. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria, pp. 359-372.
- Caprile, A.C., Aparicio, V.C., Portela, S.I., Sasal, M.C., Andriulo, A.E. 2017. Drenaje y transporte vertical de herbicidas en dos molisoles de la Pampa Ondulada Argentina. *Ciencia del Suelo* 35(1):147-159.
- Caviglia, O. P., Sadras, V.O. and Andrade, F.H. 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas: I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *Field Crops Research* 87:117-129.
- Damon, P.M., Bowden, B., Rose, T. & Rengel, Z. 2014. Contribuciones de residuos de cultivos a las reservas de fósforo en suelos agrícolas: una revisión. *Biología y bioquímica del suelo*, 74, 127-137.
- Di Rienzo, J. A., F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, et al. 2020. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Eastman, M., Gollamudi, A., Stämpfli, N., Madramootoo, C.A. & Sarangi, A. 2010. Evaluación comparativa de las pérdidas de fósforo del subsuelo y campos agrícolas con drenaje natural en la cuenca del río Pike de Quebec, Canadá. *Gestión del agua agrícola*, 97 (5), 596-604.
- Fernández-Marcos, M.L. 2011. Contaminación por fósforo procedente de la fertilización orgánica de suelos agrícolas. Pp. 25-31 en: Mosquera, M.E.L. y M.J.S. Osés (eds.). *Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola*. Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico, Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela.
- Gächter, R., Ngathiah, J.M. & Stamm, C. 1998. Transport of Phosphate from Soil to Surface Waters by Preferential Flow. *Environmental Science & Technology*, Pp 1865-1869.
- Galindo, G., Sainato, C., Dapeña, C., Fernández-Turiel, J.L., Gimeno, D., Pomposiello, M.C. & Panarello, H.O. 2007. Calidad de las aguas superficiales y subterráneas en la región nororiental de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Sudamericana de Ciencias de la Tierra*, 23 (4), 336-345.

García, F.O., Picone L.I. & Berardo, A. 2006. Fósforo. Pág. 99-121. En: Echeverría, H.E. y García, F.O. (eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.

Giannini, A.P. 2022. Fin de las reservas de fertilizantes fosfatados: ¿realidad o restricciones geopolíticas? FAVE.

Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghera, C.M., Culot, J.P. 1992. Field-crop systems of the pampas. Pp. 413-450 in: Pearson, C.J. (ed.). Field Crop Ecosystems. Ecosystems of the World. Elsevier. Amsterdam.

INTA, 1972a. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja Pergamino (3360-32), pp.106.

INTA, 1972b. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja Junín (3560-8).

Kaspar, T.C & Singer, J.W. 2011. El uso de cultivos de cobertura para manejar el suelo. Gestión del suelo: construcción de una base estable para la agricultura, 321-337.

Lajtha, K., 2000. Ecosystem nutrient balance and dynamics. In: Sala, O.E., Jackson, R.B., Mooney, H.A., Howarth, R.W. (Eds.), Methods in Ecosystem Science. Springer-Verlag, New York, pp. 249-264. Lal, R. 2005. Erosión del suelo y dinámica del carbono. Investigación de suelos y labranza, 81 (2), 137-142.

Larocque, M., Mangin A., Razack M., & Banton O. 1998. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). 205:217-231. 10.1016/S0022-1694(97)00155-8.

Lombi, E., McLaughlin, M.J., Johnston, C., Armstrong, R.D. & Holloway, R.E. 2004. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. Soil Science Society of America Journal 68: 682-689.

Lozier T.M., Macrae M.L., Brunke R. & Van Eerd L.L. 2017. Release of phosphorus from crop residue and cover crops over the non-growing season in a cool temperate region. Agricultural Water Management, Volume 189, Pages 39-51, ISSN 0378-3774. Doi: 10.1016/j.agwat.2017.04.015.

- Melgar, R. 1998. El manejo de la fertilización en siembra directa. Pp. 97-105 in: (Ed. Panigatti, J.L., Marelli, H., Buschiazzi, D. and Gil, R. (eds.). Siembra Directa. I.N.T.A.
- Moscatelli, G.N. 1991. Los suelos de la región pampeana. In: Barsky, O. (ed.). El Desarrollo Agropecuario Pampeano. INDEC-INTA-IIICA, Buenos Aires.
- Murage, E.W., Voroney P.R., Kay B.D., Deen B. & Beyaert R.P. 2007. Dynamics and turnover of soil organic matter as affected by tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 1363-1370.
- Padilla, A. & Pulido-Bosch, A. 1995. Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. 168:73-89. 10.1016/0022-1694(94)02648-U.
- Portela, S.I., Restovich, S.B., Gonzalez, H.M., Torti, M.J. 2016. Reducción del drenaje profundo y la lixiviación de nitrógeno en rotaciones agrícolas con cultivos de cobertura. *Ecología Austral* 26(3):212-220.
- Radcliffe, D.E., Reid, D.K., Blombäck, K., Bolster, C.H., Collick, A.S., Easton, Z.M. & Smith, D.R. 2015. Aplicabilidad de modelos para predecir pérdidas de fósforo en campos drenados: una revisión. *Revista de calidad ambiental*, 44 (2), 614-628.
- Reid, K., Schneider, K., McConkey, B. 2018. Components of phosphorus loss from agricultural landscapes, and how to incorporate them into risk assessment tools. *Frontiers in Earth Science* 6. doi:10.3389/feart.2018.00135.
- Restovich, S. B., Andriulo, A.E., Armas-Herrera, C.M., Beribe, M.J. & Portela, S.I. 2019. Combining cover crops and low nitrogen fertilization improves soil supporting functions. *Plant and Soil* 442:401-417.
- Rossi, M.S. 2011. Adsorción y desorción de fósforo en suelos del área central de la Región Pampeana. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba. 179 pp.
- Sasal, M. C., Andriulo, A.E., & Taboada, M.A. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and tillage research* 87:9-18.

Sasal, M. C., Castiglioni, M.G., & Wilson, M.G. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage. Soil and tillage research 108:24-29.

Serri, D.L., Faggioli, V.S. & Lorenzon, C.A. 2017. Fósforo del suelo: calidad del rastrojo y descomposición microbiana Bajo diferentes Contenidos hídricos. Cienc Suelo (Argentina) 35(2): 239-248.

Sharpley, A.N., Ahuja, L.R. & Menzel, R.G. 1981. La liberación de fósforo del suelo a la escorrentía en relación con la cinética de desorción (Vol. 10, No. 3, pp. 386-391). Sociedad Estadounidense de Agronomía, Sociedad de Ciencias de Cultivos de América y Sociedad de Ciencias del Suelo de América.

Speir, S.L., Tank, J.L., Trentman, M.T., Mahl, U.H., Sethna, L.R., Hanrahan, B.R., & Royer, T.V. 2022. Cover crops control nitrogen and phosphorus transport from two agricultural watersheds at multiple measurement scales. Agriculture, Ecosystems & Environment 326:107765.

Suñer, L.G., Galantini, J.A. & Rosell, R.A. 2008. Transformaciones del fósforo en las fracciones orgánicas en suelos naturales y cultivados. En: "Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina" (Ed. Galantini JC) de la AACCS. Pág. 181-193.

Varela, M. F., Barraco, M., Gili, A., Taboada M.A. & Rubio, G. 2017. Biomass Decomposition and Phosphorus Release from Residues of Cover Crops under No-Tillage. Agronomy Journal 109:317-326.

Zamuner, E.C.; Picone, L.I.; Echeverria, H.E. 2006. Comparison of phosphorus fertilization diagnostic methods for wheat under no-tillage. Soil and Tillage Research (89), 70-77.

ANEXO

Modelo heterocedástico para la variable respuesta drenaje

Modelos lineales generales y mixtos

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
102	1015,65	1051,11	-493,83	34,36	0,69	0,69

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	1	89	32,84	numDF	denDF	F-value	p-value (Intercept)
						<0,0001	
Suelo				1	4	1,42	0,2998
Rotacion				1	89	12,58	0,0006
Periodo				1	89	36,78	<0,0001
Lluvia.mm				1	89	164,48	<0,0001
Suelo:Rotacion				1	89	2,0E-04	0,9886
Suelo:Periodo				1	89	0,12	0,7299
Rotacion:Periodo				1	89	3,67	0,0585
Suelo:Rotacion:Periodo				1	89	0,02	0,8951

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Formula: ~1|Lisimetro

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	2,8E-03

Comparaciones múltiples

Drenaje.mm - Medias ajustadas y errores estándares para Rotacion*Periodo

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Estimaciones para la siguiente combinación de valores de las covariables

Covariable Valor

Lluvia.mm	Media			
Rotacion	Periodo	Medias	E.E.	
M-S	intercultivo	148,47	14,68	A
M-CC-S	intercultivo	95,93	6,87	B
M-S	cultivo	64,02	7,65	C
M-CC-S	cultivo	47,93	8,52	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Modelo heterocedastico para la variable respuesta lixiviación de P en kg/ha

Modelos lineales generales y mixtos

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2 0	R2 1
90	-205,24	-166,93	118,62	0,15	0,66	0,87

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	77	0,48	0,4911
Suelo	1	4	1,68	0,2642
Rotacion	1	77	6,77	0,0111
Periodo	1	77	1,70	0,1967
Drenaje.mm	1	77	1293,94	<0,0001
Suelo:Rotacion	1	77	30,88	<0,0001
Suelo:Periodo	1	77	0,02	0,8758
Rotacion:Periodo	1	77	1,81	0,1822
Suelo:Rotacion:Periodo	1	77	1,82	0,1816

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent

Formula: ~1|Lisimetro

Desvíos estándares y correlaciones

	(const)
(const)	

(const) 0,10

Comparaciones múltiples

Lix.P.kg.ha - Medias ajustadas y errores estándares para Suelo*Rotacion

LSD Fisher (Alfa=0,05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Estimaciones para la siguiente combinación de valores de las covariables

Covariable Valor

Drenaje.mm Media

Suelo	Rotacion	Medias	E.E.		
P	M-S	0,32	0,06	A	
P	M-CC-S	0,17	0,06	A	B
J	M-CC-S	0,16	0,06	A	B
J	M-S	0,11	0,06		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Prueba de Kruskal Wallis para la variable respuesta concentración de P (mg/l)

Variable	Suelo	Rotación	Periodo	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Lix P (mg/l)	J	M-CC-S	cultivo	14	0,68	1,20	0,26	26,33	0,0004
Lix P (mg/l)	J	M-CC-S	intercultivo	13	0,16	0,12	0,20		
Lix P (mg/l)	J	M-S	cultivo	10	0,49	0,94	0,20		
Lix P (mg/l)	J	M-S	intercultivo	8	0,15	0,09	0,19		
Lix P (mg/l)	P	M-CC-S	cultivo	14	1,27	2,20	0,44		
Lix P (mg/l)	P	M-CC-S	intercultivo	13	0,28	0,22	0,30		
Lix P (mg/l)	P	M-S	cultivo	10	0,80	1,63	0,27		
Lix P (mg/l)	P	M-S	intercultivo	8	0,22	0,15	0,25		

Trat.	Medias	Ranks					
J:M-S:intercultivo	0,15	21,56	A				
J:M-CC-S:intercultivo	0,16	29,92	A	B			
J:M-S:cultivo	0,49	32,70	A	B	C		
P:M-S:intercultivo	0,22	43,25	A	B	C	D	
J:M-CC-S:cultivo	0,68	48,86		B	C	D	E
P:M-CC-S:intercultivo	0,28	50,65			C	D	E
P:M-S:cultivo	0,80	57,90				D	E
P:M-CC-S:cultivo	1,27	67,07					E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)