

ESTABILIDAD ESTRUCTURAL Y P EN FRACCIONES DE AGREGADOS EN LA CUENCA DEL A° EL DIVISORIO (CORONEL PRINGLES, BA)

JOSEFINA CACCHIARELLI¹; JUAN A. GALANTINI² & RAMÓN A. ROSELL³

¹ LAHBIS-UNS, Depto. Agronomía, Universidad Nacional del Sur (UNS), (8000) Bahía Blanca; Tel. (0291) 4595101. josefina@criba.edu.ar; ² Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), CERZOS-Depto. Agronomía (UNS), jgalanti@criba.edu.ar; ³ UNS-CONICET, Depto. Agronomía, UNS.

Recibido: 22/05/07

Aceptado: 05/05/08

RESUMEN

En los últimos años la calidad del agua en el embalse Paso de las Piedras se ha visto afectada por la eutrofización, perjudicando la provisión para la población de Bahía Blanca y alrededores. Se ha señalado a la actividad agropecuaria como originaria del aumento de la concentración de fósforo (P) en el arroyo El Divisorio, que desemboca en el embalse. El objetivo de este estudio fue cuantificar las relaciones entre algunas propiedades relacionadas con el potencial de contaminación de estos suelos: la estabilidad estructural, la distribución de tamaños de agregados y las concentraciones de las formas de P en los diferentes agregados. Se seleccionaron 16 transectas en lotes de productores a lo largo del curso del arroyo. Se tomaron muestras de suelo (0-5 cm) en las posiciones loma (L), media loma (M) y bajo (B). Se determinaron los diámetros medios ponderado en seco (DMPs) y en húmedo (DMP_h), calculándose el cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP). Se determinaron los contenidos de P orgánico (Po) e inorgánico (Pi) en cada una de las posiciones y tamaños de agregados. Si bien los suelos de la cuenca mostraron buenos valores de estabilidad estructural, las fuerzas físicas provenientes de la actividad agrícola favorecieron la destrucción de los agregados menos estables encontrándose gran cantidad de material fino (<1mm). Esta fracción presentó una importante concentración de P, representando cerca del 30% del total en el suelo. La concentración del Pi fue semejante en todos los tamaños de agregados en las posiciones L y M (200-240 mg kg⁻¹), mientras que fue significativamente superior (360-400 mg kg⁻¹) en los bajos. Estas diferencias podrían estar originadas en texturas distintas y la menor estabilidad de los agregados en los bajos. En cuanto al Po las diferencias fueron menos marcadas, aunque evidenciaron valores más altos en la mayoría de los tamaños de agregados en la posición B. De acuerdo con estos resultados, las pérdidas podrían ser importantes aún con tormentas de poca capacidad erosiva que arrastren materiales menores, ya que estos contribuyen con sustanciales cantidades de P. El mayor cuidado deberá tenerse en los bajos, ya que tienen mayor contenido de P en todas las fracciones y menor estabilidad de los agregados.

Palabras clave. Eutrofización, contaminación con P, fósforo orgánico e inorgánico.

STRUCTURAL STABILITY AND PHOSPHORUS IN SOIL AGGREGATE FRACTIONS IN EL DIVISORIO STREAM CATCHMENT AREA (CORONEL PRINGLES, BUENOS AIRES PROVINCE)

ABSTRACT

In the last years, water quality in the Paso de las Piedras reservoir has been affected by eutrophication, leading to problems in the provision of potable water to the population of Bahía Blanca city and surrounding areas. Agricultural activity has been pointed out as the possible non-point source of P contaminating the El Divisorio stream, which flows directly into the reservoir. The objective of this work was to assess some selected edaphic properties associated with the contamination potential of soils such as structural stability, aggregate distribution and concentration of organic (Po) and inorganic (Pi) P in the aggregates. Sixteen locations were selected along the stream in farmers' fields. Soil samples from the surface 5 cm-layer were collected in the upper, intermediate and lower positions (L, M and B respectively) on each location. Structural stability was determined by the difference between dry and wet mean weight diameters. Soil Po and Pi were measured in each wet aggregate fraction. The values of structural stability were high; however, a great amount of fine material (<1 mm) was present, probably as a consequence of the destruction of less stable aggregates due to agricultural mechanic forces. A large concentration of P was present in this fraction, representing around 30% of total soil P. Pi concentration was similar among all fractions in L and M (200-240 mg P kg⁻¹) while it was significantly higher in B (360-400 mg P kg⁻¹). These differences may be attributed to finer texture and weaker stability in the B positions. Differences among landscape positions were less evident for Po, although greater concentrations were encountered in B in most aggregate fractions. According to these results, P losses could be of significant magnitudes even at low storm intensities, because the small soil particles that are carried in runoff water contribute with great amounts of P. Management practices tending to reduce the impact of agricultural P on water quality should be aimed to reduce the risk related to B positions due to their higher P content and lower structural stability.

Key words. Eutrophication, P losses, organic P, inorganic P.

INTRODUCCIÓN

El arroyo El Divisorio, ubicado en el partido de Coronel Pringles, vierte sus aguas en el embalse Paso de las Piedras, formado por una presa que capta las aguas del río Sauce Grande del cual este arroyo es afluente. Este embalse es la principal fuente de agua potable de las ciudades de Bahía Blanca, alrededores y del Polo Petroquímico local, la cual ha sufrido un notable deterioro en los últimos años debido al crecimiento de algas de difícil eliminación (La Nueva Provincia, 2003). No obstante la escasez de estudios en este área (Cacchiarelli *et al.*, 2002, 2004; Echeverría *et al.*, 2003), se sabe que los altos niveles de $PO_4\text{-P}$ en el arroyo El Divisorio podrían explicar, al menos en parte, la eutrofización del embalse (Marchena, 2002).

Las pérdidas de P dependen en gran medida de las pérdidas de suelo por erosión (Lundekvam, 1998). El estado de agregación del suelo es un factor importante en la tasa de liberación del P de la fase sólida de las partículas del suelo hacia la solución (Frossard *et al.*, 2000). A pesar de la extensa investigación que existe acerca de las reacciones del P edáfico, se conoce poco sobre el efecto de la agregación en estos procesos (Linguist, 1997).

Muchos autores han estudiado el efecto del grado de estructuración del suelo en la susceptibilidad a la erosión. Si bien parece no haber una relación universal entre erosión y distribución de tamaño de agregados, el valor de cambio en el diámetro medio ponderado o CDMP (uno de los índices más usados de distribución de tamaños), muestra buena correlación con la resistencia de los suelos a la erosión (Texeira & Misra, 1997). Altos valores de CDMP siempre se relacionan con mayor erosión.

Tanto la pérdida de suelo como la distribución de tamaños de agregados en los sedimentos en un evento de erosión dependen del grado en que los agregados se rompen. Los factores involucrados son principalmente el estado de agregación del suelo y las características del evento erosivo (Texeira & Misra, 1997). Debido a la capacidad de la escorrentía de poner en suspensión y transportar las partículas más livianas, habrá remoción selectiva de material fino si la energía de la escorrentía no es suficiente para suspender las partículas más pesadas (Stoltenberg & White, 1953; Alberts & Moldenhauer, 1981). Se sabe que el material erosionado es más rico en nutrientes que el suelo superficial que le dio origen, ya que ocurre una erosión selectiva de material fino con mayor contenido de nutrientes (Stoltenberg & White, 1953), conocida como enriquecimiento (Sharpely, 1995).

También es importante la ruptura de los agregados en otros menores, función de la magnitud de las fuerzas que actúan sobre los agregados, dentro de las que el im-

pacto de la gota de lluvia es el más importante. Los suelos con agregados grandes y estables pueden tener mayor resistencia a la erosión debido a que no se romperán fácilmente ante el impacto de la gota de lluvia (Texeira & Misra, 1997).

Muchos investigadores han estudiado la distribución de tamaño de partículas en los sedimentos, pero hay pocos que hayan relacionado el contenido de nutrientes de las fracciones de agregados con las pérdidas en los sedimentos. Alberts & Moldenhauer (1981) hallaron una fuerte correlación entre la distribución de agregados transportados con el sedimento y el sistema de labranza o la cobertura vegetal. La influencia de la labranza fue indirecta, a través de la modificación del anclaje de los residuos en el suelo. En los casos con mayor cobertura disminuyó la velocidad de la escorrentía, haciendo que se transportaran preferencialmente los agregados de menor densidad y contenido de arena. Los agregados erosionados contenían mayor cantidad de limo y arcilla, resultando en una mayor pérdida de N y P. Es decir, la distribución y características de los agregados pueden tener implicancias directas sobre la cantidad y calidad de las pérdidas de suelo.

Conociendo la distribución de los agregados, así como su resistencia y su contenido de nutrientes, se podría tener una idea de la susceptibilidad de pérdida en caso de ocurrir eventos de escorrentía. Ante tormentas importantes se desprenderán agregados mayores, y viceversa, por lo que conociendo cuanto P hay en cada fracción se podría prever el potencial de pérdida en cada caso. En suelos de alta estabilidad, los agregados se mantienen en su forma y podrían escurrir con tormentas grandes sin romperse. Con suelos con baja estabilidad, en cambio, los agregados grandes se rompen en agregados menores, los que tienen mayor susceptibilidad a ser erosionados.

Los objetivos de este estudio fueron analizar, en suelos de la cuenca del arroyo El Divisorio, la estabilidad estructural, la distribución de tamaños de agregados y evaluar las concentraciones de P inorgánico (Pi) y orgánico (Po) en las fracciones de agregados tamizados en húmedo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El arroyo El Divisorio se encuentra en el partido de Cnel. Pringles, a 148 msnm. Su lecho es fangoso, tiene unos 14 km de longitud, 9 m de ancho y 0,31 m de profundidad media (Marchena,

2002), aunque se registran crecidas estacionales de consideración. El clima es templado con veranos cortos, secos y calurosos, seguidos por otoños lluviosos y templados. El invierno es seco y frío, con escasas precipitaciones, y la primavera es lluviosa con fuertes vientos y heladas tardías. Las precipitaciones anuales oscilan entre 650 y 950 milímetros, pero en el año de estudio (2001) fueron de 1089 mm.

Descripción de los sitios experimentales

La distribución de los lotes visitados a lo largo del A° El Divisorio, con el nombre de los establecimientos, sitios de muestreo y el uso del suelo en ese momento se detallan en la Tabla 1. Los lotes están ordenados en forma creciente desde la cabecera del arroyo hacia su desembocadura en el dique.

En general los campos son de actividad ganadero-agrícola. El predominio de la ganadería se acentúa a medida que descendemos de las nacientes del arroyo hacia el dique, donde aumenta el campo natural y el uso de pasto llorón. Se realiza mayormente cría de vacunos para carne, y ocasionalmente también engorde de novillos. La actividad agrícola en la zona, que se realiza en su mayoría con labranza convencional, está representada por cosecha fina en un 90%, en su mayoría trigo, y cebada en menor medida. También

se cultiva girasol y maíz, y muy escasamente soja. Las pasturas son de alfalfa consociada con gramíneas, y se utiliza por lo general avena como verdeo de invierno. Otros cultivos forrajeros son centeno, sorgo y maíz. Está difundido el uso del pasto llorón y de campo natural (Aduriz *et al.*, 2003).

Son pocos los establecimientos en los que se han efectuado tareas de sistematización para el control de la erosión, hay escasos lotes con trazado de terrazas sobre curvas de nivel, si bien muchos productores reconocen que la erosión hídrica es problemática. Los fertilizantes más usados son fosfato diamónico (60 kg ha^{-1}), fosfato monoamónico ($50\text{-}90 \text{ kg ha}^{-1}$) y urea ($80\text{-}140 \text{ kg ha}^{-1}$), mientras que algunos productores declaran no emplearlos.

Esquema de trabajo

Las tareas de muestreo se efectuaron entre los meses de noviembre y diciembre de 2001, luego de un período de abundantes precipitaciones. Se seleccionaron 16 transectas en lotes de seis productores distribuidos a lo largo del curso del arroyo. Se tomaron muestras de suelo (0-5 cm) en las posiciones loma, media loma y bajo, con tres réplicas por sitio. Los estudios se realizaron en la capa superficial del suelo por ser allí donde el efecto de la escorrentía es directo.

Tabla 1. Sitios de muestreo: establecimientos, lotes y uso del suelo al momento de la toma de muestras.

Table 1. Sampling sites: Location and land use during sampling.

ESTABLECIMIENTO	LOTE N°	Uso del suelo
PICHI-CO	12	Pastura consociada base alfalfa
	13 ₂	Trigo en emergencia (en s. directa)
	19 ₂	Avena con pastoreo directo
	19 ₃	Trigo en emergencia
MALAL-CO	1	Trigo
	18	Pastura 1° año
	16	Pastura del '95
CHITA-LA	4	Barbecho
	6	Pasto llorón
	8	Rastrojo
	9	Rastrojo con pastoreo (muy empastado)
MICHELETTO	19	Centeno con pastoreo directo
	21	Trigo (por sembrarse)
	22	Pasto llorón de 10 años
R. CASALI	4	Campo natural
A. CASALI	1	3 años trigo

Se analizaron dos aspectos: a) la estabilidad de los agregados, calculada a partir de la distribución de fracciones de agregados en seco y en húmedo, y b) los contenidos de Po y Pi en cada una de las fracciones de tamizado en húmedo.

Estabilidad estructural: se evaluó por medio de la diferencia entre el diámetro medio ponderado de los agregados secos al aire y luego tamizados en agua (De Leenher & De Boott, 1967). Los tiempos de agitado en húmedo y la frecuencia de agitación se modificaron según Silenzi *et al.* (1987) y los cálculos se efectuaron según Santanoglia & Fernández (1982). Para el tamizado en seco se utilizaron tamices de mallas de 8; 4,8; 3; 2 y 1 mm de abertura, obteniéndose cuatro fracciones de agregados: 8-4,8 mm; 4,8-3 mm; 3-2 mm y 2-1 mm. La fracción <1 mm fue descartada de acuerdo a la técnica. Para el tamizado en húmedo se colocaron los agregados en una batería idéntica de tamices pero de menor diámetro, agregando los de aberturas 0,5 y 0,3 mm. Se obtuvieron así las fracciones 8-4,8 mm, 4,8-3 mm, 3-2 mm, 2-1 mm, 1-0,5 mm y 0,5-0,3 mm. La estabilidad estructural se expresó como valores de cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP), que es la diferencia entre el diámetro medio ponderado en seco (DMPs) y en húmedo (DMPH).

Para la distribución de agregados por tamizado en seco se tuvieron en cuenta las cuatro fracciones mencionadas más la de <1 mm, por medio de la fórmula:

$$p = (p_0 * 100) / (p_{8-4,8} + p_{4,8-3} + p_{3-2} + p_{2-1} + p_{<1})$$

donde: p representa el peso en g de la fracción.

Distribución de P: Se determinó el fósforo orgánico (Po) e inorgánico (Pi), (Saunders & Williams, 1955) en cada una de las fracciones del tamizado en húmedo. Las fracciones fueron recuperadas, secadas, posteriormente mortereadas y tamizadas por malla de 2 mm. Se obtuvieron seis fracciones, 8-4,8; 4,8-3; 3-2; 2-1; 1-0,3 y <0,3 mm. La fracción 1-0,3 mm se logró reuniendo las de 1-0,5 y 0,5-0,3 mm ya que representaban insuficiente cantidad de muestra por separado para los análisis. La fracción <0,3 mm se obtuvo del contenido de los recipientes de agitación del tamizado en húmedo, por sedimentación de las partículas de suelo durante al menos 24 h, desplazamiento del agua y posterior evaporación del remanente en recipientes de vidrio.

Se consideraron los resultados de Po y Pi de las siguientes maneras:

- como su concentración en cada fracción de agregados, en mg P kg⁻¹ de agregado.
- como concentración en mg P kg⁻¹ de suelo total, que expresa la contribución de las distintas fracciones de agregados al P del suelo. Este valor se obtuvo como:

$$\text{mg P kg}^{-1} \text{ de suelo total} = (\text{mg P kg}^{-1} \text{ de agregado} * p * k) / 100$$

$$\text{siendo } k = (p_{8-4,8} + p_{4,8-3} + p_{3-2} + p_{2-1}) / 100$$

El coeficiente k, calculado para corregir el peso de cada fracción, representó la proporción de agregados tamizados en húmedo dentro del peso del suelo total. Esta corrección se efectuó debido a que en el tamizado en húmedo no se empleó el total del suelo, sino que previo al mismo se descartó la fracción <1 mm.

Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente por medio de ANOVA simple (análisis de varianza) que provee Microsoft Excel y la comparación de medias por los test de Bonferroni y diferencia mínima significativa (DMS), con P<0,01 ó 0,05, utilizando macros del Dpto. de Matemática (UNS).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estabilidad estructural

El análisis de las fuerzas mecánicas sobre la distribución de los diferentes tamaños de agregados, obtenido por el tamizado en seco y cuantificado en el DMPs, mostró diferencias entre las posiciones estudiadas (Tabla 2). El DMPs promedio para todas las transectas fue mayor en las posiciones bajas que en las L y M, principalmente por un aumento de los valores mínimos encontrados.

Tabla 2. Diámetro medio ponderado en seco (DMPs), en húmedo (DMPH) y cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP) en la posición loma (L), media loma (M) y bajo (B).

Table 2. Dry (DMPs) and wet (DMPH) mean weight diameters and mean weight diameter change (CDMP) in the upper (L), intermediate (M) and lower (B) positions.

Med	DMPs			DMPH			CDMP		
	L	M	B	L	M	B	L	M	B
	3,87 a	3,88 a	4,10 b	3,47 a	3,42 a	3,49 a	0,40 a	0,46 a	0,62 b
Mín	3,17	3,19	3,75	2,53	2,72	2,51	0,18	0,15	0,23
Máx	4,35	4,29	4,43	3,97	3,85	4,00	1,29	0,89	1,53
Des	0,26	0,28	0,18	0,33	0,30	0,37	0,22	0,16	0,34

Cada media está basada en 48 muestras. Letras distintas indican diferencias altamente significativas (Bonferroni, P<0,01) entre L, M y B.

El efecto de las fuerzas inducidas por procesos de humedecimiento, analizado a través del DMP, indicó que el promedio de todas las posiciones poseía valores semejantes. Estas diferencias entre los valores de DMPs y DMP se reflejaron en los mayores valores de CDMP para el total de las posiciones B, respecto de las posiciones L y M.

El mayor CDMP en los bajos señalaría a estas posiciones como más erodibles. La mayor cantidad de agregados estables en seco observados en los bajos, indicado por las diferencias estadísticas en el DMPs, serían poco estables y resultado de uniones débiles o transitorias.

Los valores de estabilidad de estos suelos fueron muy buenos, en comparación con los encontrados por otros autores. Villamil (1999) encontró en suelos pastoreados del caldenal valores de CDMP de 2,4 a 3,4 mm, y el mejor caso en la clausura con 1,98 mm en la superficie del suelo (1-5 cm). Silenzi (1987) en suelos de Médanos no disturbados (con <1% CO y textura arenosa franca) encontró un rango de 1,36 a 1,58 mm.

De Leenher & De Boodt (1958) encontraron que para un suelo de casi perfecta estabilidad, el CDMP fue 0,5 mm, por lo que tomaron a este valor como referencia. Así, 0,5 mm dividido 100 y por el valor hallado de CDMP se expresaría la estabilidad estructural como un porcentaje referido a un "suelo no alterado". De acuerdo a los valores de referencia empíricos que señalan para este índice de estabilidad, más del 90% de los sitios se ubicó en el rango excelente estabilidad.

Sin embargo, se observaron notorias diferencias en la cantidad de agregados menores a 1 mm, que fueron descartados luego del tamizado en seco (Tabla 3) y no se tuvieron en cuenta para el CDMP. La cantidad de material de tamaño menor de 1 mm presentó diferencias significativas entre las diferentes posiciones. Los valores más altos se encontraron en L, intermedios en M y menores en B. Estos resultados ponen en evidencia que si bien los agregados son menos estables en los bajos, la fracción de agregados mayores de 1 mm representa una parte significativamente más importante dentro del suelo respecto a las posiciones L y M. Analizando los datos desde este punto de vista, los altos valores de estabilidad de los agregados en la mayoría de las posiciones, puesto en evidencia por el CDMP, nos podría estar indicando el grado de deterioro alcanzado por estos suelos. Las fuerzas físicas provenientes de la actividad agrícola favorecieron la destrucción de los agregados menos estables. Las observaciones a campo apoyan esta afirmación, ya que los suelos en barbecho presentaban un aspecto polvoriento, se disgregaban muy fácilmente al recoger la muestra con la pala, dificultando en algunos sitios la conformación de un bloque.

Distribución del P

Concentración de P (mg kg⁻¹) en los agregados. Los valores determinados en cada uno de los tamaños se analizaron para poner en evidencia diferencias en su

Tabla 3. Distribución de agregados tamizados en seco en las posiciones loma (L), media loma (M) y bajo (B).
Table 3. Dry-sieving aggregate distribution in the upper (L), intermediate (M) and lower (B) positions.

		8-4,8 mm	4,8-3 mm	3-2 mm	2-1 mm	< 1 mm
L	Med	19 a	20 a	8 a	13 a	39 c
	Mín	5	9	4	9	24
	Máx	31	27	12	18	71
	Des	6	5	2	2	13
M	Med	21 a	21 a	9 a	15 b	34 b
	Mín	9	14	7	11	20
	Máx	32	27	11	21	55
	Des	6	4	1	2	10
B	Med	28 b	24 b	9 a	15 b	24 a
	Mín	15	18	7	9	15
	Máx	37	31	20	19	43
	Des	5	2	2	2	6

Valores medios, mínimos, máximos y desvío estándar (g agregado en 100 g de suelo). Cada media está basada en 48 muestras. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (Bonferroni, P < 0,05).

calidad. Se observaron diferencias significativas en la concentración promedio de Pi (Fig. 1) y Po (Fig. 2) de las tres posiciones analizadas en los diferentes tamaños de agregados pero no entre los diferentes tamaños de agregados.

Desde el punto de vista de la calidad, la concentración del Pi fue semejante en todos los tamaños de agregados en las posiciones L y M (200-240 mg kg⁻¹). En los bajos, la concentración de Pi fue significativamente superior (360-400 mg kg⁻¹). Estas diferencias podrían estar originadas en

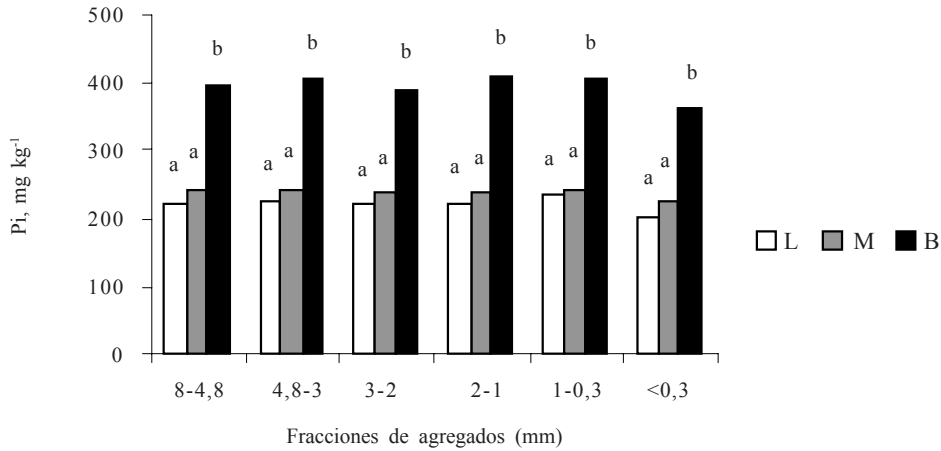


Figura 1. Concentración promedio de Pi (mg kg de agregado⁻¹) en la loma (L), media loma (M) y bajo (B) en 16 transectas a lo largo del A° El Divisorio.

Figure 1. Mean Pi concentrations (mg kg of aggregate⁻¹) in the upper (L), intermediate (M) and lower (B) positions along the El Divisorio stream.

Cada media está basada en 48 muestras. Letras distintas en la misma fracción indican diferencias altamente significativas entre posiciones (Bonferroni, P < 0,05).

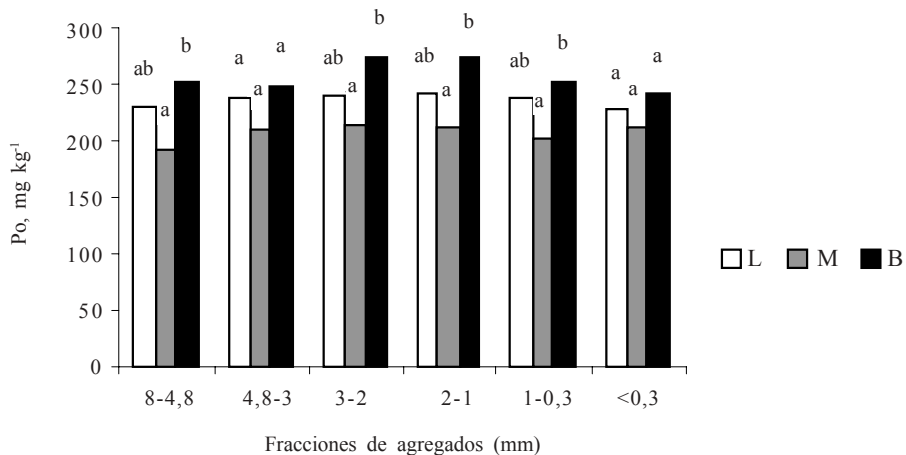


Figura 2. Concentración promedio de Po (mg kg de agregado⁻¹) en la loma (L), media loma (M) y bajo (B) en 16 transectas a lo largo del A° El Divisorio.

Figure 2. Mean Po concentrations (mg kg of aggregate⁻¹) in the upper (L), intermediate (M) and lower (B) positions along the El Divisorio stream.

Cada media está basada en 48 muestras. Letras distintas en la misma fracción indican diferencias altamente significativas entre posiciones (Bonferroni, P < 0,05).

la menor estabilidad de los agregados en los bajos y a la diferente textura entre posiciones. Los bajos presentaron mayores contenidos de arcilla y limo mientras que las lomas y medias lomas a mayores contenidos de arena (resultados no presentados). Estas diferencias estarían asociadas a la génesis natural de estos suelos con pendiente (alrededor del 5%) y posiblemente acentuadas por la actividad agrícola en la región. En cuanto al Po las diferencias fueron menos marcadas, pero con valores más altos en la mayoría de los tamaños de agregados en la posición B respecto de M y diferencias variables con L. Posiblemente, el mayor contenido de material fino en los bajos estaría relacionado con mayor contenido de MO y por lo tanto mayor Po, mientras que en las lomas la variabilidad estaría asociada con la variación de la profundidad de suelo.

En consecuencia, por cada gramo de suelo erosionado, la pérdida de P será mayor si corresponde a los bajos que si proviene de las lomas y medias lomas del paisaje.

Concentración de P en el suelo y su distribución en los agregados. La distribución del P en los agregados estuvo estrechamente asociada con los contenidos de cada una de ellas, ya que estuvo relacionada más con el peso de la fracción ($R^2 = 0,70$) que con la concentración de P en cada fracción ($R^2 = 0,28$). Esto significa que las diferencias en los tenores de P fueron más dependientes de la cantidad de agregados que de su concentración de P. Este comportamiento también ha sido observado para la materia orgánica (Villamil, 1999).

La cantidad de P (Po+Pi) en las diferentes fracciones separadas por tamizado en húmedo fue mayor en las posiciones B que en las M y L (Tabla 4). Los macroagregados estables al agua fueron los que contuvieron la mayor parte del P, principalmente las dos categorías mayores (8-4,8 y 4,8-3 mm), conteniendo desde 159 (L) a 285 (B) mg kg⁻¹ de suelo.

Tabla 4. Valores medios de la concentración de Pi y Po (mg kg de suelo⁻¹) en los diferentes tamaños de agregados y posiciones en el terreno.

Table 4. Mean Pi and Po concentrations in the different aggregate sizes and positions.

	Separación por tamizado en húmedo y en seco						Total	Suelo entero	material < 1mm
	Tamaño de agregados (mm)								
	8-4,8	4,8-3	3-2	2-1	1-0,3	<0,3			
Po+Pi									
L	78	81	34	55	12	20	280	465	184
M	85	81	32	58	15	25	296	461	164
B	155	130	48	91	30	44	498	682	184
Pi									
L	39 a	39 a	16 a	26 a	6 a	10 a	136	203 a	67 a
M	48 a	43 a	17 a	31 a	8 a	13 a	160	222 a	62 a
B	94 b	80 b	28 b	54 b	19 b	27 b	302	385 b	83 b
Po									
L	39 a	42 ab	18 ab	29 ab	6 a	10 a	144	262 ab	117 a
M	37 a	38 a	15 a	27 a	7 a	12 a	136	239 a	102 a
B	61 b	50 b	20 b	37 b	11 b	17 b	196	297 b	101 a
Po/(Po+Pi)									
L	50	52	53	53	50	50	51	56	64
M	44	47	47	47	47	48	46	52	62
B	39	38	42	41	37	39	39	44	55

Cada media está basada en 48 muestras.

Para cada forma de P, letras distintas en la misma columna indican diferencias altamente significativas (Bonferroni, $P < 0,01$).

Para suelo entero Bonferroni, $P < 0,05$, para Pi material < 1mm DMS, $P < 0,05$.

Una parte importante de P del suelo se encontró en la fracción < 1 mm separada por tamizado en seco. Si bien la concentración en esta fracción fue semejante para todas las posiciones, ella representó desde el 27% (B) hasta el 40% (L) del total. Esta diferencia fue el resultado de la menor cantidad de material < 1 mm encontrado desde las lomas a los bajos. Además, el P es liberado más rápidamente desde los agregados más pequeños que desde los más grandes (Zhang *et al.*, 2003).

En promedio para todas las muestras y posiciones, un tercio del P del suelo se encontró en esta fracción. Esto pone de manifiesto la importancia de considerar el material fino. En este sentido, las pérdidas serían importantes aún con tormentas de poca capacidad erosiva, ya que arrastrarían materiales menores, los que contribuyen con sustanciales cantidades de P. Algunos estudios han demostrado que la modificación de los equilibrios naturales del P, a través de labranzas y fertilización, favorece la formación de minerales poco disponibles que pueden ser menores de 1 mm (Baravalle *et al.*, 1995; Galantini *et al.*, 2005).

En cuanto al Pi, la tendencia general fue a un aumento de la concentración hacia la parte baja de la transecta, con valores significativamente mayores en los B. Este enriquecimiento de Pi en la posición más baja podría ser consecuencia de un flujo inorgánico desde las partes altas y/o una mayor velocidad de mineralización del material orgánico debido a la mayor humedad y nutrientes disponibles en esa posición (Galantini & Rosell, 2006).

Una tendencia semejante se observó en el Po, pero menos marcada, haciendo que el porcentaje de Po sea menor en los B que en L y M.

Las diferencias en los cambios de las formas orgánicas e inorgánicas modificaron la relación Po:Pi, mostrando una disminución desde la loma al bajo. Posiblemente, esto sea consecuencia del efecto de la diferente textura sobre la estabilización de las fracciones orgánicas (Galantini *et al.*, 2004; Kooijman *et al.*, 2005).

Otro aspecto a destacar es que en el material < 1 mm la proporción de Po tendió a ser mayor que en el resto de los tamaños de agregados (Tabla 3). Estas diferencias estarían indicando que los macro agregados serían menos estables a la degradación (Urioste *et al.*, 2006).

Los suelos más frágiles tenderán a disgregarse los agregados grandes ante el impacto de las gotas de lluvia, y escurrirán más fácilmente ante precipitaciones de poca intensidad. La cantidad de material menor de 1 mm, la estabilidad de los mayores y la concentración de las diferentes formas del P en cada uno de ellos serían los determinantes de las diferencias en el peligro potencial de escurrimiento superficial.

CONCLUSIONES

Si bien los suelos de la cuenca del arroyo El Divisorio tienen buenos valores de estabilidad estructural, las fuerzas físicas provenientes de la actividad agrícola favorecieron la destrucción de los agregados menos estables encontrándose gran cantidad de material fino. En esta fracción se encuentra gran parte del P. El mayor cuidado deberá tenerse en los bajos, ya que tienen mayor contenido de P en todas las fracciones y menor estabilidad de los agregados. A modo de recomendación, podemos decir que el manejo apropiado tendiente a disminuir las pérdidas de P será aquel que apunte, como objetivos primordiales, a aumentar la estabilidad estructural y mantener una buena cobertura de rastrojos, para reducir el arrastre de los agregados mayores ante tormentas fuertes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico brindado por la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) y el CONICET.

BIBLIOGRAFÍA

- Aduriz, MA; AO Gargano; P Chimeno; MC Saldungaray & VP Conti. 2003. Caracterización de los agrosistemas predominantes de la cuenca alta del río Sauce Grande. *RIA* 32(3): 3-26.
- Alberts, EE & WC Moldenhauer. 1981. Nitrogen and phosphorus transported by eroded soil aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 391-396.
- Baravalle, RA; RA Rosell; AM Miglierina & P Maiza. 1995. Soil fixation and availability of phosphate fertilizer. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 26: 2157-2165.
- Cacchiarelli, J; JA Galantini & RA Rosell. 2004. Estabilidad estructural y P en fracciones de agregados en la cuenca del A° El Divisorio (BA). XIX C.A.C.S. Paraná. Resumen pág. 79, CD-ROM 10 págs.
- Cacchiarelli, J; JA Galantini; RA Rosell & AM Miglierina. 2002. Formas de fósforo edáfico en la cuenca del embalse Paso Piedras (Buenos Aires). XVIII C.A.C.S. Puerto Madryn. Comisión I, pág. 8, trabajo en CD-ROM.
- De Leenher, L & M De Boodt. 1967. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. *West-European Methods for Soil Structure Determination*. State Faculty of Agricultural Sciences, Ghent, Belgium. 60-62.
- Echeverría, NE; JC Silenzi; AG Vallejos; JC Lobartini & MP De Lucía. 2003. Evaluación de la pérdida de nutrientes mediante lluvia simulada en un suelo bajo distintos manejos en la alta cuenca del río Sauce Grande. VII Congreso Argentino de Ingeniería Rural, CADIR, Balcarce.

- Frossard, E; LM Condon; A Oberson; S Sinaj & JC Fardeau. 2000. Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *J. Environ. Qual.* 29: 15-23.
- Galantini, JA & RA Rosell. 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil Till. Res.* 87: 72-79.
- Galantini, JA & RA Rosell. 1997. Organic fractions, N, P, and S changes in a semiarid Haplustoll of Argentine under different crop sequences. *Soil Till. Res.* 42: 221-228.
- Galantini, JA; L Suñer & H Krüger. 2005. Dinámica de las formas de P en un Haplustol de la región semiárida pampeana durante 13 años de trigo continuo. *RLA* 34(2): 13-31.
- Galantini, JA; N Senesi; G Brunetti & R Rosell. 2004. Influence of texture on the nitrogen and sulphur status and organic matter quality and distribution in semiarid Pampean grassland soils. *Geoderma* 123: 143-152.
- Kooijman, AM; J Jongejans & J Sevink. 2005. Parent material effects on Mediterranean woodland ecosystems in N.E. Spain. *Catena* 59: 55-68.
- La Nueva Provincia. 2003. Luz verde para la realización de estudios en Paso de las Piedras. Estarán a cargo científicos de la UNS. Bahía Blanca, 19 de agosto.
- Linquist, BA; PW Singleton; RS Yost & KG Cassman. 1997. Aggregate size effects on sorption and release of phosphorus in an Ultisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 160-166.
- Lundekvam, H. 1998. P-losses from three soil types at different cultivation systems. Phosphorus balance and utilization in agriculture-towards sustainability, proceedings of a seminar. K. Skogs-o. *Lantbr.akad. Tidskr* 137: 177-185.
- Marchena, JA. 2002. Indicadores bióticos y abióticos del deterioro del recurso hídrico en la Cuenca Alta del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires, y su dinámica temporal y espacial. Tesis de Doctor en Agronomía, UNS. Bahía Blanca.
- Santanatoglia, OJ & N Fernández. 1982. Modificación del método de De Boodt y de Leenher para el análisis de la distribución de agregados y efecto del tipo de embalaje y acondicionamiento de la muestra, sobre la estabilidad estructural. *RLA* XVII: 23-31.
- Saunders, WMH & EG Williams. 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soil. *J. Soil Sci.* 6: 254-267.
- Sharpley, AN. 1995. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. *J. Environ. Qual.* 24: 920-926.
- Silenzi, JC; AM Moreno & JC Lucero. 1987. Variaciones temporales de la estabilidad estructural de un suelo no disturbado. *Ciencia del Suelo* 5: 1-7.
- Stoltenberg, NL & JL White. 1953. Selective loss of plant nutrients by erosion. *Soil Sci. Soc. Am. Proceedings* 17: 406-410.
- Texeira, PC & RK Misra. 1997. Erosion and sediment characteristics of cultivated forest soils as affected by the mechanical stability of aggregates. *Catena* 30: 119-134.
- Urioste, AM; GG Hevia; EN Hepper; LE Anton; AA Bono & DE Buschiazzo. 2006. Cultivation effects on the distribution of organic carbon, total nitrogen and phosphorus in soils of the semiarid region of Argentinian Pampas. *Geoderma* 136: 621-630.
- Villamil, MB. 1999. Cambios del suelo asociados a la dinámica de la vegetación en el ecosistema natural de la zona sur del caldenal. Tesis Magister en Ciencias Agrarias, UNS. Bahía Blanca.
- Zhang, MK; ZL He; DV Calvert; PJ Stoffella; XE Yang & YC Li. 2003. Phosphorus and Heavy Metal Attachment and Release in Sandy Soil Aggregate Fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1158-1167.