

SEÇÃO II - QUÍMICA E MINERALOGIA DO SOLO

ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM SEDIMENTOS E SUA RELAÇÃO COM A AÇÃO ANTRÓPICA⁽¹⁾

João Batista Rossetto Pellegrini⁽²⁾, Danilo Rheinheimer do Santos⁽³⁾, Celso Silva Gonçalves⁽⁴⁾, André Carlos Cruz Copetti⁽⁵⁾ & Edson Campanhola Bortoluzzi⁽⁶⁾

RESUMO

A avaliação do teor de P total e solúvel nas águas superficiais é insuficiente para o diagnóstico do seu potencial poluidor. O objetivo deste trabalho foi avaliar as frações de P e as propriedades relacionadas com a liberação de P de sedimentos erodidos de unidades paisagísticas com diferentes graus de ação antrópica. As amostragens de água+sedimentos foram realizadas em duas unidades paisagísticas de uma sub-bacia da pequena bacia hidrográfica do Arroio Lino, Agudo, RS, Brasil. Avaliaram-se pH, concentração de sedimentos, C orgânico total, granulometria, Fe extraído por DCB (Fe_d) e oxalato (Fe_{ox}), P solúvel (Ps), P total (Pt), P particulado biodisponível (Ppb), P particulado potencialmente biodisponível (Pppb) e teor de fosfato dessorvido com água destilada (Q_0). Foram estimadas a capacidade máxima de adsorção de fosfato (Pmax), a concentração de equilíbrio de fosfato (CEP) e a constante relacionada com a energia de ligação de fosfato (k). Sedimentos erodidos de áreas mais antropizadas, comparativamente às áreas menos antropizadas, apresentaram: maior concentração de Pt, Pppb e menor quantidade de Ppb; maior Pmax e valor de k dessorveram menores quantidades de P em água destilada e mantiveram menor CEP, indicando maior potencial poluidor, especialmente em ambientes semelhantes.

Termos de indexação: bacia hidrográfica, uso do solo, qualidade de água, mata ciliar.

⁽¹⁾ Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor e foi financiado pela SAA/RS-RURAL, CNPq e FAPERGS. Trabalho apresentado no XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007 (Gramado, RS).

⁽²⁾ Doutorando do Programa do Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria-UFSM, Santa Maria (RS). CEP 97105-900. E-mail: jbpellegrini@yahoo.com.br

⁽³⁾ Professor Adjunto do Departamento de Solos, UFSM. Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq. E-mail: danilor@smail.ufsm.br

⁽⁴⁾ Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de São Vicente do Sul-Cefet-SVS. Rua 20 de Setembro - São Vicente do Sul (RS) CEP 97420-000.

⁽⁵⁾ Graduando do Curso de Graduação em Agronomia - UFSM. Bolsista de Iniciação Científica do CNPq. Email: andrecochetti@yahoo.com.br

⁽⁶⁾ Professor da Faculdade de Agronomia da Universidade de Passo Fundo-UPF, Campus I Passo Fundo (RS). CEP 99001-970. Email: edsonb@upf.br

**SUMMARY: PHOSPHORUS FRACTIONS AND ADSORPTION IN SEDIMENTS
IN RELATION TO ANTHROPOGENIC ACTIVITY**

The evaluation of the amount of total and soluble P in surface waters is insufficient to diagnose their pollution potential. This study aimed to evaluate the P fractions and soil properties related to P release from eroded sediments of landscape units with different pressure levels of anthropogenic activity. Water + sediments were sampled in two landscape units of a sub-watershed of the small watershed Arroio Lino, in Agudo, RS, Brazil. The following properties were evaluated: pH, sediment concentration, total organic C, sand, silt and clay fractions, iron extracted by DCB (Fe_d) and by oxalate (Fe_{ox}), soluble P (P_s), total P (P_t), bioavailable particulate P (P_{pb}), potentially bioavailable particulate P (P_{ppb}) and amount of phosphate desorbed with distilled water (Q_0). It was possible to estimate the maximum capacity of phosphate adsorption (P_{max}), the equilibrium concentration of phosphate (CEP) and the constant (k) related with the phosphate bond energy in the sediment. In comparison with areas with less anthropogenic activity, the sediments eroded from areas with high anthropogenic activity contained: (a) higher P_t and P_{ppb} concentration and lower P_{pb} quantity; (b) higher P_{max} and k values and (c) lower Q_0 and CEP quantities. These results indicate the higher pollution potential of eroded sediments from areas with high anthropogenic activity, especially in stagnant water.

Index terms: small watershed, soil use, water quality, riparian forest.

INTRODUÇÃO

O uso agrícola dos solos em pequenas bacias hidrográficas localizadas em regiões de encosta altera as condições ecológicas naturais. A quantidade e as características dos sedimentos carregados em suspensão pelo escoamento superficial são modificadas pela ação antrópica (Sharpely, 1985). Uma vez atingindo um ambiente aquático lântico, os sedimentos podem atuar, tanto como dreno, quanto como fonte de P para a água, diminuindo ou potencializando os processos de eutroficação (Correll, 1998; Koski-Vähälä & Hartikainen, 2001).

A variabilidade na qualidade dos sedimentos determina que os íons fosfato sejam adsorvidos aos grupos funcionais dos colóides com diferentes graus de energia (Barrow, 1983). A disponibilidade de P na água é controlada pelos processos físico-químicos de adsorção e dessorção (Correll, 1998; Reynolds & Davies, 2001; McDowell et al., 2001). De acordo com Schwertmann & Taylor (1989), os óxidos de Fe são os colóides inorgânicos mais eficazes na adsorção do P, pois a atração dos prótons pelo O do grupo funcional é muito forte, facilitando o processo de troca de ligantes.

Alguns autores, que têm estudado a importância do P para a eutroficação de lagos, demonstram que teores semelhantes de P total podem manter diferentes concentrações de P solúveis na água (Correll, 1998; Esteves, 1998). Correl (1998) encontrou para teores semelhantes de P total; concentrações

de P solúvel que variaram de 0,009 a 0,100 mg L⁻¹ em águas de lagos dos EUA. Por esta razão, esse autor defende que a avaliação apenas dos teores de P total e solúvel na água é insuficiente para o diagnóstico do estado eutrófico de determinado recurso hídrico. Deve-se, portanto, considerar o teor total de P no sedimento e sua capacidade de adsorção e dessorção.

O modelo mecanístico proposto por Barrow (1983) para descrever a adsorção de P em solos passou a ser usado mais recentemente para estudar a adsorção do P nos sedimentos de rios (McDowell et al., 2001), lagos (Koski-Vähälä & Hartikainen, 2001) e estuários (Pant & Reddy, 2001). É possível estimar em sedimentos a capacidade máxima de adsorção, a constante relacionada com energia de ligação de fosfato e a concentração de equilíbrio de fosfato dos sedimentos. Para esses autores, a concentração de equilíbrio de fosfato, onde não ocorre adsorção ou dessorção de P, é um indicador do potencial poluidor do P na água. Se o recurso hídrico receber novos sedimentos com concentração de equilíbrio inferior ao dos teores de P na solução, eles atuarão como dreno de P da água. Contrariamente, quando o meio aquático receber sedimentos com alta concentração de equilíbrio, eles atuarão como fonte de P, aumentando, assim, o risco de eutroficação, especialmente em ambientes lânticos.

Diante do exposto, análises qualitativas dos sedimentos são particularmente importante nas pequenas bacias hidrográficas rurais que ainda apresentam grandes perdas de sedimentos e,

conseqüentemente, de íons e moléculas com potencial poluidor dos recursos hídricos. Os solos de muitas pequenas bacias localizadas na Encosta Basáltica do Estado do Rio Grande do Sul são convencionalmente cultivados com a cultura do fumo. Dentre os nutrientes mais utilizados nesta cultura, o P é o que tem maior potencial poluidor de águas superficiais, conforme demonstrado por Pellegrini et al. (2007). Os sedimentos oriundos desta região são ricos em argilominerais 2:1 expansivos e muito pobres em óxidos (Bortoluzzi et al., 2006), caracterizando um sedimento com muito baixa capacidade de adsorção de fosfato. Estes sedimentos, ao atingirem o estuário do Rio Guaíba e a Lagoa dos Patos, modificam sua dinâmica principalmente por ocasião das estiagens e pela conseqüente diminuição da vazão, provocando proliferação de cianobactérias, indicando processo de eutroficação (Matthiensen et al., 1999).

O objetivo deste trabalho foi avaliar as frações de P e as propriedades relacionadas com a liberação de fosfato de sedimentos erodidos de unidades paisagísticas com diferentes graus de ação antrópica.

MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de água+sedimento foram coletadas na pequena bacia hidrográfica (MBH) do Arroio Lino. Ela está localizada no distrito Nova Boêmia, município de Agudo, RS, Brasil, entre as coordenadas UTM 6.733.500N e 280.000E (Figura 1) e faz parte do Rebordo da Serra Geral, transição entre as regiões do Planalto e da Depressão Central. Os principais solos da pequena bacia são Chernossolos e Neossolos os quais apresentam alta susceptibilidade à erosão. Em vários pontos da MBH, o sistema de drenagem (temporário e permanente) transpõe as áreas de lavouras, o que facilita a transferência de contaminantes para os cursos de água (Figura 1). Cerca de 25 % da área da pequena bacia é ocupada por culturas anuais e mais de 60 % ainda é composta por fragmentos da Floresta Estacional Decidual em diferentes estádios de sucessão ecológica. Aproximadamente, 80 % das glebas de lavoura são destinadas à produção de fumo. O sistema de cultivo convencional é predominante, com práticas culturais como intenso revolvimento do solo e uso de altas e freqüentes doses de fertilizantes e agrotóxicos (Pellegrini et al., 2007).

Para este estudo, foi selecionada uma sub-bacia com duas unidades paisagísticas (UP) (Figura 1 e Quadro 1). Em cada UP, com base na carta topográfica e nos pontos georreferenciados, determinaram-se a área de captação do escoamento superficial e o uso do solo no segundo semestre de 2003. A UP⁺⁺ localizada a jusante na sub-bacia abrange o dobro da superfície de captação, aproximadamente seis vezes a área de

lavouras, além de possuir maior número de sedes de propriedades e estradas em relação à UP⁺ localizada a montante, caracterizando-se, assim, como UP com alta e baixa atividade antrópica, respectivamente.

As amostragens de água+sedimento foram realizadas por ocasião de seis eventos pluviiais ocorridos durante o ciclo da cultura do fumo da estação de crescimento de 2003/04. A água+sedimento foi coletado por meio de amostradores (em duplicata) de nível ascendente instalados no exutório de cada UP, a cinco centímetros acima do nível normal da lâmina do curso de água (Figura 1).

Após a chegada das amostras de água+sedimento no laboratório, determinou-se o pH (Quadro 2). Uma alíquota da amostra foi filtrada em membrana porosa com diâmetro de 0,45 µm e no filtrado, determinou-se o P solúvel (Ps) (Murphy & Riley, 1962). Outra alíquota foi usada para determinar a concentração de sedimento por evaporação em estufa regulada a 105 °C. Nos sedimentos secos, foram determinados: (a) C orgânico total (Tedesco et al., 1995); (b) Fe extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Mehra & Jackson, 1960) e por oxalato de amônio (Tedesco et al., 1995) e (c) granulometria (areia, silte e argila), segundo Robert & Tessier (1974). Analisou-se o teor de P total em 0,05 g de sedimento por digestão ácida (H₂SO₄ + H₂O₂) na presença de MgCl₂ saturado (Brookes & Powlson, 1982). O P particulado biodisponível (Ppb) foi estimado com resina trocadora de ânions em membrana (Rheinheimer et al., 2003a). Sete extrações sucessivas, em intervalos de 24 h, foram realizadas até atingir teores de P constantes e próximos a zero. Os teores obtidos na primeira extração, subtraídos os teores de Ps, correspondem ao Ppb, e o somatório das sete extrações foi chamado de P particulado potencialmente biodisponível (Pppb).

Os sedimentos coletados em cada UP nos seis eventos pluviiais foram misturados para obter massa suficiente para o estudo da relação P sorvido: P na solução. A capacidade máxima de sorção de fosfato (P_{max}) foi determinada em 0,1 grama do sedimento acondicionado em tubos de centrífuga com 10 mL de solução de CaCl₂ 0,001 mol L⁻¹ que continham onze concentrações de P (0; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,5; 5,0 e 10 mg L⁻¹) correspondentes a teores de 0, 5, 10, 25, 50, 100, 500 e 1000 mg kg⁻¹ P no sedimento. As amostras foram agitadas por 16 h a 25 °C em agitador end-over-end a 33 rpm. Após, foram centrifugadas a 6.000 rpm por 15 min e filtradas em membrana porosa com diâmetro de 0,45 µm. No filtrado, foi determinado o teor de P pelo método de Murphy & Riley (1962). O P sorvido foi estimado pela diferença entre a quantidade adicionada e a recuperada na solução de equilíbrio. Os dados foram ajustados pelo modelo de Langmuir, descrito em Barrow (1983):

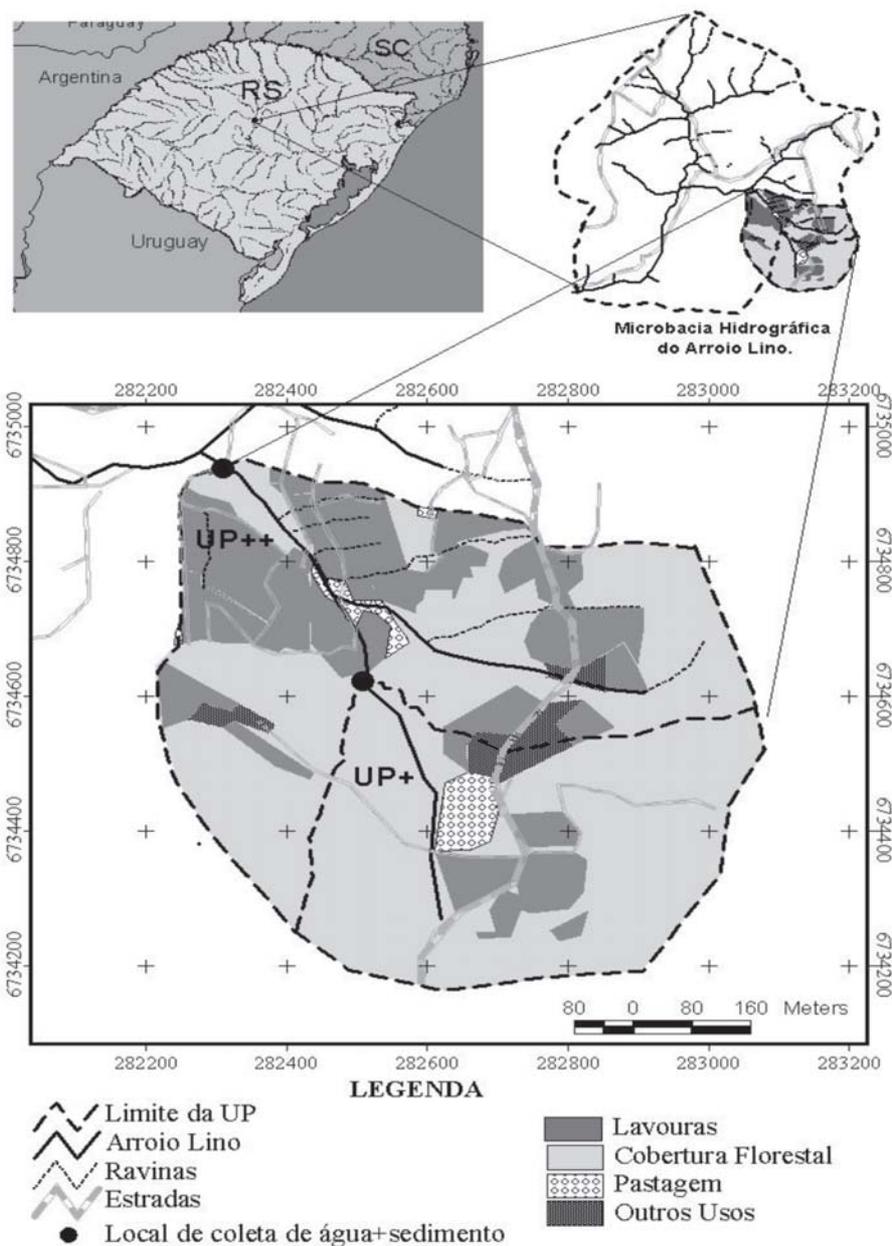


Figura 1. Pontos de coleta, divisores de água, sistemas de drenagem e uso do solo durante o ciclo de cultivo de fumo 2003/04 em duas unidades paisagísticas (UP), com diferentes graus de ação antrópica, de uma sub-bacia da pequena bacia hidrográfica do Arroio Lino, Agudo, RS.

$$P_{\text{sorvido}} = \frac{P_{\text{max}} P_{\text{solução}}}{1 + P_{\text{solução}}}$$

em que P_{sorvido} = quantidade de fosfato retido pelo sedimento, P_{max} = capacidade máxima do sedimento em sorver fosfato; k = constante relacionada com energia de sorção do fosfato pelo sedimento e $P_{\text{solução}}$ = concentração de P na solução.

A concentração de equilíbrio de P (CEP), na qual não ocorre adsorção ou dessorção (Figura 2), foi obtida

pelos dados pelo modelo de Langmuir modificado por Koski-Vähälä & Hartikainen (2001):

$$P_{\text{sorvido}} = \frac{P_{\text{max}} P_{\text{solução}}}{m + P_{\text{solução}}} + Q_0$$

em que k_m = concentração de P na solução que permite a metade da sorção máxima de P e Q_0 = quantidade de fosfato dessorvido em água destilada sem adição de P e coincide com o ponto de intersecção no eixo das ordenadas (Figura 2).

Quadro 1. Uso do solo e características ecológicas de duas unidades paisagísticas (UP) com diferentes graus de ação antrópica, de uma sub-bacia da pequena bacia hidrográfica do Arroio Lino, Agudo, RS

Unidade Paisagística	Área da UP ⁽¹⁾	Lavouras ⁽²⁾	Cobertura Florestal ⁽³⁾	Outros usos ⁽⁴⁾	Características físico-ecológicas
UP ⁺	26,9	3,2 (11,9)	21,4 (79,4)	2,2 (8,8)	<ul style="list-style-type: none"> • Nascentes e cursos de água protegidos por mata ciliar. • Lavouras distantes dos cursos de água. • Menor ação antrópica.
UP ⁺⁺	69,2	17,1 (24,1)	48,1 (69,5)	3,8 (6,3)	<ul style="list-style-type: none"> • Cursos de água desprotegidos de matas ciliares. • Lavouras próximas aos cursos de água. • Maior ação antrópica.

⁽¹⁾área da bacia de captação do escoamento superficial acima do ponto de coleta da unidade paisagística; ⁽²⁾mais de 80 % cultivadas com fumo; ⁽³⁾representa as matas nativas, secundárias e reflorestadas; ⁽⁴⁾representa as pastagens perenes, os cultivos de subsistência, pomares, hortas, instalações e estradas. UP⁺ = Unidade paisagística com menor ação antrópica; UP⁺⁺ = Unidade paisagística com maior ação antrópica.

Quadro 2. Valores de pH, concentração de sedimentos (CS), carbono orgânico total (COT), granulometria (areia, silte e argila) e ferro extraído por DCB (Fe_d) e oxalato (Fe_{ox}) em sedimentos coletados em duas unidades paisagísticas (UP) com diferentes graus de ação antrópica, de uma sub-bacia da pequena bacia hidrográfica do Arroio Lino, RS

Unidade Paisagística	Água + Sedimentos		Sedimentos secos em estufa a 105 °C				
	pH	CS	COT	Areia	Silte	Argila	Fe _d
	g L ⁻¹		g kg ⁻¹				
UP ⁺	6,7±0,4	2,8±0,8	19±5	225±35	575±49	200±31	22,8±1,9
UP ⁺⁺	6,8±0,4	18,0±2,1	14±3	150±26	550±56	300±23	62,3±3,1

UP⁺ = Unidade paisagística com menor ação antrópica; UP⁺⁺ = Unidade paisagística com maior ação antrópica; Cada valor compõe uma média de seis eventos pluviais.

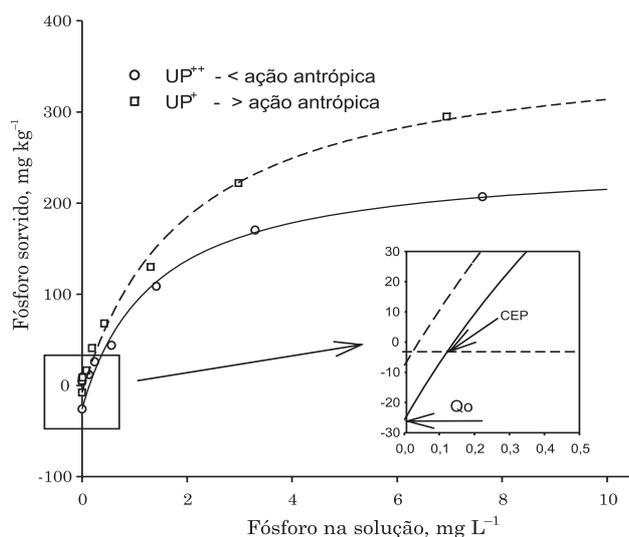


Figura 2. Relação entre o fósforo sorvido e da solução em sedimento coletados em suspensão no escoamento superficial em duas unidades paisagísticas (UP), com diferentes graus de ação antrópica, de uma sub-bacia da pequena bacia hidrográfica do Arroio Lino, Agudo, RS.

RESULTADOS

Os teores de P solúvel (0,08 e 0,09 mg L⁻¹) (Quadro 3) na água coletada no arroio das duas unidades paisagísticas (UP) foram altos e similares ao permitido para P total de águas de classe I ocorrentes em ambiente lótico e tributários de ambientes intermediários (CONAMA, 2005 – Resolução 357 do CONAMA). Os valores de P particulado potencialmente biodisponível (P_{ppb}), representado pelo somatório das sete extrações com a resina trocadora de ânions, também foram altos, especialmente na UP com maior ação antrópica (UP⁺⁺) (122 mg kg⁻¹ P). Também, nessa UP, os teores de P total contido nos sedimentos foram maiores (1.310 mg kg⁻¹) do que os sedimentos coletados na UP menos antropizada (1.070 mg kg⁻¹ P). No entanto, os sedimentos coletados na UP⁺ contêm mais P particulado biodisponível (P_{pb}), desorvido com a primeira extração com a resina (73 mg kg⁻¹), que aqueles coletados na UP⁺⁺ (43 mg kg⁻¹).

Quadro 3. Frações de fósforo e parâmetros da equação de Langmuir estimados para sedimentos coletados em duas unidades paisagísticas (UP) com diferentes graus de ação antrópica, de uma sub-bacia da pequena bacia hidrográfica do Arroio Lino, Agudo, RS, Brasil

UP	Ps ⁽¹⁾ mg L ⁻¹	Pt ⁽²⁾ mg kg ⁻¹	Extração com RTA		Parâmetros da equação de Langmuir			
			1 ^a ext (Ppb) ⁽³⁾	∑ de 7 ext (Pppb) ⁽⁴⁾	Pmax ⁽⁵⁾	Qo ⁽⁶⁾	CEP ⁽⁷⁾	k ⁽⁸⁾
UP ⁺	0,09±0,05	1070±86	73±7	101±5	274	25,8	0,128	0,330
UP ⁺⁺	0,08±0,03	1310±71	43±11	122±20	386	7,8	0,054	0,497

⁽¹⁾Fósforo solúvel; ⁽²⁾P total; ⁽³⁾P particulado biodisponível; ⁽⁴⁾P particulado potencialmente biodisponível; ⁽⁵⁾capacidade máxima de adsorção de P; ⁽⁶⁾teor de P dessorvido em água destilada; ⁽⁷⁾concentração de equilíbrio de P; ⁽⁸⁾constante relacionada com a energia de ligação de P; UP⁺ = Unidade paisagística com menor ação antrópica; UP⁺⁺ = Unidade paisagística com maior ação antrópica; Cada valor compõe uma média de seis eventos pluviais.

Os sedimentos coletados no arroio das duas unidades paisagísticas apresentaram baixa capacidade máxima de adsorção de fosfato (P_{max}) (Figura 2). Contudo, ela foi maior nos sedimentos da UP⁺⁺ (386 mg kg⁻¹) que naqueles coletados na UP⁺ (274 mg kg⁻¹). O maior valor de P_{max} está diretamente relacionado com: (a) a maior concentração de sedimento (2,8 e 18 g L⁻¹, para a UP⁺ e UP⁺⁺, respectivamente); (b) o maior teor de argila (200 e 300 g kg⁻¹); (c) a maior quantidade de Fe extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (22,8 e 62,3 g kg⁻¹) e por oxalato de amônio (2,1 e 3,5 g kg⁻¹) e (d) o menor teor de C orgânico total (Quadro 2).

A concentração de equilíbrio de P (CEP) dos sedimentos coletados na UP⁺ foi de 0,128 mg L⁻¹, mais de duas vezes superior àquele dos sedimentos da UP⁺⁺ (0,054 mg L⁻¹) (Quadro 3). De maneira inversa, a constante relacionada com energia de ligação (k) foi menor para os sedimentos oriundos da UP⁺ (0,330 L mg⁻¹ dia⁻¹) em relação aos sedimentos coletados na UP⁺⁺ (0,497 L mg⁻¹ dia⁻¹). As concentrações de fosfato dessorvido com a água destilada, Q_0 , foram de 25,8 e 7,8 mg kg⁻¹, para os sedimentos coletados na UP⁺ e UP⁺⁺, respectivamente.

Deste modo, a água do arroio da unidade paisagística mais antropizada continha maior concentração de sedimento, P total, P particulado potencialmente biodisponível, capacidade de sorção de fosfato e valor da constante relacionada com energia de ligação, em todos os eventos pluviais estudados. Esses sedimentos apresentaram maior teor de argila e de Fe e menor teor de C orgânico. Isso proporcionou menor quantidade de fosfato extraído com água destilada, com a primeira extração com resina trocadora de ânions e menor concentração de equilíbrio de P.

DISCUSSÃO

A forma de ocupação do solo nas unidades paisagísticas alterou significativamente as características hidrodinâmicas do escoamento

superficial e, conseqüentemente, as características físico-químicas e granulométricas dos sedimentos. A maior área ocupada com lavouras na UP⁺⁺ (Quadro 1) e a ausência da mata ciliar no segmento do curso de água entre os pontos de coleta da UP⁺ e o da UP⁺⁺ (Figura 1) proporcionaram maior ação dos processos erosivos, cuja concentração média de sedimento foi mais do que seis vezes daquela observada na UP⁺ (Quadro 2). Na UP⁺⁺, há várias ravinas no interior das lavouras, evidenciando um processo de erosão avançado, que é resultado da falta de estratégias de manejo e conservação dos solos no cultivo de fumo. Estes resultados demonstram a importância da manutenção da mata ciliar (Lowrence, 1998), da distribuição espacial das áreas de cultivo anual na UP, adequando-as à capacidade de uso do solo, e da necessidade de adoção de manejo dos recursos naturais em escala de pequena bacia.

A falta de planejamento paisagístico-ambiental e o manejo inadequado do solo cultivado com fumo aceleram as perdas de solo e, conseqüentemente, os sedimentos apresentam atributos físicos e físico-químicos relacionados com a dinâmica do P diferentes daqueles oriundos de ambientes naturais, cobertos por florestas (Pellegrini et al., 2007). Por esta razão, os menores teores de P particulado potencialmente biodisponível foram observados na UP⁺, a qual apresenta aproximadamente 80 % da sua área coberta por florestas e apenas 12 % com lavouras (Quadro 1). A presença de cobertura florestal, inclusive nas margens dos cursos de água, faz com que a quantidade de sedimentos carregados pela água seja menor. Os sedimentos são mais ricos em C orgânico e mais pobre em argila e, ou, de óxidos de Fe, uma vez que as taxas de infiltração são altas e somente pequena parte da água da chuva escoar lentamente sobre a superfície do solo. Os valores de Q_0 confirmam de maneira simples a alta capacidade de dessorção de P dos sedimentos erodidos de áreas naturais.

Os teores de P particulado potencialmente biodisponível estão correlacionados com os teores de

argila e óxidos de Fe presentes nos sedimentos. Os valores elevados dessa forma de P evidenciam a elevada capacidade de tamponamento do P da fração solúvel, representando grande potencial poluidor. Todo fosfato extraído pela resina pode ser considerado biodisponível (Rheinheimer et al., 2003a), pois ela extrai primeiramente o fosfato ligado com menor energia aos grupos funcionais dos colóides (Barrow, 1983). Cada quilograma de sedimento erodido da unidade paisagística com maior ação antrópica pode fazer com que 2.440 L de água de ambiente lótico passem da classe I (0,1 mg L⁻¹ P) para a classe III (0,15 mg L⁻¹), segundo as normas estabelecidas pela resolução 357 do CONAMA (CONAMA, 2005). O potencial poluidor em P do sedimento erodido da pequena bacia hidrográfica do Arroio Lino é muito grande, pois Sequinatto et al. (2006) estimaram, num evento pluvial de 65 mm ocorrido em 10/09/2005, perda de 605 t de sedimento em apenas 332 ha. Esse sedimento seria suficiente para poluir 1,48 x 10⁶ m³ de água, caso a quantidade de Pppb fosse a mesma do presente estudo.

O maior valor de P total observado na UP⁺⁺ comparado ao da UP⁺ justifica-se pelos maiores teores de argila e de Fe (Quadro 2), indicando que as lavouras e as estradas são as principais fontes de sedimento, concordando com Minella (2000). Em levantamento do estado de fertilidade dos solos desta pequena bacia, Rheinheimer (2003) constatou que o solo da camada superficial (0-5 cm) de 33 das 39 lavouras apresentou teores de P muito alto (superior a duas vezes o teor crítico – CQFSRS/SC, 2004). Isso é decorrente do pacote tecnológico imposto pelas empresas fumageiras aos fomicultores, cuja quantidade de fertilizante fosfatado independe da disponibilidade no solo.

Os baixos valores de P_{max} estimados para os sedimentos coletados nas duas UP devem-se à grande quantidade de fosfato previamente adsorvido (Rheinheimer et al., 2003b). Esses autores estimaram que a saturação prévia dos solos com fosfato chegou a 39 % da sorção máxima. No caso de sedimentos erodidos da UP⁺⁺, o Pppb (122 mg kg⁻¹) representa 32 % da P_{max} (386 mg kg⁻¹). Os baixos valores de P_{max} são explicados pelos baixos teores de Fe extraído dos sedimentos, os quais são os principais colóides adsorventes desse íon (Schwertmann & Taylor, 1989). Além disto, os sedimentos erodidos da presente pequena bacia são ricos em argilominerais do grupo das esmectitas e das micas (Bortoluzzi, et al., 2006), as quais revelam baixa capacidade de adsorção de fosfato.

Quando os sedimentos erodidos desta pequena bacia atingirem os reservatórios de água (ambientes lenticos - caso do estuário do Guaíba e da Lagoa dos Patos), em decorrência de suas altas concentrações de equilíbrio (UP⁺ = 0,128 mg L⁻¹ e UP⁺⁺ = 0,054 mg L⁻¹), eles manterão alta disponibilidade de fosfato na biota aquática. Nos ambientes lenticos, os limites críticos de P na água de classe III é de 0,075 mg L⁻¹, muito próximo do valor médio da concentração de equilíbrio

dos sedimentos das duas UP. Se o reservatório apresenta concentração de P solúvel mais baixa do que a concentração de equilíbrio do sedimento, eles continuarão liberando fosfato para a solução. Além disso, quando estes sedimentos se depositarem no fundo do corpo de água, por causa da menor difusão de O₂, pode ocorrer a redução de Fe³⁺ a Fe²⁺, liberando o P adsorvido aos colóides, aumentando a concentração de P em solução (Correll, 1998; Esteves, 1998).

Estudos realizados por Pant & Reddy (2001) demonstraram que em ambientes anaeróbios a CEP relaciona-se muito bem com os teores de óxidos de Fe. Por esta razão, pode se dizer que os sedimentos coletados na UP⁺⁺ que apresentaram o maior teor de Fe, apresentarão, no longo prazo, maiores riscos de eutroficação do que os sedimentos da UP⁺. Segundo Correll (1998) e Koski-Vähälä & Hartikainen (2001), a biodisponibilidade do P pode aumentar à medida que os processos de redução se desenvolverem na interface água-sedimento até que os sedimentos ressuspensos na coluna de água sejam novamente oxidados, passando, então, a atuarem como dreno do P dissolvido.

CONCLUSÕES

Os sedimentos erodidos de unidades paisagísticas com maior ação antrópica, comparativamente a unidades paisagísticas menos antropizadas, apresentam:

1. Maior concentração de P total, P particulado potencialmente biodisponível e menor teor de P particulado biodisponível,
2. Maior capacidade máxima de sorção de fosfato e valor da constante relacionada com energia de ligação,
3. Menores quantidades de P em água destilada e menor concentração de equilíbrio de P,
4. Maior teor de argila e Fe e menor teor de C orgânico, indicando maior potencial poluidor especialmente em ambientes lenticos.

LITERATURA CITADA

- BARROW, N.J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. *J. Soil Sci.*, 34:733-750, 1983.
- BORTOLUZZI, E.C.; RHEINHEIMER, D.S.; PELLEGRINI, J.B.R.; GONÇALVES, C.S.; PERNES, M. & DUR, J.C. Qualidade de sedimento e processos de eutroficação de águas fluviais em uma pequena bacia hidrográfica do Rio Grande do Sul. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, Porto Alegre, 2006. Anais. Porto Alegre, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2006. CD-ROM.

- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005. Brasília, 2005. 23p.
- BROOKES, P.C. & POWLSON, D.C. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. *J. Sci. Food Agric.*, 32:671-674, 1982.
- CORRELL, D.L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *J. Environ. Qual.*, 27:261-266, 1998.
- ESTEVEES, F.A. Fundamentos de limnologia. 2.ed. Rio de Janeiro, Interciência, 1998. 602p.
- KOSKI-VÄHÄLÄ, J. & HARTIKAINEN, H. Assessment of the risk of phosphorus loading due to resuspended sediment. *J. Environ. Qual.*, 30:960-966, 2001.
- LOWRENCE, R. The riparian ecosystem management model: Simulator for ecological processes in riparian zones. In: FEDERAL INTERAGENCY HYDROLOGIC MODELING CONFERENCE, 1., Las Vegas, 1998. Proceedings. Las Vegas, 1998. 30p.
- MATTHIENSEN, A.; YUNES, J.S. & CODD, G.A. Ocorrência, distribuição e toxicidade de cianobactérias no estuário da Lagoa dos Patos, RS. *R. Bras. Biol.*, 59:361-376, 1999.
- McDOWELL, R.; SHARPLEY, A.N. & FORMAL, G. Phosphorus export from an agricultural watershed: Linking source and transport mechanisms. *J. Environ. Qual.*, 30:1587-1595, 2001.
- MEHRA O.P. & JACKSON M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.*, 7:317-327, 1960.
- MINELLA, J.P.G. Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 80p. (Tese de Mestrado)
- MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.*, 27:31-36, 1962.
- PANT, H.K. & REDDY, K.R. Phosphorus sorption characteristics of estuarine sediments under different redox conditions. *J. Environ. Qual.*, 30:1474-1480, 2001.
- PELLEGRINI, J.B.R.; RHEINHEIMER, D.R.; GONÇALVES, C.S.; COPETTI, A.C.C.; BORTOLUZZI, E.C. & TESSIER, D. Effect of landscape conformation on phosphorus contamination of fluvial soil sediments in subtropical Brazilian watershed. *Agron. Sust. Develop.*, 2007 (submetido)
- REYNOLDS, C.S. & DAVIES, P.S. Sources and bioavailability of phosphorus fractions in freshwaters: A British perspective. *Biol. Rev.*, 76:27-64, 2001.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E.; KAMINSKI, J. & GATIBONI, L.C. Dessorção de fósforo avaliada por extrações sucessivas em amostras de solo provenientes dos sistemas plantio direto e convencional. *Ci. Rural*, 33:1053-1059, 2003a.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. & CONTE, E. Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:41-49, 2003b.
- RHEINHEIMER, D.S. Caracterização física, química e biológica dos solos na pequena bacia hidrográfica do Arroio Lino, Nova Boemia, Agudo, RS. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 115p. (Relatório Técnico, 2)
- ROBERT, M. & TESSIER D. Méthode de préparation des argiles de sols pour les études minéralogiques. *Ann. Agron.*, 25:859-882, 1974.
- SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. Iron Oxides. In: DIXON, J.B. & WEED S.B., eds. Minerals in soil environments. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.379-438.
- SEQUINATTO, L.; REICHERT, J.M.; COPETTI, A.C.C.; REICHERT, D.J. & RHEINHEIMER, D.S. Hidrossedimentologia em pequena bacia hidrográfica rural cultivada com fumo em Agudo – RS. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 7., Porto Alegre, 2006. Anais. Porto Alegre, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2006. CD-ROM
- SHARPLEY, A.N. The selective erosion of plant nutrients in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:1010-1015, 1985.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 188p. (Boletim Técnico, 5)