

PERDAS DE FÓSFORO E POTÁSSIO POR EROSÃO HÍDRICA EM UM INCEPTISOL SOB CHUVA NATURAL⁽¹⁾

I. BERTOL⁽²⁾, J. C. GUADAGNIN⁽³⁾, P. C. CASSOL⁽²⁾,
A. J. AMARAL⁽⁴⁾ & F. T. BARBOSA⁽⁴⁾

RESUMO

Sistemas inadequados de manejo do solo favorecem a erosão hídrica, perdas de nutrientes e poluição das águas superficiais, acelerando a degradação ambiental. As perdas de P e K por erosão hídrica foram avaliadas entre 1999 e 2001, em um Cambissolo Húmico aluminico léptico com 0,102 m m⁻¹ de declividade, em Lages (SC), sob condições de chuva natural, em diferentes sistemas de manejo do solo. Os tratamentos de preparo do solo foram: semeadura direta em seis anos (SDI₆), semeadura direta em nove anos (SDI₉), escarificação + gradagem em nove anos (E + G₉) e aração + duas gradagens em nove anos (A + 2G₉), cada um com duas parcelas experimentais, sendo uma parcela submetida à rotação das culturas de feijão, ervilhaca, milho e aveia e a outra, à sucessão de soja, trigo, soja e trigo, além de um tratamento-testemunha, constituído por aração + duas gradagens sem cultivo, em nove anos (SSC₉). O P e o K foram determinados tanto na água quanto nos sedimentos da enxurrada. As concentrações dos dois elementos foram maiores nos sedimentos do que na água da enxurrada. Tanto na água quanto nos sedimentos da enxurrada, os preparos de solo conservacionistas proporcionaram maiores concentrações de P e K do que os preparos de solo convencionais. As perdas totais de K foram maiores na água do que nos sedimentos da enxurrada, com exceção do manejo SSC₉. Com relação às perdas de P, apenas nos manejos SDI₆ e SDI₉ elas foram maiores na água do que nos sedimentos. No caso da água da enxurrada, as perdas totais de P foram maiores nos manejos SDI₆ e SDI₉, enquanto as de K variaram com os preparos conservacionistas e convencionais, sem apresentarem tendência clara. No caso do sedimento da enxurrada, as perdas totais de K foram menores nos preparos conservacionistas, mas as de P foram menores apenas nos manejos SDI₆ e SDI₉.

Termos de indexação: perdas de solo, perdas de água, perdas de nutrientes, preparo conservacionista.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do segundo autor. Desenvolvido com recursos do CNPq/FINEP/CAPES e Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Recebido para publicação em junho de 2003 e aprovado em março de 2004.

⁽²⁾ Professor do Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Caixa Postal 281, CEP 88520-000 Lages (SC). Bolsista do CNPq. E-mail: a2ib@cav.udesc.br.

⁽³⁾ Pós-Graduando em Agronomia, Centro de Ciências Agroveterinárias, UDESC. Bolsista da CAPES.

⁽⁴⁾ Aluno da Faculdade de Agronomia, UDESC. Bolsista de Iniciação Científica PIBIC.

SUMMARY: PHOSPHORUS AND POTASSIUM LOSSES BY WATER EROSION IN AN INCEPTISOL UNDER NATURAL RAINFALL

Inadequate soil management systems can lead to water erosion, nutrient losses and superficial water pollution, accelerating environmental degradation. The P and K losses caused by water erosion were evaluated from November 1999 to October 2001 in an Inceptisol with 0.102 m m⁻¹ slope, in Lages, Santa Catarina State, Brazil, under natural rainfall conditions. The evaluated soil management systems were: no-tillage for six years (NT₆), no-tillage for nine years (NT₉), chiseling plus one disking for nine years (C + D₉), and plowing plus disking twice for nine years (P + D₉). All of these treatments were carried out in duplicate. One experimental plot was cultivated with bean, vetch, corn, and oat in rotation, and the other with soybean, wheat, soybean, and wheat in succession. An additional treatment consisted of bare soil (control), which was periodically tilled with plowing plus disking twice for nine years (BS₉). The P and K contents were determined in runoff water and sediments. Both P and K concentrations were higher in runoff water and sediments under the conservation soil tillage than under conventional soil tillage. Total K losses were higher in the runoff water than in the sediment, except in the BS₉ treatment. Regarding P losses, they were higher in water than sediment only in the NT₆ and NT₉ tillage. In the runoff water, the total P losses were higher in NT₆ and NT₉ tillage, while the K losses varied with conservational tillage and conventional tillage, with no clear trend. Potassium losses in the runoff sediment were smaller in conservational tillage, but those of P were only smaller in NT₆ and NT₉ treatments.

Index terms: soil losses, water losses, nutrient losses, conservation tillage.

INTRODUÇÃO

As perdas de nutrientes por erosão hídrica são influenciadas pela sua concentração na água e nos sedimentos e pela perda total de água e de sedimentos por erosão (Schick et al., 2000b; Favaretto, 2002; Guadagnin, 2003; Bertol et al., 2003). A concentração de nutrientes na água e nos sedimentos, por outro lado, varia com sua concentração no solo (Daniel et al., 1994; Favaretto, 2002), a qual é influenciada pelas adubações e pela cobertura e manejo do solo (Seganfredo et al., 1997; Schick et al., 2000b; Mello, 2002).

Os preparos de solo conservacionistas caracterizam-se pela presença de maior rugosidade (exceto a semeadura direta) e cobertura superficial do que os convencionais (Cogo, 1981; Bertol, 1995; Schick et al., 2000a). Assim, as perdas de água e sedimentos são reduzidas nos sistemas conservacionistas, o que diminui as perdas totais de nutrientes por erosão nesses sistemas de manejo (Bertol, 1994a; King et al., 1996; Schick et al., 2000b).

A aplicação de adubos nas lavouras, durante longo período de tempo, tende a aumentar a concentração de P e K na superfície do solo, especialmente na semeadura direta sem revolvimento do solo (Eltz et al., 1989; Schick et al., 2000b). Isto proporciona aumento das concentrações desses nutrientes tanto na água quanto nos sedimentos presentes na enxurrada (Pote et al., 1996; Schick et al., 2000b; Guadagnin, 2003). McIsaac et al. (1995), aplicando 50 kg ha⁻¹ de P no cultivo da soja, obtiveram

concentrações de 0,8 mg L⁻¹ do elemento na água da enxurrada na semeadura direta e de 0,5 mg L⁻¹ na água do cultivo mínimo, sob chuva simulada, nos primeiros 10 dias após a semeadura da cultura.

Trabalhando num Cambissolo Húmico álico, sob rotação de culturas, Bertol (1994a) verificou que as perdas totais de P foram maiores no solo sem cultivo (descoberto) do que no preparo convencional, cultivo mínimo e semeadura direta, enquanto as perdas totais de K não diferiram. A principal razão para esse comportamento, no caso do P, foi a variação nas perdas de solo e água entre os tratamentos estudados, já que as concentrações do elemento foram maiores na semeadura direta do que nos demais tratamentos, especialmente nos sedimentos.

Em trabalho realizado por Guadagnin (2003), durante quatro cultivos, o autor observou que as perdas totais de P e K por erosão hídrica na água da enxurrada em geral diminuíram do início ao final do ciclo das culturas; no caso dos sedimentos, as referidas perdas em geral aumentaram do início ao final dos ciclos.

Em áreas submetidas a sistemas conservacionistas de manejo do solo e com adubação fosfatada, ocorrem, em geral, enxurradas com elevada concentração de P (Daniel et al., 1994). Nestes sistemas, nos quais ocorrem menores perdas totais de água e sedimentos por erosão hídrica do que nos preparos convencionais, as perdas totais de P em geral são menores, apesar da maior concentração desse elemento na superfície do solo nos preparos conservacionistas (Schick et al., 2000b).

Hernani et al. (1999), quantificando as perdas de nutrientes em diferentes sistemas de manejo num Latossolo Roxo, verificaram que, sob a sucessão trigo-soja, a semeadura direta foi o tratamento mais eficaz no controle da erosão, possibilitando, com isso, menores perdas de K do que o sistema grade pesada + grade niveladora.

Trabalhando em sistemas de preparo de solo conservacionistas e convencionais, com rotação de culturas, Langdale et al. (1985) observaram pequenas perdas totais de P na água da enxurrada, quando foram aplicados entre 20 e 50 kg ha⁻¹ desse elemento na semeadura. Esses autores encontraram correlação linear e positiva entre as perdas de solo e de P pela enxurrada, em preparos de solo conservacionistas e convencionais. Os referidos autores observaram, ainda, que, no preparo convencional, a maior parte do P perdido estava adsorvido aos sedimentos da enxurrada. Nos preparos conservacionistas, por outro lado, como as perdas de sedimentos foram baixas, as perdas totais de P por erosão hídrica foram expressivamente diminuídas em relação aos métodos de preparo convencionais.

Experimentos realizados por Daniel et al. (1994) e Schick et al. (2000b) indicaram que as concentrações de P na camada superficial do solo apresentaram correlação linear e positiva com as concentrações desse elemento nos sedimentos presentes nas águas de enxurrada. Pote et al. (1996) também observaram que doses crescentes de P aplicado no solo correlacionaram-se linear e positivamente com os conseqüentes aumentos nas concentrações do elemento na água da enxurrada, resultando em aumentos das perdas totais desse elemento na erosão hídrica.

Embora o P solúvel na água represente uma pequena fração do P total perdido por erosão hídrica, a forma solúvel desse elemento é mais prontamente biodisponível do que aquela ligada aos sedimentos (McIsaac et al., 1995), razão por que pode causar impacto imediato nos locais de deposição, fora do local de origem da erosão.

O objetivo deste trabalho foi quantificar as perdas de P e K na água e nos sedimentos da erosão hídrica sob chuva natural, em diferentes sistemas de manejo de um Cambissolo Húmico aluminico léptico.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado entre novembro de 1999 e outubro de 2001, na região do Planalto Sul Catarinense, situada a 27° 49' de latitude Sul e 50° 20' de longitude Oeste, a 937 m de altitude média, onde o clima é do tipo Cfb, segundo a classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.600 mm. O solo no local do experimento é um Cambissolo Húmico aluminico léptico argiloso

horizonte A moderado, com substrato composto de siltitos + argilitos e declividade média de 0,102 m m⁻¹, descrito em Bertol (1994b). Esta área experimental vem sendo utilizada desde novembro de 1988 para estudos de erosão hídrica sob chuva natural.

Os tratamentos de preparo do solo, distribuídos ao acaso, consistiram em: semeadura direta durante seis anos (SDI₆), semeadura direta durante nove anos (SDI₉), uma escarificação + uma gradagem durante nove anos (E + G₉) e uma aração + duas gradagens durante nove anos (A + 2G₉). O preparo do solo, nos tratamentos pertinentes, foi executado no sentido longitudinal ao declive. Em cada um dos tratamentos, foram utilizadas uma parcela com rotação e outra com sucessão de culturas, enquanto os sistemas de cultivo rotação e sucessão foram considerados como sendo repetição no mesmo tratamento de preparo do solo. As culturas em rotação consistiram de feijão, ervilhaca, milho e aveia e, em sucessão, soja, trigo, soja e trigo. Um tratamento-testemunha, em duas repetições, consistiu de uma aração + duas gradagens em solo sem cultivo durante nove anos (SSC₉).

A área experimental recebeu, desde 1988, 525 kg ha⁻¹ de N, 1.302 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 1.075 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de fertilizantes químicos, distribuídos nos diversos cultivos, principalmente nos de primavera-verão. Além disso, ela foi corrigida com calcário dolomítico em outubro de 1988, com 12 Mg ha⁻¹ e, em outubro de 1992, mais 3,5 Mg ha⁻¹ do mesmo calcário. O SSC₉ não recebeu calcário nem fertilizante nesse período.

Durante os cultivos de feijão e soja, foram adicionados ao solo 31 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 48 kg ha⁻¹ de K₂O, enquanto, nos cultivos de ervilhaca e trigo, os valores foram de 19 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ de K₂O. Nos cultivos de milho e soja, foram adicionados 20 kg ha⁻¹ de N para o milho e, para ambas as culturas, 65 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 95 kg ha⁻¹ de K₂O, além de 20 kg ha⁻¹ de N em cobertura para o milho. Nos cultivos de aveia e trigo, não foram aplicados fertilizantes no momento da semeadura, tendo sido aplicados 45 kg ha⁻¹ de N em cobertura em ambas. Nas SDI₆ e SDI₉, os fertilizantes foram aplicados em cobertura e a lanço no solo, tendo sido semi-incorporados na E + G₉ e incorporados ao solo na A + 2G₉.

A unidade experimental constituiu-se de uma parcela com dimensões de 22,1 x 3,5 m. Ela foi delimitada na extremidade superior e nas laterais por chapas galvanizadas cravadas 0,1 m no solo e, na extremidade inferior, por um sistema coletor de enxurrada, composto de uma calha para receber o material erodido conectada por um cano de PVC ao primeiro tanque, de sedimentação, situado 6 m abaixo da parcela. Este, por sua vez, estava ligado, por meio de um divisor de enxurrada do tipo "Geib", com nove janelas, ao segundo tanque, de armazenagem.

A coleta das amostras de enxurrada nos tanques e o seu processamento no laboratório, para quantificar as perdas de solo e água, foram feitos seguindo o método proposto por Cogo (1978).

Durante os quatro cultivos estudados, foram coletadas e analisadas amostras de enxurradas de 51 chuvas erosivas, a saber: 13 chuvas no primeiro cultivo, 17 no segundo, 12 no terceiro e nove no quarto cultivo. A seleção das enxurradas para a coleta das amostras foi feita de acordo com o volume de chuva precipitado, adotando-se o critério de coletar amostras de enxurradas provenientes de chuvas com volume superior a 20 mm. Essas chuvas, que totalizaram 1.936 mm, representaram, em volume, 73 % do total precipitado nos quatro cultivos (2.639 mm), com a seguinte distribuição relativa: 20 % no primeiro cultivo, 36 % no segundo, 22 % no terceiro e 22 % no quarto cultivo.

Após a coleta das amostras de enxurrada nos tanques para a determinação das perdas de solo e água, eram coletadas, nos mesmos tanques, duas amostras da enxurrada em cada tanque (tratamento), em frascos de vidro de 300 mL cada um. Destas amostras era retirada, imediatamente após a coleta, uma alíquota da água sobrenadante para, após decantação dos sedimentos, efetuar análise do P (Murphy & Riley) e do K (fotômetro de chama), descritos em Tedesco et al. (1995).

As amostras dos sedimentos coletados na enxurrada em cada chuva erosiva foram secas a 60 °C e armazenadas em potes plásticos até o final do ciclo de cada cultura, constituindo uma amostra única dos sedimentos por cultivo. Nestas amostras, foram determinados os teores de P extraível e potássio

trocável (Mehlich-1), descritos em Tedesco et al. (1995). Assim, foram determinadas as concentrações de P e K na água e de P extraível e K trocável no sedimento da enxurrada (ambos em mg dm⁻³). As perdas de P e K na água da enxurrada (g ha⁻¹) foram calculadas pelo produto da concentração dos elementos na água pela perda total de água, enquanto as perdas dos dois elementos nos sedimentos (g ha⁻¹), foram obtidas pelo produto da sua concentração nos sedimentos pela perda total de sedimentos.

Ao final de cada cultivo, foram coletadas amostras do solo na camada de 0-0,025 m, nas quais foram determinados os teores de P extraível e K trocável, pelo método descrito por Tedesco et al. (1995).

Por meio de regressão linear, utilizando o modelo $y = a + b x$, correlacionaram-se as perdas de água com as concentrações de P e K na água da enxurrada e as perdas de solo com as concentrações de P e K nos sedimentos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Perdas de solo e água

As perdas de solo e água foram extraídas de Guadagnin et al. (2003), cujo trabalho foi desenvolvido concomitantemente a este. Elas estão apresentadas com o objetivo de embasar as discussões que serão feitas adiante sobre as perdas de P e K ocorridas pela erosão hídrica.

As perdas de solo foram maiores no SSC₉ do que nos demais tratamentos, conforme esperado (Quadro 1), explicadas pelo preparo de solo

Quadro 1. Perdas de solo e água em 51 chuvas erosivas, em diferentes sistemas de manejo de um Cambissolo Húmico aluminico léptico. Média da rotação e sucessão de culturas - adaptadas de Guadagnin et al. (2003)

Cultivo	SDI ₆	SDI ₉	E + G ₉	A + 2G ₉	SSC ₉	EI ₃₀
Perdas de solo, Mg ha ⁻¹						MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹
1º	0,04	0,02	0,05	0,11	10,94	1.567
2º	0,31	0,34	1,04	3,98	56,85	2.950
3º	0,07	0,06	0,23	0,94	15,77	1.504
4º	0,44	0,29	0,40	0,81	10,11	890
Média	0,21	0,18	0,43	1,46	23,42	1.728
DP	0,17	0,14	0,38	1,49	19,40	753
Perdas de água, % de chuva ¹						Chuva - m ³ ha ⁻¹
1º	1,0	1,0	2,3	3,9	10,5	3.890
2º	2,0	6,1	3,7	7,6	5,9	7.030
3º	1,1	1,8	4,6	13,3	21,1	4.350
4º	27,9	28,4	35,1	58,2	49,0	4.090
Média	7,1	8,8	10,2	18,8	19,3	4.840

SDI₆: semeadura direta com seis anos; SDI₉: semeadura direta com nove anos; E + G₉: escarificação + gradagem com nove anos; A + 2G₉: aração + duas gradagens com nove anos; SSC₉: solo sem cultura com nove anos; 1º: feijão na rotação e soja na sucessão; 2º: ervilhaca na rotação e trigo na sucessão; 3º: milho na rotação e soja na sucessão; 4º: aveia na rotação e trigo na sucessão; DP: desvio-padrão.

convencional e ausência completa de cultivo que manteve a superfície descoberta e exposta ao impacto das gotas da chuva e à enxurrada.

Dentre os tratamentos com cultivo, a A + 2G₉ apresentou perdas de solo 3,4, 8,1 e 7,0 vezes maiores do que na E + G₉, SDI₉ e SDI₆, respectivamente (Quadro 1), o que também foi verificado por Bertol (1994b), Schick et al. (2000a) e Guadagnin (2003). Tal fato é explicado pela quase que completa ausência de cobertura, baixa rugosidade superficial e maior quantidade de partículas prontamente disponíveis para o transporte, além da maior susceptibilidade do solo à erosão em sulcos na A + 2G₉, conforme constatado também por Cogo (1981) e Bertol (1995).

A SDI (média da SDI₆ e SDI₉) reduziu as perdas de solo em cerca de 55 e 87 % em relação a E + G₉ e A + 2G₉, respectivamente, na média dos ciclos culturais (Quadro 1), concordando com Bertol (1994b), Schick et al. (2000a) e Guadagnin (2003). Isto pode ser atribuído aos resíduos vegetais na superfície do solo, os quais dissiparam a energia cinética das gotas da chuva e da enxurrada e diminuíram a velocidade do fluxo, reduzindo também a capacidade de desagregação e de transporte da enxurrada na SDI. Além disso, a ausência do preparo nesse tratamento permitiu o aumento da consolidação do solo, aumentando sua resistência ao sulcamento pela enxurrada.

Em geral, as perdas de água seguiram a mesma tendência das perdas de solo, tendo sido menos afetadas do que estas pelo manejo (Quadro 1). A SDI (média da SDI₆ e SDI₉) reduziu as perdas de água em 2 e 11 % em relação a E + G₉ e A + 2G₉, respectivamente, na média dos ciclos culturais, conforme verificado também por Cogo (1981), Bertol (1994b) e Schick et al. (2000a). Isto é explicado pelo fato de que, independentemente do sistema de manejo, o solo apresenta um limite de infiltração de água, a partir do qual a taxa de enxurrada tende a se igualar em distintos preparos (Bertol, 1994b). O

menor volume de água perdido na SDI (SDI₆ e SDI₉) e E + G₉ é explicado, ainda, pela maior cobertura do solo, especialmente na SDI (SDI₆ e SDI₉) e, no caso da E + G₉, também pela elevada rugosidade superficial, conforme constatado por Schick et al. (2000a) no mesmo experimento.

Concentrações de P extraível e K trocável na camada de 0-0,025 m do solo

Em geral, as concentrações de P e K na camada de 0-0,025 m do solo foram altas (Quadro 2), com exceção do P na A + 2G₉ e no SSC₉, concordando com Eltz et al. (1989), Schick et al. (2000b) e Guadagnin (2003). Isto é explicado principalmente pelas adubações efetuadas no solo e manutenção de resíduos vegetais (exceto no SSC₉), cujos nutrientes e resíduos foram mantidos na superfície em virtude da ausência de preparo na SDI₆ e SDI₉ e do cultivo mínimo na E + G₉. No caso da A + 2G₉, a menor concentração do elemento na superfície do solo está relacionada com o preparo que incorporou os adubos e os resíduos e os distribuiu na camada preparada.

No caso do P, a SDI₆, SDI₉ e E + G₉ aumentaram sua concentração no solo em 3,4 vezes em relação a A + 2G₉, na média dos cultivos (Quadro 2), enquanto, no caso do K, esse aumento foi da ordem de 1,6 vez, revelando que o K efetivamente é mais móvel no solo e concentra-se menos na superfície do que o P nos preparos conservacionistas, conforme constatado também por Eltz et al. (1989) e Schick et al. (2000b). A concentração desses dois elementos na superfície do solo nos preparos conservacionistas contribuiu para aumentar seu transporte pela enxurrada, especialmente quando adsorvidos aos sedimentos.

Concentrações de P e K na água da enxurrada

As concentrações de P na água da enxurrada foram baixas, especialmente na A + 2G₉ e SSC₉ (Quadro 3), concordando com Hernani et al. (1999), Schick (1999) e Schick et al. (2000b).

Quadro 2. Concentrações de P extraível e de K trocável na camada de 0-0,025 m do solo, em diferentes sistemas de manejo durante os quatro cultivos de um Cambissolo Húmico aluminico léptico

Cultivo	SDI ₆		SDI ₉		E + G ₉		A + 2G ₉		SSC ₉	
	P	K	P	K	P	K	P	K	P	K
	mg dm ⁻³									
1º	7	29	12	40	8	47	2	22	1	12
2º	79	345	141	366	48	416	28	180	14	145
3º	84	439	133	186	36	335	8	144	4	110
4º	26	274	10	226	23	333	21	278	10	335
Média	49	272	74	205	29	283	15	156	7	151
DP	33	152	63	116	15	140	10	92	5	117

SDI₆: semeadura direta com seis anos; SDI₉: semeadura direta com nove anos; E + G₉: escarificação + gradagem com nove anos; A + 2G₉: aração + duas gradagens com nove anos; SSC₉: solo sem cultivo com nove anos; DP: desvio-padrão.

Quadro 3. Concentrações de P e K na água da enxurrada, em diferentes sistemas de manejo durante os quatro cultivos de um Cambissolo Húmico aluminico léptico (média das coletas e da rotação e sucessão de culturas)

Cultivo	SDI ₆		SDI ₉		E + G ₉		A + 2G ₉		SSC ₉		Chuva
	P	K	P	K	P	K	P	K	P	K	
	mg L ⁻¹										mm
1º	0,52	9,39	1,22	16,95	0,99	15,12	0,37	9,47	0,35	2,45	389
2º	0,17	5,78	0,46	6,35	0,14	6,17	0,02	5,28	0,01	3,07	703
3º	0,73	11,01	1,40	9,87	0,32	7,75	0,04	5,45	0,05	2,82	435
4º	0,53	8,93	0,61	10,30	0,16	5,20	0,01	3,40	0,01	2,76	409
Média	0,49	8,78	0,92	10,87	0,40	8,56	0,11	5,90	0,11	2,78	484
DP	0,53	8,98	1,00	11,52	0,53	9,40	0,19	6,30	0,18	2,78	500

SDI₆: semeadura direta com seis anos; SDI₉: semeadura direta com nove anos; E + G₉: escarificação+gradagem com nove anos; A + 2G₉: aração + duas gradagens com nove anos; SSC₉: solo sem cultivo com nove anos; DP: desvio-padrão.

Nos preparos conservacionistas (SDI₆, SDI₉ e E + G₉), a concentração de P na água da enxurrada (Quadro 3) foi 5,6 vezes maior do que nos convencionais (A + 2G₉ e SSC₉), na média dos cultivos, concordando com Schick et al. (2000b). As maiores concentrações de P na água da enxurrada dos preparos conservacionistas estão associadas à sua maior concentração na superfície do solo (Quadro 2). Isto é consequência dos resíduos vegetais mantidos na superfície e das adubações fosfatadas adicionadas sobre o solo por ocasião da implantação das culturas. Nos preparos convencionais (A + 2G₉ e SSC₉), por outro lado, a menor concentração de P na camada superficial do solo (Quadro 2) e, conseqüentemente, na água da enxurrada, foi devida, no caso do SSC₉, à ausência de resíduos e adubações e, no caso da A + 2G₉, à incorporação ao solo, pelo preparo, tanto dos adubos aplicados quanto dos resíduos vegetais.

As concentrações de P na água da enxurrada variaram entre os cultivos (Quadro 3), tendendo, na maioria dos casos, a diminuir do início para o final dos ciclos das culturas (dados não mostrados), concordando com Guadagnin (2003). As variações entre cultivos são normais e dependem das variações dos fatores que influenciam a mineralização do elemento, especialmente daqueles relacionados com o clima, os quais influem na atividade biológica, bem como com o volume de chuvas precipitadas em cada cultivo.

As concentrações de K na água da enxurrada foram expressivamente maiores do que as de P, em todos os tratamentos, concordando com Schick (1999), Schick et al. (2000b) e Guadagnin (2003). A maior concentração de K do que de P na água da enxurrada é explicada pelo fato de que este elemento se encontra em maiores concentrações no solo, além de ser mais solúvel e móvel no solo do que o P.

Nos preparos SDI₆, SDI₉ e E + G₉, a concentração de K na água da enxurrada foi 2,2 vezes maior do que no A + 2G₉ e SSC₉, na média dos sistemas de preparo e ciclos culturais (Quadro 3). Este comportamento é explicado pelas altas concentrações do elemento na camada superficial do solo (Quadro 2) nos preparos conservacionistas, decorrente das adubações e do acúmulo de resíduos vegetais na superfície. Nos preparos convencionais (SSC₉ e A + 2G₉), as concentrações de K relativamente altas na água são explicadas, no caso do SSC₉, pelo elevado estoque natural deste elemento no solo e, no caso da A + 2G₉, além do estoque, pela incorporação dos resíduos vegetais e dos adubos ao solo pelo preparo. Os dados obtidos em relação ao K concordam com os de Schick et al. (2000b) e Guadagnin (2003).

As concentrações de K na água da enxurrada variaram amplamente entre os cultivos (Quadro 3) e entre as coletas (dados não mostrados), tendendo a diminuir do início para o final dos ciclos das culturas, concordando com Guadagnin (2003). Isto é explicado do mesmo modo como para o P, discutido anteriormente.

As concentrações de P e K na água da enxurrada afetaram fortemente as perdas desses elementos na água, especialmente no caso do K, cujas concentrações foram, na média dos tratamentos e cultivos, 18 vezes maiores do que as do P (Quadro 3).

Concentrações de P extraível e K trocável no sedimento da enxurrada

As concentrações de P no sedimento da enxurrada (Quadro 4) foram cerca de 230 vezes maiores do que as da água (Quadro 3), na média dos tratamentos e dos cultivos, concordando com os dados de Pote et

al. (1996), Gascho et al. (1998) e Hernani et al. (1999), pelo fato de ser elemento praticamente não solúvel na água, mas adsorvido pelos sedimentos. Nos sedimentos, as referidas concentrações foram 5,4 vezes maiores nos preparos conservacionistas (SDI₆, SDI₉ e E + G₉) do que nos convencionais (A + 2G₉ e SSC₉), conforme constatado também por Schick et al. (2000b) e Guadagnin (2003), explicadas pelas maiores concentrações deste elemento na camada superficial do solo (Quadro 2), decorrentes das razões apresentadas quando da discussão das concentrações desse elemento no solo. Além disso, os sedimentos perdidos por erosão dos preparos conservacionistas provavelmente foram coloidais na sua maioria e, portanto, com maior capacidade de adsorção de elementos químicos do que os dos convencionais, provavelmente não-coloidais na sua maioria.

No caso do K, as suas concentrações nos sedimentos da enxurrada (Quadro 4) foram cerca de 44 vezes maiores do que aquelas encontradas na água (Quadro 3), na média dos tratamentos e dos cultivos, conforme constatado também por Zobisch et al. (1995), Hernani et al. (1999) e Schick et al. (2000b). Isto se deve à alta concentração deste elemento no solo (Quadro 2), decorrente principalmente da aplicação de adubos e da manutenção dos resíduos vegetais no solo, no caso dos tratamentos SDI₆, SDI₉, E + G₉ e A + G₉, e, no caso do SSC₉, do alto estoque natural do elemento no solo. As concentrações de K nos sedimentos foram 2,7 vezes maiores nos preparos conservacionistas (SDI₆, SDI₉ e E + G₉) do que nos convencionais (A + 2G₉ e SSC₉), graças, principalmente, à sua maior concentração na camada superficial do solo (Quadro 2), pelas razões já discutidas anteriormente.

As concentrações de P e K nos sedimentos da enxurrada afetaram as perdas desses elementos nos sedimentos, especialmente no caso do K, cujas

concentrações foram, na média dos tratamentos e cultivos, 3,5 vezes maiores do que as do P (Quadro 4).

Perdas totais de P e K na água da enxurrada

As perdas de P na água da enxurrada foram baixas (Quadro 5), concordando com Schick et al. (2000b) e Guadagnin (2003), explicadas pelas baixas concentrações do elemento na água (Quadro 3). Os sistemas de preparo de solo conservacionistas (SDI₆, SDI₉ e E + G₉) apresentaram perdas de P na água da enxurrada 2,6 vezes maiores do que os convencionais (A + 2G₉ e SSC₉), na média dos tratamentos e dos cultivos, influenciadas principalmente pelas maiores concentrações do elemento na água da enxurrada, já que as perdas de água foram menores nos sistemas conservacionistas (Quadro 1). Assim, o comportamento desses dados, os quais concordam com os observados por de Richardson & King (1995), Rhem et al. (2002) e Schick et al. (2002b), pode ser explicado pelas mesmas razões apresentadas anteriormente, utilizadas para explicar o comportamento das concentrações do P na água da enxurrada. As perdas de P na água variaram entre os cultivos, de acordo com as variações nas perdas de água e com as concentrações do elemento na água da enxurrada, já discutidas.

As perdas do K na água da enxurrada foram elevadas (Quadro 5), concordando com Schick et al. (2000b) e Guadagnin (2003), em decorrência das elevadas concentrações do elemento na água da enxurrada (Quadros 1 e 3). Nos preparos conservacionistas (SDI₆, SDI₉ e E + G₉), as perdas deste elemento na água da enxurrada foram 13 % menores do que nos convencionais (A + 2G₉ e SSC₉), explicadas principalmente pelas maiores perdas de água ocorridas nos preparos convencionais, embora as concentrações do elemento na água da enxurrada tenham sido maiores nos preparos conservacionistas,

Quadro 4. Concentrações de P extraível e K de trocável nos sedimentos da enxurrada, em diferentes sistemas de manejo de um Cambissolo Húmico aluminico léptico (média das coletas e da rotação e sucessão de culturas)

Cultivo	SDI ₆		SDI ₉		E + G ₉		A + 2G ₉		SSC ₉	
	P	K	P	K	P	K	P	K	P	K
mg dm ⁻³										
1°	71	69	414	226	420	122	27	63	7	26
2°	133	304	70	174	139	310	28	193	35	115
3°	189	1.094	68	1.032	68	705	27	329	10	141
4°	16	137	51	284	14	145	8	82	2	100
Média	102	556	151	429	160	320	22	167	29	154
DP	65	370	152	350	156	234	8	106	27	63

SDI₆: semeadura direta com seis anos; SDI₉: semeadura direta com nove anos; E + G₉: escarificação + gradagem com nove anos; A + 2G₉: aração + duas gradagens com nove anos; SSC₉: solo sem cultivo com nove anos; DP = desvio-padrão

Quadro 5. Perdas de P e K na água e de P extraível e K trocável nos sedimentos da enxurrada, em diferentes sistemas de manejo de um Cambissolo Húmico aluminico léptico (média das coletas e da rotação e sucessão de culturas)

Cultivo	SDI ₆		SDI ₉		E + G ₉		A + 2G ₉		SSC ₉	
	P	K	P	K	P	K	P	K	P	K
g ha ⁻¹										
Na água										
1°	8	386	27	445	16	1.168	11	1.168	76	867
2°	72	5.483	156	12.029	15	7.858	24	10.868	19	4.897
3°	22	479	142	727	19	1.118	7	2.141	10	1.807
4°	17	427	115	625	18	851	4	1.470	7	859
Total	119	6.775	440	13.826	68	10.995	46	15.647	112	8.430
Nos sedimentos										
1°	3	3	7	4	21	6	3	7	154	289
2°	41	93	20	62	133	306	109	771	3.857	8.357
3°	14	78	4	62	15	179	23	310	294	2.631
4°	7	59	19	96	6	58	6	67	37	1.026
Total	65	233	50	224	175	549	141	1.155	4.342	12.303

SDI₆: semeadura direta com seis anos; SDI₉: semeadura direta com nove anos; E + G₉: escarificação + gradagem com nove anos; A + 2G₉: aração + duas gradagens com nove anos; SSC₉: solo sem cultivo com nove anos.

concordando com Hernani et al. (1999) e Schick et al. (2000b). As referidas perdas variaram entre os cultivos, em decorrência das oscilações das perdas de água e das concentrações do elemento na água, já discutidas.

Perdas totais de P extraível e K trocável no sedimento da enxurrada

As perdas de P nos sedimentos da enxurrada foram baixas nos tratamentos que envolveram cultivo do solo (SDI₆, SDI₉, E + G₉ e A + 2G₉) (Quadro 5), apesar das altas concentrações do elemento nos sedimentos da enxurrada nesses tratamentos (Quadro 4), concordando com os dados obtidos por Bertol (1994a), Schick et al. (2000b) e Guadagnin (2003). Assim, as baixas quantidades de P perdido nos sedimentos foram influenciadas, principalmente, pelas baixas perdas de solo ocorridas nesses tratamentos (Quadro 1). No caso do SSC₉, a alta perda desse elemento nos sedimentos é explicada, principalmente, pela alta perda de solo, já que a concentração desse elemento nos sedimentos foi baixa.

Nos sedimentos, as perdas de K foram 3,7 vezes maiores nos tratamentos que envolveram preparo do solo (E + G₉ e A + 2G₉) do que naqueles sem preparo (SDI₆ e SDI₉) (Quadro 5), explicadas principalmente pelas maiores perdas de solo ocorridas nos tratamentos com mobilização do solo, principalmente no A + 2G₉ (Quadro 1), já que as

concentrações de K nos sedimentos foram menores nesses tratamentos do que nos conservacionistas (Quadro 4), discordando de Rhem et al. (2002). As perdas de K nos sedimentos foram 20 vezes maiores nos preparos convencionais (A + 2G₉ e SSC₉) do que nos conservacionistas (SDI₆, SDI₉ e E + G₉) (Quadro 5), explicadas porque, na A + 2G₉ e SSC₉, as perdas de solo foram maiores do que nos demais tratamentos (Quadro 1), cujos dados concordam com os de Zobisch et al. (1995), Hernani et al. (1999) e Schick et al. (2000b).

Os dados mostram que, em situações de longos comprimentos de rampa e, ou, elevadas inclinações de declive, as quais favorecem a enxurrada, em conjunto com sistemas inadequados de manejo do solo e na ausência de práticas conservacionistas de suporte, as perdas de P e K podem ser altas, com possíveis reflexos no empobrecimento do solo e na contaminação dos locais de deposição da erosão, fora do seu local de origem.

As perdas de água e solo apresentaram correlação negativa com as concentrações de P e K na água e nos sedimentos perdidos por erosão hídrica (Figura 1). Assim, na medida em que aumentaram as perdas de água e solo, diminuíram as concentrações de P e K, tanto na água quanto nos sedimentos, confirmando que, nos sistemas de manejo conservacionistas, nos quais as perdas de água e solo são menores do que nos convencionais, a água e os sedimentos perdidos por erosão são mais concentrados em P e K.

No caso do P e K presentes na água da enxurrada, as correlações entre as concentrações desses elementos na água e as quantidades de água perdidas foram relativamente altas. No caso do P (Figura 1a), 65 % da concentração do elemento na água foi dependente do volume de água perdido, enquanto, no caso do K, tal relação foi ainda maior, ou seja, 78 % (Figura 1b). Assim, para as condições do experimento, é possível utilizar o volume de água perdido pela enxurrada para inferir sobre a concentração desses elementos na água da enxurrada, principalmente para o K, levando-se em conta o grau de confiabilidade conferido pelos respectivos coeficientes de correlação. As correlações entre as perdas de solo e as concentrações de P e K nos sedimentos perdidos por erosão foram muito baixas, indicadas pelos baixos valores de R^2 , 0,34 para o P (Figura 1c) e 0,35 para o K (Figura 1d). Nesse caso, provavelmente é necessário maior número de dados, obtidos em maior período de tempo, para descrever melhor essa relação, dada a alta variabilidade das perdas de solo, tanto entre tratamentos quanto entre épocas. Essa variabilidade foi menor no caso das perdas de água.

CONCLUSÕES

1. As concentrações de P e K foram maiores nos sistemas de manejo de solo conservacionistas do que nos convencionais, tanto na água quanto nos sedimentos da enxurrada, sendo, ainda, substancialmente maiores nos sedimentos do que na água da enxurrada.

2. As perdas totais de K foram maiores na água do que nos sedimentos da enxurrada, com exceção do manejo SSC₉. Com relação às perdas de P, apenas nos manejos SDI₆ e SDI₉, elas foram maiores na água do que nos sedimentos.

3. No caso da água da enxurrada, as perdas totais de P foram maiores nos manejos SDI₆ e SDI₉, enquanto as perdas de K variaram com os preparos conservacionistas e convencionais, sem apresentarem uma tendência clara.

4. No caso dos sedimentos da enxurrada, as perdas totais de K foram menores nos preparos conservacionistas, mas as de P foram menores apenas nos manejos SDI₆ e SDI₉.

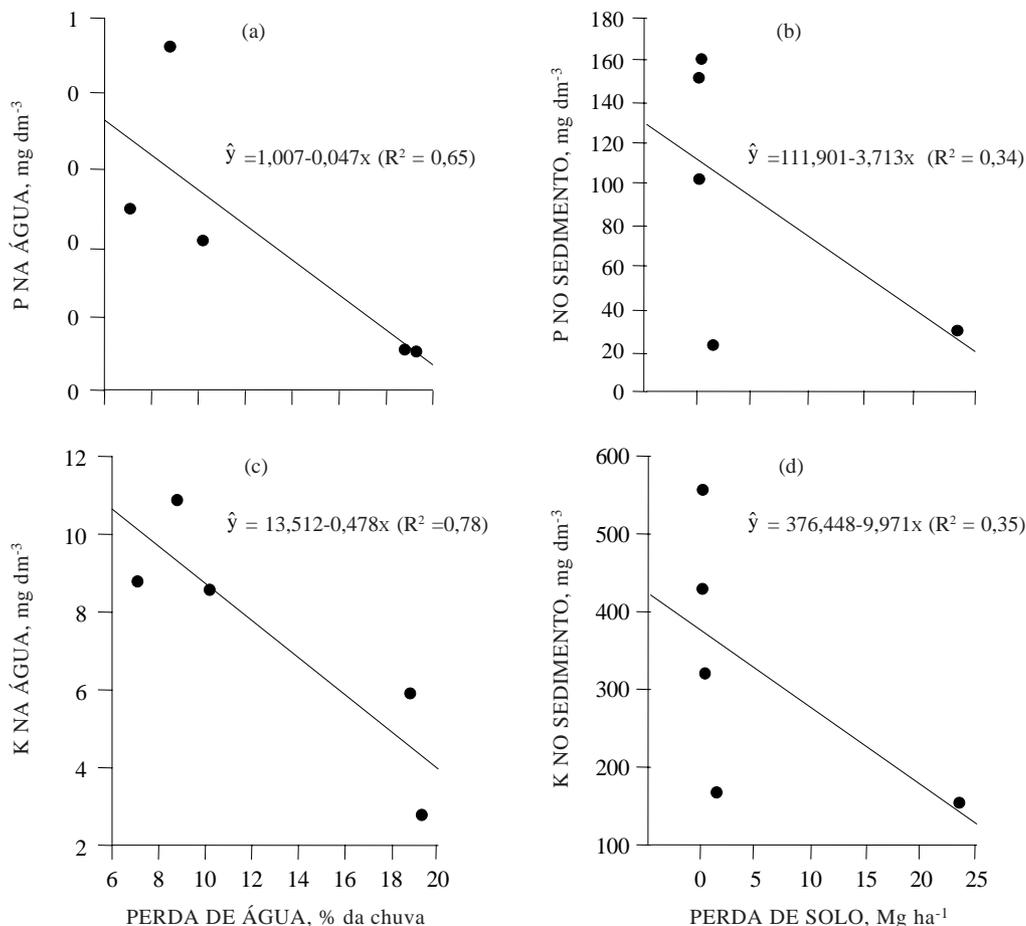


Figura 1. Relação das perdas de água com o P na água (a) e com o K na água (b) e das perdas de solo com o P no sedimento (c) e com o K no sedimento (d) (média de quatro cultivos).

5. As concentrações de P e K na água da enxurrada foram descritas pelo volume de água perdida por erosão hídrica, por meio de modelo de regressão linear simples, sendo a relação negativa; no caso da relação com as perdas de solo por erosão hídrica, as concentrações desses elementos nos sedimentos apresentaram relação linear muito baixa, também negativa.

LITERATURA CITADA

- BERTOL, I. Perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo de solo sob rotação de culturas. *Univ. Des.*, 2:174-184, 1994a.
- BERTOL, I. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico distrófico sob diferentes preparos do solo e rotação de cultura. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:267-271, 1994b.
- BERTOL, I. Comprimento crítico de declive para preparos conservacionistas de solo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 185p. (Tese de Doutorado)
- BERTOL, I.B.; MELLO, E.L.; GUADAGNIN, J.C.; ZAPAROLLI, A.L.V. & CARRAFA, M.R. Nutrient losses by water erosion. *Sci. Agr.*, 60:581-586, 2003.
- COGO, N.P. Uma contribuição à metodologia de estudo das perdas de erosão em condições de chuva natural. I. Sugestões gerais, medição dos volumes, amostragem e quantificação de solo e água da enxurrada (1ª aproximação). In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 2., Passo Fundo, 1978. *Anais. Passo Fundo, EMBRAPA-CNPT*, 1978. p.75-98.
- COGO, N.P. Effect of residue cover, tillage induced roughness, and slope length on erosion and related parameters. West Lafayette, Purdue University, 1981. 346p. (Tese de Doutorado)
- DANIEL, T.C.; SHARPLEY, A.N.; EDWARDS, D.R.; WEDEPOHL, R. & LEMUNYON, J.L. Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management. *J. Soil Water Conserv.*, 40:30-38, 1994.
- ELTZ, F.L.F.; PEIXOTO, R.T.G. & JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparos do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. *R. Bras. Solo*, 13:259-267, 1989.
- FAVARETTO, N. Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium related to water quality and plant nutrition. West Lafayette, Purdue University, 2002. 150p. (Tese de Doutorado)
- GASCHO, G.J.; WAUCHOPE, R.D. & DAVIS, J.G. Nitrate-nitrogen, soluble, and bioavailable phosphorus runoff from simulated rainfall after fertilizer application. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62:1711-1718, 1998.
- GUADAGNIN, J.C. Perdas de nutrientes e carbono orgânico pela erosão hídrica, em um Cambissolo Húmico aluminico léptico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2003. 142p. (Tese de Mestrado)
- GUADAGNIN, J.C.; BERTOL, I.; CASSOL, P.C. & AMARAL, A.J. Perdas de nitrogênio por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo em um Cambissolo Húmico aluminico léptico. *R. Bras. Ci. Solo*, 2003. (No prelo)
- HERNANI, L.C.; KURIHARA, C.H. & SILVA, W.M. Sistemas de manejo do solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:145-154, 1999.
- KING, K.W.; RICHARDSON, C.W. & WILLIAMS, J.R. Simulation of sediment and nitrate loss on a Vertissol with conservation practices. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 6:2139-2145, 1996.
- LANGDALE, G.W.; LEONARD, R.A. & THOMAS, A.W. Conservation practices effects on phosphorus losses from Southern Piedmont watersheds. *J. Soil Water Cons.*, 40:157-160, 1985.
- MELLO, E.L. Erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo sob chuva simulada. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2002. 88p. (Tese de Mestrado)
- McISAAC, G.F.; MITCHELL, J.K. & HIRSCHI, M.C. Dissolved phosphorus concentrations in runoff from simulated rainfall on corn and soybean tillage systems. *J. Soil Water Conserv.*, 4:383-387, 1995.
- POTE, D.H.; DANIEL, T.C. & SHARPLEY, A.M. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:855-859, 1996.
- RHEM, G.; LAMB, J.; SCHMITT, M.; RANDAL, G. & BUSMAN, L. Agronomic and Environmental management of phosphorus. University of Minnesota. <<http://www.scirus.com>> acesso em 20 de set. 5p. 2002.
- RICHARDSON, C.W. & KING, K.W. Erosion and nutrient losses from zero tillage on a clay soil. *J. Agric. Eng. Res.*, 61:81-86, 1995.
- SCHICK, J. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico álico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 1999. 114p. (Tese de Mestrado)
- SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O. & BALBINOT Jr., A.A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico aluminico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:427-436, 2000a.
- SCHICK, J.; BERTOL, I.; BALBINOT Jr., A.A. & BATISTELA, O. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico aluminico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: II. Perdas de nutrientes e carbono orgânico. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:437-447, 2000b.
- SEGANFREDO, M.L.; ELTZ, F.L.F. & BRUM, A.C.R. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em sistemas de culturas em plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:287-291, 1997.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análise de solos, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.
- ZOBISCH, M.A.; RICHTER, C.; HEILIGTAG, B. & SCHLOTT, R. Nutrient losses from cropland in the Central Highlands of Kenya due to surface runoff and soil erosion. *Soil Till Res.*, 33:109-116, 1995.