



VI-032 – ALTERAÇÃO NA METODOLOGIA DO CÁLCULO DE CARGAS CONTAMINANTES DE FÓSFORO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS NO RIO GRANDE DO SUL E POSSÍVEIS EFEITOS NA GESTÃO DO LICENCIAMENTO AMBIENTAL

Luciano Gebler⁽¹⁾

Engenheiro Agrônomo pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC/CAV). Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS). Pesquisador da Embrapa Uva e Vinho (CNPUV) e Professor da Universidade de Caxias do Sul (UCS/CAMVA).

José Antonio Saldanha Louzada

Engenheiro Civil. Doutor em Recursos hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS). Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Ildegardis Bertol

Engenheiro Agrônomo. Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor da Universidade do estado de Santa Catarina (UDESC/CAV)

Roger Robert Ramos

Geógrafo. Mestrando em Ciência do Solo pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC/CAV). Professor da Universidade do Planalto Catarinense (UNIPLAC).

David Jose Miquelluti

Engenheiro Agrônomo. Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP). Professor da Universidade do estado de Santa Catarina (UDESC/CAV)

Endereço⁽¹⁾: BR 285, km 115, caixa postal 115 – Zona rural - Vacaria - RS - CEP: 95200-000 - Brasil - Tel: (54) 3231-8300 - e-mail: lugebler@cnpuv.embrapa.br

RESUMO

O fósforo em excesso no ambiente, principalmente aquele oriundo de áreas agrícolas, pode provocar diversos impactos negativos. É necessária a adequação de metodologias para a avaliação de seu risco em relação aos recursos hídricos de uma bacia. O objetivo deste trabalho foi propor uma adaptação metodológica para quantificar o arraste de fósforo reativo dissolvido e total em áreas agrícolas, baseada na influência de culturas arbóreas, de porte herbáceo e de campo nativo e seu manejo, como parte do processo de análise de licenciamento ambiental pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler (FEPAM/RS), permitindo a evolução do processo de gestão atual para uma metodologia que contemple a análise de zonas de risco. A metodologia utilizada foi o estudo do arraste do fósforo reativo de parcelas cobertas por diferentes culturas agrícolas e relacioná-las com a metodologia do cálculo de cargas máxima diária, atualmente aceita pelos órgãos ambientais do Estado para os processos de licenciamento ambiental de atividades potencialmente poluidoras. Os resultados demonstram que o cálculo de carga de fósforo contaminante, atualmente em uso, pode estar subestimando as condições brasileiras, principalmente para o Rio Grande do Sul, e que a nova metodologia permite introduzir a variação temporal como elemento de análise no processo, permitindo que a análise para licenciamentos adote uma postura dinâmica e pontual.

PALAVRAS-CHAVE: Licenciamento ambiental, TMDL, Contaminação agrícola difusa, FEPAM.

INTRODUÇÃO

O conhecimento da bacia hidrográfica permite utilizar sistemas remotos de decisão, comparando-se inicialmente um padrão e alguns indicadores e, à medida que os dados se tornam mais confiáveis, aplicando-se a modelagem. No Rio Grande do Sul já vem sendo utilizado oficialmente um modelo de suporte a tomada de decisão para a predição de cargas contaminantes, aplicado no licenciamento de atividades potencialmente poluidoras na bacia. Este método de predição relaciona-se com o método de cálculo da carga máxima diária (USEPA, 2008).



Essa carga é utilizada nos EUA com objetivo de reduzir a poluição nos corpos hídricos até que ela retorne aos níveis aceitáveis pela legislação daquele país. No Brasil, a CMD foi aplicada experimentalmente em um estudo de bacia hidrográfica no Paraná, onde se detectou o fósforo agrícola como um dos principais fatores de risco àquele corpo d'água (Bittencourt & Gobbi, 2006).

No cálculo de cargas contaminantes, entretanto, a contribuição de fósforo proveniente de fontes difusas, como a agrícola, é determinada por meio de um valor anual tabelado por área (Rast & Lee, 1983; Deus et al., 1997). Isto contradiz a realidade, pois, ao longo do ano, varia o sistema de cultivo, cobertura de solo, precipitação e contenção de erosão. Ainda, o uso contínuo do solo durante o ano e o clima é diferente das condições nos EUA (Peel et al., 2007).

Além disso, a metodologia propicia que a análise da bacia seja feita para o momento da instalação do empreendimento, e não de forma contínua. Assim, corre-se o risco de que, imperceptivelmente, o fósforo ultrapasse o nível permitido legalmente em água, avaliado o potencial poluidor. Portanto, para o uso desta técnica nas condições do Rio Grande do Sul seria necessária a adaptação na metodologia de avaliação, considerando as condições variáveis de arraste de fósforo reativo na superfície do solo ao longo do ano e a forma de aplicação.

O trabalho foi realizado em duas etapas de campo, em condições de clima, solo e cultivo diferentes, sendo a etapa I em Vacaria, RS, e a etapa II, em Lages – SC.

Dos estudos realizados, conclui-se que há necessidade de se aprofundar as pesquisas referentes às fontes de poluição difusas no meio rural, passando-se a levar em consideração a sua sazonalidade e temporalidade na bacia.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em duas etapas de campo, em condições de clima, solo e cultivo diferentes. A etapa I aconteceu em 2007/2008, quantificando-se o arraste de fósforo reativo total em pomar de maçã sob diferentes manejos, em Vacaria, RS, sobre um Latossolo Bruno. Na etapa II, em 2009/2010, quantificou-se o arraste de fósforo reativo total e dissolvido, em cultivo solteiro de soja, milho e feijão, e em consórcio de milho-feijão, em Lages – SC, sobre um Cambissolo Húmico.

A unidade experimental, ou parcela, apresentava uma área de 38,5 m², com 11 m de comprimento na direção do declive e 3,5 m de largura, delimitada por chapas galvanizadas com 0,3 m de altura x 1,5 m de comprimento. Na parte inferior encontrava-se uma calha coletora que reunia a enxurrada para um cano de 75 mm de diâmetro e 6 m de comprimento até o ponto de coleta (Bertol et al., 2004). Entre as duas parcelas, num espaço de 3,5 m, posicionava-se o simulador de chuvas.

O simulador de chuva (Swanson, 1965), apresenta 10 braços rotatórios com aspersores de chuva VEEJET 80/100 distribuídos helicoidalmente, e cobria uma área de 176,71 m². Em ambas as etapas, aplicaram-se chuvas com intensidade de 64 mm h⁻¹, condizentes com a média das intensidades máximas de chuva de uma hora para período de retorno de 15 anos na região de Lages (SC) e de Vacaria (RS).

Em Vacaria (etapa I) os trabalhos foram executados sobre uma área de Latossolo Bruno distrófico típico, comum na região, subdividida em 10 parcelas, com cinco diferentes formas de manejo de cobertura de solo sob as árvores de maçã, distribuídas ao acaso: cobertura de árvores e solo capinado na entrelinha (A); cobertura de árvores e solo coberto com cultivo de gramíneas - aveia (B); cobertura de árvores e solo coberto com palha de aveia dessecada (C); cobertura de árvores e solo descoberto (D); sem cobertura de árvores e campo nativo (E) (Gobbi et al., 2011).

Simulou-se o evento ambientalmente crítico na parcela D1, com a ocorrência de uma chuva de alta intensidade logo após a aplicação do fertilizante mineral solúvel em um solo sem cobertura. Na condição oposta, foi considerada a parcela E2, com plena cobertura natural e sem adição de fósforo.



Em Lages (Etapa II), também seguindo a metodologia aplicada por Gobbi et al., (2011), foram estabelecidas 10 parcelas experimentais, distribuídas ao acaso, porém ordenadas na forma de cinco tratamentos com uma repetição espacial cada. Em quatro dos tratamentos utilizou-se a semeadura direta sob os cultivos solteiros de: soja (F), feijão (H), milho (I), e consórcio de milho com feijão na entrelinha (G); e, adicionalmente, um tratamento em solo sem cultivo com a superfície totalmente descoberta (J).

De todas as áreas, foram retiradas amostras de solo para determinação da umidade gravimétrica atual do solo, antes da aplicação das chuvas, e amostras de enxurrada durante o período de escoamento superficial, a cada 5 minutos em provetas graduadas, para posterior cálculo da vazão e do volume de água da enxurrada, e também em frascos plásticos de boca larga com volume de 700 mL, as quais foram armazenadas sob refrigeração a 4°C até a execução das análises químicas para o fósforo reativo.

No laboratório a metodologia para análise de fósforo reativo dissolvido (FRD), reativo total (FRT) e reativo em suspensão (FRS), seguiu o descrito no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Phosphorous, 1998), utilizando-se a medição colorimétrica da reação química em amostras com (FRD) e sem filtração (FRT) ($\varnothing < 0,45 \mu\text{m}$). A diferença matemática resultante entre as quantidades determinadas pelos dois processos resultou na quantidade do fósforo reativo suspensão (FRS).

O delineamento experimental foi definido como em blocos com repetição e sobre os valores obtidos foi aplicada a análise estatística por meio do software Assistat[®] e do software Statistical Analysis System - SAS[®]. As análises baseadas no SAS[®] foram conduzidas a partir dos dados de todas as unidades experimentais incluídas nos tratamentos estudados da etapa II, de acordo com o delineamento experimental utilizado, implantadas com um modelo linear de análise de variância com medidas repetidas no tempo.

As comparações entre os valores médios nos diferentes tratamentos em cada tempo de leitura foram testadas por meio do teste DMS de Fisher. Também foram obtidas equações de regressão para os tempos de leitura em cada tratamento.

Para atender as suposições teóricas implícitas dos testes, houve necessidade de se transformar a variável analisada somando-se uma unidade aos seus valores originais e obtendo-se a seguir a função logaritmo natural (transformação logarítmica), conforme sugerido pela análise descritiva dos dados. Todas as análises foram procedidas usando-se o procedimento MIXED do SAS[®]. Para todos os testes efetuados foi considerado o nível mínimo de significância de 5%.

RESULTADOS OBTIDOS

Atualmente, a análise ambiental no Rio Grande do Sul é baseada no estudo das cargas máximas contaminantes para cursos d'água. As informações obtidas para fontes difusas rurais nas análises ambientais neste estado, englobando todas as atividades agrícolas extensivas, com exceção da cultura do arroz irrigado, resultaram no aporte de um valor de fósforo total de $0,000836 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P (Rast & Lee, 1983; Deus et al., 1997). Levando-se em conta somente o valor de fósforo reativo total obtido neste trabalho, os resultados apontam que o valor tabelado em uso atual fica muito aquém do potencial de risco.

Calculando a carga de FRT média dos tratamentos com cobertura vegetal herbácea de F a I, obtém-se o valor médio de $0,191268 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P. Mesmo considerando os princípios de precaução que se deve ter quanto à extrapolação de dados obtidos em parcelas amostrais em experimento de chuvas simuladas para condições de bacia hidrográfica (Avalos et al., 2009), o valor para as culturas anuais é 229 vezes maior do que o valor tabelado para as condições internacionais que vem sendo usado pelos órgãos ambientais estaduais.

Calculando-se os valores para áreas de campo nativo, sem aporte de adubação (parcela E2), representativo da realidade de manejo de áreas de pastejo em campo nativo na região sul do Brasil, os resultados de FRT apontam ainda maior diferença entre o obtido ($1,84034 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e o tabelado, ou seja, de 2.200 vezes, boa parte podendo ser considerado fósforo orgânico mineralizado.

Entretanto, em áreas de pomar de manejo tradicional (cobertura de entrelinhas permanente com capina na linha do pomar (parcela A1), e que necessitam de intensa adubação ($210 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P_2O_5 , em média, segundo



ROLAS (2004), também escolhida por representar os métodos atualmente empregados para manejo de fósforo e cobertura de solo para esta cultura, os valores são ainda maiores, chegando a patamares de $3,8794 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, representando uma diferença 4.640 vezes maior que o valor tabelado.

Não se espera que haja este fluxo de chuva sobre a bacia durante todas as horas, todos os dias, ao longo de um ano. Logo, estes valores devem ser vistos como orientativos e dependentes do regime pluviométrico de cada local. O cálculo deve considerar a quantidade real de horas de chuvas intensas sobre a bacia, sendo que estes valores devem ser adequados, considerando esta situação. Portanto, os valores anuais obtidos acima devem ser divididos por 8.760 h, resultando em valores de fósforo arrastado na ordem de $\text{t ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ de P, sendo daí multiplicado pelo total de horas de chuvas intensas ocorridas no espaço de tempo em análise.

Ainda, considerando que chuvas de intensidade mais baixa que 64 mm h^{-1} também apresentam capacidade erosiva e podem efetuar o transporte do FRT (Sharpley, 1995; Shigaki et al., 2007), é possível realizar exemplo de simulação, utilizando-se o novo índice de arraste de FRT e FRD relacionado às horas de chuva erosiva que cada bacia recebe anualmente, como forma de atender os requisitos da individualização ambiental. Assim, chuva de 20 mm h^{-1} , por exemplo, pode ser considerada como pontos de corte na escolha dos dados de chuva a serem utilizados, pois já apresenta força erosiva suficiente, segundo Lombardi Neto & Moldenhauer (1992).

Portanto, as unidades dos valores aceitos pela tabela da FEPAM passariam a ser considerados como $\text{t ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ de chuva, o que permitiria que o cálculo também atendesse o requisito da variabilidade da área e do tempo de chuva em tempo real.

Além disso, culturas de porte arbóreo, campo nativo da região serrana do RS e culturas de porte herbáceo apresentaram valores diferenciados (pelo menos uma ordem de grandeza), o que permitiu, ao menos, três subdivisões dentro da categoria de fontes difusas de origem agrícola na tabela de aporte de cargas atualmente aceita pela FEPAM. Assim, foram estabelecidos valores orientativos de fósforo total segundo a prática agrícola real da região sul do Brasil, respeitando as características locais. Calculando a carga de FRT média dos tratamentos, temos os resultados apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Valores de FRT obtidos no campo sua variação em relação aos valores tabelados.

Tipo de cobertura	Valores obtidos $\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P	Número de vezes maior que o valor tabelado
Culturas herbáceas	0,191268	229
Culturas arbóreas	1,84034	2.200
Campo nativo	3,8794	3.8794

Estes valores devem ser vistos como orientativos e dependentes do regime pluviométrico de cada local, que deve considerar a quantidade real de horas de chuvas intensas sobre a bacia, adequando estes valores para tal.

Portanto, as unidades dos valores aceitos pela tabela da FEPAM passariam a ser considerados como tonelada por hectare hora de chuva ($\text{t ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), o que permitiria que o cálculo também atendesse o requisito da variabilidade da área e do tempo de chuva em tempo real.

Assim, os resultados permitiram três subdivisões dentro da categoria de fontes difusas de origem agrícola na tabela de aporte de cargas atualmente aceita pela FEPAM, estabelecendo valores orientativos de fósforo total segundo a prática agrícola da região sul do Brasil e respeitando características locais (Tabela 2).

Tabela 2: Valores orientativos de FRT para aplicação no cálculo de cargas máximas contaminantes de fósforo em bacias hidrográficas

Tipo de cobertura	Valores orientativos ton ha ⁻¹ hora de chuva ⁻¹
Culturas herbáceas (baseado na média de F a I)	0,00002183
Culturas arbóreas (baseado em A1)	0,00044285
Campo nativo (baseado em E2)	0,00021008

Um exemplo da simulação aplicada, baseado nos valores de arraste de FRT apresentados na tabela 1, foi aplicado sobre dados de precipitação obtidos junto ao INMET, para os anos de 2008, 2009, 2010 e 2011¹ em uma bacia hipotética, comparando com os valores tabelados atualmente aceitos pela FEPAM.

O resultado do exercício comprovou que há dois tipos de diferenças: aquela relativa ao ano chuvoso (mais chuvas erosivas) versus anos secos (menos chuvas erosivas); e aquela entre o valor tabelado aceito pela FEPAM e o valor calculado pela metodologia proposta. Além da variação das chuvas anuais, é comum a alteração temporal de áreas agrícolas derivada das variações de mercado.

Dessa forma, utilizando a nova metodologia, é possível acompanhar ano a ano, ou mesmo em diferentes épocas dentro do mesmo ano, caso da alternância de culturas de inverno e verão, a variação espacial da contribuição de fósforo aos recursos hídricos em conjunto com a variação da precipitação e da área cultivada ou não.

Na tabela 3, os valores em azul de diferença anual e anualizada significam que houve mais arraste de fósforo que o previsto pelo método em uso pela FEPAM, significando anos com mais chuvas erosivas. Já os valores em vermelho, demonstram anos em que houve menos arraste, significando menos chuvas erosivas no ano.

Tabela 3: Resultados obtidos de simulação para comparação entre os valores propostos e os valores aceitos pela FEPAM

Tipo de cobertura	Área (ha)	P (t ha ⁻¹ h ⁻¹)	2008	2009	2010	2011
			Sub-total [#]	Sub-total	Sub-total	Sub-total
Lavoura	2500	0,00002183	0,2183	0,109	0,273	0,163
Fruticultura	1000	0,00044285	1,774	0,886	2,214	1,328
Campo	4000	0,00021008	3,361	1,680	4,201	2,521
Total proposto pelo método			5,35	2,68	6,69	4,01
FEPAM	7500	0,000836	6,27	6,27	6,27	6,27
t ha ⁻¹ ano ⁻¹						
Diferença anual (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)			-0,92	-3,59	+0,41	-2,26
Diferença anualizada* (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)			+0,64	-3,59	+0,41	+3,49

*Dado mensal aceito pela FEPAM multiplicado pelo número de meses da amostra.

[#]Valor da coluna P (t ha⁻¹ hora de chuva⁻¹) multiplicado pelo número de horas de chuva >20 mm hora⁻¹ de cada ano.

¹ 2008 a partir de abril e 2011 somente janeiro.



Com o uso de pluviogramas, é possível a FEPAM estabelecer a exigência de uso de médias históricas de chuvas nas bacias em análise, ficando sob sua responsabilidade estabelecer o período de tempo mínimo para análise do comportamento de chuvas, como foi feito, por exemplo, para o cálculo das vazões mínimas de 7 dias para período de retorno de 10 anos (índice Q_7^{10}) dos cursos d'água (Baena et al., 2004).

O uso de média móvel, nestes casos, serve também para considerar os ciclos de variação natural ou provocada, como o ciclo de mudanças climáticas que se está presenciando atualmente.

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

O risco de contaminação de recursos hídricos em bacias rurais pode estar sendo subestimado em algumas áreas, segundo a metodologia atual.

É necessária aplicação de regras diferenciadas em relação ao tipo de ocupação humana nas bacias, quando houver a necessidade de estudos de impacto ambiental para introdução de novos empreendimentos.

A introdução dos princípios de análise ambiental local, propostos por esta metodologia, indica já ser possível a mudança dos paradigmas de análise e licenciamento ambientais atuais, para modelos dinâmicos e pontuais, baseados no zoneamento do risco, com vistas à redução dos riscos de eutrofização e perda de qualidade dos recursos hídricos no estado do Rio Grande do Sul.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AVALOS, J. M. M.; FOUZ, P. S.; VÁZQUEZ, E. V.; GONZÁLEZ, A. P.; BERTOL, I. Crop residue effects on organic carbon, nitrogen and phosphorous concentrations and loads in runoff water. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 40, p. 200–213, 2009.
2. BAENA, L. G. N.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; CALIJURI, M. L. Espacialização da Q_7^{10} , $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$ visando à gestão dos recursos hídricos: estudo de caso para a bacia do rio Paraíba do Sul. *Engenharia na Agricultura*, v.12, n.1, p.24-31, 2004.
3. BERTOL, I. et al. Erosão hídrica em um nitossolo háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada: perdas de nutrientes e carbono orgânico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n. 28, p. 1045-1054, 2004.
4. BITTENCOURT, S.; GOBBI, E. F. Carga máxima de fósforo admissível ao reservatório piraquara ii, uma aplicação do processo TMDL. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, p.595-603, 2006.
5. DEUS, A. B. S. de; LUCA, S. J. de; PRATES, S. H. *Estudo Comparativo de cargas poluidoras na Bacia do Rio Caí/RS*. In: Simpósio Internacional Brasil/Alemanha de Gerenciamento Ambiental, Tecnologias Compatíveis e Biodiversidade, 1997, Caxias do Sul.
6. GOBBI, E.; BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; WERNER, R. S.; RAMOS, R. R.; PAZ-FERREIRO, J.; GEBLER, L. Erosão hídrica associada a algumas variáveis hidrológicas em pomar de maçã submetido a diferentes manejos do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n. 35, p. 1013-1024, 2011.
7. LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUSER, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). *Bragantia*, v.51, p.189-196, 1992.
8. PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Update world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 11, p.1633-44, 2007.
9. PHOSPHOROUS. In: CLESCERI, L. S.; GREENBERG, A. E. EATON, A. D. *Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater*. 20. ed. Washington: American Public Health Association, 1998. p. 123–48.
10. RAST, W.; LEE, G. F. Nutrient loading estimates for lakes. *Journal of Environmental Engineering*, v. 109, n. 2, p. 502-78, 1983.
11. ROLAS - Rede Oficial de Análise de Solo e de Tecido Vegetal. Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400p.



12. SHARPLEY, A. Identifying sites vulnerable to phosphorous loss in agricultural runoff. Journal of Environmental Quality, v.24, p.947-51, 1995.
13. SHIGAKI, F.; SHARPLEY, A.; PROCHNOW, L. I. Rainfall intensity and phosphorus source effects on phosphorus transport in surface runoff from soil trays. Science of Total Environment. v.373, p.334-243, 2007.
14. SWANSON, N. P. A rotating-boom rainfall simulator. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, v.8 p.71-72, 1965.
15. USEPA - United States Environmental Protection Agency. Handbook for developing watershed TMDLs. Washington: USEPA, 2008. 168p.