

Avaliação do risco de degradação da qualidade da água em bacias hidrográficas agrícolas em situação de cheia

Risk assessment of water quality deterioration during flood events in an agricultural catchment

Maria C. Gonçalves¹, Tiago B. Ramos², Maria A. Branco¹, David Brito³, José Tavares¹, Sara Rodrigues¹, Ângela Prazeres¹, José C. Martins¹, Manuel L. Fernandes¹ e Fernando P. Pires¹

¹*Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, UEIS Sistemas Agrários e Florestais e Sanidade Vegetal, Portugal, email: maria.goncalves@iniav.pt.*

²*CEER—Centro de Engenharia dos Biosistemas, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.*

³*Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.*

Resumo

As cheias são fenómenos naturais responsáveis pelo transporte de sedimentos e de nutrientes para as linhas de água, originando picos de poluição que podem conduzir à eutrofização dos rios e reservatórios e à contaminação da água potável. Este trabalho teve como objectivos: (i) estudar a evolução da qualidade da água durante as cheias ocorridas no rio Enxóe (Alentejo) ao longo do ano hidrológico 2010-2011; (ii) determinar a carga de sedimentos e de nutrientes transportados para o reservatório da bacia hidrográfica; e (iii) determinar a origem dos sedimentos e nutrientes transportados. O rio Enxóe, com uma bacia hidrográfica de 60,8 km², foi monitorizado para a concentração de sedimentos suspensos (SSC), fósforo total (TP), fósforo particulado (PP), fósforo solúvel reactivo (SRP) e nitratos (NO₃⁻). As concentrações de SSC, TP, PP, SRP e NO₃⁻ variaram entre 1,6-1447,9, 0,05-5,15, 0-4,77, 0-0,66 e 0-27,84 mg L⁻¹, respectivamente. As perdas de sedimentos e de fósforo ao longo da bacia foram função da capacidade de transporte das linhas de água e da disponibilidade das partículas, enquanto que as perdas de nitratos foram relacionadas com as propriedades hidráulicas do solo e as práticas agrícolas. A erosão do solo totalizou 2517,8 t (414 kg/ha), ocorrendo sobretudo durante as cheias (55,3%). As perdas de fósforo atingiram os 5285 kg (0,87 kg/ha), ocorrendo também durante os períodos de cheias (76,2 %). Com base nos padrões de histerese, 46,4 e 52,1% dos sedimentos e do fósforo transportados, respectivamente, tiveram origem em depósitos sedimentados ao longo do leito do rio e da erosão das margens do rio, enquanto que as restantes perdas foram provenientes de zonas distantes, nomeadamente, campos agrícolas. As perdas de nitratos totalizaram 204,8 t (33,7 kg/ha; 15,2% durante as cheias), chegando ao rio por escoamento subsuperficial (84,8%), principalmente durante o Outono e Primavera. A implementação de práticas de conservação, tais como a adopção de técnicas de sementeira directa e a preservação da vegetação ripária poderão reduzir substancialmente as perdas de sedimentos e de nutrientes para o reservatório.

Palavras-chave: Eventos de cheia; histerese; nitratos; fósforo; sedimentos suspensos.

Abstract

Floods are natural events responsible for driving sediments and nutrients to water bodies, resulting in pollution peaks that can lead to eutrophication and to the contamination of drinking waters. The objective of this study was: (i) to monitor water quality during flood events occurred in the Enxoé river (Alentejo) during one hydrological year (2010-2011); (ii) to quantify the sediments and nutrients loads to the reservoir, and (iii) to determine sediment and nutrient sources. The temporary river of Enxoé, with a catchment area of 60,8 km², was monitored for suspended sediment concentration (SSC), total phosphorous (TP), particulate phosphorous (PP), soluble reactive phosphorous (SRP), and nitrate (NO₃⁻). SSC, TP, PP, SRP, and NO₃⁻ concentrations varied between 1,6–1447,9, 0,05–5,15, 0–4,77, 0–0,66, and 0–27,84 mg L⁻¹, respectively. Sediment and phosphorous transport was influenced by the stream transport capacity and particle availability, whereas nitrate loads were influenced by soil hydraulic characteristics and land management. Annual sediment yield summed 2517,8 t (414 kg ha⁻¹) with 55,3% being transported during flood events. Likewise, phosphorous transport amounted 5285 kg (0,87 kg ha⁻¹), wherein 76,2% occurred during floods. Based on their hysteresis patterns, 46,4 and 52,1% of sediment and phosphorous transport, respectively, was originated from river deposited sediments and nearby source areas, while the remaining losses had origin in distant agricultural areas. Annual nitrate loads were relatively low (204,8 t; 33,7 kg ha⁻¹; 15,2% during flood events), reaching the river through subsurface flow (84,8%), mostly during autumn and spring. The implementation of conservation practices, such as adopting no-tillage techniques and preserving riparian vegetation in the river bed should reduce substantially sediment and nutrient loads to the reservoir.

Keywords: Flood events; Hysteresis patterns; Nitrate; Phosphorous; Suspended sediments.

Introdução

As cheias são fenómenos naturais, responsáveis pelo transporte de sedimentos e de nutrientes para as linhas de água, podendo originar picos de poluição que podem conduzir à eutrofização dos rios e reservatórios e à contaminação da água potável e dos ecossistemas. Nas regiões mediterrâneas, devido às características do clima, dos solos e das práticas agrícolas associadas, o fenómeno das cheias contribui significativamente para a remoção de sedimentos, fósforo e azoto do solo (Torrent *et al.*, 2007). Este problema é ainda mais agravado no caso dos rios temporários, onde as primeiras cheias após o período seco do Verão, são responsáveis pela transferência de quantidades significativas de sedimentos e nutrientes para os rios e reservatórios.

Dos nutrientes transportados para os meios aquáticos destacam-se aqui o fósforo e o azoto. O fósforo, que é considerado o factor limitante para a produção primária, é normalmente transferido por escorrimento superficial, com a erosão do solo, ou seja, por ligação às partículas de solo, através de interacções da sua forma inorgânica com o ferro e alumínio (Olli *et al.*, 2009). O azoto, que desempenha também um papel importante na produção autotrófica, nomeadamente na forma de nitratos, é mais frequentemente transportado nas águas de drenagem (Oeurng *et al.*, 2010).

A monitorização da concentração daqueles nutrientes nas linhas de água e reservatórios é importante para a determinação do seu estado trófico, mas devido ao carácter

esporádico das cheias, os picos de poluição podem facilmente escapar aos sistemas de monitorização clássicos baseados em amostragens sazonais. É, portanto, essencial estabelecer programas de monitorização contínua para melhor compreender o regime hidrológico dos rios e a dinâmica dos sedimentos e dos nutrientes nas bacias hidrográficas, nomeadamente, das bacias com rios temporários. Contudo, a monitorização contínua dos elementos, só por si, não fornece informação sobre a origem dos sedimentos e nutrientes que são arrastados para as linhas de água. Nesse sentido, os padrões de histerese ao nível da relação concentração-caudal são frequentemente analisados para obter aquela informação (Butturini *et al.*, 2006).

Os objectivos deste estudo são: (i) identificar a variabilidade temporal dos sólidos suspensos totais, fósforo solúvel e particulado e nitratos, no rio temporário do Enxoé, durante um ano hidrológico (Setembro de 2010 a Agosto de 2011); (ii) determinar a carga de sedimentos e de nutrientes transportados para o reservatório da bacia durante o período de monitorização; e (iii) identificar a origem dos sedimentos e nutrientes e os processos associados, com base na interpretação dos padrões de histerese dados pela relação concentração-caudal.

Material e métodos

Descrição da bacia hidrográfica

Este estudo foi realizado na bacia hidrográfica (60,8 km²) localizada a montante do reservatório do rio Enxoé (Serpa, Alentejo), um dos afluentes do rio Guadiana. Os principais tipos de solo são os Luvisolos (em 47% da área), Cambissolos (31%), Calcissolos (14%) e Vertissolos (6%) (IUSS Working Group WRB, 2006). O uso do solo compreende o olival (18,3%), montado de azinho (17,6%) e as culturas arvenses anuais de sequeiro (17%). O clima da região é sub-húmido seco a semi-árido. A precipitação média anual é de 500 mm, distribuída irregularmente ao longo do ano e com intensidade muito variável. Entre o Outono e a Primavera, o rio apresenta frequentemente picos de caudal após chuvadas intensas e encontra-se seco no Verão. A temperatura média anual é de 16°C, e a evapotranspiração de referência varia entre 1200 e 1300 mm/ano.

Monitorização da qualidade da água no rio Enxoé

A qualidade da água do rio Enxoé foi monitorizada junto à aldeia de Vale de Vargo entre Setembro de 2010 e Agosto de 2011. Uma sonda de medição automática (YSI 6920 Incorporated, Ohio, EUA) foi usada para monitorizar automaticamente o nível da água no rio e a turbidez (nefelometria). O caudal (Q) do rio foi calculado com a equação de Gauckler-Manning, a partir do nível da água medido pela sonda e da geometria do leito do rio.

A sonda controlava um colhedor automático de amostras de água (EcoTech Umwelt-Meßsysteme GmbH, Bonn, Alemanha), com 8 frascos de 2 L cada, programado para colher amostras sempre que se verificava uma variação do nível da água no rio de 10 cm. Foram ainda colhidas amostras fora dos períodos de cheia. Nas amostras de água monitorizaram-se a concentração de sedimentos suspensos (SSC), o fósforo total (TP), o fósforo particulado adsorvido às partículas >0,45 µm do material suspenso (PP), o fósforo solúvel reactivo (SRP) e os nitratos (NO₃⁻). As amostras de água foram filtradas, com filtros de fibra de vidro pré-tarados (GFF 0,75 µm), para determinar os SSC. Os

sedimentos retidos foram secos na estufa a 50° C durante 24 h. Alíquotas de cada amostra foram filtradas com um filtro de acetato de celulose (0,45 µm), e analisadas para as concentrações de fósforo total dissolvido (TDP), SRP e NO₃⁻. O TP foi determinado nas amostras de água bruta (não filtradas). O TP e o TDP foram quantificados, depois da digestão com ácidos sulfúrico e nítrico, colorimetricamente, por reacção com o molibdato de amónio. O SRP foi também quantificado colorimetricamente, a partir da mesma reacção (Murphy e Riley, 1962). O PP foi determinado por diferença entre as concentrações de TP e de TDP. A concentração de NO₃⁻ foi medida directamente na solução filtrada com um equipamento de fluxo segmentado (Hendriksen e Selmer-Olsen, 1970).

Cargas de sedimentos e de nutrientes

As cargas para o reservatório foram calculadas a partir do integral no tempo, do produto das concentrações pelo caudal. As cargas dos elementos particulados foram obtidas a partir dos valores de turbidez medidos automaticamente, uma vez que a correlação desta propriedade com aqueles elementos é elevada (R² entre 0,792 e 0,897).

Histerese na relação concentração-caudal

A histerese para um dado caudal é caracterizada por diferenças na concentração de um elemento, no ramo ascendente e descendente do hidrograma (Figura 1). As variações na relação concentração-caudal resultam em trajectórias no sentido horário quando a concentração é mais alta no ramo ascendente (indicando cargas provenientes de locais próximos i.e., margens e leito do rio e escoamento superficial), e no sentido anti-horário quando a concentração é superior no ramo descendente da cheia (indicando uma transferência mais lenta e difusa dos elementos para o rio, proveniente de elementos de locais mais remotos, i.e., resultante da erosão da parte montante da bacia e de escoamentos subsuperficiais) (Oeurng *et al.*, 2011; Bowes *et al.*, 2005).

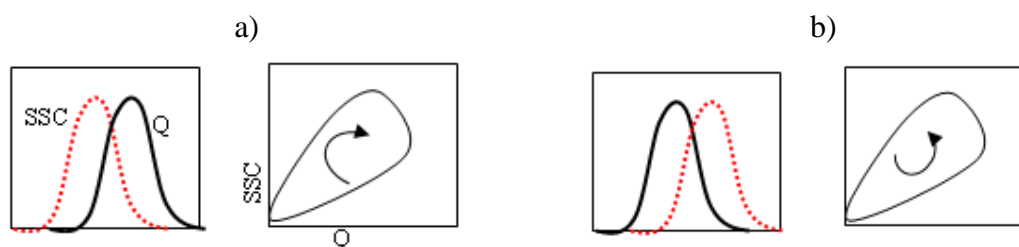


Figura 1 – Padrões da histerese. a) Sentido horário, o pico de concentração chega antes do pico da cheia (entradas rápidas do elemento no rio - locais próximos). b) Sentido anti-horário, o pico de concentração chega depois do pico da cheia (transferência para o rio mais lenta e difusa - locais mais afastados).

A análise das concentrações de SSC, TP, PP, SRP e NO₃⁻ em função do caudal, foi efectuada, para cada evento de cheia, através do modelo empírico de Butturini *et al.* (2006). Este modelo descreve o comportamento da histerese a partir de 2 parâmetros: as alterações na concentração dos solutos (ΔC) e a área e o padrão rotacional de cada curva da histerese (ΔR). O parâmetro ΔC (%) descreve as alterações relativas na concentração dos solutos pela equação:

$$\Delta C = (C_s - C_b) / C_{\max} * 100 \quad (1)$$

em que C_b e C_s são as concentrações do soluto antes da cheia ter início e no pico do caudal, respectivamente, e C_{max} é a concentração máxima observada durante essa cheia. ΔC varia entre -100 e 100%, sendo os valores positivos indicativos de um aumento da concentração e valores negativos de uma diluição. O parâmetro ΔR (%) integra a informação relativa à grandeza (área) e direção (padrão rotacional) do fenómeno de histerese na relação concentração-caudal ($C-Q$):

$$\Delta R = R A_h 100 \quad (2)$$

em que A_h é a área da histerese no histograma da relação $C-Q$ e R resume o padrão rotacional da histerese. O valor de A_h é estimado após normalização do caudal e das concentrações. Se o valor de A_h for próximo de zero, a área da curva de histerese é menor, mais linear e a concentração no ramo ascendente é similar à do ramo descendente. Se o valor de A_h for próximo de 1, a área da curva de histerese é maior, e a concentração do ramo ascendente é diferente da do ramo descendente. Por outro lado, se o padrão rotacional da histerese for no sentido dos ponteiros do relógio então $R=1$, se for no sentido anti-horário, $R=-1$, e para situações complexas (padrão rotacional em forma de 8) ou sem histerese, $R=0$. O parâmetro ΔR varia também entre -100 e 100%.

A variabilidade dos 2 parâmetros incluídos no modelo empírico de Butturini *et al.* (2006) pode ser descrita num plano unitário ΔC vs. ΔR , onde 4 regiões são identificadas de acordo com o aumento de concentração/diluição do elemento e o padrão rotacional (horário e anti-horário) da histerese. Esta informação permite clarificar a fonte (origem) dos solutos e do material particulado e identificar diferentes tipos de cheias.

Resultados e discussão

Durante o período monitorizado (Setembro de 2010 a Agosto de 2011) foram registados nove eventos de cheia. Estes eventos ocorreram durante o Outono (3), Inverno (5), e Primavera (1). No entanto, só em 5 destes eventos foi possível obter informação, suficientemente detalhada, para a análise do fenómeno de histerese (Figura 2). Todas as cheias apresentaram grandes variações de caudal, distinguindo-se múltiplos picos, com excepção da primeira cheia de Outono e da cheia na Primavera. Durante o Verão e até à primeira cheia, o rio não apresentou caudal.

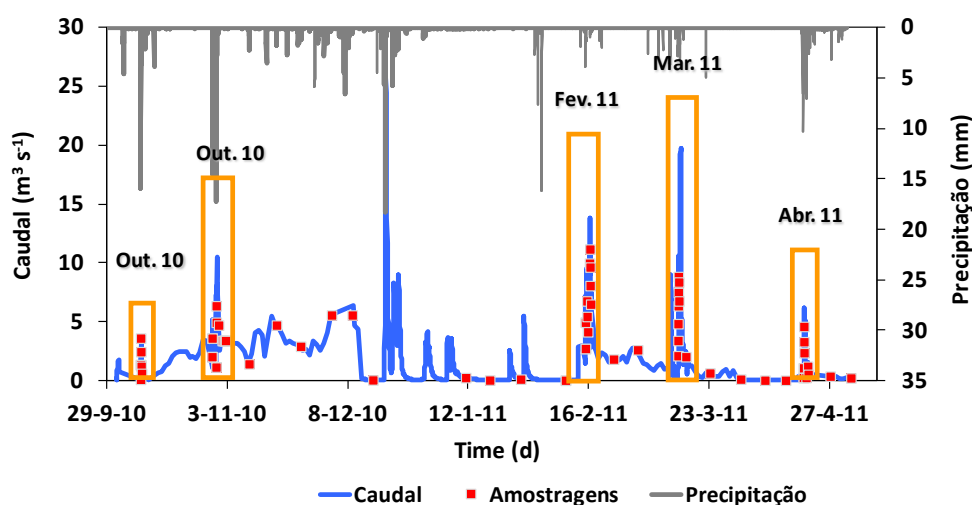


Figura 2 – Precipitação (mm) e caudal ($m^3 s^{-1}$) no rio Enxó durante o período monitorizado. Podem observar-se as 5 cheias acompanhadas (assinaladas a laranja) e as amostragens efectuadas.

As concentrações de SSC, TP, PP, SRP e NO_3^- variaram entre 1,6–1447,9, 0,05–5,15, 0–4,77, 0–2,02 e 0–27,84 mg L^{-1} , respectivamente. Os valores máximos de todos os elementos foram sempre observados durante as cheias, nomeadamente no Outono e Primavera, estando relacionados com a erosão provocada por chuvadas intensas e com as operações culturais associadas à instalação das culturas arvenses anuais de sequeiro.

O padrão da histerese variou ao longo do ano (Figura 3). A SSC, TP e PP (elementos particulados) apresentaram geralmente uma trajetória horária durante as cheias ocorridas entre o Outono e o meio do Inverno e uma trajetória anti-horária durante o fim do Inverno e Primavera. O SRP apresentou trajetórias mistas dependendo da cheia. A grande variabilidade na resposta SRP-Q indica que, a partir do número de amostragens realizadas, não foi possível detectar um padrão para o rio Enxoe. O NO_3^- apresentou geralmente um padrão de histerese anti-horário, no qual o pico da concentração aparece apenas depois do pico da cheia. No entanto, na cheia de Fevereiro, a relação NO_3^- -Q registou um padrão horário, certamente devido a práticas de fertilização locais, nomeadamente adubações de cobertura dos cereais de inverno.

O comportamento dos elementos particulados foi, assim, diferente dos elementos solúveis. Enquanto os primeiros foram arrastados essencialmente de locais próximos, tais como, depósitos sedimentados nos leitos do rio ou da degradação das suas margens, os elementos solúveis chegaram predominantemente ao rio por difusão de locais mais afastados, nomeadamente de terrenos agrícolas situados a montante. O transporte de sedimentos e de fósforo ao longo da bacia foi assim relacionado com a capacidade de transporte das linhas de água e com a disponibilidade das partículas, enquanto o transporte de nitratos foi relacionado com as propriedades hidráulicas do solo e as práticas agrícolas.

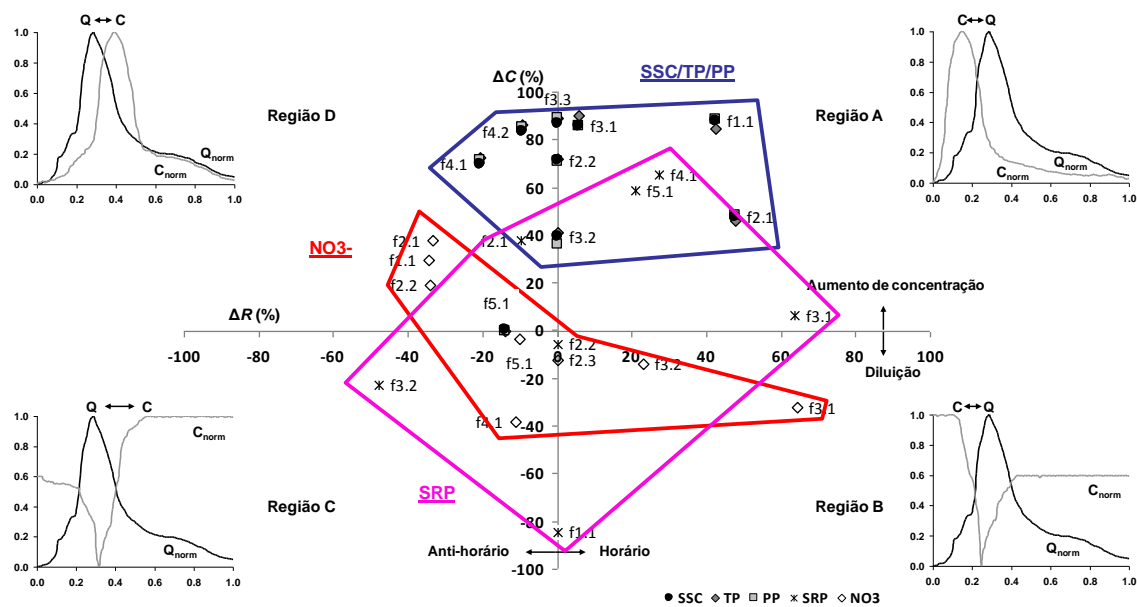


Figura 3 – Plano unitário ΔC vs. ΔR para a histerese verificada na relação concentração-caudal da concentração de sedimentos suspensos (SSC), fósforo total (TP), fósforo particulado (PP), fósforo solúvel reactivo (SRP) e nitratos (NO_3^-) de cada um dos cinco eventos de cheia monitorizados. Os símbolos $f_{i,j}$ correspondem à cheia i monitorizada ($i=1-5$) e o j ao pico de descarga ($j=1-3$). Relações Concentração-Caudal típicas estão representadas para cada região do plano unitário ΔC vs. ΔR .

A erosão do solo atingiu 2517,8 t (414 kg/ha), em que 55,3% corresponderam a sedimentos transportados durante as cheias. As perdas de fósforo atingiram 5285 kg (0,87 kg/ha), com 76,2% ocorrendo durante os mesmos períodos de cheia. Baseado no comportamento da histerese, 46,4 e 52,1% dos sedimentos e do fósforo transportados para a albufeira, respectivamente, tiveram origem nos depósitos no leito e nas margens do rio, enquanto as restantes perdas foram provenientes dos campos agrícolas. As perdas de nitratos totalizaram 204,8 t, sendo este um valor relativamente baixo (33,7 kg/ha). As maiores perdas de NO_3^- foram observadas durante o Outono e a Primavera, períodos em que os agricultores tradicionalmente procedem às adubações das culturas, chegando ao rio maioritariamente por escoamento subsuperficial (84,8%). Apenas 15,2% das perdas de nitratos foram registadas durante as cheias.

Conclusões

Os 5 eventos de cheias, monitorizados entre Setembro de 2010 e Agosto de 2011, revelaram grande variabilidade sazonal ao nível da dinâmica dos sedimentos e dos nutrientes na bacia hidrográfica do Enxóe. As concentrações máximas de todos os elementos foram sempre observadas durante, ou logo após, as cheias, nomeadamente no Outono e Primavera. A dinâmica daqueles elementos na bacia está assim relacionada com a erosão provocada por chuvadas intensas e o uso do solo.

O padrão da histerese variou ao longo do ano. As concentrações de SSC, TP e PP (elementos particulados) apresentaram geralmente uma trajetória horária durante as cheias ocorridas no Outono até ao meio do Inverno, e uma trajetória anti-horária durante o fim do Inverno e Primavera. A concentração de SRP apresentou trajetórias mistas dependendo da cheia, nada se podendo concluir sobre a sua dinâmica. A concentração de NO_3^- apresentou geralmente um padrão de histerese anti-horário.

As perdas de sedimentos e fósforo ao longo da bacia foram relacionadas com a capacidade de transporte das linhas de água e com a disponibilidade das partículas, enquanto as perdas de nitratos foram relacionadas com as propriedades hidráulicas do solo e as práticas agrícolas. Os valores médios de erosão do solo (414 kg/ha) e das perdas de NO_3^- (33,7 kg/ha) foram relativamente baixos, embora as perdas de fósforo tenham sido consideradas altas (0,87 kg/ha). A implementação de práticas de conservação, tais como a adopção de técnicas de sementeira directa e a preservação da vegetação ripária (impedindo o pastoreio nas margens) deverão prevenir a degradação das margens do rio e reduzir substancialmente as perdas de sedimentos e de nutrientes para o reservatório.

Agradecimentos

Estudo financiado pelo projecto PTDC/AGR-AAM/098100/2008 EUTROPHOS e SOE1/P2/F146 AGUA FLASH.

Bibliografia

Bowes, M. J., House, W. A., Hodgkinson, R. A., Leach, D. V. 2005. Phosphorus-discharge hysteresis during storm events along a river catchment: the River Swale, U.K. *Water Research* 39: 751-762.

- Butturini, A., Gallart, F., Latron, J., Vazquez, E., Sabater, F. 2006. Cross-site comparison of variability of DOC and nitrate c-q hysteresis during the autumn-winter period in three Mediterranean headwater streams: a synthetic approach. *Biogeochemistry* 77: 327-349. DOI:10.1007/s10533-005-0711-7.
- Hendriksen, A., Selmer-Olsen, A.R. 1970. Automatic methods for determination of nitrate and nitrite in water and soil extracts. *The Analyst* 95: 514-518. DOI:10.1039/AN9709500514.
- IUSS Working Group WRB. 2006. World reference base for soil resources 2006. 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.
- Murphy, J., Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphorous in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 12: 31-36. DOI:10.1016/S0003-2670(00)88444-5.
- Oeurng, C., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J.M. 2010. Temporal variability of nitrate transport through hydrological response during flood events within a large agricultural catchment in south-west France. *Science of the Total Environment* 409: 140-149. DOI:10.1016/j.scitotenv.2010.09.006.
- Oeurng, C., Sauvage, S., Coynel, A., Maneux, E., Etcheber, H., Sánchez-Pérez, J. M. 2011. Fluvial transport of suspended sediment and organic carbon during flood events in a large agricultural catchment in southwest France. *Hydrological Processes* 25: 2365–2378. DOI:10.1002/hyp.7999.
- Olli, G., Darracq, A., Destouni, G. 2009. Field study of phosphorous transport in drainage reaches. *Journal of Hydrology* 365: 46-55. DOI:10.1016/j.jhydrol.2008.11.039.
- Torrent, J., Barberis, E., Gil-Sotres, F. 2007. Agriculture as a source of phosphorus for eutrophication in southern Europe. *Soil Use and Management* 23: 25-35. DOI:10.1111/j.1475-2743.2007.00122.x.