

Monitoramento hidrossedimentológico automático em uma microbacia rural inserida no programa de pagamento por Serviços Ambientais ⁽¹⁾

Eduarda Freitas Storace e Silva⁽²⁾; Alexandre Ortega Gonçalves ⁽³⁾; Pedro Gehard ⁽⁴⁾; Maria Lucia Zuccari ⁽⁵⁾.

⁽¹⁾ Trabalho executado com aporte de recursos da The Nature Conservancy Brasil. ⁽²⁾ Graduanda em Gestão Ambiental, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba. ⁽³⁾ Engenheiro Agrônomo, DSc., Pesquisador Embrapa Solos/Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna (SP). ⁽⁴⁾ Graduação em Ciências Biológicas, DSc, Pesquisador Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna (SP). ⁽⁵⁾ Bacharelado em Ciências Biológicas, DSc, Pesquisadora Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna (SP).

Resumo – A quantificação de sedimentos em suspensão é essencial no monitoramento e estudos hidrossedimentológico em bacias hidrográficas, e destaca que os resultados refletem indiretamente a ação do homem sobre as terras, por meio das diferentes proporções de uso e cobertura do solo e tipos de manejos aplicados nelas. O trabalho foi desenvolvido em uma microbacia rural no município de Jaguariúna, cujo uso do solo predominante é a pecuária extensiva. Em uma estação hidrossedimentológica foram coletados automaticamente, e na frequência de 5 minutos, dados de chuva, vazão de água e turbidez servirão de subsídio para análise da interferência das práticas de revegetação e proteção de uma nascente objeto de estudo de um projeto liderado pela Embrapa Meio Ambiente (Monitoramento Hidrológico em áreas de restauração florestal e Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) no âmbito do Programa Bacias Jaguariúna) bem como para a compreensão da dinâmica da produção/control de sedimentos na área onde atualmente são realizadas ações de recomposição florestal e proteção de nascentes. Contabilizou-se 1174 mm de chuva no período estudado. 53 eventos de chuva foram classificados como erosivos e estima-se em 10350 kg de sedimentos produzidos.

Palavras-Chave turbidez, vazão, sedimentos.

Introdução

Bacias hidrográficas são áreas delimitadas espacialmente pelos divisores de água, constituídas por uma rede de drenagem interligada, cujo escoamento converge para uma seção comum, denominada foz ou exutório (Mello e Silva, 2013). É considerada um sistema físico, aberto e dinâmico. A entrada ocorre via precipitação pluvial, uma parte da água sai através do exutório carregando sedimentos, nutrientes, outra parte tem sua saída pela evapotranspiração e pela drenagem. Esta dinâmica é influenciada e alterada por atividades antrópicas devido às mudanças de uso e manejo do solo. (Bruijnzeel, 2004). A erosão é o fator antrópico que mais afeta negativamente as bacias hidrográficas (Valentino, 2019).

Uma vez incorporados ao curso d'água, os sedimentos erodidos são denominados de hidrossedimentos que podem ser transportados por suspensão ou arraste de fundo. Quando não há energia suficiente de transporte, são depositados no fundo do corpo d'água, ocorrendo a sedimentação (Mello Neto, 2017).

Dada a problemática hidrossedimentos *versus* qualidade de água, é fundamental a quantificação e qualificação dos sedimentos em suspensão, em bacias hidrográficas, pois reflete nas taxas erosivas causadas pela energia da chuva e do escoamento superficial referente aos diferentes tipos de uso do solo e manejos (Minella et al., 2008).

A presença de cobertura vegetal diminui drasticamente o impacto das gotas sobre a superfície do solo, reduzindo o poder de destaque das partículas superficiais (Coelho Netto, 2021)

A lei nº 12.651/2012, estabelece diretrizes de proteção e conservação de bacias hidrográficas através de áreas de preservação permanente (APP): Uma área protegida, coberta por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, o solo, a estabilidade geológica e a biodiversidade.

Como ferramenta de auxílio a políticas ambientais de preservação e conservação, criou-se a política de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA). Essa política tem como princípio básico o reconhecimento de que o meio ambiente fornece gratuitamente uma gama de bens e serviços de interesse direto ou indireto do ser humano. Entre esses bens e serviços estão a purificação do ar e da água, a regulação do fluxo e qualidade dos recursos hídricos, o controle da sedimentação e a manutenção da fertilidade do solo (ANA, 2012).

Quantificar continuamente os sedimentos em suspensão, é fundamental, pois reflete as taxas erosivas causadas pela energia da chuva e do escoamento superficial sobre as diferentes proporções de uso e cobertura do solo e tipos de manejos aplicados (Minella et al., 2008) e fazê-las no exatário é essencial. Pode ser de forma direta - que demanda elevado custo em recursos humanos ou, mesmo, na aquisição de eficientes amostradores automáticos ou de maneira indireta - feito por turbidimetria. (Pellegrini, 2013).

No método de turbidimetria (nefelométrico) um feixe de luz incidente sobre a amostra tem parte dos raios luminosos refratados pelas partículas em suspensão, enquanto que o restante do feixe atravessa a solução (Pellegrini, 2013). Contudo, a validação dos resultados depende do processo de calibração do sensor. Para Pinheiro et al. (2013) a concentração de sedimentos suspensos, estimada pelo turbidímetro, quando calibrada em laboratório, utilizando-se amostra composta de solo da bacia, é confiável até certa faixa de turbidez.

Material e Métodos

A área de nascente estudada localiza-se próxima ao CNPMA (Embrapa Meio Ambiente), em Jaguariúna (SP) (Figura 1a) e tem aproximadamente 11 hectares. As coordenadas geográficas locais são: latitude 22°43'55" S, longitude 47°00'19" W e altitude 600 m. A declividade média é de 4% e o solo predominante é um latossolo vermelho-escuro, distrófico, de textura argilosa. O clima da região, segundo o sistema de Köppen, é do tipo Cwa, mesotérmico, com verões quentes e úmidos e invernos secos.

Na área experimental já existia uma estação hidrossedimentológica (Figura 1b) dotada dos seguintes sensores: precipitação pluvial, nível de água, turbidez, condutividade elétrica e temperatura da água e uma calha tipo "H" para a determinação da vazão por meio da leitura do sensor de nível de água. (Figura 1c).



Figura 1. (a) Localização da microbacia monitorada; (b) Sistema instalado na microbacia anteriormente e (c) Calha "H" instalada na área da microbacia.

Todo o conjunto de sensores e datalogger foi substituído por um de programação aberta baseado em coletor de dados CR1000 (*Campbell Scientific Inc.*) (anteriormente era de programação fechada). Tais equipamentos foram adquiridos no âmbito do projeto "Monitoramento Hidrológico em áreas de restauração florestal e Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) no âmbito do Programa Bacias Jaguariúna." uma parceria entre a Embrapa Meio Ambiente, a Prefeitura Municipal de Jaguariúna e a TNC Brasil - *The Nature Conservancy*. A determinação da concentração de sólidos em suspensão (sedimentos) foi realizada de maneira indireta, por meio das leituras do sensor de turbidez, calibrado com solo coletado na área de influência da microbacia, conforme metodologia apresentada por GONÇALVES (2019) (Figura 2).

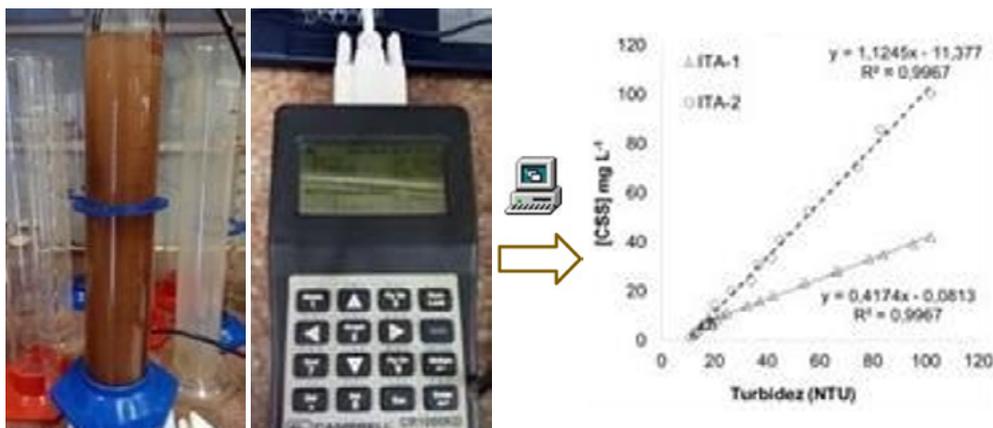


Figura 2. Instrumental utilizado na construção de curva turbidez (NTU) x Concentração de sólidos em suspensão ([CSS])(a) e exemplo de uma curva de calibração (b).

Fonte: Gonçalves (2019)

Os dados dos sensores eram armazenados na memória interna do datalogger na frequência de 5 minutos. Após baixados (ou transferidos do servidor no caso da telemetria) foram inseridos e resumidos em planilhas eletrônicas diárias contendo valores totais, máximos, mínimos e médios, além de relatórios e gráficos em forma de tabelas e gráficos dinâmicos. Como forma de um melhor gerenciamento da estação, também foi instalado um sistema de telemetria para envio automático dos dados que possibilita o acompanhamento em tempo real dos dados. A manutenção na área era realizada quinzenalmente e consistia na limpeza dos sensores na água (conforme dita o manual do usuário do fabricante), da calha (retirada de lodo no leito da calha e de vegetação invasora), do pluviômetro (entupimento por insetos e fezes de aves) e do sistema fotovoltaico (fuligem, cipós, trepadeiras, insetos).

Resultados e Discussão

A determinação da concentração de sólidos em suspensão ([CSS] - sedimentos) para estimativa do transporte de sedimentos na área da nascente foi realizada de maneira indireta (Figura 3), por meio das leituras do sensor de turbidez OBS3+ (*CampbellScientific Inc*), calibrado com solo coletado na área de influência da microbacia, conforme metodologia apresentada por Gonçalves (2019)

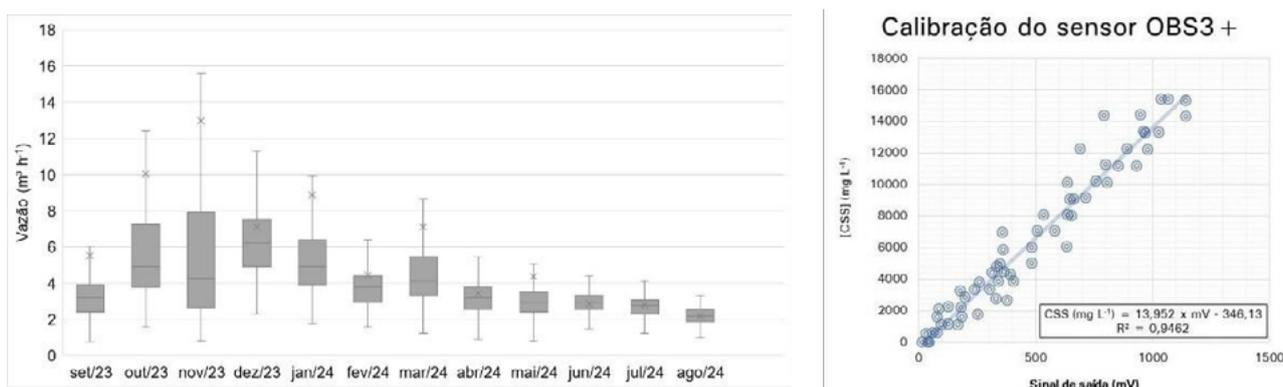


Figura 3. Curva de correlação entre leitura de turbidez e concentração de sólidos em suspensão [CSS]

Desta maneira o sinal elétrico de saída em milivolts foi convertido para uma [CSS] que se multiplicado pela vazão (L s⁻¹) se obteve a estimativa total de sedimento carregado durante determinado evento de chuva, de acordo com a equação 1.

$$\text{CSS (mg L}^{-1}\text{)} = 13,952 * \text{mV} - 346 \quad (1)$$

Onde mV é o valor em milivolts da tensão de saída do sensor e CSS o valor da concentração de sólidos em suspensão.

A separação dos eventos de chuva seguiu o proposto por D'Agostini et al. (2017) por meio de algoritmo inseridos na planilha eletrônica que armazenava os dados.

Em se tratando de dados de chuva e vazão, durante o período de setembro de 2023 a agosto de 2024, se teve a seguinte variação (Figura 4).

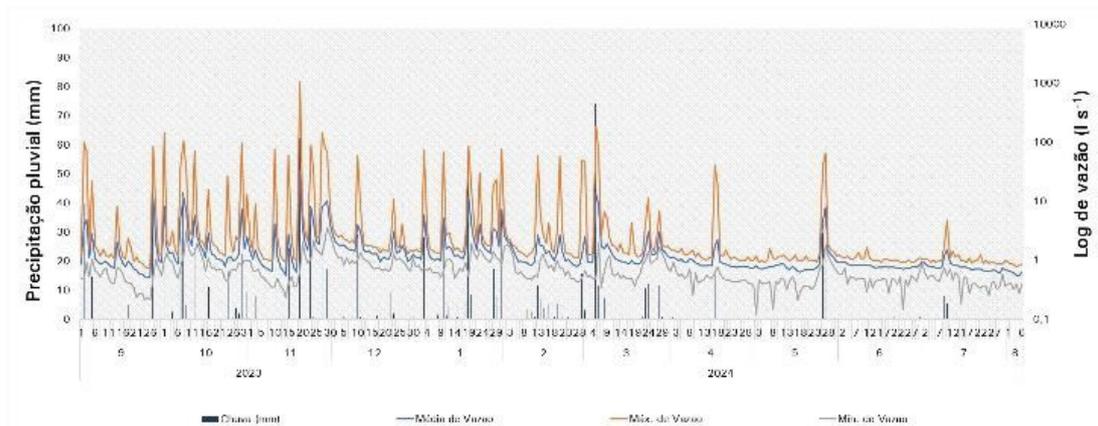


Figura 4. Variação do nível de água e do total diário de precipitação pluviométrica.

Contabilizou-se 1174 mm de chuva e 53 eventos de chuva considerados erosivos no Estado de São Paulo, conforme classificação proposta por Carvalho et al (2004). Nestes eventos a altura pluviométrica máxima em 1 hora foi de 30,5 mm em janeiro de 2024 e a intensidade máxima horária, com base nos dados de 5 minutos, foi de 80 mm h⁻¹ em 05/03/24. Em termos de vazão, a média foi 1,65 l s⁻¹, ou 6 m³ h⁻¹. Salienta-se que durante o período de monitoramento a região vinha passando por um período crítico de estiagem, porém a nascente continuava a “produzir” água a uma taxa média de 2,7 m³ h⁻¹. (Figura 5)



Fonte: Google (2024)

Figura 5. Entrada de sedimentos oriundos em estrada que corta a microbacia. Data da imagem: 14/03/2024

Estima-se que cerca de 10,35 Mg de solo tenham sido carreados para o curso d'água ao longo dos 12 meses do monitoramento, porém investigações de campo mostraram que grande parte deste material foi oriundo do manejo inadequado da drenagem de uma estrada municipal que corta a microbacia. (Figura 6). Se adotarmos o encontrado por Oliveira (2015) tal valor seria 37% menor e iria ao encontro do encontrado por Hernani et al. (1999) que ao estudarem um latossolo vermelho distroférico encontraram valores de 6,9 Mg ha⁻¹ por ano.

Segundo Bertol e Almeida (2000), ao estudar umabacia com predominância de nitossolo, a perda de solo foi de 12 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Já Oliveira et al. (2015) em uma área com o mesmo solo anterior encontraram 19,65 Mg ha⁻¹ ao longo de 15 meses e advertem que estes números reforçam os

cuidados que se deve ter na implantação e manutenção das redes viárias, pois as estradas foram as principais causadoras de enxurradas, quando comparadas aos demais usos do solo estudados.

Neste aspecto a adoção de práticas conservacionistas de solo e água como as propostas Casarin e Oliveira (2018) poderiam ser de grande valia, uma vez que a adoção da recomposição vegetal e da proteção da nascente da entrada de gado tem seus resultados sido mascarados. Tal entendimento é corroborado por SMA (2009) onde toda a área de bacia merece atenção quanto à preservação do solo, e todas as técnicas de conservação, objetivando tanto o combate à erosão como a melhoria das características físicas do solo, notadamente aquelas relativas à capacidade de infiltração da água da chuva ou da irrigação, vão determinar maior disponibilidade de água na nascente em quantidade e estabilidade ao longo do ano, incluindo a época das secas.

Conclusões

Sensores de turbidez nefelométrico calibrados com solo local são capazes de estimar a concentração de sólidos e, suspensão.

É preciso manejar adequadamente as estradas rurais para evitar que sedimento seja carregado para áreas de nascentes.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. (CNPq) e à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica do primeiro autor, à *The Nature Conservancy Brasil* pelo aporte financeiro para realização do monitoramento e à Embrapa Meio Ambiente pelo apoio de campo e logístico.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual operativo do Programa Produtor de Água**. 2. ed. Brasília, DF: AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA), 2012. Acesso em: 25/04/2024

BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 657-668, 2000.

BRUIJNZEEL, Leendert Adriaan. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 104, n. 1, p.185-228, 2004. Acesso em: 25/04/2024

CASARIN, R. OLIVEIRA, E Controle de erosão em estradas rurais não pavimentadas, utilizando sistema de terraceamento com gradiente associado a bacias de captação. **IRRIGA**. 14. 548-563. 1015809/irriga.2009v14n4p548-563. 2018.

CARVALHO, M. D. P. e; FREDDI, O. D. S.; VERONESE JUNIOR, V. Critérios de Classificação de Chuva Individual Erosiva Para o Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 26, n. 2, p. 175–183, 16 Apr. 2004. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSci-Agron/article/view/1880>>. Acesso em: 24/04/2024.

COELHO NETTO, Ana Luiza (2021). Hidrologia de Encostana Interface com a Geomorfologia. In: Geomorfologia – uma atualização de bases e conceitos. Orgs. A.J.T. Guerraes S.B. Cunha. Ed. Bertrand Brasil, 15a edição, 2021.

GONÇALVES, A.O. **Caracterização hidrossedimentológica e sua relação com o índice de qualidade participativo do plantio direto, na bacia do Alto Paranapanema-SP**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019. doi:10.11606/T.11.2020.tde-22012020-095632. Acesso em: 24 abr. 2024.

HERNANI, L.C.; KURIHARA, C.H.; SILVA, W.M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.145-154, 1999.

MELLO, C. R. D.; SILVA, A. M. D. **Hidrologia: Princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: UFLA, 2013. Acesso em: 20/04/2024

MELO NETO, J. O.; SILVA, A. M.; FERREIRA, A. M.; MENEZES, P. H. B. J. GUIMARAES, D. V. **Vulnerabilidade dos solos à erosão em bacia hidrográfica minerada no sul de Minas Gerais**. In: Congresso Internacional de Hidrossedimentologia, 2, 2017, Foz do Iguaçu. Anais do II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2017. v. 1. Acesso em: 20/04/2024

MINELLA, J. P. G. et al. Estimating Suspended Sediment Concentrations from Turbidity Measurements and the Calibration Problem. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 12, p. 1819–1830, 15 Jun. 2008. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.6763>>.

MINELLA, J. P. G.; WALLING, D. E.; MERTEN, G. H. **Combining Sediment Source Tracing Techniques with Traditional Monitoring to Assess the Impact of Improved Land Management on Catchment Sediment Yields**. *Journal of Hydrology*, v. 348, n. 3–4, p. 546–563, Jan. 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169407006208>>. Acesso em: 23/04/2024

OLIVEIRA, L. C. de et al. Perdas de Solo, Água e Nutrientes Por Erosão Hídrica Em Uma Estrada Florestal Na Serra Catarinense. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 3, p. 655–665, 30 Sep. 2015. Disponível em: <<http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/cienciaflorestal/article/view/19616>>. Acesso em: 21/04/2024.

PELLEGRINI, André et al. **Índices de desempenho ambiental e comportamento hidrossedimentológico em duas bacias hidrográficas rurais**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Acesso em: 25/04/2024

PINHEIRO, E. A. R. et al. Calibração de Turbidímetro e Análise de Confiabilidade Das Estimativas de Sedimento Suspenso Em Bacia Semiárida. **Water Res. Irrig. Manag**, v. 2, n. 2, p. 103–110, 2013. Disponível em: <<http://www2.ufrb.edu.br/wrim/wrim-v-2-n-2-2013>>.

Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Departamento de Proteção da Biodiversidade. **CADERNOS da Mata Ciliar - N 1 (2009)**. São Paulo: SMA, 2009. Disponível em: <https://sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam3/Repositorio/222/Documentos/Cadernos_Mata_Ciliar_1_Preservacao_Nascentes.pdf>. Acesso em 24/04/2024.

VALENTINO, César Henrique et al. **Caracterização hidrológica e hidrossedimentológica em bacia hidrográfica com finalidades experimentais**. 2019. Acesso em: 21/04/2024