

## ANÁLISE DAS CURVAS DE CLASSIFICAÇÃO DE SEDIMENTOS PARA A SUB-BACIA DO RIO ARAGUAIA

LAYANE CARMEM ARRUDA DA ROCHA<sup>1</sup>, MICHEL CASTRO MOREIRA<sup>2</sup>  
RICARDO SANTOS SILVA AMORIM<sup>3</sup>, DEMETRIUS DAVID DA SILVA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Eng. de Biosistemas, Doutoranda em Eng. Agrícola, Depto. de Eng. Agrícola, UFV, Viçosa – MG, layane.rocha@ufv.br

<sup>2</sup>Eng. da Computação, Prof. Associado. Doutor, Depto. de Eng. Agrícola, UFV, Viçosa – MG, michelcm@ufv.br

<sup>3</sup>Eng. Agrônomo, Prof. Associado. Doutor, Depto. de Eng. Agrícola, UFV, Viçosa – MG, rsamorim@ufv.br

<sup>4</sup>Eng. Agrônomo, Prof. Titular. Doutor, Depto. de Eng. Agrícola, UFV, Viçosa – MG, demetrius@ufv.br

Apresentado no  
LI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2022  
27 a 29 de outubro de 2022 - Pelotas - RS, Brasil

**RESUMO:** Compreender a dinâmica hidrossedimentológica dos rios é uma importante ferramenta de gestão de recursos hídricos e conservação dos solos. Em áreas onde não se tem monitoramento, a curva de classificação de sedimentos é amplamente utilizada, uma vez que ao relacionar a vazão e a concentração de sólidos em suspensão, permite a estimativa das perdas de solo da região. Todavia, métricas estatísticas devem ser utilizadas para identificar quais curvas se aproximam da realidade, de modo que este estudo teve como objetivo analisar a melhor abordagem metodológica para o cálculo das curvas de classificação de sedimentos para uma sub-bacia do Rio Araguaia. Utilizando a curva chave de sedimentos, e tendo como base métricas estatísticas como o NSE, PBIAS e o  $R^2$ , que são comumente utilizadas em estudos de modelos hidrológicos, verificou-se que quando as curvas são analisadas de forma separada (estação seca da chuvosa), a estação seca apresenta melhores coeficientes estatísticos, entretanto é necessário avaliar a sedimentação principalmente em épocas chuvosas, em que a tendência é que se tenha maiores perdas de solo. Assim, conclui-se que a melhor abordagem é avaliar as curvas considerando todo o conjunto de dados, sem separar em estação seca e chuvosa.

**PALAVRAS-CHAVE:** CONSERVAÇÃO DO SOLO, CURVA-CHAVE DE SEDIMENTO; PERDA DE SOLO.

### ANALYSIS OF SEDIMENT CLASSIFICATION CURVES FOR THE ARAGUAIA RIVER SUB BASIN

**ABSTRACT:** Understanding the hydrosedimentological dynamics of rivers is an important tool for managing water resources and soil conservation. In areas where there is no monitoring, the sediment classification curve is widely used, since by relating the flow and the concentration of suspended solids, it allows the estimation of soil losses in the region. However, statistical metrics must be used to identify which curves are close to reality, so this study aimed to analyze the best methodological approach to calculate sediment classification curves for a sub-basin of the Araguaia River. Using the sediment key curve, and based on statistical metrics such as NSE, PBIAS and  $R^2$ , which are commonly used in hydrological model studies, it was found that when the curves are analyzed separately (dry and rainy seasons), the dry season presents better statistical coefficients, however it is necessary to evaluate the sedimentation mainly in rainy seasons, in which the tendency is for greater soil

losses. Thus, it is concluded that the best approach is to evaluate the curves considering the entire data set, without separating into dry and rainy seasons.

**KEYWORDS:** SOIL CONSERVATION, SEDIMENT KEY CURVE; SOIL LOSS.

**INTRODUÇÃO:** A dinâmica sedimentar das bacias hidrográficas é afetada diretamente pela falta de ordenamento do uso do solo, favorecendo a erosão e o aumento da carga de sedimentos no rio (FISHER et al., 2021; PEIXOTO et al., 2020). Estimar a carga em suspensão acaba sendo um desafio, uma vez que o transporte de sedimentos ocorre de forma não linear e é afetado por diversos fatores intervenientes como os climáticos, os geológicos e os morfológicos (JUNG et al., 2020). Para suprir a inexistência de dados contínuos de monitoramento, a técnica empírica da curva de classificação de sedimentos é amplamente utilizada, ao relacionar uma variável preditora, que no caso é a vazão (Q), com a concentração de sólidos em suspensão (ACHARYA et al., 2021). Assim, este estudo teve como objetivo avaliar e identificar a melhor abordagem metodológica para o cálculo da descarga sólida em suspensão (QSS) para uma sub-bacia do Rio Araguaia, utilizando o método da curva de classificação de sedimentos suspensos.

**MATERIAL E MÉTODOS:** A área de estudo compreendeu uma sub-bacia do Rio Araguaia, a jusante da Ilha do Bananal, com área total de 70.243 km<sup>2</sup> (MARCUIZZO, 2017). Essa região faz parte dos biomas Amazônia e Cerrado, os quais sofrem significativamente com as queimadas (INPE, 2022). De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018), os solos predominantes nessa região são: Argissolo Vermelho-Amarelo, Gleissolo Háplico, Latossolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Quartzarênico e Plintossolo Pétrico. Sobre o clima, conforme a classificação climática de Köppen-Geiger, apresentada em Alvares et al. (2013), o clima regional predominante é Aw (clima tropical de verão úmido e período de estiagem no inverno) e Am (clima tropical úmido ou subúmido, apresentando um mês mais seco). Os dados de vazão (Q) e Concentração de Sólidos em Suspensão (CSS) foram obtidos a partir do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) para cinco estações de monitoramento de sedimentos (Figura 1), sendo elas Arapoema (27550000), Bernardo Sayão (27530000), Conceição do Araguaia (27500000), Ponte do Rio Piranhas (27380000) e Rio do Coco (27110000). Apesar de existirem 36 estações fluviométricas na bacia hidrográfica, apenas 5 tem dados de sedimentos no seu acervo, possuindo cerca de quatro medições anuais entre 2007 e 2019.

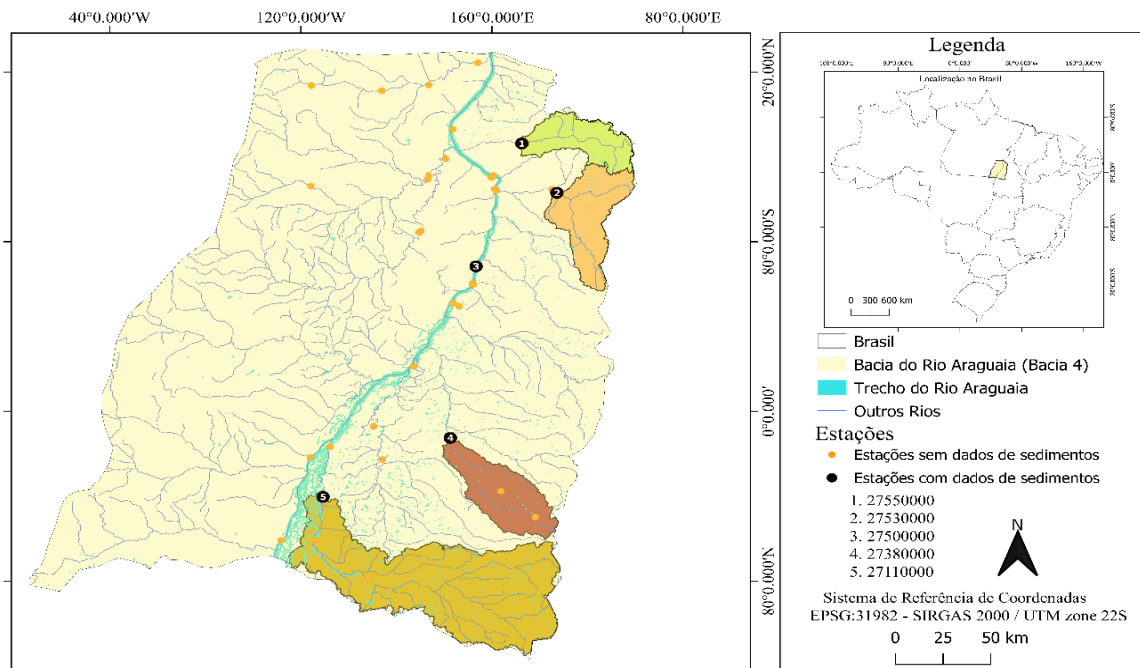


FIGURA 1. Identificação das áreas monitoradas.

Para determinar a descarga de sedimento em suspensão ( $Q_{ss}$ ), foi utilizada a Equação 1 (DA SILVA et al., 2021).

$$Q_{ss} = 0,0864 \times Q \times CSS \quad (1)$$

em que,

$Q_{ss}$  - descarga sólida estimada ( $t \text{ dia}^{-1}$ ),

$Q$  - vazão ( $m^3 \text{ s}^{-1}$ ) no instante da medição da concentração do sólido suspenso e,

$CSS$  - concentração do sólido em suspensão ( $mg \text{ L}^{-1}$ ).

Obtidos os valores de  $Q_{ss}$  foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, para que assim fosse determinado se o conjunto de dados é paramétrico ou não. Para os dados que apresentaram distribuição normal, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) para avaliar a relação direta entre a  $Q_{ss}$  e a  $Q$ . Para o conjunto de dados que obtiveram uma forte correlação de Pearson ( $r < 0.6$ ), procedeu-se as etapas seguintes, já nos casos em que a correlação não foi satisfatória ( $r > 0.4$ ) foi necessário averiguar os outliers, e removê-los. Para tal identificação foi utilizado o método de Tukey (boxplot), sendo os dados fora dos limites classificados como outlier (RAJI et al., 2020). Logo, a série foi submetida novamente à análise do coeficiente de Pearson. Em seguida, foi realizada a determinação das Curvas de Transporte de Sedimento (Curva Chave) a partir da relação potencial (Equação 2) entre valores da descarga sólida ( $t \text{ dia}^{-1}$ ) e os valores. de  $Q$  ( $m^3 \text{ s}^{-1}$ ), conforme metodologia apresentada em Zhao et al. (2021).

$$Q_{ss} = aQ^b \quad (2)$$

em que,

$a$  e  $b$  - coeficientes estimados a partir dos dados registrados para cada estação de monitoramento.

Para cada estação, em cada seção de medição, foram construídas três curvas. A primeira considerando os dados de forma geral, a segunda considerando apenas o período chuvoso

(outubro a abril) e a terceira o período de estiagem (maio a setembro), da área em estudo. Além das curvas de tendências e suas respectivas equações, a fim de realizar a adequação das curvas obtidas, foram calculados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o coeficiente de Nash-Sutcliffe, e o PBIAS (ALTHOFF; RODRIGUES, 2021). Com base em diversas análises estatísticas, Moriasi et al. (2007) propôs quatro indicadores estatísticos quantitativos, apresentados na Tabela 1, e nesta pesquisa foram utilizadas para escolher a melhor equação.

TABELA 1. Indicadores estatísticos quantitativos

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO	COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DE NASH-SUTCLIFFE	PORCENTAGEM DE VIÉS
Muito bom	$0.75 < NSE < 1.0$	$-10 < PBIAS < +10$
Bom	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$+10 < PBIAS < +15$ ou $-15 < PBIAS < -10$
Satisfatório	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$+15 < PBIAS < +25$ ou $-25 < PBIAS < -15$
Insatisfatório	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS > +25$ ou $PBIAS < -15$

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Os parâmetros do teste de Shapiro-Wilk, aplicado nas cinco estações, separadamente, observou-se que as variáveis Q, CSS e QSS apresentam distribuição normal ( $p$ -valor  $< 0,05$ ). Na Tabela 2 estão apresentados os resultados da correlação de Pearson ( $r$ ) e o  $R^2$  obtido pelas curvas de ajustes. Observa-se que o  $r$  não foi satisfatória para os dados completos das estações 27380000 e 27110000, e apesar de ser satisfatório no posto 27530000, quando foram removidos os outliers o  $r$  teve um aumento. O melhor  $R^2$  foi obtido com dados da estação 27500000, que por sua vez, está no percurso do rio Araguaia, no trecho mais ao Sul da Bacia, e possui área de drenagem em torno de 332000  $km^2$  (ANA, 2022).

TABELA 2. Correlação de Pearson e  $R^2$  entre as variáveis Q e C<sub>ss</sub>

Estação	r		R <sup>2</sup>			
	Dados Completos	Ajustados	Dados Completos	Ajustados	Estação Chuvosa	Estação Seca
27550000	0,89	0,79	0,80	0,55	0,74	0,95
27530000	0,68	0,91	0,40	0,76	0,77	0,79
27500000	0,91	0,77	0,82	0,59	0,81	0,94
27380000	0,27	0,51	0,12	0,34	0,19	0,55
27110000	0,37	0,92	0,14	0,86	0,75	0,95

Já na Tabela 3, estão dispostas as métricas estatísticas aplicadas para se determinar o melhor ajuste e assim obter as descargas sólidas. De acordo com Moriasi et al. (2007), as curvas que apresentaram o NSE entre 0,50 e 0,65 e o módulo de PBIAS entre 15 e 25 são satisfatórias. Assim percebe-se que a partir do momento em que a série foi dividida entre a estação chuvosa e a seca, os parâmetros estatísticos avaliados mostraram-se insatisfatórios para a estação chuvosa e permaneceram muito boas para a estação seca.

TABELA 3. Métricas estatísticas avaliadas para as três curvas, por posto sedimentológico

Estação	Métricas estatísticas								
	Curva Geral			Estação Chuvosa			Estação Seca		
	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS
27550000	0.80	-4.79	168.63	0.74	0.05	21.84	0.95	0.67	-16.21
27530000	0.76	0.63	-1.23	0.77	0.46	2.54	0.79	0.72	0.67
27500000	0.82	-58.38	-446.26	0.81	-0.21	23.74	0.94	0.05	86.09

27380000	0.34	0.12	-16.04	0.19	0.96	-16.71	0.55	0.21	1.80
27110000	0.86	0.76	0.91	0.75	-142577.13	24072.76	0.95	0.97	-4.12

Observa-se que em todas as estações avaliadas existe uma discrepância ao serem analisadas considerando a estação chuvosa e a de estiagem. Quando um modelo foi satisfatório (para uma estação do ano), na outra estação mostrou-se ser insatisfatório. Todavia, na literatura, diversos trabalhos consideraram apenas o  $R^2$  como parâmetro para determinação de modelos de descarga sólida (GEFFER; VESTENA, 2021; PEIXOTO, 2020). Assim, sugere-se que para determinar a descarga sólida em suspensão nos trechos acima citados sejam utilizadas as seguintes equações:  $Q_{ss}=0,26Q^{1,39}$ ;  $Q_{ss}=0,54Q^{1,41}$ ;  $Q_{ss}=0,53Q^{1,12}$ ;  $Q_{ss}=4,23Q^{0,58}$  e  $Q_{ss}=1,49Q^{0,78}$ , como pode ser observada na Figura 2.

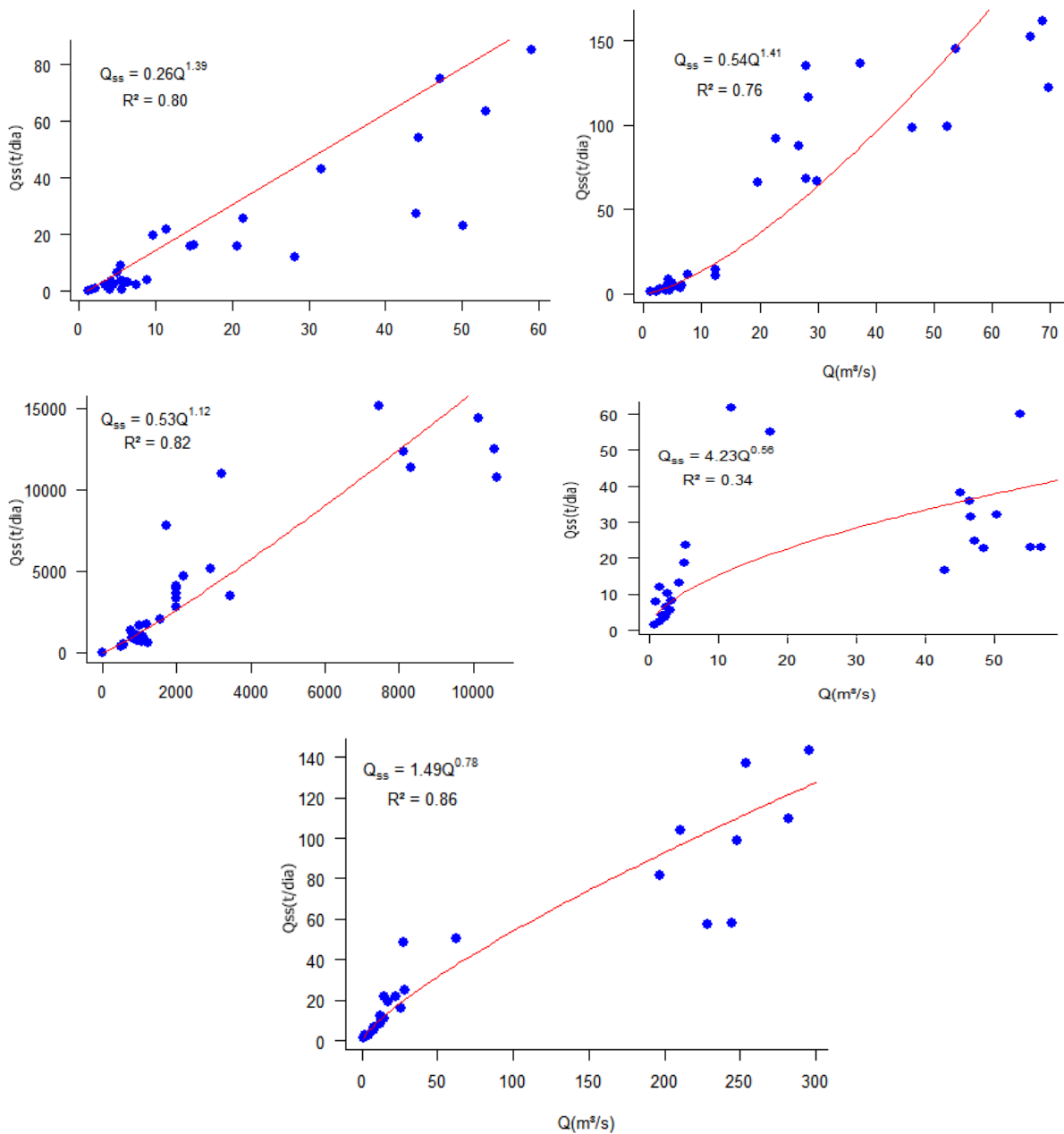


FIGURA 2. Curvas e Equações potências para estimativa da perda de solo dos trechos estudados.

**CONCLUSÕES:** Na ausência de monitoramento contínuo, a curva-chave de sedimentos torna-se uma alternativa eficiente para se ter uma série de dados. Todavia, é necessário avaliar cada trecho monitorado de forma particular. O monitoramento dos dados hidrossedimentológicos na estação seca apresentou melhores coeficientes estatísticos, entretanto, é necessário avaliar a CSS principalmente na estação chuvosa, onde a tendência é que se tenha maior perda de solo.

**AGRADECIMENTOS:** O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## **REFERÊNCIAS:**

ACHARYA, P.; NATH, T. K.; NIMMA, R. B. Sediment Rating Curve and Sediment Concentration Estimation for Mahanadi River. **Springer Singapore**, v. 185, 2021.

ALVARES C.A.; STAPE J.L.; SENTELHAS P.C., DE MORAES GONCALVES J.L., SPAROVEK G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. Goodness-of-fit criteria for hydrological models: Model calibration and performance assessment. **Journal of Hydrology**, v. 600, 2021.

Agência Nacional de Águas (ANA), HIDROWEB. 2022. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>.

DA SILVA, M. S.; CAVALCANTE, R. L.; FILHO, P. W. M. e S.; JÚNIOR, R. O. da S.; PONTES, P. R.; DALLAGNOL, R.; ROCHA, E. J. P. da. Comparison of sediment rating curves and sediment yield in subbasins of the itacaiúnas river watershed, eastern amazon. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 26, p. 1–20, 2021.

DOS SANTOS, B. B.; MAUAD, F. F.; MIRANDA, R. B. de; SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S. de. A computational tool for hydrosedimentological and statistical calculations. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 545–555, 2021.

FISHER, A.; BELMONT, P.; MURPHY, B. P.; FERRIER, L. M. K. L. HU, K. Natural and anthropogenic controls on sediment rating curves in northern California coastal watersheds. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 46, n. 8, p. 1610–1628, 2021.

GEFFER, E.; VESTENA, L. R. Eficácia de métodos de estimativa da carga sólida total em rios de leitos rochosos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 22, n. 1, 2021.

INPE. Banco e Dados e queimadas. Disponível em: <<https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>>.

JUNG, B. M.; FERNANDES, E. H.; JR., O. O. M.; GRACÍA-RODRIGUEZ, F. Estimating suspended sediment concentrations from river discharge data for reconstructing gaps of information of long-term variability studies. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 9, 2020.

MARCUZZO, F. MAPA DAS BACIAS E SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS DO BRASIL. 2017.

MORIASI, D. N., ARNOLD, J. G., VAN LIEW, M. W., BINGNER, R. L., HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

PEIXOTO, R. de A. O.; PEREIRA, C. E.; SALLA, M. R.; FILHO, J. E. A.; NISHIMURA, A. Determinação da relação entre vazões líquida e sólida e análise de fatores que influenciam a dinâmica do transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão (UPGRH-PN 1). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 6, p. 921–931, 2020.

RAJI, I. A.; LEE, M. H.; RIAZ, M. ABUJIYA, M. R.; ABBAS, N. Outliers detection models in shewhart control charts; An application in photolithography: A semiconductor manufacturing industry. **Mathematics**, v. 8, n. 5, 2020.

SANTOS, HG, JACOMINE, PKT, ANJOS, LHC, OLIVEIRA, VA, LUMBRERAS, JF, COELHO, MR, ALMEIDA, JA, ARAUJO FILHO, JC, OLIVEIRA, JB, C. T. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2018.

ZHAO, Y.; HU, C.; ZHANG, X.; LV, X.; YIN, X.; WANG, Z. Response of sediment discharge to soil erosion control in the middle reaches of the Yellow River. **Catena**, v. 203, 2021.