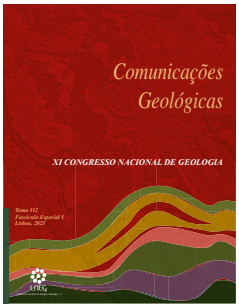
Comunicações Geológicas

Comunicações Geológicas (2025) 112, Especial I, 329-332
ISSN: 0873-948X; **e-ISSN**: 1647-581X

Índices multi-elementares como abordagem para avaliação da qualidade dos sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero, Brasil

Multi-element indexes as an approach to evaluate the quality of river sediments in the Iron Quadrangle, Brazil



R. Vicq[1*], T. Valente[1], L. Leão[2], M. Leite[2], H. A. Nallini Júnior[2]

DOI: https://doi.org/10.34637/9efr-kh88
Recebido em 14/09/2023 / Aceite em 18/03/2024
Publicado online em abril de 2025
© 2025 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP

Artigo original
Original article

Resumo: Os objetivos deste estudo foram avaliar a qualidade ambiental e o estado ecológico dos sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero através do cálculo de índices de qualidade multielementares para os elementos As, Cd, Cr, Cu, Pb e Zn. Além disso, como as bacias hidrográficas da região foram historicamente antropizadas pela mineração, o presente estudo também visa avaliar uma possível associação com minas ativas e abandonadas. Foram calculados os seguintes índices: Índice de Risco Ecológico Potencial (IR), Grau de Poluição Modificado (mCd), Índice de Poluição (PI) e Índice de Poluição Modificado (MPI). As distribuições PI, MPI e RI indicam uma grande área do Quadrilátero Ferrífero com forte poluição sedimentar, especialmente nas bacias do Rio das Velhas, Rio Conceição e Rio Gualaxo do Norte.

Palavras-chave: sedimentos de corrente, qualidade ambiental, Risco Ecológico, Quadrilátero Ferrífero.

Abstract: The objectives of this study were to evaluate the environmental quality and the ecological state of the stream sediments of the Iron Quadrangle through the calculation of multielementary quality indices for As, Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn. Additionally, since the river basins in the region have been historically anthropized by mining, the present study also aims to assess possible association with active and abandoned mines. The following indices were calculated: Potential Ecological Risk Index (RI), Modified Pollution Degree (mCd), Pollution Index (PI), and Modified Pollution Index (MPI). The PI, MPI and RI distributions indicate a large area of the Iron Quadrangle with strong sediment pollution, especially in the basins of the das Velhas River, Conceição River, and Gualaxo do Norte River.

Keywords: stream sediments, environmental quality, ecological risk, Iron Quadrangle.

[1] Instituto de Ciências da Terra, Polo da Universidade do Minho, Campus Gualtar, Braga, Portugal
[2] Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

[*] Corresponding author / Autor correspondente: raphaelcosta@dct.uminho.pt

1. Introdução

Os sedimentos são provavelmente um dos compartimentos ambientais mais suscetíveis à contaminação por elementos potencialmente tóxicos (EPT), sobretudo devido à sua capacidade de absorção/adsorção. Esta capacidade, conferida por minerais específicos, como as argilas e óxidos-hidróxidos, torna os sedimentos grandes depósitos geoquímicos de elementos tóxicos (Liu *et al*., 2019).

Como mais de 90 % da concentração total de EPT é encontrada em sedimentos (sejam como carga de fundo ou particulados transportados em suspensão), são eles que controlam a disponibilidade e a transferência destas substâncias ao nível da hidrosfera e/ou biota (Walling, 2006; Zhang *et al*., 2018). Em função disso, podem causar inúmeros danos aos ecossistemas (Liu *et al*., 2019) e à saúde humana, já que um grande número de metais e metalóidessão conhecidos pelo seu caráter tóxico e carcinogênico (Fu e Wang, 2011; Zhang *et al*., 2018).

Além disso, funcionam como arquivos naturais de mudanças ambientais recentes (Kruopiene, 2007) e permitem análises espaciais, sendo, portanto, uma importante ferramenta na determinação dos padrões de distribuição dos contaminantes dos sistemas aquáticos (Çevik *et al*., 2009, Vicq *et al*., 2015; Jahan e Strezov, 2019).

O estado da arte demonstra que os sedimentos fluviais próximos às atividades mineiras, ativas ou abandonadas, tendem a apresentar concentrações de EPT muito acima dos valores médios para a crosta e do *background* regional (Leão *et al.*, 2019). Sendo este o caso do Quadrilátero Ferrífero (QF), Brasil, a mais importante província mineral da região sudeste brasileira, sendo conhecida mundialmente por sua diversidade de minérios e tipos litológicos.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade ambiental e o estado ecológico dos sedimentos fluviais do QF através do cálculo de índices de qualidade multielementares para os elementos As, Cd, Cr, Cu, Pb e Zn e as possíveis associações às atividades mineiras da região. Foram calculados os seguintes índices: Índice de Potencial Risco Ecológico (RI), Grau de Contaminação Modificado (mCd), Índice de Poluição (PI) e Índice de Poluição Modificado (MPI).

2. Cenário Geológico

O Quadrilátero Ferrífero (QF) é conhecido por sua variedade de tipos litológicos e tradição mineira, a qual contribui para a disponibilização de elementos traço (Vicq *et al*., 2015). Constitui-se como uma das mais importantes províncias mineiras do mundo, situado no estado de Minas Gerais, na região sudeste do Brasil, entre as coordenadas 19º45' até 20º30' S e 44º30' até 43º07' W (Figura 1).

A geologia regional é complexa e definida por quatro unidades litoestratigráficas principais, que são caracterizadas da base para o topo, pelos complexos metamórficos, o Supergrupo Rio das Velhas, o

Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi, além de depósitos terciários e sedimentos recentes (Alkmim e Marshak, 1998) (Figura1).

Segundo Nalini Junior *et al*. (2009), a exploração mineral no QF remonta do século XVII e se intensificou nas últimas décadas, incluindo a exploração de ouro, ferro, manganês, bauxita, argila, dolomito, areia, brita, rochas ornamentais e pedras semipreciosas como o topázio imperial. A grande diversidade mineira da área está condicionada a uma complexa geologia, que naturalmente tem correspondência com uma considerável diversidade geoquímica (Vicq *et al*., 2015)

Na região do QF se localizam ainda as cabeceiras de duas das principais bacias hidrográficas brasileiras: rios Doce e São Francisco. Estas são alimentados pelas sub-bacias do rio das Velhas e rio Paraopeba (drenando para a bacia do rio São Francisco), rio Conceição, Piracicaba, Carmo, Gualaxo do Sul e Gualaxo do Norte (drenando para o rio Doce). Todas estas sub-bacias estão sujeitas a históricas atividades antrópicas, sendo a bacia do rio das Velhas considerada a mais poluída do estado de Minas Gerais (Weber *et al*., 2017).

3. Materiais e Métodos

Foram coletadas 541 amostras de sedimentos de corrente nos exutórios das bacias de 3ª ordem (Strahler, 1952) do QF (Figura 1), o que resultou em uma densidade amostral de 1 amostra a cada 13 km². Todos os sedimentos foram coletados ao longo de um trecho de 300 a 500 m, com nove subamostras para cobrir padrões distintos da geomorfologia fluvial (corredeiras, poças e transição) (Salminen *et al.*, 1998).

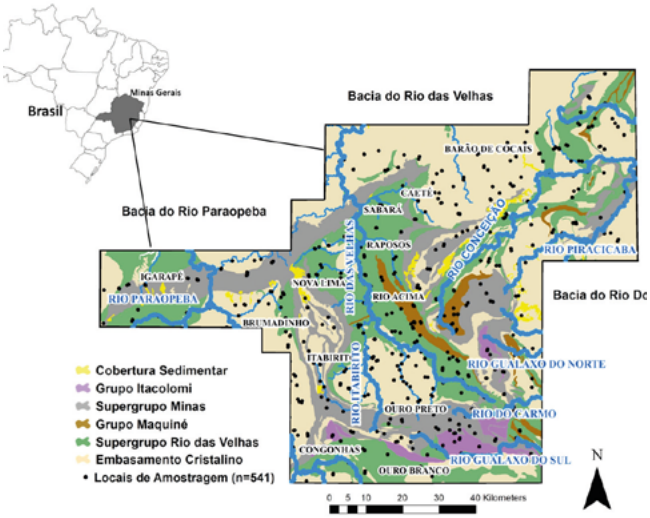


Figura 1. Mapa geológico simplificado do QF (Alkmim e Marshak, 1998) com os pontos de amostragem.

Figure 1. Simplified Geological Map of the Iron Quadrangle with the Sampling Points

Todas as amostras foram secas à temperatura ambiente e peneiradas, sendo que a fração menor que 63 µm foi destinada à análise química após digestão por água régia, mistura de HCl com HNO_3 na razão de 3:1. As concentrações dos EPT foram determinadas por Espectrofotômetria de Emissão Atômica com Fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), marca Spectro/Modelo Ciros CCD. Os resultados foram controlados em relação aos valores certificados e os valores obtidos com o material de referência LKSD-01 (CCNRP-Canadá), sendo a taxa de recuperação disponíveil em Vicq *et al.* (2015).

O potencial de risco ecológico (RI; Håkanson, 1980) pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$RI = \sum_{i=1}^{n} Er \qquad Er = Ti.\frac{Cn}{Bn}$$

Em que: Er é o potencial de risco ecológico de um contaminante; Ti, reposta tóxica dos elementos (As = 10; Cu = Pb = 5; Zn = 1; Cr= Ni = 2; Cd = 30); Cn, é a concentração do elemento i no sedimento; e Bn, o valor de referência regional do elemento i no sedimento.

Valores de RI inferiores a 150 indicam um baixo risco ecológico, entre 150 e 300 moderado, de 300 a 600 considerável e maiores que 600 muito alto.

Os outros índices são calculados pelas seguintes equações:

$$mCd = \sum_{i=1}^{i=n} C_f^i \,.\, n^{-1} \qquad \text{(Håkanson,1980)}$$

$$PI = \frac{\sqrt{(Cf\ médio)^2 + (Cf\max)^2}}{2} \qquad \text{(Nemerow, 1991)}$$

$$MPI = \frac{\sqrt{(Ef\ médio)^2 + (Ef\max)^2}}{2} \qquad \text{(Brady et al., 2015)}$$

Os valores de mCd > 1,5 indicam não poluído, 1,5 < mCd < 2,0 ligeiramente poluído, 2 < mCd <4,0 poluição moderada, 4 < mCd <8 poluição moderada a forte, 8 < mCd < 16 poluição severa, 16 < mCd < 32 poluição forte e mCd > 32 condição de extrema poluição.

O PI< 0,7 indica não poluído, 0,7 < PI < 1 ligeiramente poluído, 1,00 <PI <2,0 poluição moderada, 2,0 < PI <3,0 poluição severa, e PI > 3,0 poluição forte.

Já os valores de MPI< 1,00 indicam não poluído 1,0 < MPI < 2,0 ligeiramente poluído, 2,0 < MPI < 3,0 poluição moderada, 3,0 < MPI < 5,0 poluição moderada a forte, 5,00 < MPI< 10,0 poluição severa, e MPI > 10 condição de extrema poluição.

4. Resultados

A Tabela 1 apresenta os resultados das estatísticas descritivas básicas dos elementos analisados, bem como os valores de referência local (Vicq, 2015).

Tabela 1. Valores máximos e mínimos e Valores de Referência Locais (VRL) dos elementos analizados no QF (Vicq, 2015).

Table 1. Maximum and minimum values and Concentration Reference Values (CRV) of the elements analyzed in the IQ

Valores ($mg.kg^{-1}$)	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
Min	1,6	0,4	0,2	0,3	1,0	1,6
Máx	1690	23	2580	233	107	340
Média	18,1	1,1	133	23	23	51
VRL	6,1	0,9	128	33	32	60

O grau de contaminação modificado (mCd) indica que cerca de 82 % das amostras de sedimentos do QF não estão poluídas pelos elementos analisados neste estudo (Tabela 2) e 18 % das amostras apresentam algum nível de poluição, variando de poluição ligeira até extrema poluição.

Em contrapartida, apenas 26,06 % das amostras não estão poluídas segundo o PI, e 19,96 % das amostras são classificadas como afetadas por poluição forte (Tabela 2).

Por sua vez, o MPI classifica como não poluídas uma porcentagem menor de amostras, 14,79 % somente, e segundo esse índice, 30,87 % das amostras encontram-se nas faixas de poluição severa a poluição forte.

Tabela 2. Percentagem de amostras por classe de qualidade definida para mCd, PI e MPI.

Table 2. Percentage of samples by quality class defined for mCd, PI and MPI.

Qualidade do Sedimento	%mCd	%PI	%MPI
Sem poluição	82,07	26,06	14,79
Ligeiramente poluído	7,02	19,78	19,04
Poluição moderada	6,65	26,62	17,38
Poluição moderada a forte	2,77	-----	17,93
Poluição severa	1,29	7,58	18,67
Poluição forte	----	19,96	12,20
Extrema poluição	0,18	-----	-----

5. Discussão

Os valores de RI dos elementos na área de estudo variaram de 9,05 a 3077,81 indicando baixo a médio risco ecológico nos sedimentos contaminados, de acordo com a classificação de risco da tabela.

Os maiores valores de RI ocorreram sobretudo em função dos elevados valores de Er para o As e Cd, uma vez que apenas estes dois elementos apresentaram Er superiores a 320.

De acordo com Zheng-Qi *et al*. (2008) e Pan e Li (2016) o Cd é um dos elementos que tem alto nível de toxicidade e que possui uma enorme distribuição no solo e sedimentos de áreas próximas ou internas de atividades de mineração.

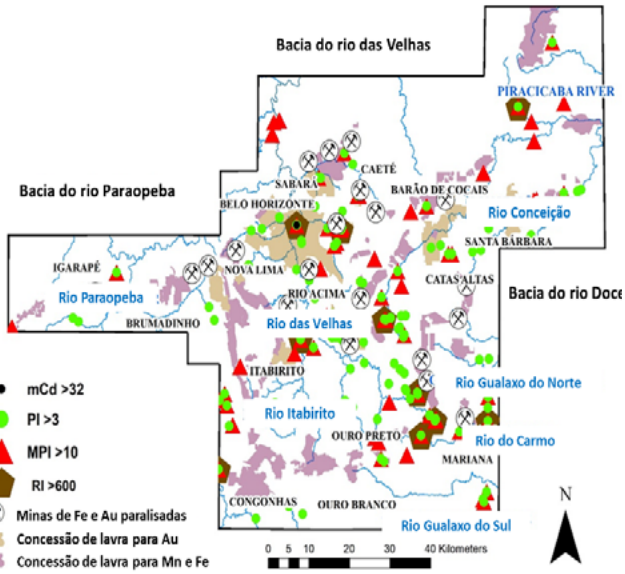


Figura 2. Mapa com a distribuição das áreas de concessão de lavra para Fe e/ou Mn e Au, atividades mineiras paralisadas de Fe e Au, principais cursos d'água e ocorrência de amostras com PI>3, mCd>32, RI>600.

Figure 2. Map with the distribution of mining concession areas for Fe and/or Mn and Au, stopped mining activities for Fe and Au, main watercourses and occurrence of samples with PI>3, mCd>32, RI>600.

Os valores dos índices de multielementos (mCd, PI, MPI e RI) foram dispostos juntamente com as áreas de concessão de lavra para Au, Fe e Mn, que são os principais recursos metálicos explorados no QF, bem como atividades mineiras paralisadas (Figura 2). No intuito de verificar os locais em piores condições de qualidade em relação aos índices calculados, foram utilizadas apenas as classes mCd>32, PI>3 e MPI>10, que indicam poluição forte e RI >600 contaminação alta.

As distribuições do PI, MPI e RI indicam uma grande área do QF com poluição forte dos sedimentos, sobretudo nas bacias do rio das Velhas próximo a Nova Lima e Caeté, bacia do rio Conceição e rio Gulaxo do Norte.

Estas são bacias historicamente antropizadas por atividades mineiras, o que pode ser visto pelas áreas de concessão de lavra presentes no mapa, bem como pelas minas paralisadas. Mais especificamente, é possível visualizar a correlação entre as áreas de concessão de lavra de Au com as amostras contaminadas nas bacias do rio das Velhas e Conceição.

Por outro lado, as bacias dos rios Paraopeba, Gualaxo do Norte, Carmo e Piracicaba, encontram-se em regiões com grandes áreas mineiras de Fe e Mn, sendo observado nessas áreas os maiores graus de contaminação por esses elementos (Figura 2).

6. Conclusões

Pela primeira vez, foi realizado o cálculo de diferentes índices de contaminação para elementos potencialmente tóxicos nos sedimentos de corrente para toda área do QF, com o respetivo mapeamento da distribuição espacial. Esse estudo indicou forte contaminação associada ao As e Cd em grande parte da região, o que não havia sido quantificado até então.

Obteve-se a delimitação de duas regiões bem definidas que apresentaram contaminação para todos os parâmetros analisados, que somadas ocupam aproximadamente 20 % de toda área do QF.

A primeira área engloba a bacia do rio Carmo (bacia do rio Doce), nos municípios de Ouro Preto e Mariana, e a segunda na parte central da bacia do rio das Velhas, abrangendo os municípios de Rio Acima, Nova Lima, Caeté, Sabará e Raposos.

Além destas duas maiores áreas, todos os parâmetros indicaram pontos de elevada contaminação distribuídos ao longo do QF. Estes pontos são observados em zonas com registos de atividades mineiras de ouro e ferro.

Em função de diversos trabalhos desenvolvidos, já se conhecia a ocorrência de elevadas concentrações de As e Cd na região. Porém, a partir deste estudo, foi possível delimitar e quantificar o grau de contaminação por estes EPT, com base nos indices de risco. Para além disso, o mapeamento destes índices fornece a localização de pontos críticos, contribuindo para uma gestão ambiental adequada destas áreas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FCT—Fundação para a Ciência e a Tecnologia através dos projetos DOI 10.54499/UIDP/04683/2020, DOI 10.54499/UIDB/04683/2020, Nano-MINENV (PTDC/CTA-AMB/29259/2017) e as instituições CNPq, FAPEMIG e principalmente CAPES pela bolsa Proc. Nº 10228/13-6.

Referências

Alkmim F. F., Marshak S., 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Reearch,* **90**: 29–58.

Brady, J. P., Ayoko, G. A., Martens, W. N., Goonetilleke, A., 2015. Development of a hybrid pollution index for heavy metals in marine and estuarine sediments. *Environmental Monitoring and Assessment*, **187**: 306.

Çevik, F., Göksu, M., Derici, O., Fındık, Ö., 2009. An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses. *Environmental Monitoring and Assessment*, **152**: 309-317.

Fu, F., Wang, Q., 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *Journal of Environmental Management*, **92**: 407-418.

Håkanson, 1980, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Res*, **14**: 975-1001.

Jahan, S., Strezov, V., 2019. Comparison of pollution indices for the assessment of heavy metals in the sediments of seaports of NSW, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, **128**: 295-306.

Kruopiene, J., 2007. Distribution of heavy metals in sediments of the Nemunas River (Lithuania). *Polish Journal of Environmental Studies*, **16**: 715-722.

Leão, L. P., Vicq R.F.C., Leite, M. G. P., Nalini Jr, H. A., 2019. Mn Geochemical Mapping and Quality Assessment of Fluvial Sediments and Surface Waters of Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ,* **42**: 469-480.

Liu, M., Chen, J., Sun, X., Hu, Z., Fan, D., 2019. Accumulation and transformation of heavy metals in surface sediments from the Yangtze River estuary to the East China Sea shelf. *Environmental Pollution,* **245**:111-121.

Nalini Junior, H. A. (coord), 2009. Estudos geoambientais no Quadrilátero Ferrífero: Mineração e Sustentabilidade. Departamento de Geologia UFOP, Minas Gerais.

Nemerow, N L., 1991. Stream, lake, estuary, and ocean pollution, 2nd edition. United States.

Pan, Y., Li, H., 2016. Investigating heavy metal pollution in mining brownfield and its policy implications: a case study of the Bayan Obo rare Earth mine, Inner Mongolia. China. *Environ. Manag.,* **57(4):** 879-893.

Salminen, R., Tarvainen, T., Demetriades, A., Duris, M., Fordyce, F. M., Gregorauskiene, V., Kahelin, H., Kivisilla, J., Klaver, G., Klein, H., Larson, J. O., Lis, J., Locutura, J., Marsina, K., Mjartanova, H., Mouvet, C., O'Connor, P., Odor, L., Ottonello, G., Paukola, T., Plant, J. A., Reimann, C., Schermann, O., Siewers, U., Steenfelt, A., Van Der Sluys, J., De Vivo, B., Williams, L., 1998. FOREGS Geochemical Mapping Field Manual. Guide 47, Geological Survey of Finland, Espoo.

Strahler, A. N., 1952. Dynamic Basis of Geomorphology, Geological Society America Bulletin, **63**: 923-938.

Vicq, R. F. C., 2015. Mapeamento Geoquímico e Determinação de Valores de Referência de Sedimentos Fluviais do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Tese de Doutoramento. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia.

Vicq, R., Matschullat, J., Leite, M.G.P., Nalini Junior, H.A., Mendonça, F.P.C., 2015. Iron Quadrangle stream sediments, Brazil: geochemical maps and reference values. *Environmental Earth Sciences*, **74**: 4407-4417.

Walling, D. E., 2006. Human impact on land–ocean sediment transfered by the world's Rivers. *Geomorphology*, **79**: 192–216.

Weber, A.A., Moreira, D.P., Melo, R.M.C., Vieira, A.B.C., Prado, P.S., da Silva, M.A.N., Bazzoli, N., Rizzo, E., 2017. Reproductive effects of oestrogenic endocrine disrupting chemicals in Astyanax rivularis inhabiting headwaters of the Velhas River, Brazil. *Sci. Total Environ.,* **592**: 693-703.

Zhang, Z., Lua, Y., Li, H., Tua, Y., Liua, B., Yang, Z., 2018. Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River. China. *Science of the Total Environment*, **645**: 235-243.

Zheng-Qi, X., Shi-Jun, N., Xian-Guo, T., Cheng-Jiang, Z., 2008. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index. *Environ. Sci. Technol.,* **31:** 112-115.