



**1º CONGRESSO
LATINO-AMERICANO
DE DRENAGEM
ÁCIDA DE MINA**

24 e 25 de novembro de 2021
Belo Horizonte • MG • Brasil

1ST LATIN AMERICAN ACID MINE DRAINAGE CONGRESS
NOVEMBER 24-25, 2021 • BELO HORIZONTE • MG • BRAZIL

1^{ER} CONGRESO LATINOAMERICANO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA
24-25 DE NOVIEMBRE DE 2021 • BELO HORIZONTE • MG • BRAZIL

PROMOÇÃO



MODELAGEM HIDROGEOQUÍMICA DA INTERAÇÃO DE ÁGUA COM REJEITOS E ESTÉREIS DEPOSITADOS NUMA CAVA DE MINÉRIO DE FERRO EXAURIDA EM MINAS GERAIS, BRASIL

Rafael C. Albuquerque, Carolina Bittencourt de Abreu, Lara Lange, Layane Silva, Danilo Almeida (Water Services); Maria Isabel P. Teodoro (PROGEN); Maria Luiza Ramos, Vinicius Feijó Cordeiro (Vale)

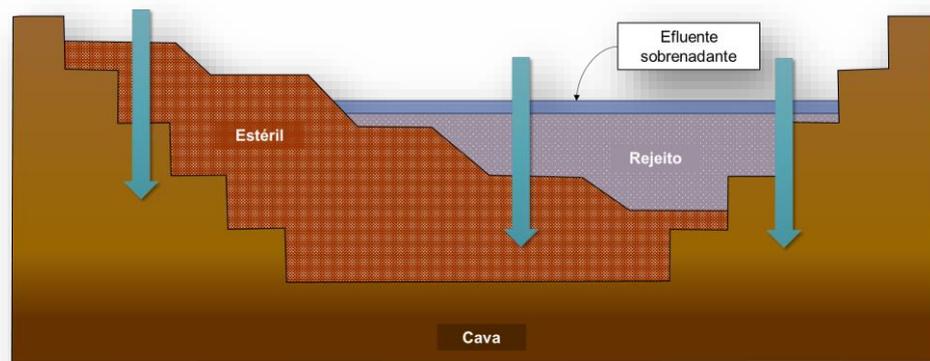
Belo Horizonte, 24 de Novembro de 2021





INTRODUÇÃO

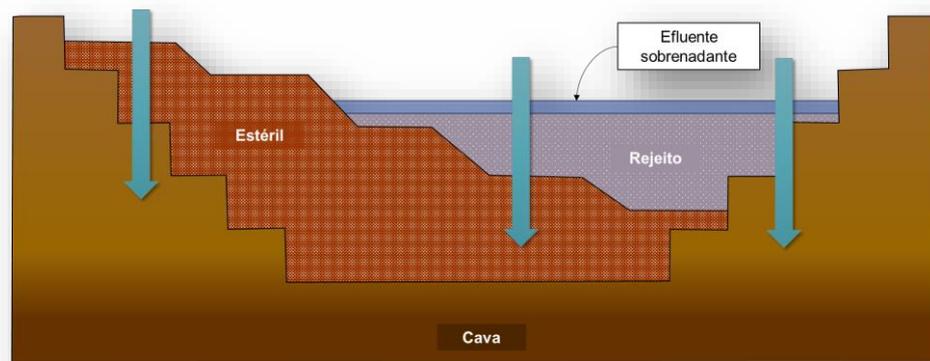
- Análise da condição hidrogeoquímica atual de uma mina de minério de ferro exaurida, onde ocorre a deposição de estéreis e rejeitos como alternativa de fechamento
 - Caracterização física,
 - Caracterização química e
 - Caracterização mineralógica
 - Dados do monitoramento hidroquímico





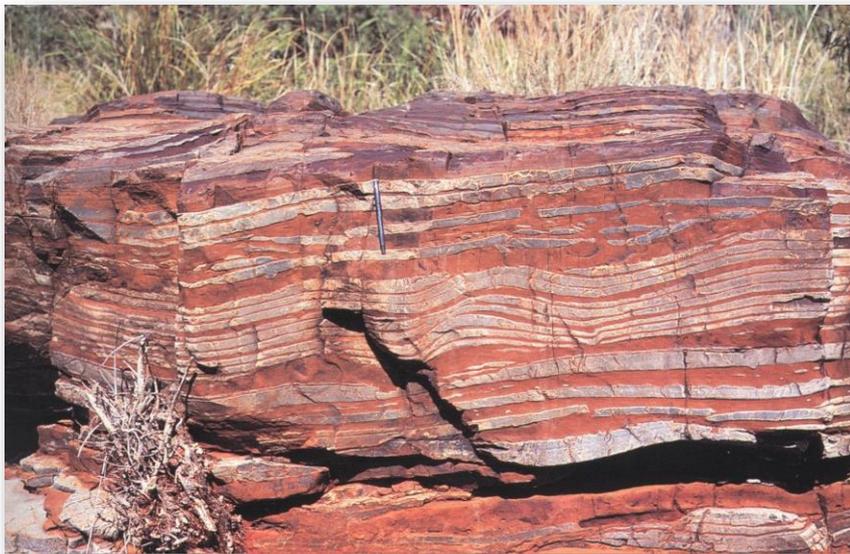
INTRODUÇÃO

- Simulações numéricas foram executadas com o auxílio do *software* PHREEQC
- O objetivo das simulações foi:
 - Compreender a hidroquímica do entorno da cava;
 - Calibrar o modelo para eventuais simulações futuras





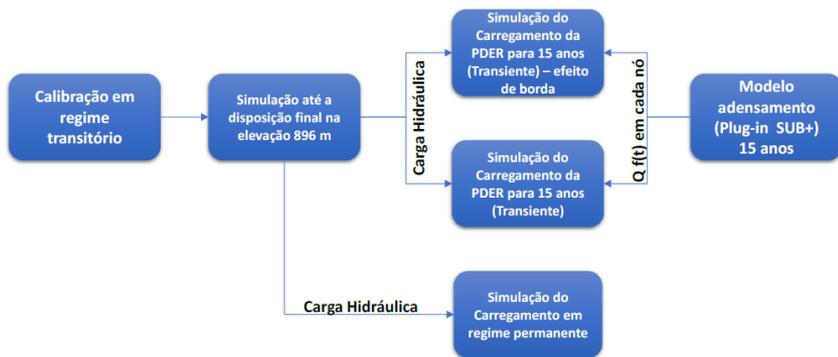
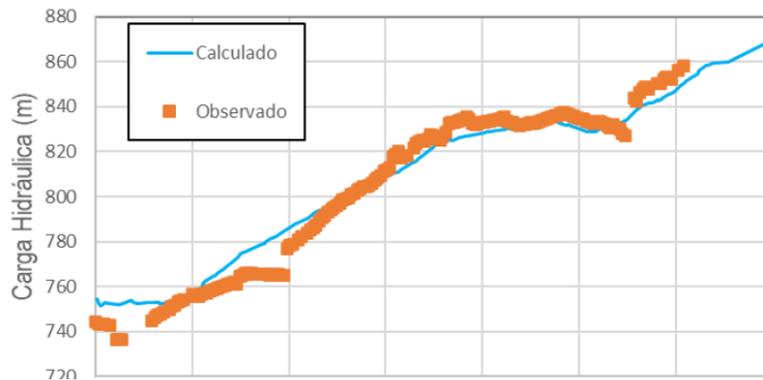
CONTEXTUALIZAÇÃO



- A área de estudo está localizada em uma sequência litoestratigráfica do Quadrilátero Ferrífero, sobre um enclave de rochas supracrustais composto por sequências metassedimentares químicas e clásticas de rochas do Supergrupo Minas e Supergrupo Rio das Velhas, encaixadas sobre complexos metamórficos (Schorcher & Guimarães, 1986; Endo et al., 2020).
- O depósito da mina de ferro exaurida é classificado como Formação Ferrífera Bandada (BIF - Banded Iron Formation) do tipo Lago Superior (ou apenas tipo Superior), que são rochas com mais que 15% de ferro.



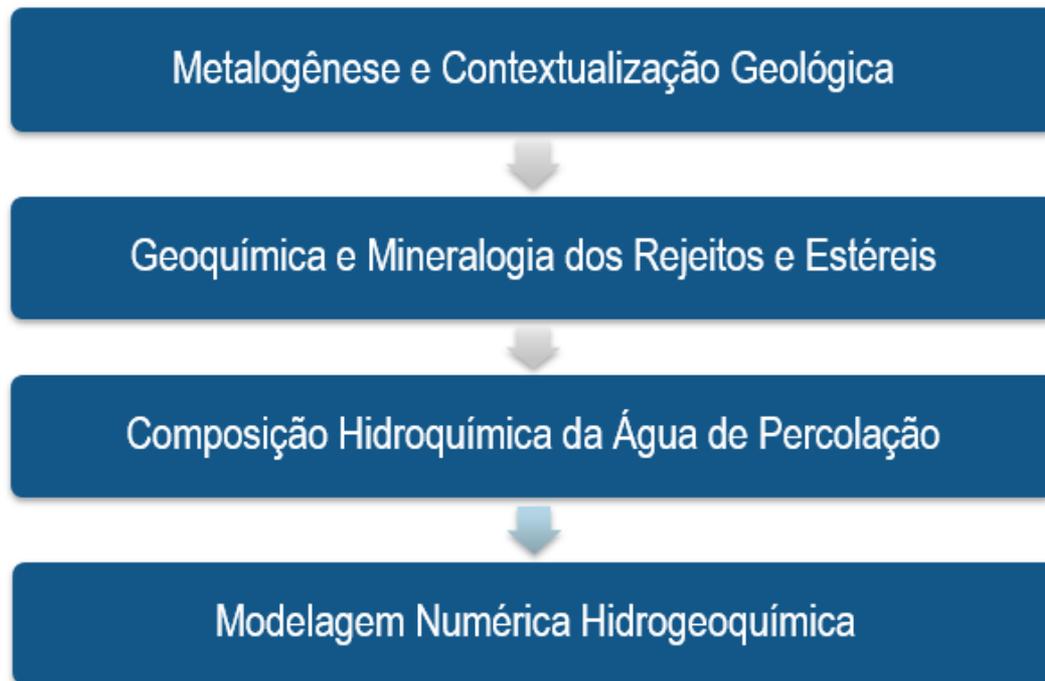
MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA



- Antes do estudo hidrogeoquímico, foi desenvolvido um modelo hidrogeológico conceitual e numérico (utilizando FEFLOW®) da área da cava avaliada;
- Modelo numérica foi calibrado para os cenários:
 - Pré-Mina (estacionário);
 - Lavra e deságue de mina (transiente);
 - Deposição do rejeito e recuperação do NA (transiente);
- Simulação de deposição de rejeito envolveu:
 - Mudança nos parâmetros hidrodinâmicos (K e Sy) nos rejeitos ao longo do tempo
 - Liberação de água em função do adensamento (*plug-in SUB+*)



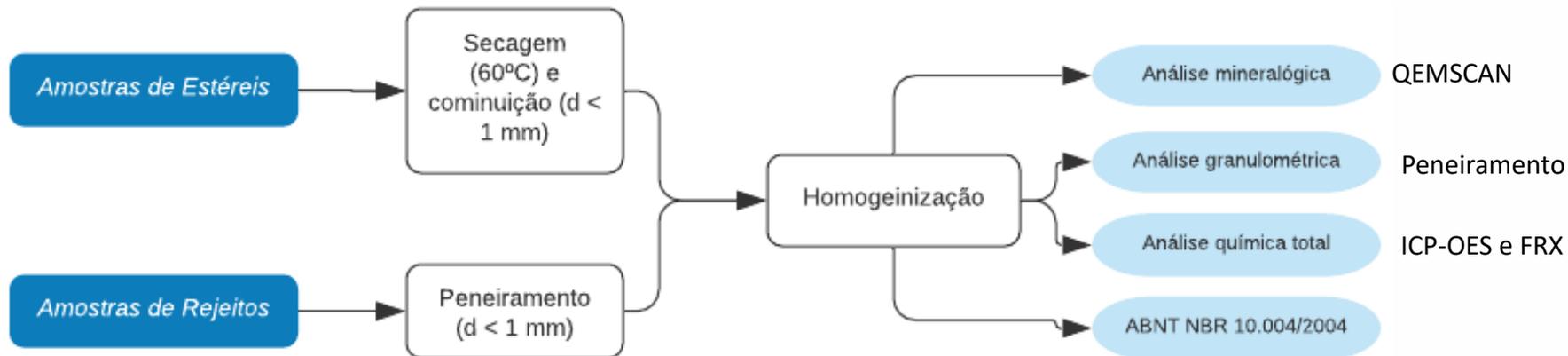
ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO - ESTRUTURAÇÃO





MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização do material





MINERALOGIA

Caracterização do material

Amostra		Rejeito 1			Rejeito 2			Rejeito 3		
		Global	- 0,045 mm	- 0,250 + 0,045 mm	Global	- 0,045 mm	- 0,250 + 0,045 mm	Global	- 0,045 mm	- 0,250 + 0,045 mm
Silicatos	Quartzo	51,56	33,62	87,75	41,21	24,34	87,83	69,34	38,90	89,06
	Feldspatos	0,59	0,51	1,58	0,35	0,29	1,11	0,78	0,51	1,37
	Anfibólios	2,05	6,02	0,09	1,95	7,23	0,11	0,29	3,27	0,03
	Clorita	3,75	7,71	0,36	2,83	5,73	0,49	0,47	1,52	0,17
	Biotita	1,31	2,26	0,12	1,44	2,02	0,20	0,31	0,74	0,11
	Muscovita	1,03	1,76	0,25	0,74	1,11	0,25	0,23	0,42	0,08
	Caulinita	2,60	4,14	0,37	2,18	3,07	0,69	0,82	1,28	0,42
	Talco	0,32	0,39	0,38	0,18	0,20	0,36	0,15	0,15	0,10
Óxidos	Óxidos de Fe	35,29	41,48	8,62	48,10	54,34	8,55	26,97	51,81	8,40
	Óxidos de Mn	0,62	0,85	0,19	0,42	0,56	0,14	0,35	0,73	0,09
	Gibbsita	0,10	0,14	0,04	0,07	0,08	0,03	0,04	0,07	0,03
Outros	Calcita	0,13	0,12	0,10	0,05	0,05	0,05	0,07	0,14	0,05
	Apatita	0,13	0,15	0,03	0,11	0,15	0,03	0,06	0,13	0,02
	Outras fases	0,53	0,85	0,10	0,37	0,81	0,14	0,12	0,34	0,06

* Não foram detectados sulfetos na mineralogia do rejeito



MINERALOGIA

Caracterização do material

Amostra	Litotipo	Silicatos	Óxidos	Carbonatos	Sulfetos	Outros
Estéril 1	Quartzito	93,3	0,87	4,91	0,8	0,12
Estéril 2		80,73	1,32	17,7	0,08	0,17
Estéril 3		96,85	1,14	1,66	0,01	0,34
Estéril 4		93,74	0,75	5,23	0,02	0,26
Estéril 5	Gnaisse	82,36	2,71	14,39	0,31	0,23
Estéril 6		69,82	4,15	25,8	0,02	0,21
Estéril 7	Xisto	82,46	1,35	15,61	0,35	0,23
Estéril 8		79,2	3,38	17,08	0,09	0,25
Estéril 9		92	0,94	6,78	0	0,28
Estéril 10		89,83	0,49	9,42	0,04	0,23
Estéril 11	Itabirito	41,91	58,06	0,01	0	0,03
Estéril 12		61,62	38,21	0,15	0	0,02
Média		80,32	9,45	9,89	0,14	0,2



MODELAGEM NUMÉRICA GEOQUÍMICA - PHREEQC

Aspectos considerados no modelo

Composição água
da chuva e do
aquífero

Composição da
água Sobrenadante

Pressão de CO₂

Mineralogia

Cinética dos
silicatos

Características
hidráulicas (tempo
de residência)



MATERIAIS E MÉTODOS

Dados de entrada

Efluente sobrenadante

Parâmetro	Efluente	Parâmetro	Efluente
Temperatura (°C)	25	Magnésio (mg/L)	3,48
pH (in situ)	7,72	Manganês (mg/L)	2,24
pe (in situ)	0,40	N-nitrato (mg/L)	0,12
Alcalinidade Total (mg CaCO ₃ /L)	211,0	Sódio (mg/L)	92,80
Arsênio (mg/L)	0,0020	Fósforo Total (mg/L)	0,13
Alumínio (mg/L)	0,0125	Sulfato (mg/L)	1,24
Bário (mg/L)	0,25	Titânio (mg/L)	0,50
Cálcio (mg/L)	3,81	Potássio (mg/L)	8,92
Cloreto (mg/L)	16,60	Níquel (mg/L)	0,01
Ferro (mg/L)	0,05	Oxigênio Dissolvido (in situ) (mg/L)	1,85
Fluoreto (mg/L)	0,21	Balanco Iônico (%)	-3,61



MATERIAIS E MÉTODOS

Dados de entrada

Água de chuva

Parâmetros	pH	Ca (mg/L)	Cl (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
Valores	4,5	0,42	1,49	0,14	0,86	3,24

Aquífero

Parâmetro	Temp. (°C)	pH	pe	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	Si (mg/L)
Aquífero	21,5	5,40	4,26	2,01	0,04	0,01	0,86	6,60



ÁGUA SOBRENADANTE x POÇO A JUSANTE

Parâmetro	Água sobrenadante	Jusante da estrutura
pH	7,7	6,1
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	211	35,4
Cálcio (mg/L)	3,8	23,8
Sulfato (mg/L)	1,24	120
Sódio (mg/L)	92,8	29,6
Manganês Dissolvido (mg/L)	2,24	0,11
Ferro Dissolvido (mg/L)	0,05	0,42





MATERIAIS E MÉTODOS

Dados de entrada

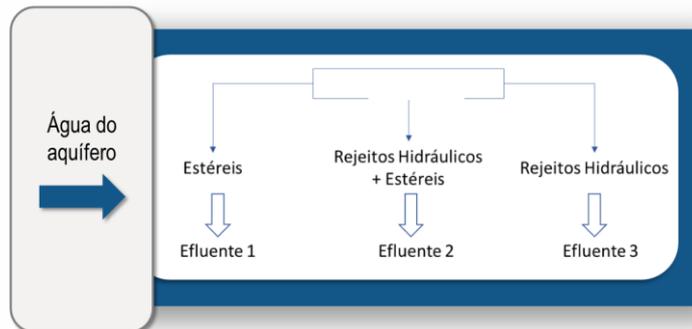
Parâmetros hidrogeológico e tempos de residência

Parâmetros	Rejeito	Estéril
Porosidade	0,36	0,41
Condutividade hidráulica	$3,87 \times 10^{-7}$ m/s	$1,00 \times 10^{-5}$ m/s

- Banco de dados LLNL, elaborado pelo *Lawrence Livermore National Laboratory* (2017).
- A pressão parcial de gases atmosféricos foi considerada ao simular meios insaturados. Adotou-se o equilíbrio da PO_2 e PCO_2 a 1 atm ($\text{Log } PO_2 = -0,68$; $\text{Log } PCO_2 = -3.5$).



Calibração do Modelo - Mescla



Tentativa A

Rejeito: 29,2%
Estéreis: 37,3%
Rejeito + Estéreis:
8,5%
Aquífero: 25%

Tentativa B

Rejeito: 5%
Estéreis: 60%
Rejeito + Estéreis:
30%
Aquífero: 5%



Resultados – Calibração do Modelo

Parâmetro	Unidade	Tentativa A	Tentativa B	Poço 1	Poço 2
pCO ₂ inicial		-3,5	-3,5	NA	NA
pCO ₂ final		-2,6	-3,2	-1,6*	-1,5*
T	°C	24	24	22	22
pH		7,4	7,9	6,1	5,9
pe		-0,31	-2,44	0,24	2,33
Alcalinidade	mg CaCO ₃ /L	54	40	35	43
Ca + Mg	mg/L	22,6	39,7	31,1	35,8
Cl ⁻	mg/L	6,8	6,7	3,4	3,5
Fe	mg/L	0,004	0,008	4,050	0,420
K	mg/L	2,5	2,3	6,4	5,4
Mn	mg/L	0,298	0,558	0,110	0,010
Na	mg/L	21,6	22,7	29,7	30,5
SO ₄ ²⁻	mg/L	49	104	121	129



Resultados – Calibração do Modelo

Parâmetro	Unidade	Tentativa A	Tentativa B	Poço 1	Poço 2
pCO ₂ inicial		-3,5	-3,5	NA	NA
pCO ₂ final		-2,6	-3,2	-1,6*	-1,5*
T	°C	24	24	22	22
pH		7,4	7,9	6,1	5,9
pe		-0,31	-2,44	0,24	2,33
Alcalinidade	mg CaCO ₃ /L	54	40	35	43
Ca + Mg	mg/L	22,6	39,7	31,1	35,8
Cl ⁻	mg/L	6,8	6,7	3,4	3,5
Fe	mg/L	0,004	0,008	4,050	0,420
K	mg/L	2,5	2,3	6,4	5,4
Mn	mg/L	0,298	0,558	0,110	0,010
Na	mg/L	21,6	22,7	29,7	30,5
SO ₄ ²⁻	mg/L	49	104	121	129



Resultados – Calibração do Modelo

Parâmetro	Unidade	Cenário 2 (PCO2 = -1,5)	Poço 1	Poço 2
pCO ₂ inicial		-3,5	n,a,	n,a,
pCO ₂ final		-1,5	-1,6	-1,5
T	°C	25	22	23
pH		6,2	6,1	5,9
pe		1,59	0,24	2,33
Alcalinidade	mg CaCO ₃ /L	40	35	43
Ca + Mg	mg/L	39,7	31,1	35,8
Cl ⁻	mg/L	6,7	3,4	3,5
Fe	mg/L	0,008	4,050	0,420
K	mg/L	2,3	6,4	5,4
Mn	mg/L	0,558	0,110	0,010
Na	mg/L	22,7	29,7	30,5
SO ₄ ²⁻	mg/L	104	121	129



CONCLUSÕES

- Os estéreis depositados possuem sulfetos em baixos teores (abaixo de 1%) em algumas amostras e, em outras, não há sulfetos detectáveis. O teor de carbonatos é significativamente superior, o que permite estabelecer que qualquer eventual acidez gerada nos estéreis será neutralizada. O sulfato, cálcio, magnésio e alcalinidade são produtos desta combinação de reações de oxidação de sulfetos e dissolução de carbonatos.
- Foi estabelecida uma hipótese plausível para a origem dos sulfatos nos poços próximos à cava, a oxidação de sulfetos presentes em baixos teores nos estéreis.



CONCLUSÕES

- O ferro e manganês, apesar de estarem presentes em concentrações relativamente elevadas na água sobrenadante da cava (principalmente o manganês), ocorrem em baixas concentrações nos poços a jusante (conseqüentemente no aquífero).
 - Isto demonstra que esses elementos perdem mobilidade ainda na água sobrenadante em função das condições oxidantes (em contato com gases atmosféricos) neste ambiente.
 - Não há contribuição relevante de ferro e manganês dos rejeitos para o aquífero, apesar do elevado teor de ferro neste material.



CONCLUSÕES

- Foi obtida correspondência satisfatória entre a composição química simulada pelo modelo e a composição da água dos poços P01 e P02.
- Controle da pressão parcial de CO_2 no pH dos poços a jusante.
 - Fator preponderante no controle de pH no meio, que se sobrepõe a eventuais processos de geração de acidez pela oxidação de sulfetos.



REFERÊNCIAS

ENDO I.; MACHADO R.; GALBIATTI H. F.; ROSSI D.Q.; DELGADO C. E. R.; CASTRO P.T.A.; OLIVEIRA M.N.F. (2020) Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Castro P.T.A., ENDO I., GANDINI A.L., Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos 280p.

PARKHURST, D.L.; APPELO, C.A.J. (1999) User's Guide to PHREEQC (Version 3) - A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report 99-4259, Washington DC.

SCHORCHER, H. D.; GUIMARÃES P. F. (1986) Estratigrafia e Tectônica do Supergrupo Minas e Geologia do Distrito Ferrífero de Itabira. XXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, MG.

WSB - WATER SERVICES BRASIL LTDA. (2018). Estudo Hidrogeológico Serra da Moeda. Relatório Técnico - Fase 2. 30 de maio de 2018