

III-1174 – MONITORAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM UM ATERRO SANITÁRIO DE GRANDE PORTE ENCERRADO

Cícero Antonio Antunes Catapreta ⁽¹⁾

Engenheiro Civil e Sanitarista (PUC-Minas), Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG). Engenheiro Sanitarista e Gerente de monitoramento e disposição final de resíduos da Superintendência de Limpeza Urbana de Belo Horizonte (SLU-BH). Professor da PUC-Minas.

Gustavo Ferreira Simões

Engenheiro Civil (UFMG), Mestre e Doutor em Engenharia Civil (PUC-Rio). Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG.

Endereço ⁽¹⁾: - Superintendência de Limpeza Urbana de Belo Horizonte – SLU/BH. Departamento de Tratamento e Disposição Final de Resíduos. Rodovia BR 040 – Km 531 – Jardim Filadélfia - Belo Horizonte – MG. Brasil - Tel: (31) 3277-8303 – e-mail: catapret@pbh.gov.br

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a qualidade das águas subterrâneas na área de influência de um aterro sanitário encerrado, tendo como estudo de caso o aterro sanitário da cidade de Belo Horizonte, MG, a partir da análise da evolução histórica dos parâmetros físico-químicos obtidos no monitoramento desse aterro. O período total de monitoramento avaliado foi de 22 anos. Neste trabalho foram apresentados e discutidos os resultados dos parâmetros: OD, DBO, DQO, pH, potencial redox (eh), condutividade elétrica, cloretos, sulfatos, série nitrogenada (NH₃, NO₂⁻ e NO₃⁻), metais (Al, Ba, Fe, Mn, Pb, Hg, Cr), série de sólidos (SDT) e surfactantes. A avaliação dos resultados das análises físico-químicas realizadas sugere que o aterro sanitário de Belo Horizonte (MG), mesmo após o encerramento de suas atividades, ainda pode estar contribuindo para alteração da qualidade das águas subterrâneas na sua área de influência. Mesmo que pontualmente e considerando os parâmetros avaliados neste trabalho, valores acima dos VMP ainda foram observados, sugerindo que, associados à mineralogia dos solos locais, o aterro ainda pode estar influenciando a qualidade das águas subterrâneas.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro Sanitário, Resíduos Sólidos, Monitoramento, Águas Subterrâneas.

INTRODUÇÃO

Os requisitos de monitoramento e manutenção pós-fechamento para aterros sanitários encerrados estabelecem critérios mínimos que os operadores dessas unidades devem cumprir após o encerramento da disposição de resíduos. Dentre esses requisitos, o monitoramento ambiental se destaca, devendo ser continuado, o que permite que seja realizada a contínua identificação de eventuais emissões de poluentes e contaminantes para o meio ambiente, possibilitando que medidas de recuperação possam ser implementadas.

O período de manutenção desse monitoramento pós-fechamento é de 30 anos em alguns países, enquanto que no Brasil, apesar de não haver legislação estabelecendo esse prazo, a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT sugere que o mínimo a ser considerado seja de 20 anos (ABNT, 1997).

Dentre os monitoramentos a serem continuados no pós-fechamento dos aterros sanitários, o acompanhamento da influência deste empreendimento sobre as águas subterrâneas se mostra de grande importância. Ainda que esses aterros tenham sido projetados e implantados com um sistema de impermeabilização adequado, visando a garantia da proteção do meio ambiente e da saúde pública, e a proteção das águas subterrâneas, na ocorrência de qualquer falha estrutural nesse sistema de impermeabilização, as águas subterrâneas tendem a ser imediatamente afetadas e, eventualmente, tendo suas características alteradas.

Tem-se ainda que o monitoramento das águas subterrâneas fornece informações sobre a qualidade e dinâmica do aquífero em relação às variações sazonais e efeitos antrópicos, que pode vir a subsidiar ações de controle da poluição ambiental e gestão deste recurso hídrico, servindo como base para estudos hidrogeológicos e de

identificação de plumas de contaminação, assim como a necessidade de intervenção e o enquadramento das águas subterrâneas, conforme as classes definidas na legislação específica.

Nesse sentido, o objetivo deste artigo é abordar questões relativas ao monitoramento de águas subterrâneas em aterros sanitários, tendo como estudo de caso do aterro sanitário da cidade de Belo Horizonte, MG.

MATERIAIS E MÉTODOS

O aterro sanitário de Belo Horizonte está localizado na Bacia hidrográfica do Ribeirão Onça, na região Noroeste da cidade (Figura 1), possui uma área de 114,50 ha e esteve em operação por 32 anos, entre 1975 e 2007. Os resíduos sólidos urbanos - RSU gerados em Belo Horizonte foram dispostos em diversas regiões da área, ocupando cerca de 70 ha. O aterro possui camadas de resíduos sobrepostas e possuía, na época de seu encerramento, cerca de 65 m de altura máxima, tendo sido dispostos, aproximadamente, 23 Mt de RSU durante sua operação.

Com o encerramento das atividades de disposição de RSU nesse aterro sanitário, foi elaborado um Plano de Encerramento e Manutenção das atividades ali desenvolvidas, onde foi previsto que alguns monitoramentos continuassem a ser executados por um período mínimo de 20 anos, considerando a mesma frequência e parâmetros avaliados durante a operação do aterro. Dentre os monitoramentos que vinham sendo realizados, previu-se a continuidade do monitoramento ambiental e geotécnico da área.

Devido à sua localização, o aterro pode, eventualmente, impactar diretamente 4 (quatro) bacias hidrográficas presentes na área, sendo elas: Ipanema, Coqueiros, Taiobas e Álvaro Camargos (Figura 1). Logo, é de suma importância a realização frequente da coleta e análise de amostras de suas águas subterrâneas, pois são interceptores de fluxo de poluentes oriundos do aterro.

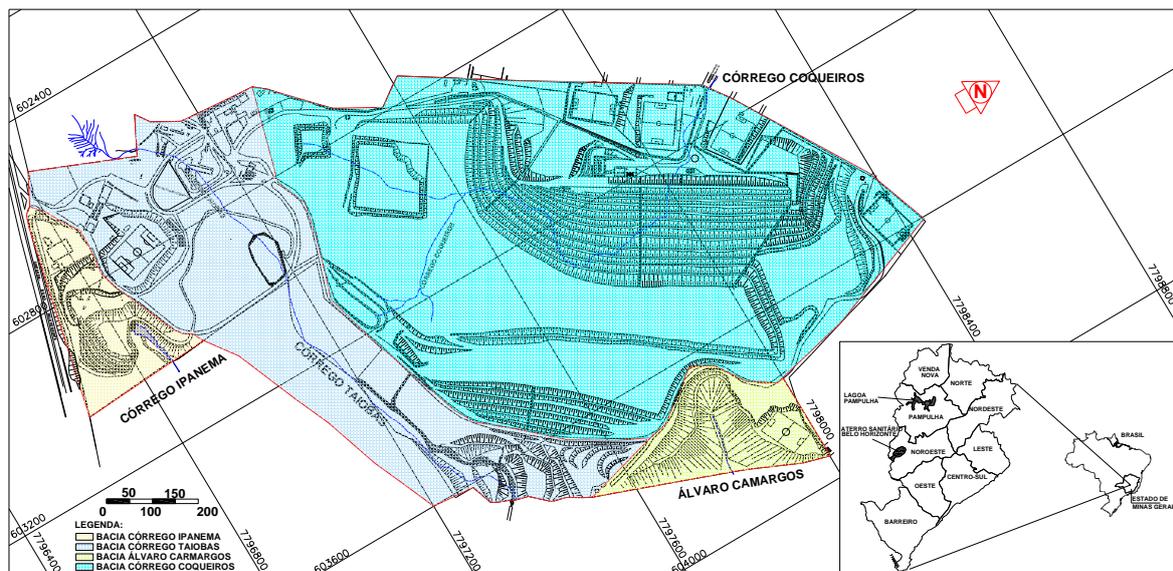


Figura 1 – Bacias hidrográficas na área de influência do aterro sanitário de Belo Horizonte

Há que se destacar a importância desses cursos d'água, já que na área territorial do município de Belo Horizonte, existem três bacias hidrográficas, as bacias do Ribeirão Arrudas e do Onça, ambos afluentes do Rio das Velhas e Rio São Francisco, e são as maiores do município, e uma terceira, a Bacia do Isidoro, na região Norte do município. O aterro sanitário de Belo Horizonte encontra-se inserido na sub-bacia hidrográfica do Córrego Sarandi, que pertence à bacia hidrográfica do Onça.

Para a realização do monitoramento das águas subterrâneas na área de influência do aterro sanitário de Belo Horizonte (MG), ao longo dos anos, foram instalados 27 poços (PM), sendo 21 simples (com profundidade variando entre 5 m e 33 m) e 6 multiníveis (profundidades de 10 m, 20 m e 30 m), cuja localização foi determinada de forma a contemplar todas as microbacias da área de influência do aterro (Figura 2).

Destaca-se que o monitoramento das águas subterrâneas é realizado há aproximadamente 24 anos e, quando do encerramento de sua operação, foi elaborado o Plano de Encerramento e Manutenção das atividades ali desenvolvidas, onde foi prevista a continuidade do monitoramento ambiental e geotécnico da área.

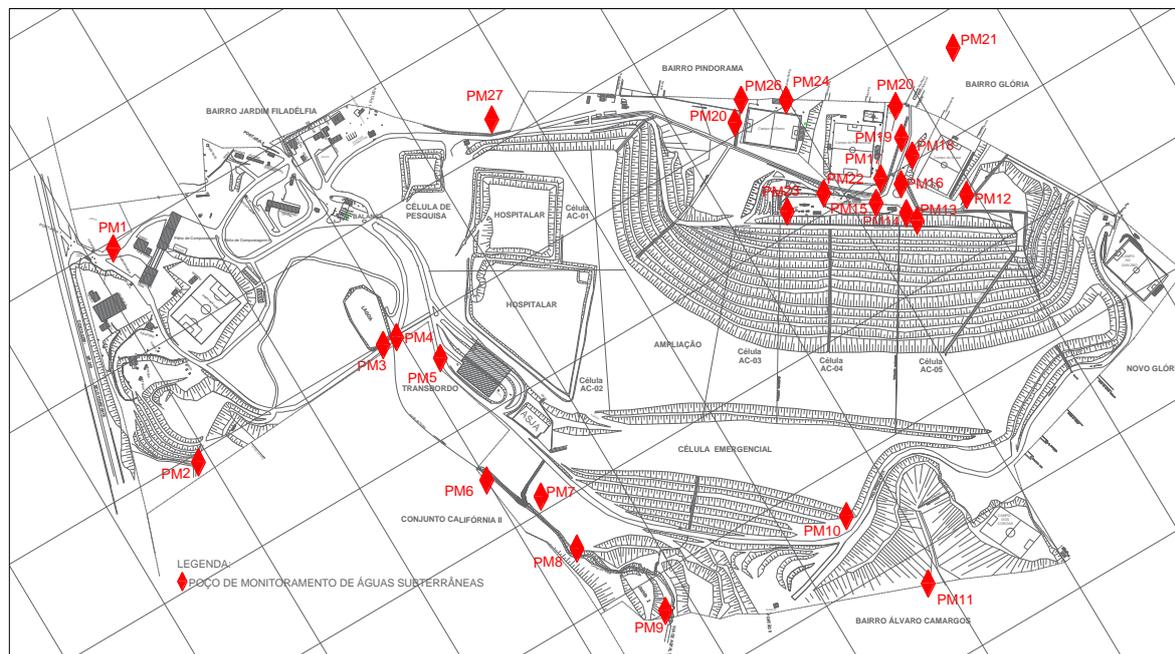


Figura 2 - Localização de poços de monitoramento de águas subterrâneas – Aterro Sanitário de Belo Horizonte/MG

O monitoramento da qualidade das águas subterrâneas consiste na avaliação de diversos parâmetros físico-químicos e microbiológicos. Neste trabalho serão apresentados e discutidos os resultados dos parâmetros: OD, DBO, DQO, pH, potencial redox (eh), condutividade elétrica, cloretos, sulfatos, série nitrogenada (NH_3 , NO_2^- e NO_3^-), metais (Al, Ba, Fe, Mn, Pb, Hg, Cr), série de sólidos (SDT) e surfactantes.

As metodologias de análise seguiram o *Standard Methods of Water and Wastewater* (APHA, 2005) e, para avaliar a qualidade das águas subterrâneas, considerou-se como referência, neste trabalho, os limites estabelecidos pela Portaria de Consolidação nº 5 (BRASIL, 2017). A coleta de amostras de águas e as análises são realizadas trimestralmente e, de forma complementar, é realizada leitura do nível d'água (mensal) em cada poço, ou câmara destes. O método de coleta é o de baixa vazão, após a purga do poço, ou com *bailer*, e o nível d'água é registrado com um medidor elétrico de nível d'água, composto por um sensor sonoro conectado a uma fita métrica.

Foi efetuada a análise da evolução temporal dos parâmetros mencionados anteriormente e avaliada uma estatística descritiva simples desses dados ao longo do tempo (valores mínimos e máximos, média, mediana e desvio padrão), considerando as bacias hidrográficas existentes.

Destaca-se que na estatística descritiva realizada, foram utilizados todos os resultados das análises, mesmo que pudessem ser considerados “*outliers*”, sob o ponto de vista estatístico. Isso muitas vezes faz com que valores médios, e eventualmente medianos, tenham grande influência desses valores extremos. No entanto, ressalta-se que valores extremos podem ter sofrido influência pontual de fatores ambientais diversos e que de fato podem retratar a condição no momento da coleta, e não uma falha nos procedimentos de amostragem e análise.

Com relação à frequência, a coleta de amostras de águas e as análises são realizadas trimestralmente em cada poço de monitoramento. Entretanto, alguns parâmetros que inicialmente eram monitorados, deixaram de ser e outros, ao longo do tempo passaram a ser realizados. Essas alterações devem-se à dinâmica do monitoramento e em conformidade com as análises temporais da evolução da concentração dos parâmetros que, em determinados momentos, indicou a necessidade de alteração nos parâmetros monitorados e, quando necessário, a frequência.

As amostragens e as análises são realizadas por empresas terceirizadas contratadas pela Superintendência de Limpeza Urbana da Prefeitura de Belo Horizonte.

Em relação aos estudos hidrogeológicos realizados, foram empregados modelos computacionais específicos e método geofísico de eletrorresistividade para caracterização dos fluxos das águas subterrâneas, identificação de eventuais plumas de contaminação e previsão de remediações futuras na área de influência do aterro sanitário de Belo Horizonte, conforme descrito em Kimura *et al.* (2005) e Bacellar & Catapreta (2010).

RESULTADOS

A) ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Os resultados do monitoramento das águas subterrâneas realizado têm permitido avaliar a evolução temporal da qualidade das águas subterrâneas na área de influência do aterro sanitário de Belo Horizonte antes e após o encerramento de suas atividades, e ao longo do tempo. De maneira geral, os resultados indicam uma grande variabilidade dos resultados ao longo do tempo, como pode ser visto mais adiante nesse trabalho.

Os resultados foram agrupados por bacias Hidrográficas existentes na área do aterro e por períodos, conforme descrito na Tabela 1 e apresentados na Figura 1. Deve-se considerar que ao longo do tempo, alguns parâmetros deixaram de ser monitorados e outros foram acrescidos, dada a dinâmica do monitoramento, assim como alguns poços foram instalados em função da necessidade melhor caracterizar a área de influência desse aterro. Os resultados da análise estatística descritiva são apresentados nas Tabelas 2 a 6.

Tabela 1 – Bacias hidrográficas monitoradas, períodos considerados e número de poços avaliados – Aterro Sanitário de Belo Horizonte/MG

Bacia	Período Considerado	Número de Poços	Observações
Álvaro Camargos	2000 – 2005	1	
	2006 – 2009	1	
	2010 – 2015	2	
	2016 – 2022	2	
Córrego Ipanema	2010 – 2015	1	Começou a ser monitorada em 2010.
	2016 – 2022	1	
Córrego Taiobas	2010 – 2015	8	Começou a ser monitorada em 2010.
	2016 – 2022	8	
Córrego Coqueiros	2000 – 2005	16	
	2006 – 2009	16	
	2010 – 2015	16	
	2016 – 2022	16	

Tabela 2 – Resultados da análise estatística descritiva dos parâmetros físico-químicas das águas subterrâneas observados no poço PM-10, por período (Bacia Álvaro Camargos).

Parâmetros	Al	Al ³⁺	NH3	Ba ²⁺	Pb ²⁺	Cl ⁻	Condut. (D)	Cr	Cr ⁶⁺	DBO	DOO	Dureza	Fe ³⁺	Mn ²⁺	Hg	Hg ²⁺	Nitrato	Nitrito	OD	pH	Potencial Redox	SDT	Sulfato	Surfactantes	
2000-2005																									
Média	8,24		0,07			17,57	278,24	0,037		19,52	63,04	112,97				0,0006		0,4829	0,0692	1,634	6,09	95,93	214,31	29,16	0,21
Max	74,70	2,00				489,20	850,00	0,160		65,00	618,00	893,20				0,0059		2,9400	1,2400	4,300	7,08	397,00	1566,00	319,00	0,96
Min	0,010		0,002			1,50	58,20	0,010		1,07	8,06	10,40				0,0001		0,0100	0,0010	0,100	5,70	-189,00	89,00	0,100	0,010
Mediana	1,020		0,020			5,00	255,50	0,030		14,40	41,00	87,00				0,0002		0,2000	0,0050	1,500	6,02	116,00	178,00	2,000	0,120
Desvio Padrão	17,111		0,285			68,03	139,10	0,024		17,09	99,77	143,46				0,0012		0,6675	0,2691	1,094	0,22	118,10	202,54	71,83	0,241
VMP	0,200	0,200	1,5	0,700	0,010	250	-	0,050	0,05	-	-	500	0,3	0,1	0,0010	0,0010	10	1,000	-	6,5 a 9,5	-	1000	250	0,500	
2006-2009																									
Média	1,77		0,218			13,57		0,023		22,60	56,17	123,85	3,48	2,15	0,0002	0,0002	0,4100	0,0441		6,36			288,39	18,25	0,190
Max	15,70		1,89			138,00		0,064		33,48	137,00	253,00	25,26	4,25	0,0009	0,0008	1,3800	0,3600		7,31			832,00	100,09	0,770
Min	0,100		0,010			1,00		0,005		1,30	18,11	33,00	0,050	0,200	0,0001	0,0001	0,0900	0,0050		5,64			204,00	0,800	0,030
Mediana	0,530		0,050			5,34		0,009		25,65	46,05	119,85	0,170	2,06	0,0002	0,0002	0,2000	0,0300		6,28			244,50	3,85	0,135
Desvio Padrão	3,23		0,411			27,43		0,022		11,86	41,34	42,81	5,59	0,78	0,0001	0,0001	0,4647	0,0529		0,34			144,34	36,30	0,160
VMP	0,200	0,200	1,5	0,700	0,010	250	-	0,050	0,05	-	-	500	0,3	0,1	0,0010	0,0010	10,000	1,000	-	6,5 a 9,5	-	1000	250	0,500	
2010-2015																									
Média	0,509	0,038	0,020	0,237	0,006	2,21	320,07	0,010	0,009	4,84	37,43	80,07	1,39	1,77	0,020	0,003	0,408	0,031	3,41	6,49	168,88	201,29	4,09	0,033	
Max	4,80	0,170	0,020	0,470	0,010	3,90	489,00	0,010	0,010	15,00	104,00	153,00	6,60	3,30	0,040	0,020	3,100	0,310	6,30	7,80	840,00	268,00	41,00	0,120	
Min	0,010	0,005	0,020	0,002	0,003	1,00	196,00	0,010	0,002	0,500	10,00	40,00	0,002	0,002	0,000	0,000	0,010	0,008	1,30	5,90	1,00	88,00	0,020	0,020	
Mediana	0,060	0,010	0,020	0,290	0,005	2,15	272,50	0,010	0,010	2,15	25,00	73,50	0,054	2,05	0,020	0,000	0,120	0,010	3,30	6,45	52,00	193,00	0,150	0,030	
Desvio Padrão	1,22	0,059	0,000	0,167	0,003	0,86	100,31	0,000	0,003	5,39	33,47	34,97	2,27	1,30	0,019	0,007	0,844	0,080	1,52	0,51	284,20	49,49	10,97	0,033	
VMP	0,200	0,200	1,500	0,700	0,010	250	-	0,050	0,050	500	0,300	0,100	0,001	0,001	10	1,000	-	6,5 a 9,5	-	1000	250	0,500			

1. Dissolvido; 2. Dureza Total; 3. Surfactantes; 4. Portaria nº 36 do Ministério da Saúde (1990); 5. Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde (2011); 6. Portaria nº 5 do Ministério da Saúde (2017).

Tabela 3 – Resultados da análise estatística descritiva dos parâmetros físico-químicas das águas subterrâneas observados no poço PM-11, por período (Bacia Álvaro Camargos).

Parâmetros	Al	Al'	NH3	Ba'	Pb'	Cl-	Condut. (O)	Cr	Cr'	DBO	DQO	Dureza	Fe'	Mn'	Hg	Hg'	Nitrato	Nitrito	OD	pH	Potencial Redox	SOT	Sulfato	Surfactantes
2010-2015																								
Média	1,04	0,26	0,02	0,07	0,01	3,03	209,06	0,01	0,01	2,26	13,78	16,44	2,64	0,54	0,0222	0,0067	0,927	0,040	1,96	6,47	-59,76	109,50	2,37	0,024
Max	6,50	1,50	0,02	0,14	0,01	15,00	263,00	0,01	0,01	11,00	50,00	33,00	7,80	1,20	0,0400	0,0200	4,50	0,34	4,40	7,60	294,00	202,00	7,30	0,100
Mín	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,30	81,00	0,00	0,00	0,50	10,00	0,04	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,010	0,008	2,40	5,90	-823,00	72,00	0,010	0,020
Mediana	0,04	0,01	0,02	0,09	0,01	1,95	227,00	0,01	0,01	0,58	10,00	15,00	1,47	0,72	0,0200	0,0000	0,195	0,100	1,60	6,40	-63,50	107,00	2,15	0,020
Desvio Padrão	1,80	0,58	0,00	0,05	0,00	3,31	49,03	0,00	0,00	3,32	9,47	7,99	2,90	0,43	0,0166	0,0097	1,50	0,80	1,33	0,42	220,32	29,56	1,90	0,019
VMP	0,2	0,2	1,5	0,7	0,01	250	-	0,05	0,05	-	500	0,3	0,1	0,0010	0,0010	11	1	-	6,5 a 9,6	-	1000	250	0,500	
2016-2022																								
Média	6,82	0,023	0,062	0,168	0,003	2,416	284,84	0,016	0,003	4,75	42,35	43,71	36,05	0,91	0,0001	0,0001	0,561	0,038	2,61	6,45	-24,06	122,17	21,54	0,196
Max	44,40	0,070	0,260	0,289	0,009	5,000	830,00	0,080	0,010	13,96	178,00	127,00	75,60	1,54	0,0002	0,0002	1,390	0,210	5,88	8,31	117,50	758,00	57,20	1,000
Mín	0,057	0,001	0,020	0,067	0,001	1,190	177,00	0,001	0,001	2,00	5,00	14,50	0,100	0,06	0,0001	0,0001	0,200	0,010	0,10	5,06	-78,10	54,00	3,23	0,050
Mediana	1,51	0,015	0,020	0,179	0,001	1,960	268,00	0,010	0,001	3,00	20,00	31,35	41,15	0,86	0,0001	0,0001	0,500	0,030	2,65	6,31	-25,72	94,50	18,95	0,200
Desvio Padrão	11,72	0,024	0,069	0,048	0,003	1,101	126,43	0,023	0,004	2,84	53,75	29,69	23,34	0,38	0,0000	0,0000	0,325	0,044	1,32	0,71	40,30	138,76	14,15	0,184
VMP	0,200	0,200	1,200	0,700	0,010	250	-	0,050	0,050	-	300	0,300	0,100	0,0010	0,0010	11,0	1,000	-	6,5 a 9,6	-	500	250	0,500	

1. Dissolvido; 2. Dureza Total; 3. Surfactantes; 4. Portaria nº 36 do Ministério da Saúde (1990); 5. Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde (2011); 6. Portaria nº 5 do Ministério da Saúde (2017).

Tabela 4 – Resultados da análise estatística descritiva dos parâmetros físico-químicas das águas subterrâneas observados no poço PM-02, por período (Bacia Córrego Ipanema).

Parâmetros	Al	Al'	NH3	Ba'	Pb'	Cl-	Condut. (O)	Cr	Cr'	DBO	DQO	Dureza	Fe'	Mn'	Hg	Hg'	Nitrato	Nitrito	OD	pH	Potencial Redox	SOT	Sulfato	Surfactantes
2010-2015																								
Média	3,30	2,86	0,028	0,052	0,009	3,57	382,96	0,008	0,008	0,95	10,90	87,95	0,033	1,16	2,83	2,83	0,73	0,58	1,41	4,83	0,011	0,010	0,024	0,031
Max	14,00	9,50	0,150	0,100	0,064	14,00	1917,00	0,010	0,010	3,50	17,00	309,00	0,240	4,30	9,70	9,70	3,20	1,10	7,80	9,40	0,060	0,060	0,160	0,100
Mín	0,005	0,005	0,020	0,002	0,003	0,510	0,100	0,002	0,002	0,500	10,00	17,00	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,020
Mediana	1,70	1,50	0,020	0,057	0,005	2,20	155,50	0,010	0,010	0,500	10,00	36,00	0,005	1,20	2,60	2,60	0,52	0,57	6,00	5,25	0,005	0,005	0,005	0,020
Desvio Padrão	3,96	3,35	0,030	0,031	0,014	3,69	484,51	0,004	0,004	0,884	2,22	90,10	0,065	0,96	3,00	3,00	0,82	0,38	2,04	2,88	0,014	0,014	0,043	0,026
VMP	0,200	0,200	1,5	0,7	0,01	250	-	0,050	0,050	-	500	0,300	0,100	0,001	0,001	11	1	-	6,5 a 9,6	-	1000	250	0,500	
2016-2022																								
Média	0,420	0,072	0,050	0,130	0,122	7,96	225,18	0,004	0,004	2,82	8,46	55,61	0,038	2,66	1,08	1,36	2,12	1,283	1,742	3,580	0,005	0,320	0,404	0,165
Max	2,17	0,72	0,140	0,250	2,980	102,58	1299,00	0,010	0,010	3,00	20,00	235,00	0,120	4,09	2,32	2,31	6,66	3,190	3,500	8,910	0,014	0,762	1,280	0,200
Mín	0,100	0,001	0,020	0,084	0,001	1,85	62,40	0,001	0,001	2,00	5,00	20,50	0,001	0,250	0,108	0,112	0,244	0,415	0,580	0,351	0,001	0,001	0,001	0,050
Mediana	0,210	0,005	0,020	0,111	0,006	3,01	137,00	0,003	0,002	3,00	5,00	41,45	0,024	2,69	1,01	1,32	0,368	1,230	1,630	3,230	0,005	0,276	0,256	0,200
Desvio Padrão	0,46	0,18	0,053	0,048	0,583	19,53	279,97	0,003	0,004	0,37	6,45	44,49	0,040	0,926	0,445	0,400	2,48	0,541	0,751	2,638	0,004	0,235	0,377	0,064
VMP	0,200	0,200	1,200	0,700	0,010	250	-	0,050	0,050	-	300	0,300	0,100	0,001	0,001	11	1	-	6,5 a 9,6	-	500	250,000	0,500	

1. Dissolvido; 2. Dureza Total; 3. Surfactantes; 4. Portaria nº 36 do Ministério da Saúde (1990); 5. Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde (2011); 6. Portaria nº 5 do Ministério da Saúde (2017).

Tabela 5 – Resultados da análise estatística descritiva dos parâmetros físico-químicas das águas subterrâneas observados nos poços da Bacia Córrego Taiobas, por período.

Parâmetros	Al	Al'	NH3	Ba'	Pb'	Cl-	Condut. (O)	Cr	Cr'	DBO	DQO	Dureza	Fe'	Mn'	Hg	Hg'	Nitrato	Nitrito	OD	pH	Potencial Redox	SOT	Sulfato	Surfactantes
2010-2015																								
Média	0,13	0,04	0,02	0,34	0,01	37,83	409,20	0,009	0,008	2,47	15,36	101,00	0,840	1,30	0,28	0,27	2,42	0,10	2,22	6,60	34,41	255,17	9,49	0,032
Max	3,60	0,650	0,130	3,60	0,150	313,00	1716,00	0,021	0,020	33,00	92,00	398,00	23,00	9,70	9,70	26,00	1,10	7,80	9,40	390,00	870,00	314,00	0,480	
Mín	0,001	0,001	0,010	0,002	0,001	0,075	0,10	0,002	0,002	0,50	2,90	0,060	0,002	0,000	0,000	0,000	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Mediana	0,010	0,010	0,020	0,002	0,003	1,20	263,00	0,010	0,010	0,50	10,00	44,00	0,005	0,002	0,040	0,000	0,010	0,010	1,40	6,50	0,005	0,005	0,000	0,020
Desvio Padrão	0,032	0,010	0,020	0,096	0,005	32,00	429,00	0,010	0,010	0,57	10,00	88,00	0,005	0,150	0,020	0,000	0,410	0,010	1,80	6,60	6,45	262,00	3,00	0,020
VMP	0,319	0,088	0,017	0,543	0,016	38,22	263,36	0,003	0,004	4,35	12,05	73,28	3,09	2,22	1,21	1,21	5,57	2,23	1,71	3,32	120,71	146,30	34,11	0,042
VMP	0,200	0,200	1,5	0,700	0,010	250	-	0,050	0,050	-	500	0,300	0,1	0,001	0,001	11	1,000	-	6,5 a 9,6	-	1000	250	0,500	
2016-2022																								
Média	1,73	0,572	0,385	1,640	0,014	49,06	484,68	0,007	0,002	4,16	16,48	158,37	105,79	1,41	0,905	1,26	2,18	0,488	1,48	8,23	23,56	280,37	22,14	0,261
Max	101,00	0,520	13,00	192,00	0,017	500,00	1720,00	0,100	0,007	21,31	73,30	874,00	21400,00	8,91	2,32	2,31	11,50	3,19	6,50	9,50	325,00	1144,00	503,00	0,800
Mín	0,001	0,001	0,020	0,020	0,001	0,500	3,11	0,001	0,000	2,01	5,00	5,09	0,003	0,001	-	-	-	-	-	-	-547,00	0,000	0,000	0,000
Mediana	0,050	0,010	0,020	0,040	0,001	0,500	1090,00	0,002	0,000	2,76	5,50	131,00	0,076	1,54	1,30	1,47	0,320	0,040	0,300	6,52	0,005	353,00	0,000	0,220
Desvio Padrão	0,100	0,010	0,020	0,289	0,002	40,55	507,00	0,002	0,001	3,16	10,40	124,50	0,406	1,01	0,940	1,32	0,970	0,060	1,00	6,42	16,40	282,00	8,96	0,225
VMP	0,200	0,200	1,20	0,700	0,010	250	-	0,050	0,050	-	300	0,300	0,100	0,001	0,001	11	1,000	-	6,5 a 9,6	-	500	250	0,500	

1. Dissolvido; 2. Dureza Total; 3. Surfactantes; 4. Portaria nº 36 do Ministério da Saúde (1990); 5. Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde (2011); 6. Portaria nº 5 do Ministério da Saúde (2017).

Tabela 6 – Resultados da análise estatística descritiva dos parâmetros físico-químicas das águas subterrâneas observados nos poços da Bacia Córrego Coqueiros, por período.

Parâmetros	Al	Al'	NH3	Ba'	Pb'	Cl-	Condut. (O)	Cr	Cr'	DBO	DQO	Dureza	Fe'	Mn'	Hg	Hg'	Nitrato	Nitrito	OD	pH	Potencial Redox	SOT	Sulfato	Surfactantes
2000-2005																								
Média	1,358	0,948				245,72	960,16	0,035		14,05	64,70	275,80			0,963		0,535	0,026	1,47	6,15	104,68	671,02	8,60	0,227
Max	28,31	26,40				3523,00	17850,00	1,010		310,00	995,00	1209,00			28,31		8,81	6,620	7,90	7,50				

Bacia do Álvaro Camargos

Para avaliação da qualidade das águas subterrâneas nessa bacia, foi considerado um ponto de monitoramento localizado sob a área de disposição de RSU (PM10) e outro a jusante, fora da área de disposição de RSU (PM11). Nas Tabelas 2 e 3 podem ser observados os resultados da análise estatística descritiva dos registros do monitoramento por período. Não foram observadas diferenças, ou variações significativas, antes e após o encerramento das atividades de aterragem de resíduos no aterro. De maneira geral, a maioria dos parâmetros apresentou valores de concentração médios e medianos inferiores ao VMP estabelecido na legislação, nos períodos analisados. Além disso, de uma forma geral, os valores observados no poço PM11, localizado fora da área de disposição do aterro, apresentou valores médios e medianos inferiores ao PM10 para a maioria dos parâmetros analisados. Podem ser destacados o alumínio, o ferro e o manganês, que apresentaram valores médios superiores ao VMP. Aparentemente, essas variações podem estar relacionadas com a mineralogia do solo local.

Bacia do Córrego Ipanema

Nessa bacia, há somente um poço implantado, denominado PM02, localizado à montante de uma área onde foram dispostos somente resíduos de construção civil (RCC). Na Tabela 4 podem ser observados os resultados da análise estatística descritiva dos registros do monitoramento por período.

As concentrações de Al, Mn e Hg apresentaram valores médios e medianos superiores ao VMP, em ambos os períodos monitorados. Os nitratos também apresentaram valores médios e medianos acima do VMP. O pH apresentou oscilações atípicas em relação à faixa estabelecida pela legislação. A mineralogia dos solos da área pode explicar em parte os valores observados, uma vez que não há influência direta da disposição de resíduos nesse ponto.

De maneira geral, para os demais parâmetros os resultados se mostram satisfatórios, apresentando concentrações médias e medianas dentro do estabelecido pela legislação.

Bacia do Córrego Taiobas

Nessa bacia encontram-se as primeiras áreas em que foi realizada a disposição de RSU nesse aterro, ainda na década de 70. Na Tabela 5 podem ser observados os resultados da análise estatística descritiva dos registros do monitoramento por período.

Como pode ser observado na Tabela 5, foram verificados valores médios e medianos acima do VMP para os parâmetros alumínio, ferro, manganês e mercúrio. Com exceção do mercúrio, os valores observados podem estar associados à mineralogia dos solos da área. Alguns valores máximos observados, acima do VMP, podem, eventualmente, estar relacionados à disposição de RSU à montante dos poços considerados e, provavelmente, ao fato de que o córrego Taiobas recebe esgoto doméstico à montante (contribuição externa à área do aterro sanitário), e que eventualmente poderia estar afetando a qualidade das águas subterrâneas nessa região do aterro. Como essa área foi encerrada no final dos anos 70, também não se pode fazer uma correlação com o período de encerramento das atividades do aterro.

Bacia do Córrego Coqueiros

Na Tabela 6 podem ser observados os resultados da análise estatística descritiva dos registros do monitoramento por período nos poços de monitoramento localizados na Bacia do Córrego coqueiros, por períodos. Esta é a maior bacia na área de influência do aterro sanitário e onde se encontra implantada a maior parte dos poços de monitoramento, dada a sua vulnerabilidade.

Como pode ser observado na Tabela 6, foram verificados valores médios e medianos acima do VMP para os parâmetros alumínio, ferro, manganês e mercúrio. Com exceção do mercúrio, os valores observados podem estar associados à mineralogia dos solos da área. Alguns valores máximos observados, acima do VMP, podem, eventualmente, estar relacionados à disposição de RSU à montante dos poços considerados.

De maneira geral, para os demais parâmetros, os resultados se mostram satisfatórios, apresentando concentrações médias e medianas e valores máximos dentro do estabelecido pela legislação. Não foram observadas diferenças, ou variações significativas, antes e após o encerramento das atividades de aterragem de resíduos no aterro.

B) NÍVEL D'ÁGUA X PRECIPITAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS

Possíveis relações entre a variação dos níveis d'água nos poços de monitoramento de águas subterrâneas ao longo dos anos com o regime pluviométrico e mesmo com a evolução dos parâmetros físico-químicos, não ficaram evidenciadas, embora em alguns momentos possam ser identificadas algumas tendências. Tal observação reforça a complexidade do estabelecimento de tais relações diretas, que são função de uma complexa interação entre aspectos geológico-geotécnicos da área e de sua relação com o regime climatológico.

C) ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS

O programa de monitoramento de águas subterrâneas também vem permitindo a realização de estudos hidrogeológicos na área de influência do aterro sanitário de Belo Horizonte, que é essencial devido à sua localização, no meio da malha urbana do município. Foram realizados 3 (três) estudos, em 2005, 2009 e 2010, respectivamente (Kimura *et al*, 2005; Bacellar & Catapreta, 2010).

Segundo as modelagens numéricas executadas na área do aterro em 2005 e 2009, as águas subterrâneas identificadas neste trecho com alterações de qualidade tendem a fluir em direção ao fundo do vale do córrego dos Coqueiros (Figura 3). Como salientado nesses estudos, tais modelagens pressupõem condições de homogeneidade e isotropia dos aquíferos, que nem sempre correspondem à situação real. Por tal motivo, no estudo desenvolvido em 2009, foi recomendada a execução de ensaios de eletrorresistividade para melhor conhecimento das condições subsuperficiais dos aquíferos e da pluma de contaminação, assim como a instalação de mais poços de monitoramento.

Esse estudo, conduzido em 2009, apontou ser a área do vale do córrego dos Coqueiros mais afetada pela contaminação por líquidos lixiviados do aterro sanitário. Contudo, a pluma de contaminação delimitada pela eletrorresistividade não apresenta geometria uniforme, exibindo um padrão irregular e descontínuo, possivelmente condicionado pelas heterogeneidades e anisotropias do substrato geológico.

O levantamento geolétrico confirmou também o efeito do declive topográfico local, que atua direcionando os contaminantes das encostas laterais para a calha do córrego dos Coqueiros, onde são encontradas as menores resistividades aparentes.

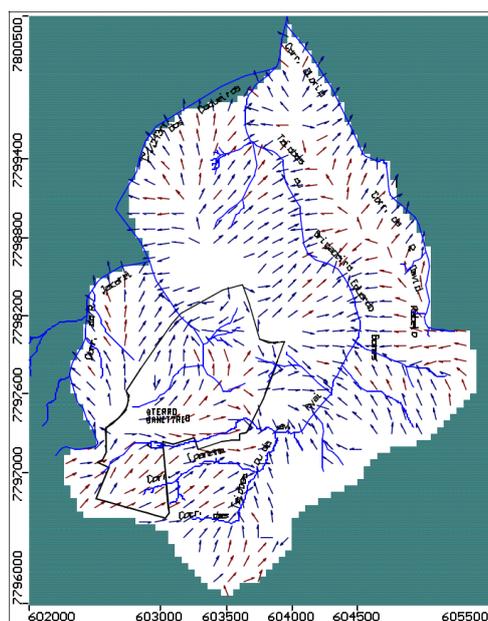


Figura 3 – Mapa das direções de fluxo das águas subterrâneas – Aterro sanitário de Belo Horizonte (Fonte: Kimura *et al*, 2005)

CONCLUSÕES

A avaliação dos resultados das análises físico-químicas realizadas sugere que o aterro sanitário de Belo Horizonte (MG), mesmo após o encerramento de suas atividades, ainda pode estar contribuindo para alteração da qualidade das águas subterrâneas na sua área de influência. Mesmo que pontualmente e considerando os parâmetros avaliados neste trabalho, valores acima dos VMP ainda foram observados, sugerindo que, associados à mineralogia dos solos locais, o aterro ainda pode estar influenciando a qualidade das águas subterrâneas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15847, Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento – Método de Purga. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 15 p.
2. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13896, Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 12 p.
3. APHA - American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th Edition, 2005. (APHA/AWWA/WEF).
4. BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Brasília: 2017.
5. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 396 de 07 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências Brasília: CONAMA, 2008.
6. KIMURA, G.; LOUREIRO, C. O.; CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F.; BATISTA, H. P. Simulation of groundwater flow at Belo Horizonte Landfill area using visual Modflow. In: International Conference on Diffuse Pollution, 11, 2007, Belo Horizonte. Proceedings of 11th International Conference on Diffuse Pollution. Belo Horizonte: IWA, 2007.
7. BACELLAR, L. A. P.; CATAPRETA, C. A. A. Emprego de eletrorresistividade para delimitação de pluma de contaminação por líquidos lixiviados no aterro sanitário de Belo Horizonte. Revista Águas Subterrâneas, São Paulo, v. 24, p. 46-58, 2010.