

SIMULAÇÃO DE FLUXO VERTICAL EM ATERRO SANITÁRIO: UM ESTUDO DE CASO

Simulation of vertical flow in a sanitary landfill: a case study

Victoria Ottoni Almeida de Souza*

Claudio Fernando Mahler**

Martinus Theodorus van Genuchten***

Elizabeth May B. D. Pontedeiro****

RESUMO – O objetivo deste trabalho foi estudar o fluxo de água em camadas de cobertura de aterros sanitários através do emprego do código HYDRUS-1D (Šimůnek *et al.*, 2013). Após um estudo paramétrico, com dados obtidos em ensaios de campo e laboratório, definiram-se os parâmetros para a simulação dos modelos geométricos. Dois cenários foram propostos a partir da configuração final do aterro: 1º células do aterro tratadas isoladamente, somando-se ao final o volume de líquido produzido por cada célula; e, 2º células sobrepostas, como na situação de campo, calculando e adicionando o volume produzido para cada altura de perfil. O volume determinado na análise numérica foi comparado com o volume de lixiviados medido no aterro. Observou-se que o HYDRUS-1D é uma ferramenta eficiente para o estudo de fluxo em aterros de resíduos urbanos. Os resultados sugerem que os processos hidrológicos no aterro são fortemente influenciados pela pluviometria, condutividade hidráulica, número e espessuras de coberturas intermediárias, bem como da cobertura final.

SYNOPSIS – This research aimed to study the flow of water through cover layers of landfills using the HYDRUS-1D computational code (Šimůnek *et al.*, 2013). After a parametric study based on data obtained from field and laboratory tests, the final unsaturated hydraulic parameters were selected for simulating flow through a landfill assuming the particular geometry. Based on the final configuration of the landfill, two scenarios were considered. First assuming flow through individual landfill cells, after which the volumes of fluid produced by each cell were added together. Second considering overlapping cells as in the actual field situation, with the volumes calculated for each profile height added to produce one overall drainage estimate for the entire landfill. Volumes of leachate obtained for both scenarios were compared with field observation drainage rates. The research shows that the selected 1D computer code proved to be an efficient tool for studying flow in municipal solid waste landfills. Results suggest that hydrological processes in a landfill are strongly influenced by rainfall, hydraulic conductivity and the number and thicknesses of intermediate and final cover layers.

PALAVRAS CHAVE – Aterros sanitários, fluxo vertical, modelagem computacional.

* Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Mestre em Geotecnia Ambiental, Doutoranda em Geotecnia Ambiental no PEC/COPPE/UFRJ. E-mail: victoria@mecanica.coppe.ufrj.br

** DSc em Geotecnia, Professor Associado IV do PEC/COPPE/UFRJ. Líder do Grupo de Estudos em Tratamento de Resíduos (GETRES) na UFRJ. E-mail:cfmahler@gmail.com

*** PhD em Física de Solos, New Mexico State University, EUA. Professor no Department of Earth Sciences da Utrecht University, Holanda. Professor Colaborador no DEM/COPPE/UFRJ. E-mail: rvangenuchten@hotmail.com

**** DSc em Engenharia Mecânica, PEM/COPPE/UFRJ, Pesquisador Colaborador no Programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ. E-mail: bettinadulley@hotmail.com

1 – INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas que pode ocorrer em aterros de resíduos sólidos urbanos é a contaminação das águas subterrâneas causada pelo lixiviado produzido no interior do aterro e que flui em direção à sua base. O lixiviado, produto da umidade dos resíduos, da decomposição da matéria orgânica, da água da chuva e possíveis outros elementos líquidos que penetrem no aterro, apresenta altos valores de DQO e DBO, com elevados teores de metais pesados e outros compostos orgânicos e inorgânicos, que, ao alcançar o lençol subterrâneo, contaminam suas águas bem como o subsolo.

Por outro lado, a percolação desses líquidos através do corpo do aterro é inevitável e contribui para que a decomposição dos resíduos aconteça, propiciando processos aeróbios, próximos à superfície e anaeróbios a partir de certa profundidade, que provocam degradação biológica e química da matéria orgânica, em primeiro lugar, e a seguir, de outros elementos presentes na massa de resíduos, contribuindo para a formação de mais lixiviado e gases, que dependendo das condições e quantidade, podem eventualmente ser explorados comercialmente.

Ao mesmo tempo que a produção de lixiviados pode representar um grande problema para o aterro, o conhecimento dos processos hidrológicos que ocorrem no seu interior, assim como a previsão do fluxo ao longo da sua vida útil e no pós-fechamento, são de extrema importância para o projeto de drenagem e as manobras de operação tais como recirculação, armazenamento e tratamento de lixiviados, para posterior lançamento em corpos d'água. Cabe aqui ressaltar a influência preponderante dos processos hidrológicos na camada de cobertura final de solo compactado, empregada para o encerramento do aterro ao término da sua vida útil, e que será objeto de estudos neste trabalho.

Devido à crescente preocupação com as questões de cunho ambiental, a partir do início da década de 80, vêm sendo desenvolvidos diversos modelos computacionais para a estimativa da quantidade de líquidos lixiviados em aterros sanitários. Esses modelos estão se tornando, cada vez mais, uma valiosa ferramenta para a avaliação do desempenho dos sistemas de cobertura de aterros. Porém, a escolha da metodologia adequada é de extrema importância, devendo-se levar em consideração as condições do local, dos resíduos e de operação do aterro, entre outras.

O código computacional escolhido, HYDRUS-1D (Šimůnek *et al.*, 2013), é um programa de elementos finitos que simula o movimento unidimensional de água, calor e soluto, em meios porosos variavelmente saturados, para várias condições limite, incluindo precipitação e evaporação. Para a solução do problema, o programa requer a definição da distribuição inicial de pressão (distribuição espacial da carga hidráulica inicial sobre o domínio de fluxo) e das condições iniciais de contorno do sistema em questão, descritas na modelagem do problema.

O modelo apresenta várias possibilidades de cenários, relativamente à geometria das camadas de solo, aos materiais que compõem as diferentes camadas, situações temporais definidas para as simulações e para o cálculo computacional (discretização de tempo), condições de fluxo iniciais e de contorno e permite a escolha dentre cinco modelos analíticos para as propriedades hidráulicas (função de retenção de água no solo): Brooks e Corey (1964), van Genuchten (1980), Vogel e Císlerová (1988), Kosugi (1966) e Durner (1994), podendo considerar ou não a histerese no cálculo computacional para o caso específico do modelo de van Genuchten (1980). Este último emprega a distribuição estatística de tamanho dos poros de Mualem (1976), para a obtenção da equação para a previsão da condutividade hidráulica não saturada, em função dos parâmetros de retenção de água pelo solo, tendo sido adotado para a presente pesquisa.

Como caso prático, estudou-se o fluxo de água e de lixiviado no Aterro Sanitário de Nova Iguaçu, no estado do Rio de Janeiro, por encontrar-se em fase final de implantação, por ocasião desta pesquisa.

2 – O ATERRO SANITÁRIO DE NOVA IGUAÇU

O trabalho baseou-se em dados de monitoramento e ensaios relativos ao “Sub-Aterro 1” do Aterro Sanitário de Nova Iguaçu (Fig. 1), cuja área de implantação está situada entre as latitudes de 22° 30’ e 23° S no meridiano 43° 00’ W, em região de planície (Borba, 2006).

O “Sub-Aterro 1” foi implantado segundo o método executivo do tipo encosta ou rampa, onde numa área relativamente plana de meia encosta se modifica a topografia através de terraplanagem, construindo-se uma rampa onde os resíduos são dispostos, formando células. O método consiste no aterro construído a partir do aproveitamento de um talude natural ou construído, onde os resíduos são compactados de encontro a esse talude previamente protegido por uma geomembrana de PEAD (polietileno de alta densidade).



Fig. 1 – Situação de operação do Aterro Sanitário de Nova Iguaçu em 2010, indicando o Sub Aterro 1 (esquerda) (Bortolazzo, 2010) e ilustração esquemática da configuração final (direita) (adaptada de Borba, 2006).

Os valores referentes ao controle da vazão de lixiviados foram fornecidos pela empresa que administrava o aterro por ocasião da pesquisa (Haztec Tecnologia e Planejamento Ambiental S.A.). O Quadro 1 apresenta a produção anual de lixiviados, desde o segundo ano da deposição de resíduos em células (janeiro de 2004) até dezembro de 2010, data de conclusão da etapa estudada (encerramento do Sub-Aterro 1).

Quadro 1 – Quantitativo de resíduos recebidos e geração anual de lixiviados.

Ano	Resíduos recebidos (ton/ano)	Total acumulado de resíduos (ton/ano)	Geração de lixiviados (m ³ /ano)
2003	294 607	294 607	-
2004	580 682	875 289	30 084
2005	796 114	1 671 403	55 445
2006	532 337	2 203 740	41 041
2007	365 671	2 569 411	41 899
2008	316 637	2 886 048	55 088
2009	68 561	2 954 609	50 103
2010	97 692	3 052 301	33 098

3 – ESTUDO REALIZADO

O estudo constou, em sua fase preliminar, de cinco etapas distintas:

- 1) Coleta de amostras de solo da camada de cobertura final, em nove pontos distintos do Sub-Aterro 1;
- 2) Realização de ensaios de laboratório com as amostras colhidas, para a determinação de parâmetros geotécnicos e hidráulicos;
- 3) Estudo paramétrico para a definição de alguns valores iniciais de entrada no Programa, a partir de simulações preliminares, visando posterior emprego destes nas demais simulações;
- 4) Definição do modelo para o cálculo final da vazão de lixiviados; e,
- 5) Comparação dos resultados obtidos através dos modelos adotados, com as vazões monitoradas no aterro.

Verificou-se, na fase preliminar da pesquisa, que seriam necessários dados de pluviometria e temperaturas mínima e máxima diárias, para utilização no programa de simulação, com a finalidade de aproximar o máximo possível da situação real do cotidiano do aterro. Com este objetivo, e diante da falta de dados diários da região do aterro, se tentou encontrar uma estação meteorológica o mais próximo possível desta região, tendo sido selecionadas as estações meteorológicas automáticas de Xerém e Ecologia Agrícola (Seropédica), monitoradas pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), sendo solicitada a este Instituto uma série histórica (com dados diários) destas estações. Porém, os dados recebidos não foram suficientes, e, diante da necessidade de uma série mais longa, foram obtidos dados da Estação Pluviométrica de Anchieta, localizada ao norte do Município do Rio de Janeiro, por se tratar da estação mais próxima operando na região que disponibilizava esses dados. Esses dados foram obtidos através do *site* AlertaRio, da Fundação GEORIO (<http://www0.rio.rj.gov.br/alertario>), cujo sistema utiliza informações, em tempo real, de 32 estações pluviométricas automáticas instaladas no Município do Rio de Janeiro e, juntamente com dados de temperaturas máximas e mínimas diárias da Estação Automática de Ecologia Agrícola (Seropédica), fornecidos pelo INMET (2011), foram empregados nas simulações. A partir da inserção desses dados no programa HYDRUS-1D, este calcula a evapotranspiração potencial (ET).

Para o estudo do fluxo com o código HYDRUS, os dados meteorológicos empregados corresponderam a um período de 10 anos (janeiro/2001 – dezembro/2010), replicados para obter um período total de simulação de 20 anos.

Para a obtenção de dados relativos ao solo de cobertura final do aterro, foi realizada a coleta de nove amostras, em três regiões distintas e com diferentes idades de resíduos, sendo três amostras de cada região, distantes de 2 a 5 metros entre si, para cada região considerada, de forma a se obter uma maior representatividade do aterro. Para cada amostra coletada, foram realizados ensaios para a determinação da condutividade hidráulica saturada, da retenção de umidade pelo solo e da composição granulométrica. O Quadro 2 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de granulometria para as amostras de solo denominadas AMS01, AMS02 e AMS03, referentes aos pontos de coleta PT-02, PT-01 e PT-03, respectivamente (Fig. 2).

Quadro 2 – Composição granulométrica das amostras 01, 02 e 03, dos solos das 3 regiões selecionadas do Sub-Aterro 1 (Escala ABNT).

Amostra	Argila	Silte	Areia			Pedregulhos
			Fina	Média	Grossa	
PT-01	31	21	13	18	14	3
PT-02	25	18	15	18	19	5
PT-03	36	16	8	13	23	4

A determinação da condutividade hidráulica saturada das amostras, coletadas em pontos distintos do Sub-Aterro 1 (Fig. 2) foi feita através de ensaios de carga variável, realizados em conformidade com a NBR 14545/2000, com a utilização do permeâmetro de carga variável.

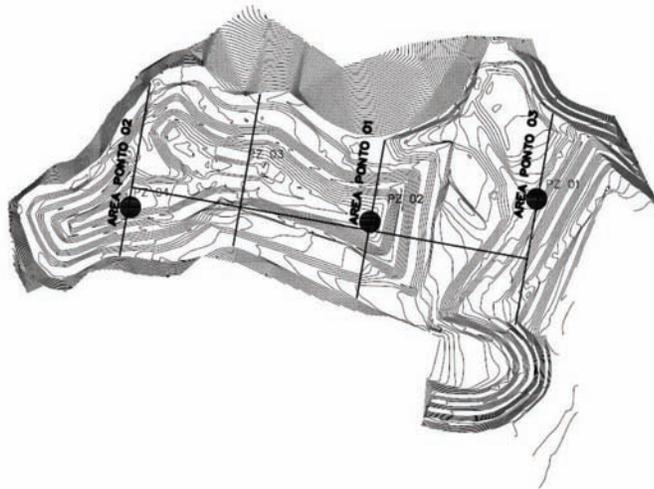


Fig. 2 – Localização dos pontos de retirada das amostras para ensaios de permeabilidade e composição granulométrica (da esquerda para a direita: PT-02, PT-01 e PT-03, marcados com círculos).

O Quadro 3 apresenta os valores médios da condutividade hidráulica vertical obtidos dos ensaios das amostras do solo de cobertura final do Sub-Aterro 1.

Para a determinação dos demais parâmetros hidráulicos de entrada no Programa HYDRUS, referentes às camadas de cobertura, o programa faz uma previsão destes a partir do valor dos percentuais de argila, silte e areia, por meio do emprego de rede neural baseada em funções de pedotransferência que integram o pacote computacional HYDRUS-1D e o código Rosetta (Schaap *et al.*, 2001). Esses parâmetros, descritos no Quadro 4, são função da retenção da água nos solos.

Quadro 3 – Valores médios calculados (em cm/s) para as permeabilidades de cada ponto e valor médio final para emprego nas simulações.

	K_{AM1}	K_{AM2}	K_{AM3}	K_m
PT-01	3,89E-05	3,54E-05	3,04E-05	3,49E-05
PT-02	3,75E-05	1,93E-05	*	2,84E-05
PT-03	8,75E-06	9,05E-06	3,48E-05	1,75E-05
	Média final			2,69E-05

* amostra não aproveitada por estar danificada.

Quadro 4 – Dados de entrada no Hydrus-1D para parâmetros hidráulicos (Šimůnek *et al.*, 1998).

Parâmetros de retenção de água pelos solos
θ_r - conteúdo volumétrico de água residual
θ_s - conteúdo volumétrico de água saturado
α - parâmetro empírico para a curva de retenção de van Genuchten ou Brooks-Corey
n - parâmetro empírico para a curva de retenção de van Genuchten
K_S - condutividade hidráulica saturada

Devido à falta de informações suficientes e adequadas, relativamente aos resíduos, os parâmetros hidráulicos destes foram obtidos da literatura, através de Breitmeyer (2011), onde o autor realiza um estudo detalhado para a estimativa dos parâmetros hidráulicos não saturados dos resíduos sólidos urbanos. Para esse estudo, Breitmeyer utilizou 46 amostras com diferentes massas específicas secas e níveis de decomposição, em escala de laboratório e de campo, com o emprego do código computacional HYDRUS-1D. Na presente pesquisa, foram utilizados os resultados médios obtidos por Breitmeyer para o modelo de van Genuchten-Mualem (Quadro 5).

Quadro 5 – Parâmetros hidráulicos dos resíduos segundo o modelo de van Genuchten (1980), empregados nos cálculos (Breitmeyer, 2011).

θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n (-)	K_S (cm s^{-1})	l (-)
0,25	0,53	0,20	1,98	2,7E-05	0,5

4 – METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO COM HYDRUS-1D

4.1 – O modelo geométrico

Para todas as simulações realizadas, o modelo geométrico foi definido considerando-se as camadas de cobertura final e intermediárias com 60 cm de espessura, e as camadas de resíduos com 500 cm de espessura, havendo pequenas variações na camada de resíduos da base, conforme a necessidade de definição dos perfis analisados (Fig. 3).

Na fase inicial da pesquisa, os perfis simulados corresponderam aos pontos de coleta das amostras (PT-01, PT-02 e PT-03), e as seções originais da massa de resíduos do Sub-Aterro I referentes a esses pontos podem ser vistas através das Figs. 4a, b e c.

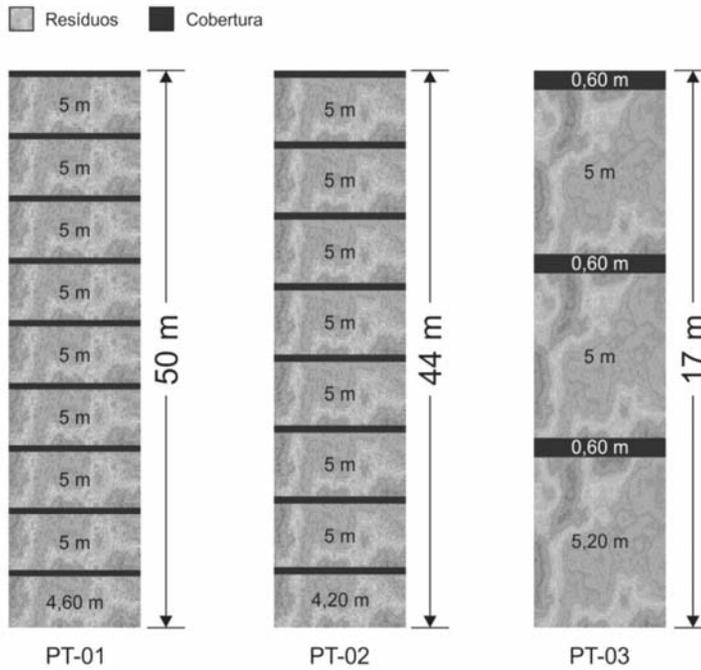


Fig. 3 – Perfis dos pontos PT-01 (50m), PT-02 (44m) e PT-03 (17m), gerados pelo programa HYDRUS-1D (adaptados).

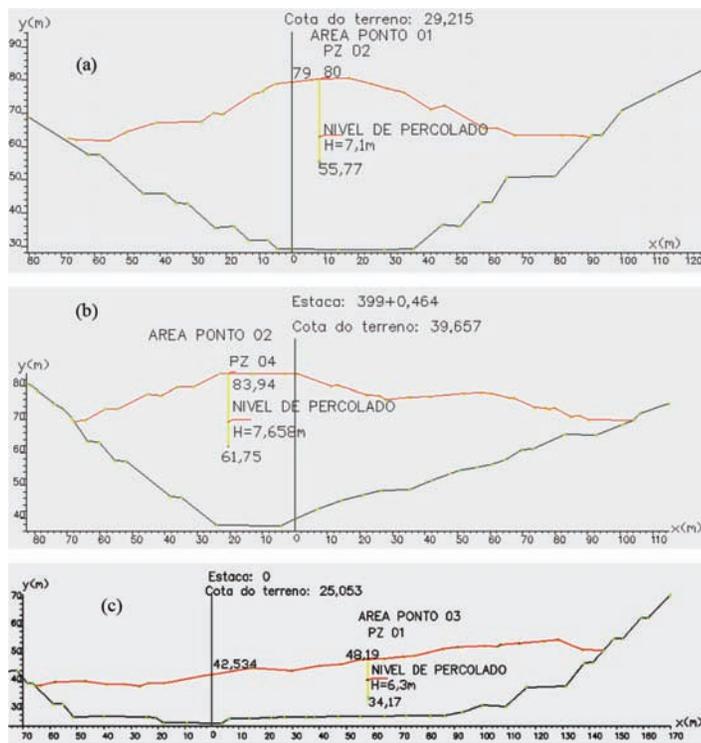


Fig. 4 – Seções referentes aos pontos (PT-01, PT-02 e PT-03) de retirada das amostras no Sub-Aterro 1.

A camada drenante, localizada na base do aterro, não foi considerada, devido à alta permeabilidade desta, da ordem de 0,01 cm/s (correspondentes a 864 cm/dia), equivalentes à condutividade hidráulica saturada da brita (Bortolazzo, 2010). Portanto, utilizou-se como hipótese que todo o líquido que chega a esta camada é drenado para fora do aterro para posterior tratamento.

Adotou-se como condição inicial o solo não saturado, cujo valor “default” equivale a -100 cm para a carga hidráulica inicial (h_0). Foi verificado, através das simulações iniciais, que esta se mantinha constante, em torno de -30 cm, sendo adotado a partir daí este valor de carga hidráulica inicial para as simulações seguintes.

O modelo adotado para as propriedades hidráulicas do solo não saturado foi o de van Genuchten-Mualem, que emprega a distribuição estatística de tamanho dos poros de Mualem (1976) para a obtenção da equação para prever a condutividade hidráulica não saturada em função dos parâmetros de retenção de água pelo solo (Šimůnek *et al.*, 2013).

Na etapa inicial dos cálculos, foi realizada a análise de sensibilidade para alguns parâmetros de entrada no Programa HYDRUS-1D. Considerou-se para fins desta análise inicial, os tempos de cálculo (*Calculation Time*), o erro relativo em termos de percentual (%) do balanço hídrico de massa para todo o domínio de fluxo (*WatBalR %* no HYDRUS-1D), e a taxa de recarga (*R*) para o perfil simulado, calculada através do quociente entre a variação do fluxo acumulado na base (*AcvBot*) para o intervalo de tempo considerado (ΔT).

O cálculo final da geração de lixiviados foi realizado através do estabelecimento de dois cenários, definidos de acordo com a configuração final das células do Sub-Aterro 1, fornecida pela empresa administradora do aterro, segundo o Quadro 6.

Quadro 6 – Conformação geométrica das células do Sub-Aterro 1.

Taludes (células)	Tipo	Área (m ²)	Área média (m ²)	Altura média (m)	Volume (m ³)
Talude 01	Pé 01	43 018,86	45 260,62	3,00	135 781,85
	Crista 01	47 502,38			
Talude 02	Pé 02	51 483,66	55 045,45	5,00	275 227,26
	Crista 02	58 607,25			
Talude 03	Pé 03	61 703,71	65 612,49	5,00	328 062,47
	Crista 03	69 521,28			
Talude 04	Pé 04	73 172,92	77 428,70	3,00	232 286,09
	Crista 04	81 684,47			
Talude 05	Pé 05	84 451,30	89 054,06	5,00	445 270,29
	Crista 05	93 656,82			
Talude 06	Pé 06	84 769,30	89 372,06	5,00	446 860,29
	Crista 06	93 974,82			
Talude 07 (bolo)	Pé 07	51 675,84	42 266,94	7,50	317 002,08
	Crista 07	32 858,04			
Talude 08 (bolo)	Pé 08	26 952,06	18 056,32	10,50	189 591,31
	Crista 08	9 160,57			
Total					2 370 081,64

4.2 – Etapas da modelagem

A seguir são mostradas as etapas de cálculo da vazão de líquidos gerados para os dois cenários pré-estabelecidos, visando a comparação final com a vazão de lixiviados monitorada no Sub-Aterro 1, para o ano de 2010, em que o aterro estava sendo finalizado e suas células já encerradas.

CENÁRIO 1: Células (ou camadas de alteamento dos resíduos) consideradas isoladamente, com base nas suas dimensões reais fornecidas (área do piso, área da crista e altura média, segundo o Quadro 6).

Para este cenário, foi considerada a influência de cada célula, considerada em separado, tomada como a média aritmética da área do piso e da crista (Fig. 5), e tendo como premissa que o fluxo gerado na célula é todo captado pela rede de drenagem.

Para o cálculo do fluxo através deste cenário, adotou-se uma única taxa de recarga (R) igual a 0,0703 cm/dia, definida em função das simulações finais realizadas para perfis de 1 a 10 metros, onde todos os resultados obtidos, para uma distribuição regular de nós, com elemento de malha igual a 1 cm e mesmo tempo de discretização, forneceram valores muito próximos a este.

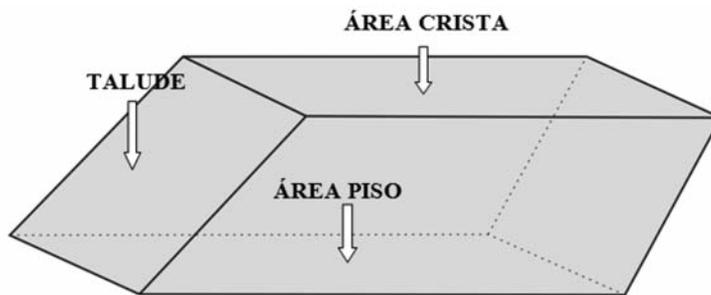


Fig. 5 – Representação esquemática de uma célula do aterro.

Para fins de comparação com a situação real de campo e diante do encerramento do Sub-Aterro 1, que na ocasião encontrava-se em fase de plantio de gramíneas, foi considerada a geração de lixiviados monitorada para o ano de 2010, que totalizou 33 098 m³ (vide Quadro 1).

Para o cálculo final da vazão de lixiviados produzida no Sub-Aterro 1, foi somada a vazão de líquidos produzida por cada célula para o ano de 2010. O cálculo para cada célula, assim como a sua totalização, encontra-se explicitado no Quadro 7, onde a vazão total obtida para os líquidos gerados foi de 123 699 m³/ano.

Relativamente a este cenário, pode-se observar que a soma das áreas de influência das células, representada pelo somatório das áreas médias das células, equivale a uma área quatro vezes a área total do Sub-Aterro 1. Por outro lado, como a área de incidência de chuva, na situação de campo, equivale a uma área quatro vezes menor, dividiu-se a vazão total assim obtida por quatro, que resultou em um total gerado de 30 925 m³, referente ao ano de 2010.

Quadro 7 – Vazão de líquidos gerados para cada célula do Cenário 1, no ano de 2010.

Célula	Altura (m)	Área média (m ²)	Vazão (m ³ /ano)
1	3,00	45 260	11 613
2	5,00	55 045	14 124
3	5,00	65 612	16 835
4	3,00	77 428	19 867
5	5,00	89 054	22 850
6	5,00	89 372	22 932
7	7,50	42 266	10 845
8	10,50	18 056	4633
Total	44,00	482 093	123 699

CENÁRIO 2: Células sobrepostas, considerando-se as áreas de influência da chuva para cada altura de perfil.

Com base nas informações anteriores, relativamente às dimensões de cada célula, foi estabelecido um modelo simplificado para a estrutura final do aterro, considerando-se as áreas da base e da crista de cada célula, porém superpondo-as, como na situação de campo, indicada simplificada na seção transversal do Sub-Aterro 1, representada nas Figs. 6a e 6b.

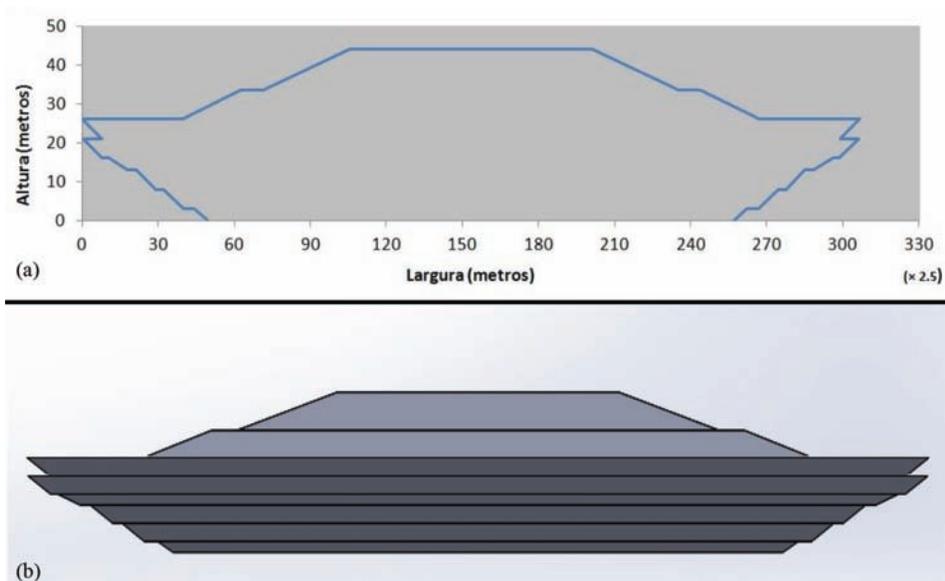


Fig. 6 – Modelo da conformação simplificada do Sub-Aterro 1, para o Cenário 2.

Neste cenário, é analisada a contribuição de cada altura de perfil (da base do aterro à crista exposta de cada célula), relativamente à área de influência da chuva para cada altura considerada, sendo o somatório das áreas de contribuição correspondente a 120 000 m² (12 hectares), que equivale a área do Sub-Aterro 1.

Os perfis foram definidos considerando-se a área aparente de cada célula e a altura desta até a base do aterro. A área para cada perfil equivale à área média da célula, calculada como a média entre a área do pé e a área da crista, e que também equivale à área de influência das chuvas.

Diante da dificuldade em se estabelecer, com precisão, uma cota única para a base de cada perfil (devido à configuração irregular na base do aterro, e também ao traçado deste, que nas laterais e ao fundo tem a sua estrutura assentada sobre taludes construídos a partir de escavações das encostas naturais), assumiu-se a seguinte simplificação: para as áreas correspondentes às células 1 a 5, considerou-se que estas teriam áreas de influência iguais, calculadas como a diferença entre a área total do Sub-Aterro 1 (120 000 m²) e a soma das áreas de influência das células superiores (6, 7 e 8), dividindo-se esse valor por 5 (células de 1 a 5).

Para o cálculo do fluxo através deste cenário, foram consideradas taxas de recarga distintas para cada altura de perfil, tendo em vista o fato de que quanto mais alto é o aterro, mais camadas de cobertura intermediária existirão, e estas, por possuírem um K_s (coeficiente de permeabilidade saturada) bem menor do que o K_s dos resíduos, dificultarão o fluxo através destes. Esta variação pode ser vista através da Fig. 7, onde para alturas até 10 metros, a taxa de recarga é quase constante, em torno de 0,070 cm/dia e, a partir de 10 metros, à medida que a altura aumenta, a taxa de recarga diminui, sendo essa variação com tendência à linearidade.

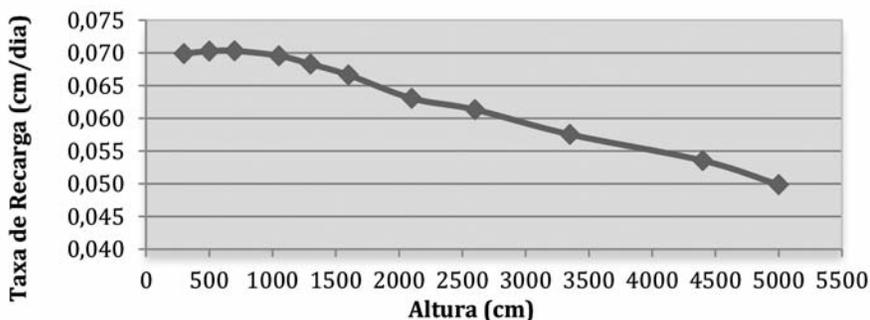


Fig. 7 – Variação da taxa de recarga com a altura do perfil para o Cenário 2.

O cálculo da vazão de lixiviados, gerada por cada perfil, e da vazão total produzida no Sub-Aterro 1, relativamente ao Cenário 2, pode ser melhor compreendido através do Quadro 8, onde a vazão produzida pelo perfil é o produto da área de influência deste pela respectiva taxa de recarga.

Quadro 8 – Produção de lixiviados, para cada área de influência, referente ao ano de 2010, para o Cenário 2.

Designação	Altura do perfil (m)	Área de influência (m ²)	Taxa de recarga (m/ano)	Lixiviados gerados (m ³ /ano)
PERFIL 01	3,00	6126	0,2566	1572
PERFIL 02	8,00	6126	0,2566	1572
PERFIL 03	13,00	6126	0,2493	1572
PERFIL 04	16,00	6126	0,2432	1572
PERFIL 05	21,00	6126	0,2302	1572
PERFIL 06	26,00	47 105	0,2239	10 546
PERFIL 07	33,50	24 211	0,2101	5086
PERFIL 08	44,00	18 056	0,1955	3529
Total				27 021

A vazão total de líquidos lixiviados, gerados no Sub-Aterro 1, calculada para o ano de 2010, relativamente ao Cenário 2, foi de 27 021 m³/ano.

CENÁRIO 2A: O mesmo modelo do cenário anterior (mesma conformação geométrica e perfis considerados), com aplicação de fator de equivalência para o índice pluviométrico da cidade de Nova Iguaçu.

Devido ao elevado índice pluviométrico na região em que se encontra o aterro, foi realizada uma tentativa de ajuste dos dados pluviométricos empregados nas simulações, tendo em vista que para todas as simulações foram empregados dados de precipitação diários de Anchieta. A partir da soma dos dados mensais de pluviometria monitorados, durante a execução do Sub-Aterro 1, e dos dados empregados nas simulações anteriores (E. A. de Anchieta) para o mesmo período, verificou-se a razão entre estas, denominada nesta pesquisa de “Fator de Ajuste”.

$$F_{\text{ajuste}} = \frac{\sum \text{IPA}_1}{\sum \text{IPA}_2} = 1,263 \quad (1)$$

onde IPA₁ é o índice pluviométrico anual de Nova Iguaçu e IPA₂ é o índice pluviométrico anual de Anchieta. O valor de F_{ajuste} obtido, segundo a Equação 1, foi multiplicado pelos dados pluviométricos diários da E.A. de Anchieta para serem empregados nas simulações relativas a este cenário.

A Fig. 8 apresenta, para fins de comparação, um comparativo dos índices pluviométricos anuais para as três estações pluviométricas analisadas, onde fica evidenciado o elevado índice pluviométrico monitorado na região do aterro, representado pelas colunas à esquerda de cada grupo por ano.

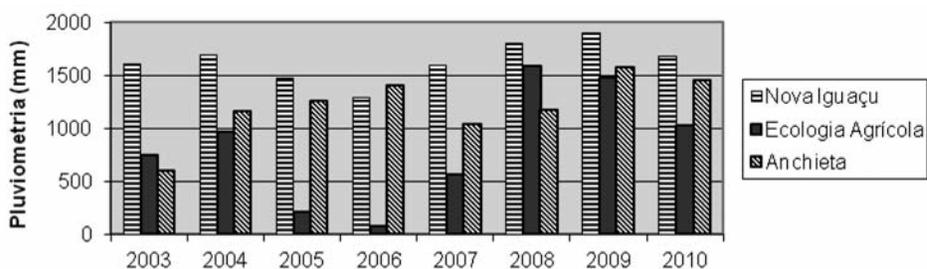


Fig. 8 – Comparativo dos índices pluviométricos anuais das regiões de Nova Iguaçu, Ecologia Agrícola (Seropédica) e Anchieta para o período de 2003- 2010.

Os resultados para as taxas de recarga obtidos através das simulações com a aplicação do Fator de Ajuste, para cada altura de perfil simulado, encontram-se no Quadro 9, onde se pode comparar estes com os resultados obtidos sem a aplicação deste fator (Cenário 2). A quarta coluna indica que um aumento no índice pluviométrico da ordem de 26% ($= F_{ajuste}$) produziu um aumento de cerca de 50 a 60% na taxa de recarga (R). Esta variação pode ser melhor visualizada através da Fig. 9, onde a linha inferior representa a variação da taxa de recarga para a pluviometria da E.A. de Anchieta empregada nas simulações e a linha superior representa esta variação com a aplicação do Fator de Ajuste para a pluviometria de Nova Iguaçu, região do aterro.

Quadro 9 – Taxas de recarga obtidas através das simulações realizadas, com e sem ajuste dos dados de pluviometria.

Altura (cm)	Taxa de recarga (R) (cm/dia), com F_{ajuste}	Taxa de recarga (R) (cm/dia), sem F_{ajuste}	Razão entre R, com e sem ajuste
300	0,1067	0,0703	1,516
700	0,1068	0,0703	1,518
1000	0,1068	0,0703	1,518
1300	0,1042	0,0683	1,525
1600	0,1023	0,0666	1,536
2000	0,0982	0,0628	1,563
2100	0,0983	0,0631	1,558
2600	0,0950	0,0613	1,549
3350	0,0922	0,0576	1,602
4400	0,0875	0,0536	1,634

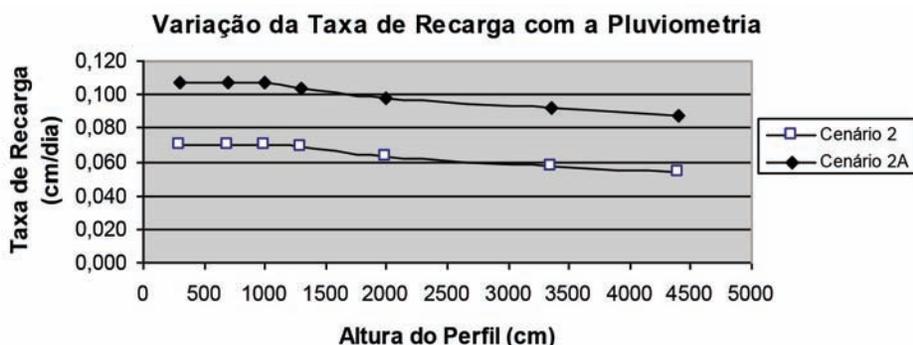


Fig. 9 – Variação da taxa de recarga com a altura do perfil, para os Cenários 2 e 2A (sem e com a aplicação do Fator de Ajuste).

O cálculo da vazão de lixiviados relativa ao ano de 2010, produzida por cada perfil simulado, e a vazão total gerada no Sub-Aterro 1, para esse ano, relativamente ao Cenário 2A, está apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 – Produção de lixiviados para cada área de influência, no ano de 2010, referente ao Cenário 2A (com aplicação do Fator de Ajuste).

Designação	Altura do perfil (m)	Área de influência (m ²)	Taxa de recarga (m/ano)	Vazão gerada (m ³ /ano)
PERFIL 01	3,00	6125,88	0,389	2382,97
PERFIL 02	8,00	6125,88	0,389	2382,97
PERFIL 03	13,00	6125,88	0,380	2327,83
PERFIL 04	16,00	6125,88	0,374	2291,08
PERFIL 05	21,00	6125,88	0,359	2199,19
PERFIL 06	26,00	47 105,12	0,347	16 345,48
PERFIL 07	33,50	24 210,62	0,337	8158,98
PERFIL 08	44,00	18 056,32	0,319	5759,97
Total simulado Cenário 2A				41 848,47

Os resultados obtidos para os Cenários 1 e 2, com o emprego de dados de pluviometria da E. A. de Anchieta e dados de temperaturas máximas e mínimas diárias da E.A. de Ecologia Agrícola (Seropédica), para o mesmo período, ficaram bem próximos do valor monitorado da vazão real para o ano de 2010.

Para o Cenário 2A, onde ao Cenário 2 foi aplicado o *Fator de Ajuste* da pluviometria para a região do aterro, calculado em 1,263, observou-se que a aplicação deste resultou numa variação da taxa de recarga da ordem de 1,5 a 1,6 (50% a 60%).

A influência do número de células com cobertura intermediária pode ser verificada através da comparação entre os resultados das simulações para os Cenários 1 e 2 onde, para alturas maiores de perfil, acima de 10 metros, as taxas de recarga (R) diminuem com o aumento do perfil, como indicado na Fig. 7.

5 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A relação entre as vazões obtidas a partir dos três cenários propostos e a vazão monitorada, relativamente ao ano de 2010, é mostrada na Fig. 10.

Através dos resultados obtidos, podemos observar o seguinte:

- 1) Relativamente ao Cenário 1, houve uma diferença da ordem de 6,57%, para menos, diferença essa atribuída principalmente aos seguintes fatores: pluviometria, pois no caso avaliado, foi empregada a pluviometria obtida da E.A. de Anchieta, que apresenta uma média anual da ordem de 26% inferior à da região do Aterro Sanitário de Nova Iguaçu. Por outro lado, considerou-se apenas o montante de água (das chuvas) que entra no sistema (aterro), desprezando-se a quantidade de fluidos gerados no interior dos resíduos, que, por vezes, não é de se desprezar.
- 2) Relativamente ao Cenário 2, em que o modelo, por considerar as células sobrepostas e, portanto, perfis analisados mais próximos da situação real de campo, houve uma redução da ordem de 18,36%, que comparada com o Cenário 1, comprova a influência do aumento do número de camadas de cobertura intermediárias, na redução da taxa de recarga, e, conseqüentemente, da vazão gerada. Nesse caso, a diminuição da vazão anual deve-se não somente à pluviometria, como no Cenário 1, mas também ao aumento do número de coberturas intermediárias, além da não consideração da quantidade de líquidos gerados no interior dos resíduos.
- 3) Relativamente ao Cenário 2A, que nada mais é do que uma adaptação do Cenário 2 ao índice pluviométrico da região do aterro através da aplicação do Fator de Ajuste, a vazão produzida aumentou na ordem de 26,44%, comparada à vazão monitorada no aterro, e de 54,87%, comparada com o cenário 2A, onde a pluviometria empregada foi a da região de Anchieta, indicando a elevada e preponderante influência da precipitação na produção de lixiviados.

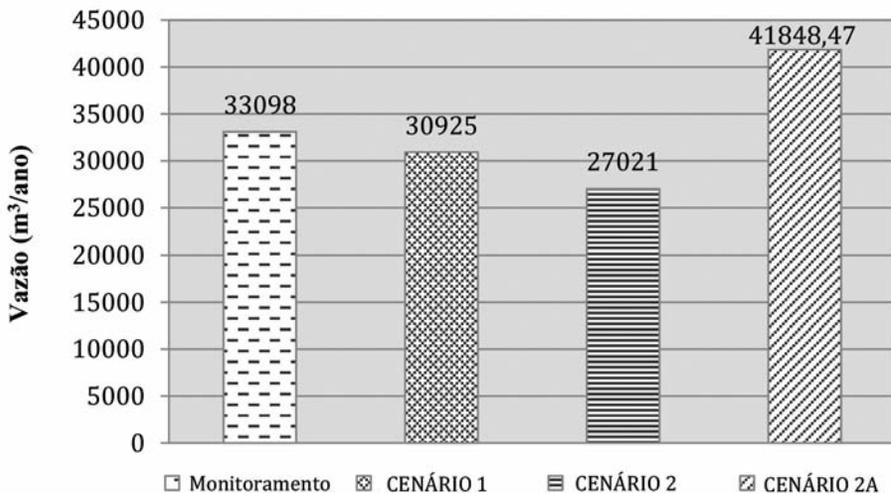


Fig. 10 – Comparativo das vazões obtidas por monitoramento *in situ* e calculadas, respectivamente aos três cenários propostos.

6 – CONCLUSÕES

Se o movimento de água em regiões não saturadas do solo é um processo extremamente complexo, devido, principalmente, à natureza heterogênea deste e à variação nas condições de contorno atmosféricas, em se tratando de aterros de resíduos este processo torna-se ainda mais complexo devido à enorme variabilidade e complexidade deste material, quando comparado ao solo. Porém, a despeito das simplificações feitas pelo HYDRUS-1D, este modelo computacional, apesar de unidimensional, pode ser considerado uma valiosa ferramenta para o estudo dos processos hidráulicos, avaliação e previsão da geração de lixiviados em aterros sanitários, tendo, no caso analisado, se mostrado bastante adequado para uma boa simulação do fluxo de líquidos por um aterro de resíduos sólidos urbanos.

Dentre os principais fatores responsáveis pela geração de líquidos lixiviados em aterros, destacam-se a área do aterro, exposta à incidência direta da pluviometria, a ineficiência das coberturas final e intermediárias na retenção de líquidos, o índice pluviométrico ao qual a região está sujeita e o processo de biodegradação dos resíduos, este último não contemplado na presente pesquisa, sendo todos os fatores citados comprovados através dos resultados das simulações e da aplicação destes nos cenários analisados.

7 – AGRADECIMENTOS

À Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu e ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), pelas informações fornecidas para a pesquisa, e sem as quais esta não poderia ter sido realizada.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000). NBR 14545 - *Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. Rio de Janeiro.
- Borba, S.M.P. (2006). *Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 134 p.
- Bortolazzo, W.M. (2010). *Estimativa da Produção de Percolados no Aterro Sanitário de Nova Iguaçu com a Aplicação de Modelos Computacionais*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 189 p.
- Breitmeyer, R.J. (2011). *Hydraulic Characterization of Municipal Solid Waste*, PhD Dissertation, University of Wisconsin-Madison, USA, 192p.
- Brooks, R.H.; Corey, A.T. (1964). *Properties of porous media affecting fluid flow*, J. Irrig. Drainage Div., ASCE Proc. 72(IR2), pp. 61-88.
- Durner, W. (1994). *Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure*. Water Resources Research, 32(9), pp. 211-223.
- GEORIO (2014). Prefeitura do Rio de Janeiro – Alerta Rio, Dados Pluviométricos Diários. Disponível em: <<http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/>>. Acesso em: 04/03/2014.

- INMET (2011). Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em:
<http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/pg_automaticas.php>. Acesso em: setembro de 2011.
- Kosugi, K. (1996). *Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties*. Water Resources Research, 32(9), pp. 2697-2703.
- Mualem, Y. (1976). *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. Water Resources Research, 12(3), pp. 513-522.
- Schaap, M.G.; Leij, F.J.; van Genuchten, M.Th. (2001). *Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions*. Journal of Hydrology, 01/2001, 251, pp. 163-176.
- Šimůnek, J.; Šejna, M.; van Genuchten, M.Th. (1998). *The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media*. Version 2.0. IGWMC – TPS – 70, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 162p.
- Šimůnek, J.; Šejna, M.; van Genuchten, M.Th. (2013). *The HYDRUS-1D package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media*. Version 4.16. Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, California, USA.
- van Genuchten, M.Th. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, 44(5), pp. 892-898.
- Vogel, T.; Císlerová, M. (1988). *On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve*. Transport in Porous Media, 3(1), pp. 1-15.