

# COMPARAÇÃO DE MÉTODOS EMPÍRICOS E COMPUTACIONAIS PARA QUANTIFICAÇÃO DE LIXIVIADOS EM ATERROS SANITÁRIOS

*Rafaella Campos<sup>1</sup> & Natália de Souza Pelinson<sup>2</sup>; Jurandyr Povinelli<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>; <sup>2</sup> Estudante Pós Graduação; <sup>3</sup> Professor Colaborador Sênior (EESC-US)*

**Resumo** – Os resíduos sólidos se decompõem gerando líquidos percolados, que constituem um problema sério relativo à degradação ambiental pela contaminação principalmente das águas. A quantificação do volume de lixiviados no aterro, apesar de ser uma difícil tarefa, permite dimensionar sistemas adequados para tratar tais líquidos, visando minimizar o impacto gerado pela disposição dos resíduos sólidos. Para comparação da estimativa do volume de percolado gerado analisou-se os métodos empíricos do Balanço Hídrico, Racional e Suíço e os computacionais, HELP e MODUELO. Enquanto os empíricos se apresentam mais usados devido à praticidade de obtenção dos dados, os modelos computacionais apresentam-se mais precisos. Entre os métodos empíricos o Suíço foi muito utilizado por ser simples sua aplicação, porém figura como o menos preciso, enquanto o método racional apresenta-se adequado para se estimativa da vazão do pico do escoamento superficial da bacia. Quanto aos modelos computacionais, o HELP apesar de mais preciso que o Balanço Hídrico apresenta algumas incongruências como assumir um fluxo uniforme de água, desconsiderando a existência de caminhos preferenciais. Finalizando, o MODUELO apresenta-se como uma estimativa mais aplicada, portanto mais precisa, o modelo permite estimar o volume de umidade acumulada na massa do aterro o que reflete diretamente nas suas características estruturais.

**Abstract** – The solid waste decomposes generating leachate, which constitutes a serious problem relating to environmental degradation mainly by contamination of the waters. Quantifying the volume of leachate in the landfill, despite being a difficult task, it allows you to design systems in place to handle such liquids in order to minimize the impact from solid waste disposal. To compare the estimated volume of leachate generated was analyzed the empirical methods, Suiço, Racional and Balanço Hídrico, and computacional, MODUELO and HELP. While the empirical are most commonly used due to the practicality of obtaining data, computers models have become more accurate. Among the empirical methods, the higher used was Suiço because it's very simple to be applied, however ranks as the least accurate, while the Racional Method is presented suitable for estimation of peak flow runoff from the basin. As for computer models, the HELP although more accurate than the water balance has some inconsistencies as to assume a uniform flow of water, disregarding the existence of preferential paths. Finally, the MODUELO presented as an estimated more applied and thus more accurate, this model allows estimating the volume of accumulated moisture in the landfill body which reflects directly on their structural characteristics.

**Palavras-Chave** – Aterros Sanitários, Resíduos Sólidos Urbanos, Modelos Balanço Hídrico.

<sup>1</sup> Estudante Pós Graduação EESC-USP. Alameda dos Crisântemos nº60, 13566-550 São Carlos- SP. 55(16)34167312. [rafaella\\_campos@hotmail.com](mailto:rafaella_campos@hotmail.com)

<sup>2</sup> Estudante Pós Graduação EESC-USP. Alameda dos Crisântemos nº60, 13566-550 São Carlos-SP. 55(16)34167312. [natalia.pelinson@usp.br](mailto:natalia.pelinson@usp.br)

<sup>3</sup> Professor Colaborador Sênior EESC-USP, Av. São Carlense, 400, 13566-590 São Carlos- SP. 55(16)3373-9526. [jpovinel@sc.usp.br](mailto:jpovinel@sc.usp.br)

## 1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o aumento na produção de resíduos é cada vez maior, visto que há uma relação diretamente proporcional entre este e o aumento da população e do desenvolvimento econômico. Acoplado a isso, surge a necessidade de busca de alternativas que visem a redução, reutilização, reciclagem e, em última instância, a sua disposição final adequada.

Atualmente a forma mais adequada de disposição final de resíduos é o aterro sanitário, definido pela NBR 8419 (ABNT, 1992) como sendo uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde e à sua segurança, minimizando impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos.

Apesar de ser a forma mais correta de disposição, o aterro sanitário não está livre de gerar passivos ambientais, dentre os quais podem ser citados a produção de metano, dióxido de carbono e chorume.

O chorume é um líquido fétido, de coloração escura oriundo da atividade dos microrganismos decompositores e da umidade intrínseca dos resíduos; este quando recebe a água pluvial que infiltra no solo, passa a ser denominado lixiviado ou percolado. O lixiviado possui um grande potencial poluidor e sua composição varia de acordo com as fases de digestão anaeróbia e idade do aterro, além dos tipos de resíduos nele depositados (FERRAZ, 2010).

Um das ferramentas de engenharia empregadas no projeto de aterros para minimizar a poluição gerada é o sistema de drenagem e tratamento chorume. No entanto, para um adequado dimensionamento desses sistemas é necessário conhecer a vazão de lixiviado produzido, e como dito anteriormente, essa produção será dada em função das características dos resíduos, bem como a sua idade e também terá interferência da quantidade de água pluvial que aporta sobre o aterro e infiltra, bem como a infiltração lateral proveniente de níveis freáticos, embora este último seja indesejável, já que o contato de água subterrânea com o percolado causa a contaminação do manancial.

Nesse contexto, os métodos que estimam o potencial de geração de lixiviado em um aterro assumem grande importância para definir os parâmetros de dimensionamento de um sistema de drenagem e tratamento eficiente, evitando assim, que o percolado atinja e contamine águas subterrâneas e as superficiais.

Nesse artigo pretende-se realizar a revisão bibliográfica dos métodos de estimativa de balanço hídricos mais utilizados para tal fim, de modo a fazer um paralelo entre eles e dessa forma determinar qual o método que melhor se aplica. Dentre os métodos a serem analisados estão: racional, suíço, balanço hídrico, HELP e Moduelo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil, estudos referentes à contaminação do solo por lixiviados em locais de disposição de resíduos sólidos urbanos não são frequentes. Portanto, é necessário, no atual estágio de conhecimento, a obtenção de valores de referência para a avaliação da presença de contaminantes em diferentes tipos de solos, o que representa um grande desafio no Brasil, pela sua extensão e variedade de tipos de solos existentes. (ALMEIDA, 2009)

Segundo Jucá (2003) apud Almeida (2009), os aterros sanitários representam, com algumas poucas exceções, a principal destinação final dos resíduos sólidos. Para a implantação de aterro de resíduos sólidos há a necessidade de se elaborar um projeto, que deve conter os seguintes estudos: caracterização e classificação dos resíduos e caracterização do local destinado à implantação do aterro (geográfica, topográfica, hidrogeológica e climatológica). É recomendável ainda a adoção de barreiras para evitar a liberação de poluentes ao ambiente, as quais podem ser associadas desde a escolha da área, como hidrogeologia favorável, isolamento em relação a aquíferos aproveitáveis, colocação de camadas impermeabilizantes e sistemas de coleta e tratamento de lixiviados (SCHALCH et al., 2000). A seguir a Figura 1 ilustra os detalhes em um diagrama esquemático de um aterro sanitário.



Figura 1: Diagrama esquemático de um aterro sanitário (Fonte: IPT/CEMPRE, 2000).

Este método de disposição de resíduos sólidos apresenta algumas vantagens: evita a disposição de qualquer tipo de resíduo; recupera áreas topograficamente inutilizadas; controla a proliferação de vetores; possibilita o uso de equipamentos e máquinas de serviços de terraplanagem; possibilita a disposição de lodos provenientes de estações de tratamento de esgoto; evita altos

investimentos para sua construção (comparados aos necessários para implantação das usinas de compostagem ou instalações de incineração) entre outros fatores.

Alguns dos problemas relacionados aos aterros sanitários são a falta de áreas adequadas para a implantação e o esgotamento da vida útil dos aterros em operação, em função da escassez de espaço, devido ao aumento da produção de resíduos sólidos e das exigências ambientais para a construção de novos aterros. Em relação ao tempo de duração de um aterro sanitário este deve ser estimado conforme sua capacidade de confinamento e o volume de resíduos para ele encaminhado, sendo que a NBR 13.896 (ABNT, 1997) recomenda a construção de aterros com vida útil mínima de 10 anos, devido aos gastos e as dificuldades na implantação, principalmente burocráticas.

Como desvantagens, apresenta ainda: despesas com transporte devido a necessidade de grandes áreas distantes da área urbana; desvalorização imobiliária do terreno; produção de chorume; necessidade de um longo período de tempo para estabilização dos resíduos no aterro; produção de ruídos e poeira durante a execução e operação do aterro (SCHALCH *et al.*, 2000), entre outros.

A previsão da vazão dos líquidos percolados é um aspecto importante que tem por propósito o controle preventivo de situações de risco à integridade física do aterro e de risco ambiental. Fornece elementos para a execução do projeto de drenagem dos percolados e do sistema de tratamento de efluentes, viabilizando as reais situações de cada aterro específico. Segundo Almeida (2009), as características dos lixiviados variam de acordo com características da população, do local e também do tempo de exposição. Em função de suas características, podem apresentar risco efetivo ou potencial à saúde humana, ou gerar impactos aos meios físico, biótico e socioeconômico, exigindo cuidados especiais quanto ao manuseio, acondicionamento, coleta, transporte e disposição final.

Para avaliação do movimento da água através de aterros sanitários, levam-se em consideração a intensidade dos processos climatológicos, hidrológicos, os materiais envolvidos, as características de projeto e a operação do aterro, conforme ilustra a Figura 2.

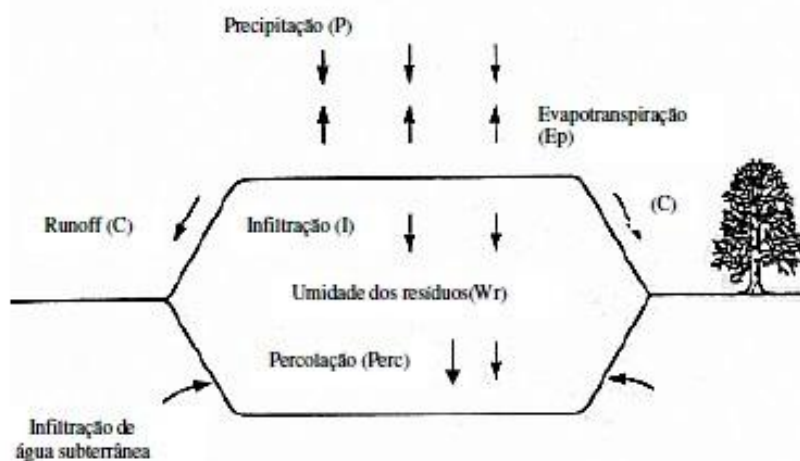


Figura 2 - Balanço Hídrico de um aterro sanitário (FAQUHAR, 1989 apud ALMEIDA, 2009).

O balanço hídrico consiste na soma das parcelas de água que entram e na subtração das que deixam a célula do aterro durante o período monitorado (IPT/CEMPRE, 2000). A estimativa do balanço hídrico em aterros sanitários é a chave para o projeto de sistemas de cobertura final e de impermeabilização do fundo, significa também entender a variação de umidade no interior da massa de resíduos com o tempo, que tem importância fundamental na análise dos processos de degradação dos resíduos e na avaliação de propriedades geotécnicas dos mesmos, o que permite a avaliação da estabilidade estrutural dos aterros sanitários (PADILLA, 2007).

A determinação da quantidade de líquidos lixiviados gerados em aterros sanitários continua sendo uma tarefa difícil. O principal problema ambiental é o risco de poluição das águas subterrâneas e superficiais (CAPELO NETO & CASTRO, 2005 apud PADILLA, 2007). O volume de líquido lixiviado é normalmente calculado utilizando procedimentos empíricos, métodos de balanço hídrico e métodos computacionais (KOERNER & DANIEL, 1997 apud PADILLA, 2007). A seguir serão descritos alguns dos métodos para que possam posteriormente serem discutidos.

## 2.1 Método Suíço

Este método trata-se de uma sistemática empírica, desenvolvida na Suíça, para determinação da vazão de líquidos lixiviados. Nele estima-se que certa porcentagem da precipitação infiltra nos resíduos, atinge a camada de impermeabilização na base, devendo ser drenada. Esta porcentagem é, normalmente, estipulada em função do peso específico dos resíduos dispostos no aterro e da experiência do projetista (PADILHA, 2007).

Trata-se de um modelo simples de previsão da vazão média de percolado. A fórmula algébrica para a aplicação do método suíço, onde se estima a vazão de lixiviado é mostrada na Equação 1. Na Tabela 1 encontram-se os valores de K para aplicação do método:

$$Q = \frac{1 \times (P \times A \times K)}{t} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

Q = vazão média do percolado;

P = precipitação;

A = área do aterro (m<sup>2</sup>);

K = coeficiente empírico adimensional, ver Tabela 1

t = tempo

Tabela 1 – Valores de K para aplicação do Método Suíço

| COMPACTAÇÃO DO ATERRO          | PESO ESPECÍFICO DOS RSU* COMPACTADOS | K           |
|--------------------------------|--------------------------------------|-------------|
| Aterros fracamente compactados | 0,4 a 0,7 ton/m <sup>3</sup>         | 0,25 a 0,50 |
| Aterros fortemente compactados | Acima de 0,7 ton/m <sup>3</sup>      | 0,15 a 0,25 |

Fonte: ROCCA (1981) *apud* OLIVEIRA (2007)

\*Resíduos Sólidos Urbanos

O Método Suíço já foi muito utilizado no passado devido á sua simplicidade, porém ele é o menos preciso dos métodos de quantificação de lixiviados, servindo apenas, para uma estimativa grosseira das vazões (CONTRERA, 2008).

De acordo com a CETESB (1997) *apud* Contrera (2008), o método admite que uma certa porcentagem das águas de chuva precipitadas sobre o aterro irá infiltrar-se, transformando-se em lixiviados. Essa porcentagem depende do grau de compactação dos resíduos, isto é, do seu peso específico aparente ( $\gamma$ ). Assim, quanto mais compactado o aterro, menor será a quantidade de líquidos gerados. Essa é apenas uma meia verdade, pois a qualidade e as características da camada de cobertura de terra são mais importantes que o grau de compactação dos resíduos.

Ainda de acordo com as observações de Contrera (2008), esse método também não considera que, o tipo de solo de cobertura, a declividade da superfície dessa camada e variações sazonais ao longo do ano (incidência de sol e evapotranspiração) também influem na geração dos lixiviados, além disso, considera que a precipitação anual tem distribuição homogênea para todos os meses, fato que somente se verifica em algumas poucas regiões do nosso país.

## 2.2 Método Racional

O método aplicado é indicado para prever o deflúvio superficial direto em áreas menores que 500 ha, que geralmente é utilizado para o dimensionamento de sistemas de drenagem de águas pluviais. Ele é geralmente utilizado para estimar a vazão de pico do escoamento superficial em pequenas bacias, e considera a intensidade da chuva e a área da região estudada.

O cálculo da vazão superficial por este método baseia-se em três parâmetros: área da bacia de contribuição, intensidade e duração das chuvas e o coeficiente de escoamento, conforme Equação 2 abaixo:

$$Q = C \times i \times A \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

Q = vazão superficial máxima (L/s ou m<sup>3</sup>/s);

C = coeficiente de escoamento ou “runoff”, relação entre o pico de vazão e a chuva média sobre a área receptora;

i = intensidade média da chuva (L ou m<sup>3</sup> por ha/s);

A = área da bacia receptora da chuva (ha).

Entretanto, para obter a parcela da precipitação que infiltra, deve-se subtrair o volume total precipitado sobre a área do aterro, do volume escoado, que é calculado pelo método racional, dentro do mesmo intervalo de tempo. Devendo, deste resultado, subtrair a parcela de água devida à evapotranspiração. Tem-se, portanto a fórmula algébrica mostrada na Equação 3 (CONTRERA, 2008).

$$Q = \frac{[(P-ES)-EP]}{t} \times A \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

Q = Vazão do percolado em litros por segundo;

P = Precipitação média mensal, em milímetros;

EP = Evaporação Potencial, em milímetros;

A = Área de contribuição em metros quadrados;

t = Número de segundos em 1 mês (2592000 s);

ES = (P x C) = Escoamento superficial, em milímetros;

C = Coeficiente de escoamento superficial ("run-off", adimensional).

Suas desvantagens são a adoção do período de retorno da chuva como igual ao da vazão, a não consideração da relação entre a duração da precipitação e o escoamento, dos teores antecedentes de umidade do solo e da condutividade hidráulica do material de cobertura (TOZETTO, 2008).

Segundo Castro (2001), o método racional, apesar de não considerar determinadas variáveis (umidade dos resíduos, material de cobertura, grau de compactação, número de camadas), pode ser considerado confiável, uma vez que as parcelas desconsideradas são menos expressivas.

### 2.3 Método do Balanço Hídrico

O balanço hídrico, da forma como foi concebido, para o estudo do solo e da água, é baseado na relação existente entre a precipitação, a evapotranspiração, o escoamento superficial e o armazenamento da água no solo. A precipitação representa a recarga de água no sistema, enquanto a evapotranspiração representa a combinação entre a evaporação das plantas e a da superfície do solo, estando incluída a transpiração das plantas. Esse processo de evapotranspiração é praticamente o transporte da água de volta para a atmosfera, sendo o inverso do processo da precipitação. O escoamento superficial representa o fluxo superficial da água na área de interesse. A capacidade de armazenamento representa a capacidade de água que pode ficar retida no solo e nos resíduos sólidos nos casos dos aterros sanitários (FENN *et al.*, 1975).

Este método permite estimar o percolado baseado em um fluxo unidimensional, na conservação de massa, e nas características de transmissão e retenção da cobertura do solo, como apresentado na Equação 4.

$$P + U_w = E + G + L + R + \Delta U_w + \Delta U_s \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

P = Precipitação;

U<sub>w</sub> = umidade do resíduo (contribui apenas uma vez no balanço hídrico);

E = Evaporação;

G = Vapor d'água que sai com os gases;

L = Água que sai como percolado;

R = Escoamento superficial (runoff);

TU<sub>w</sub> = Água absorvida ou retida pelo lixo;

TU<sub>s</sub> = Água absorvida ou retida pela camada de cobertura.

Segundo Capelo Neto (1999), o método do balanço hídrico é um método complexo que se aplica nos casos em que há grande disponibilidade de dados de precipitação e evapotranspiração, medidos no local do aterro ou disponibilizado pela mais próxima estação meteorológica. Para assegurar a confiabilidade dos dados, estes devem ser validados e comparados com dados provenientes das outras estações situadas na proximidade do local estudado. Os parâmetros meteorológicos utilizados devem ser as médias aritméticas mensais.

Para a conservação de massa, a quantidade de água que entra na camada de cobertura deve ser igual à quantidade que sai mais o montante de água que ficou armazenado. O princípio da conservação de massa é, portanto a base para o Balanço Hídrico (KOERNER e DANIEL, 1997). A



metodologia utilizada por estes autores foi baseada nas publicações de Thornthwaite e Mather (1957), Fenn *et al.* (1975) e Kmet (1982). (FERREIRA, 2006)

A metodologia utilizada para a estimativa de geração do percolado através do cálculo do Balanço Hídrico está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros para base do cálculo do Balanço Hídrico.

| PARÂMETROS                                                               | FONTES                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Precipitação (P)</b>                                                  | Estação Meteorológica                                                                                                                                   |
| <b>Escoamento Superficial (ES)</b>                                       | $ES = C \times P$<br>Coeficiente de escoamento (C)                                                                                                      |
| <b>Infiltração (I)</b>                                                   | $I = P - ES$                                                                                                                                            |
| <b>Evapotranspiração potencial (ETp)</b>                                 | Formulação de Thornthwaite                                                                                                                              |
| <b>Evapotranspiração real (ETr)</b>                                      | $(I - ETr) > 0$ ; $ET = ETp$<br>$Per > 0$ ; períodos úmidos<br>$(I - ETp) < 0$ ; $ETr = [ETp + (I - ETp) - \Delta As]$ ;<br>$Per = 0$ ; períodos secos. |
| <b>Armazenamento de água no solo de cobertura (As)</b>                   | Valor da água disponível no solo obtidos na literatura, dependente do tipo de solo e do $\sum$ valores negativos de (I-ETp)                             |
| <b>I-ETp</b>                                                             | Diferença entre a água que infiltra e a que evapora                                                                                                     |
| <b><math>\sum NEG(I-ETp)</math></b>                                      | $\sum$ dos valores negativos de (I-ETp)                                                                                                                 |
| <b>Varição no armazenamento de água no solo (<math>\Delta As</math>)</b> | Diferença entre a água armazenada no solo, de um mês para o outro ( $\Delta As = As_n - As_{n-1}$ )                                                     |
| <b>Percola em mm (Per)</b>                                               | $Per = I - As - Etp$                                                                                                                                    |
| <b>Vazão mensal em l/s (Qm)</b>                                          | $Qm = (Per \times \text{Área}_{\text{aterro}}) / \text{segundos}$                                                                                       |

Fonte: FERREIRA (2006).

## 2.4 HELP

O modelo de SCHOEDER *et al.* (1994), chamado HELP versão 3 (Hydrology Evaluation of Landfill Performance – ou Avaliação do Comportamento Hidrológico de Aterros Sanitários) vem se destacando como modelo determinístico recomendado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency - USEPA). Trata-se de um modelo

computacional que considera a acumulação inicial de água até que seja atingida a capacidade de campo e o período de retardamento entre a água da precipitação que se infiltra e a descarga de líquidos percolados, por meio do cálculo do fluxo de água no aterro (FERREIRA, 2006).

O HELP modela o aterro através do uso e definição de 4 tipos distintos de camadas:

- Camadas com percolação vertical,
- Camadas com drenagem lateral,
- Barreiras impermeáveis de solo, e
- Geomembranas.

O modelo HELP é baseado nos mesmos princípios hidrológicos do método tradicional de Balanço Hídrico, mas requer maior detalhamento em sua seqüência de cálculo. Pelo detalhamento e precisão do modelo, o HELP exige o uso de dados consistentes para que os resultados sejam confiáveis (PADILLA, 2007).

Trata-se de um modelo de simulação dos processos hidrológicos quasi-bidimensional, em que uma das dimensões é usada para calcular a percolação vertical e a outra, a drenagem lateral instalada sob o sistema de cobertura. Para simulação dos processos hidrológicos o modelo solicita dados de entrada dos parâmetros climatológicos e propriedades dos materiais envolvidos, além das características de projeto. Os processos hidrológicos externos são simulados através da alimentação de dados climáticos, como taxas médias diárias de precipitação, temperatura médias mensais, umidades relativas trimestrais, velocidade média do vento, radiação solar, crescimento vegetal e evapotranspiração, além das especificações do projeto para realizar as análises. Para o cálculo dos processos hidrológicos no interior do maciço são necessários dados referentes à geometria das camadas formadoras do aterro (FERREIRA, 2006).

O modelo possibilita a entrada de dados referentes ao sistema de drenagem, tais como, declividades e distâncias máximas entre os drenos laterais; dados do sistema de cobertura, espessuras, descrição das camadas, área, percentual do líquido utilizado na recirculação de percolado, infiltrações subsuperficiais, características do solo (capacidade de campo, ponto de murcha, condutividade hidráulica saturada, porosidade) e da geomembrana (densidade, defeitos de instalação, condutividade hidráulica saturada, espessura, transmissividade) SCHOEDER *et al.* (1994) *apud* FERREIRA (2006).

Ainda, de acordo com FERREIRA (2006), o modelo não considera o fluxo através dos bolsões de gás, comuns no interior de aterros de resíduos, bem como despreza as eventuais trincas no solo causadas por impacto de caminhões pesados e tratores, favorecendo o fluxo do percolado através de caminhos preferenciais. O modelo assume um fluxo uniforme de água, desconsiderando a

existência de caminhos preferenciais. O processo de biodegradabilidade dos resíduos não é considerado pela simulação do modelo HELP.

## 2.5 Modelo MODUELO

O MODUELO é um modelo tridimensional baseado nas equações de fluxo saturado, no escoamento de água entre as células e no balanço de umidade, capaz de gerar, em caráter horário, os dados de umidade e a vazão de líquidos lixiviados, a partir de uma representação tridimensional do aterro, cuja forma se atualiza instantaneamente mediante a definição de um modelo de produção. (SIMÕES, 2005)

Além do cálculo das vazões de líquidos lixiviados e do registro instantâneo da umidade nas células, que possibilita a avaliação do nível interno de líquidos em células pré-determinadas, o modelo simula a degradação dos RSU, estimando a composição do líquido lixiviado, o volume e a composição do biogás gerado. (SIMÕES, 2005)

A versão inicial de MODUELO, denominado MODUELO 1 representa os fenômenos com modelos elementares tomados diretamente da literatura, foi apresentado por Rodríguez (1999). A base para o desenvolvimento da primeira versão do programa foi aplicada no aterro sanitário de Meruelo I em Cantabria – Espanha. Seguidamente Dupuy (2000), com a experiência de laboratório descrita por Rodríguez (1999) e o fechamento do aterro de resíduos de Galicia – Espanha, constatou vários problemas no MODUELO 1, tendo sugerido alterações. O trabalho seguinte de aplicação do programa foi apresentado por Lobo *et al.* (2001a e 2001b) e, junto com uma descrição geral das tendências em modelamento de aterros, em Lobo *et al.* (2002c). A última aplicação prática da primeira versão foi baseada na segunda fase de operação do aterro de Meruelo (LODDO, 2001). Lobo (2003), em sua Tese de Doutorado, apresentou MODUELO 2, intitulada, “Ferramenta para a avaliação da contaminação produzida em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos”.

O Grupo de Engenharia Ambiental da Universidade de Cantabria – Espanha entre Janeiro de 2001 até Maio de 2003 desenvolveu uma ferramenta de gestão e biorrecuperação dos solos contaminados por aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, que deu lugar ao MODUELO 3.

Em março de 2005, mediante convênio entre uma empresa de gestão de resíduos e o Departamento de Técnicas da Água e do Meio Ambiente da Universidade de Cantabria, foi aplicada o modelo MODUELO 3 ao aterro sanitário Can Mata (Barcelona – Espanha), para a verificação dos modelos incorporados em MODUELO 3.

A Figura 3 traz a sequência dos cálculos utilizados pelo modelo e adiante serão mostradas algumas considerações sobre os modelos utilizados.

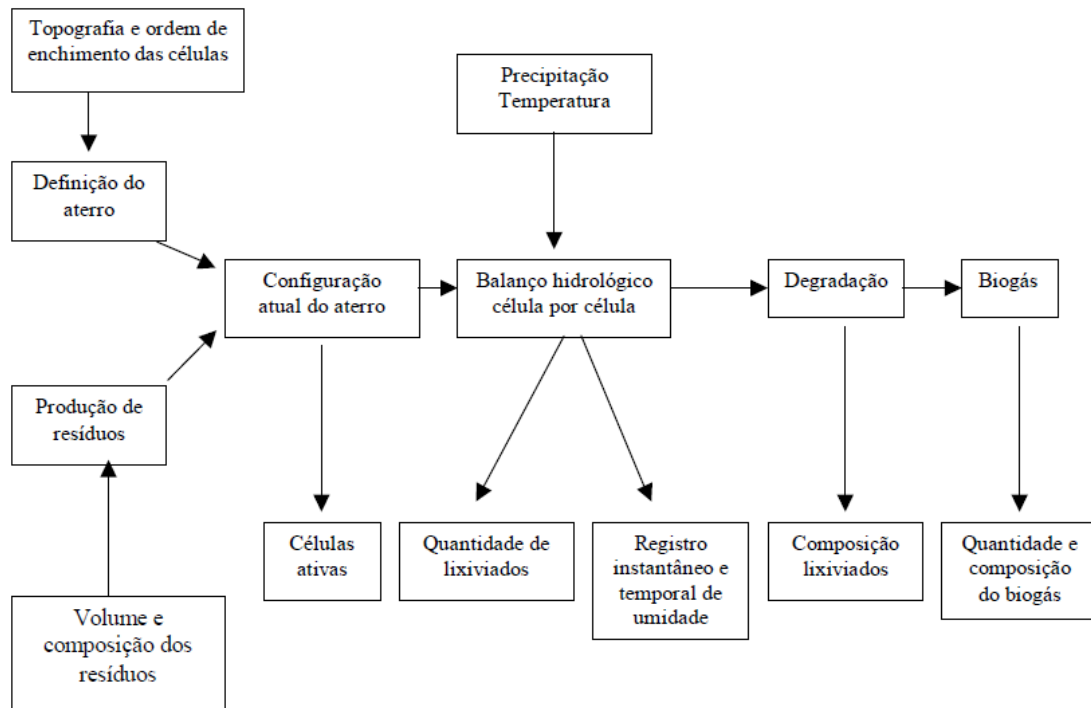


FIGURA 3: SEQUÊNCIA DE CÁLCULOS DO MODELO – Fonte: Simões (2005)

O balanço hídrico em uma célula será expresso mediante a equação 5:

$$\frac{\Delta L_d}{\Delta t} = P(t) + L_{fv}(t) \pm L_{fh}(t) - E_s(t) - EVT(t) - CC_r(t) + PS_w(t) \quad \text{Equação (5)}$$

Em que:

$\frac{\Delta L_d}{\Delta t}$  = variação da quantidade de lixiviado disponível. Supõe-se um armazenamento que posteriormente escoará vertical ou horizontalmente para as células vizinhas.

$H(t)$  = umidade que estará presente em duas formas: como  $CC_r$  e/ou como  $\frac{\Delta L_d}{\Delta t}$ .

$P(t)$  = precipitação sobre a célula.

$L_{fv}(t)$  = volume escoado verticalmente proveniente da célula imediatamente superior.

$L_{fh}(t)$  = volume escoado horizontalmente proveniente das quatro células laterais. Será positivo ou negativo em função do que entra ou sai da célula em estudo.

$E_s(t)$  = o escoamento superficial da água de chuva que escorre pela superfície sem infiltrar.

$EVT(t)$  = a evapotranspiração ou evaporação, de acordo com a existência de plantas na superfície.

$CC_r(t) = \text{capacidade de campo remanescente } CC_{r(t)} = CC_{(t-1)} - H_{(t-1)} \geq 0$ . Se a capacidade de campo não está saturada  $CC_r(t) > 0$ , tem-se  $H_{(t)} = CC_{(t)}$ , caso contrário, se a capacidade de campo está saturada,  $CC_r(t) = 0$ , tem-se  $H_{(t)} = \Delta L_d / \Delta t$ .

$PS_w(t) = \text{umidade liberada pela compressão dos poros } PS_{w(t)} = CC_{(t-1)} - CC_{(t)}$

### 3. DISCUSSÃO

Dentre os métodos expostos, aquele que retorna valores mais imprecisos é o Método Suíço, uma vez que se trata de um método simples, já que para suas estimativas, ele considera apenas o grau de compactação dos resíduos, e desconsidera variáveis importantes como a característica da camada de cobertura, declividade e variações sazonais, além disso, por ser um método de aplicação simples, ele ainda considera que as precipitações são homogêneas ao longo de todo o ano, fato irreal em um país de clima tropical como o Brasil.

O método Racional também pode ser considerado um método de fácil aplicação e é ideal para pequenas áreas, além de ser indicado para dimensionamento de sistemas de drenagem. Ele leva em consideração a intensidade de chuvas, área da bacia de contribuição e coeficiente de escoamento (dependente das características de superfície). Apesar de não considerar determinadas variáveis, é tido como um modelo capaz de retornar valores confiáveis.

O Método do Balanço Hídrico trata-se de uma sistemática um pouco mais elaborada. Relaciona precipitação e evapotranspiração, que devem ser medidos no local do aterro ou em estações meteorológicas situadas em áreas próximas. Assim, observa-se que os dados de entrada já começam a ser mais elaborados e, portanto, é necessário maior disponibilidade de informações, o que pode ser um problema em determinados casos.

O método do Balanço Hídrico é um dos modelos mais utilizados atualmente em aterros sanitários para determinação dos volumes de líquidos lixiviados gerados. Dentro do método, a precipitação representa a recarga de água do sistema, enquanto a evapotranspiração representa a combinação entre a evaporação das plantas e da superfície do solo, estando incluída a transpiração das plantas, o escoamento superficial representa o fluxo superficial da água diretamente na área de interesse e a capacidade de armazenamento representa a quantidade de água que pode ficar retida no solo e nos resíduos sólidos. Este método admite fluxo unidimensional, conservação de massas e nas características de transmissão e retenção de líquidos nas camadas de solo e resíduos o que torna o

método mais completo que os anteriores, mas ainda está sujeito a erros já que a frequência de dados é superior e as considerações não são sempre válidas.

O HELP é um modelo computacional capaz de fornecer estimativas confiáveis, já que em seu processamento ele leva em conta parâmetros climatológicos, propriedades dos materiais envolvidos e características do projeto. Ele é inspirado no método do Balanço Hídrico, porém, exige maior detalhamento. Para garantir a precisão dos resultados, este método precisa da entrada de dados consistentes. Apesar de um retorno de estimativa confiável, observa-se a dificuldade de atender todos os valores de entradas por ele exigidos.

O MODUELO é um modelo computacional desenvolvido na Espanha, constando já de três versões, trata-se de uma ferramenta para projetos, gestão e biorremediação de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Sua utilização permite estimar, diariamente, os dados de umidade, vazão de líquidos lixiviados, fluxos no contorno, recalques e quantidade de biogás gerado, a partir de uma representação tridimensional de um aterro, sendo sua forma atualizada instantaneamente mediante um modelo de produção e sobre a qual se aplica um modelo de fluxo não saturado tridimensional.

O modelo descrito mostra-se versátil e com grande capacidade de simular o balanço hídrico em aterros de disposição de RSU desde a fase inicial de enchimento, considerando geometrias complexas e existência de sistemas de drenagem internos, entre as principais dificuldades encontradas pode-se citar a necessidade de conhecimento de um grande volume de informações, principalmente o histórico de preenchimento, usualmente não disponível. No entanto, por ser um modelo tridimensional que contempla a interação entre células, sua utilização em aterros onde se dispõe dos dados pode permitir a sua calibração e posterior comparação dos resultados com modelos mais simplificados, permitindo a validação desses.

De acordo com o exposto, pode-se observar a existência de métodos extremamente simples e outros muito sofisticados, que levam em consideração as mais diversas variáveis. A escolha, de um ou outro, deve ser calcada na realidade de cada situação, visto que há algumas dificuldades de obtenção de dados de entrada dependendo do modelo escolhido. Deve-se levar em conta a limitação de cada método, bem como as congruências na aplicação do método para o que se pretende simular. Sempre que possível, é importante dar preferência a modelos que retorne valores mais precisos, mas no caso de ausência de dados em entradas suficientes, é interessante dar preferência ao método Racional, já que o Suíço é o menos preciso.

### 3.1 Tabela comparativa dos métodos de balanço hídrico em aterro

Considerando as limitações apresentadas por cada modelo, a Tabela XXXX apresenta um panorama comparativo entre os métodos e modelos computacionais discutidos no item anterior.

Tabela 3 – Comparação entre os modelos utilizados para estimar percolados em aterros sanitários.

|                  | Característica            | Método Suíço | Método Racional | Balanço Hídrico | HELP     | Moduelo |
|------------------|---------------------------|--------------|-----------------|-----------------|----------|---------|
| <b>CLIMA</b>     | Dimensão                  | 1D           | 1D              | 1D              | Quase 2D | 3D      |
|                  | Precipitação              | X            | X               | X               | X        | X       |
|                  | Temperatura               |              |                 | X               | X        | X       |
|                  | Velocidade do vento       |              |                 |                 | X        | X       |
|                  | Radiação Solar            |              |                 |                 | X        |         |
|                  | Insolação                 |              |                 |                 |          | X       |
|                  | Umidade Relativa          |              |                 |                 |          | X       |
|                  | Interação com a atmosfera |              |                 | X               | X        | X       |
| <b>MATERIAIS</b> | Camada de resíduos        | X            |                 |                 | X        | X       |
|                  | Área de contribuição      | X            | X               | X               | X        | X       |
|                  | Camadas de solo           |              | X               | X               | X        | X       |
|                  | Geossintéticos            |              |                 |                 | X        |         |
|                  | Sistema de drenagem       |              |                 |                 | X        | X       |
|                  | Fluxo vertical            |              | X               | X               | X        | X       |
|                  | Fluxo horizontal          |              | X               |                 | X        | X       |
| <b>OPERAÇÃO</b>  | Histórico do aterro       |              |                 |                 |          | X       |
|                  | Simulação em operação     |              |                 |                 |          | X       |
|                  | Simulação pós fechamento  |              |                 | X               | X        | X       |
|                  | Degradação dos resíduos   |              |                 |                 |          | X       |
|                  | Previsões de longo prazo  |              |                 |                 | X        | X       |

Fonte – Adaptada, FERREIRA (2006).

## 4. CONCLUSÃO

Como discutido, os métodos que estimam o potencial de geração de lixiviado em um aterro assumem grande importância para definir parâmetros de dimensionamento de um sistema de drenagem, bem como a possibilidade de aplicação de tratamentos mais eficientes, evitando assim que o percolado atinja e contamine águas subterrâneas e as superficiais.

A partir dos aspectos previamente analisados, observa-se que a disponibilidade de dados é limitante na aplicação de métodos mais precisos na estimativa da vazão de percolados, já que os métodos que apresentam os melhores resultados necessitam de maior volume de dados de entrada. Dessa forma, o Método Suíço apresenta-se como o mais impreciso por adotar variáveis mais simples. No extremo oposto, a adoção de métodos computacionais, que requerem maior quantidade de parâmetros locais, dá retorno de valores mais próximos da realidade, embora sejam métodos de difícil aplicação.

Conclui-se, que a escolha do método deve ser baseada na realidade de cada situação, visto que há algumas dificuldades de obtenção de dados de entrada dependendo do modelo escolhido. Deve ser considerada a limitação de cada método, bem como as propriedades na aplicação do método para o que se pretende simular. É importante dar preferência a modelos que retorne valores mais precisos, mas no caso de ausência de dados em entradas suficientes deve-se escolher então métodos empíricos que apresentem menores resíduos estatísticos.

## 5. BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, T. L. “Implicações Ambientais dos Processos de Atenuação de Lixiviado em locais de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos”, Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Hidráulica e Saneamento. São Carlos, SP. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT

\_\_\_\_\_ (1992) NBR 8419 – “Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos”. Rio de Janeiro. 7p.

\_\_\_\_\_ (1997) NBR 13896 – “Aterro de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação: Procedimento”. Rio de Janeiro. 12p.

CAPELO NETO, J. C.; MOTA, S.; SILVA, F. J. A. “Geração de percolado em aterro sanitário no semiárido nordestino: uma abordagem quantitativa”. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 4, n. 3, jul./set. 1999; n. 4, out./dez. 1999.

CASTRO, M.C.A.A. “Avaliação de um sistema australiano de lagoas no tratamento conjunto de esgoto sanitário e líquidos percolados”. 224 pag. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e



Saneamento). Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP. 2001.

CONTRERA, R.C. “Tratamento de lixiviados de aterros sanitários em sistema de reatores anaeróbio e aeróbio operados em batelada sequencial”. 789 pag. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento). Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP. 2008.

FENN, D. G.; HANLEY, K. J. DEGEARE, T. V “Use of water balance method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites.” Washington, D. C. U. S Environmental Protection Agency. 1975.

FERRAZ, F.M. “Recuperação da amônia liberada no processo “air stripping” aplicado ao tratamento do lixiviado de aterros sanitários”. 129 pag. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento). Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2010.

FERREIRA, M.A.S. “Aplicação de modelos de avaliação qualitativa e quantitativa dos percolados gerados em um aterro sanitário”. 227 pag. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2006.

JUCÁ, J.F.T. “Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil”- 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO 2003, Porto Alegre RS, 2003.

OTERO D’ALMEIDA, M. L.; VILHENA, A. (coord.) (2000) “Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado”. 2ed. São Paulo: IPT/ CEMPRE, 2000.

PADILLA, R.S. “Aplicação de um modelo computacional tridimensional para estimativa de balanço hídrico em aterros sanitários”. 125 pag. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.

SIMÕES, G. F.; LOBATO, L. C. S.; MARTINS, H. L.; CATAPRETA, C. A. “A Aplicação de um modelo tridimensional de avaliação de balanço hídrico em aterros de disposição de resíduos sólidos

urbanos”, (2005) 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 18 a 23 de setembro de 2005 - Campo Grande/MS.

SCHALCH, V.; LEITE, W. C. DE A.; FERNANDES JUNIOR, J. L.; CASTRO, M. C. A. A. “Gerenciamento de Resíduos Sólidos” (APOSTILA). Disciplina Gerenciamento de Resíduos Sólidos. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2000.

TOZETTO, C. M. “Modelagem matemática de aterros sanitários com a simulação hidrológica da geração de lixiviado: estudo de caso do Aterro Sanitário de Curitiba” Universidade Federal do Paraná – Curitiba – PR, 2008 - 154 pag.