

# Estudo da evaporação em camada de cobertura de aterro de RSU - comparação entre medições de campo e resultados obtidos com a aplicação das equações de Wilson (1990) e Wilson et al. (1997)

Mateus, Maria do Socorro Costa São

Professor Adjunto, Depto. de Tecnologia/Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana-Ba, [somateus@gmail.com](mailto:somateus@gmail.com).

Machado, Sandro Lemos

Professor Adjunto, DCTM/UFBA, Salvador-Ba, [smachado@ufba.br](mailto:smachado@ufba.br)

Barbosa, Maria Claudia

COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, [mclaudia@coc.ufrj.br](mailto:mclaudia@coc.ufrj.br)

**Resumo:** O presente trabalho buscou verificar a aplicação das equações de Wilson (1990) e Wilson et al. (1997), propostas para o cálculo da evaporação de água em solos não saturados. São apresentados resultados de ensaios de evaporação realizados em amostras de solo compactado da camada de cobertura do aterro sanitário Metropolitano Centro, Salvador-Ba, Brasil. Os resultados experimentais obtidos foram comparados com resultados utilizando as equações propostas por Wilson (1990), que modificou a equação de Penman (1948), e Wilson et al. (1997), introduzindo dados da curva de retenção de água nos solos, para o cálculo da evaporação. Estas equações foram então utilizadas para a previsão da variação na evaporação normalizada (relação evaporação real/evaporação de água no solo), em função do tempo e de sua umidade volumétrica neste trabalho. Verificou-se, para o solo e condições estudadas, que os resultados obtidos nos experimentos para a evaporação normalizada decrescem com a perda de umidade, conforme esperado, e que os resultados previstos com a equação de Wilson et al. (1997) permanecem em torno da unidade para valores de sucção inferiores a 3000 kPa, decrescendo para sucções superiores a este valor, conforme previsto por esses autores.

**Abstract:** This work verified the application of Wilson (1990) and Wilson et al. (1997) equations, proposed to calculate water evaporation in unsaturated soils. The results of evaporation tests are presented, performed in compacted soil samples of the soil cover layer used in the Metropolitan Center MSW Landfill, Salvador, Bahia, Brazil. The experimental results were compared to the proposed equations by Wilson (1990), that modified Penman (1948) equation, and Wilson et al. (1997) to calculate evaporation, using the soil-water retention curve data. Those equations were applied to estimate the variation of the ratio between real evaporation and water evaporation (normalized evaporation), as a function of time and of soil volumetric water content. It was verified that the obtained normalized evaporation by experimental results decreases as the soil loses water content, and the results calculated by Wilson et al. (1997) equation showed a constant value equals to 1 when suction values are below 3000 kPa, decreasing to upper values of suction, as Wilson et al. (1997) had verified.

**Palavras-chave:** evaporação, cobertura de aterros, equação de Wilson.

**Keywords:** evaporation, landfills cover, Wilson equation.

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema de cobertura de aterros sanitários (em geral representado por camadas de diferentes tipos de solos e geossintéticos) possui a função primordial de barreira para o fluxo de água. No entanto, para locais de clima seco ou situações em que a camada de cobertura estará sujeita a ciclos de secagem e umedecimento, essa concepção necessita ser

reavaliada, a exemplo de estudos desenvolvidos por Blight et al. (2003), face à alteração das propriedades hidráulicas e mecânicas iniciais do material.

A camada de cobertura possui papel importante na minimização de odores, no controle da infiltração de água de chuva para o resíduo e na emissão de gases fugitivos para a atmosfera.

No Brasil, em virtude de condições climáticas muito variadas, o estudo da interação entre o material de cobertura de aterros com os agentes atmosféricos é fundamental para garantir a adequação dessa forma de disposição final de resíduos sólidos. Neste sentido, os componentes de um balanço hídrico, entre eles infiltração e evaporação, têm sido exaustivamente estudados.

Para estudar o mecanismo de funcionamento dos sistemas de cobertura, é importante a abordagem de alguns aspectos gerais, dentre eles: conhecer resultados obtidos em campo, identificar os fatores que influenciam o fluxo e determinar a taxa de fluxo de água ou de líquidos no material utilizado.

As características geotécnicas (índice de vazios, permeabilidade, por exemplo) mudam com o tempo, devido a fissuras resultantes dos recalques diferenciais e às fissuras de retração, quando a superfície não estiver revestida com vegetação, exercendo influência na taxa de percolação.

A camada de cobertura em aterros de resíduos sólidos contribui diretamente para o controle da infiltração de água de chuva no maciço e, conseqüentemente, para a geração do volume de lixiviados. Neste sentido, os fluxos evaporativos associados ao escoamento superficial, contribuem para o estabelecimento do equilíbrio do sistema.

O balanço hídrico em coberturas de aterros de resíduos sólidos (RS) tem sido bastante estudado, destacando-se alguns autores, como Swason (1995), Blight & Fourie (1997, 1999), Capelo Neto e outros (1999), Marques e Manzano (2003), Ubaldo (2005), Mateus (2008), entre outros, mostrando a necessidade crescente de obtenção de parâmetros em campo e em laboratório, relacionados com cada componente do balanço hídrico. Obviamente, o sucesso do balanço dependerá da adequada determinação de cada componente.

Ubaldo (2005), por exemplo, estudou o desempenho de coberturas para aterros de resíduos sólidos de mineração. Em seus estudos, a autora testou diferentes materiais (areia, argila e resíduo denominado cinza de fundo) conjuntamente, quanto ao processo de evaporação e comparou com as simulações realizadas no Programa "Soil Cover".

Nos experimentos de evaporação, Ubaldo (2005) utilizou colunas de tubo de PVC (diâmetro igual a 10,14cm e altura variando entre 5 e 17cm), contendo camadas desses materiais, que foram expostas ao ar, tendo-se registrado a variação do peso das colunas ao longo de diferentes períodos de tempo. Ubaldo (2005) observou, dentre outras coisas, que a coluna de água perdeu umidade a uma taxa praticamente constante ao longo de todo o ensaio, enquanto que as colunas com material de cobertura mudaram sensivelmente a taxa de evaporação, definindo claramente duas etapas de evaporação. Na primeira etapa, em que o material encontra-se com elevado

teor de umidade, a taxa de perda de água é praticamente igual à da coluna de água pura. Na segunda etapa, como o material encontra-se com umidade decrescente, a taxa de evaporação torna-se muito menor do que a da coluna de água e é praticamente constante nos três tipos de cobertura.

Um solo próximo da saturação, terá o processo de evaporação governado pela demanda atmosférica, que depende, principalmente, da radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos (Reichardt, 1985; Cristoph Wels & Newman, 2001). Neste caso, a velocidade de evaporação é constante e independente da umidade do solo, o qual terá um potencial disponível para os fluxos evaporativos. Quando o solo se torna não saturado, surge uma resistência à saída de água e a velocidade de evaporação deixa de ser constante, decrescendo com o tempo; as propriedades hidráulicas do solo passam a governar o processo. O potencial de evaporação ou evaporação potencial (EP), na prática é representado pelas leituras realizadas em Tanque Classe A ou no evaporímetro de Piche, instalados em estações climatológicas. Teoricamente, a equação de Penman (1948) é uma das mais difundidas e utilizadas para a sua estimativa (ver Equação 1).

(1)

Onde:

E - taxa de fluxo evaporativo vertical (mm/dia);

H - radiação solar (mm/dia);

$\Delta$  - declividade da curva, obtida no gráfico pressão de vapor na saturação x temperatura, na temperatura do ar considerada (kPa/°C);

v - constante psicrométrica = 0,063 kPa/°C;

$E_a = f(u) \cdot (e_{sa} - e_a)$  (mm/dia) e representa a evaporação em superfícies de água, sugerida por Dalton (1802), segundo Wilson et al. (1997);

$f(u) = 2,63158(1+0,15 \cdot u_2)$ ; função dependente da velocidade dos ventos, rugosidade da superfície e difusão;

$u_2$  - velocidade dos ventos (km/h) a 2m de altura do solo;

$e_{sa}$  - pressão de vapor do ar na saturação, acima da superfície evaporante (kPa);

$e_a$  = pressão parcial de vapor do ar acima da superfície evaporante (kPa).

De acordo com Dunne & Leopold (1978), para a evaporação potencial em solos saturados, Penman (1948) sugeriu que se considerasse 90% da evaporação potencial calculada pelo seu método, que foi desenvolvido para superfícies de água livre.

Wilson (1990) propôs uma modificação na formulação de Penman (1948), para o cálculo da

evaporação real (ER), considerando a condição não saturada do solo, conforme Equação 2.

(2)

Sendo:

A - inverso da umidade relativa ( $h_s$ ) na superfície do solo;

$E_a = f(u)e_a(B-A)$ ;

B - inverso da umidade relativa (UR) do ar.

Segundo Borma et al. (2004), a expressão proposta por Wilson (1990) é semelhante à expressão de Penman-Monteith para solos, sendo que o termo de resistência do solo ( $r_s$ ) foi substituído pela umidade relativa ( $h_s$ ), definida pela Equação 3.

(3)

$\Psi_m$  = sucção matricial ( $mH_2O$ ) e, na Equação 3, deverá entrar com o valor negativo;

$g$  = aceleração da gravidade ( $9,80665m/s^2$ );

$W_v$  = peso molecular da água ( $0,018kg/mol$ );

$R$  = constante universal dos gases ( $8,314 J/mol.^\circ K$ );

$T$  = temperatura do solo ( $^\circ K$ ).

De acordo com Wilson et al. (1997), a Equação 3 foi sugerida por Edlefsen and Anderson (1943).

Como se pode observar, para utilizar a Equação 2, é necessário conhecer a relação entre umidade volumétrica ( $\theta$ ) e sucção ( $\Psi$ ) dos solos.

Wilson et al. (1997) publicaram resultados de experimentos em amostras de solo com pequena espessura (4,0 mm), sem levar em consideração o fluxo de água em profundidade. Considerando que a evaporação na superfície dos solos é função do gradiente de pressão de vapor entre esta e a atmosfera, propuseram a Equação 4 para o cálculo da relação entre evaporação real e evaporação na água (evaporação potencial), também denominada evaporação normalizada.

(4)

Onde:

ER - evaporação real (mm/dia);

EP - evaporação potencial ou evaporação na água (mm/dia), determinada utilizando Penman (1948).

Para esse estudo, os autores verificaram que a equação proposta apresentou resultados bastante condizentes com as medições realizadas e, que ER/EP tende a zero para valores de sucção superiores a 100 000 kPa. Observaram também que a evaporação normalizada apresentou valor constante e em torno de 1 (um), para valores inferiores a 3 000 kPa de sucção, decrescendo para sucções superiores a esse valor.

A Equação 4 somente será válida, se  $h_s > UR$ . Esta equação foi desenvolvida, considerando que o solo, a água e o ar possuem igual temperatura. Observa-se que os resultados dependem dos parâmetros do solo, teor de umidade e sucção correspondente, bem como da umidade relativa do ar.

## 2 O SOLO ESTUDADO

O solo estudado foi coletado em sete pontos diferentes, distribuídos na superfície a uma profundidade de 20 cm, na camada de cobertura temporária da Célula 5 - Aterro Sanitário Metropolitano Centro, Salvador-Ba, e pertence à Formação Barreiras. Esta Formação reúne praticamente todos os sedimentos terciários na Bahia e cobre uma grande área da Região Metropolitana de Salvador (Barbosa & Dominguez, 1996 *apud* Cavalcanti et al., 2001), com espessura variando entre 25m e 65m, aproximadamente.

O solo foi caracterizado, mediante realização dos ensaios de granulometria (NBR-7181/1984), massa específica dos grãos (NBR-6508/1984), limites de liquidez (NBR-645/1984) e de plasticidade (NBR-7180/1984). Foram realizados também ensaios de compactação Proctor Normal em laboratório (NBR-7182/1986), ensaios para determinação da condutividade hidráulica saturada, a carga variável e a carga constante e, ensaio para determinação da curva de retenção de água para amostras indeformadas.

A Tabela 1 apresenta os resultados de peso específico dos sólidos e limites de consistência para o solo estudado.

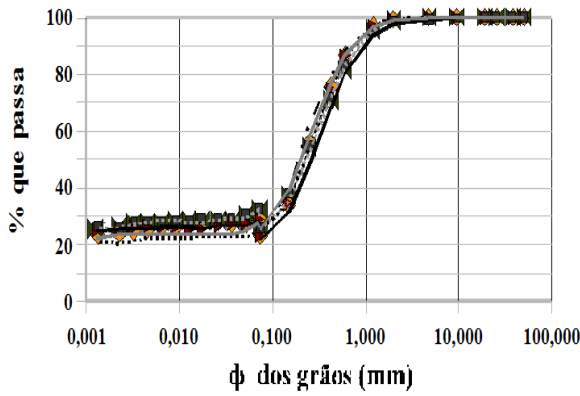
**Tabela 1. Caracterização do solo estudado**

cp	$\gamma_s$ ( $kN/m^3$ )	$w_L$ (%)	$w_p$ (%)	IP (%)
1	26,44	NL	NP	-
2	26,44	NL	NP	-
3	28,69	NL	NP	-
4	26,44	NL	NP	-
7	27,06	NL	NP	-
8	27,23	25	14	11
11	28,69	NL	NP	11

**Obs.: a numeração dos corpos de prova está inserida em um grupo maior de amostras analisadas.**

**O ensaio de compactação Proctor Normal forneceu peso específico seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) igual a 19,03  $kN/m^3$  e umidade ótima ( $w_{ot}$ ) igual a 11,6%.**

**A Figura 1 apresenta a curva granulométrica de amostras do solo estudado.**



**Figura 1.** Curvas granulométricas dos corpos de prova 1, 2, 3, 4, 7, 8 e 11

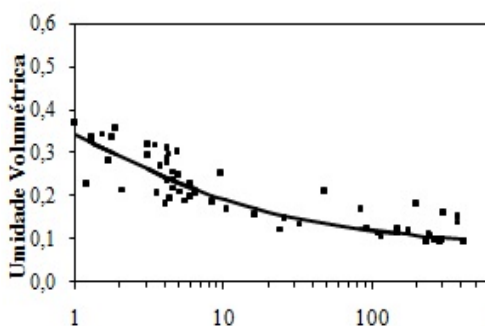
Os valores de condutividade hidráulica saturada e índices físicos dos corpos de prova ensaiados são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2. Condutividade hidráulica determinada em laboratório e índices físicos das amostras**

cp	$k_{sat}$ (cm/s)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e (-)
1	$5,56 \times 10^{-7}$	16,86	0,56
2	$5,56 \times 10^{-7}$	18,05	0,46
3	$1,06 \times 10^{-6}$	15,21	0,89
4	$5,56 \times 10^{-7}$	14,42	0,83
7	$1,89 \times 10^{-7}$	13,60	0,99
8	$1,00 \times 10^{-6}$	17,77	0,53
11	$1,07 \times 10^{-6}$	15,58	0,84

O valor médio de coeficiente de permeabilidade encontrado em laboratório foi de  $k_{sat} = 8,33 \times 10^{-7}$  cm/s, com desvio padrão de  $\sigma k_{sat} = 3,87 \times 10^{-7}$  cm/s. Em campo, obteve-se o valor médio de  $k_{sat} = 4,23 \times 10^{-5}$  cm/s, com desvio padrão de  $\sigma k_{sat} = 4,28 \times 10^{-5}$  cm/s, utilizando o permeômetro Guelph.

A curva característica do solo (Figura 2) foi determinada por drenagem, no equipamento desenvolvido por Machado e Dourado (2001), utilizando o mecanismo semelhante à câmara de pressão de Richards.



**Figura 2.** Ajuste da curva de retenção de água de todas as amostras analisadas conjuntamente

conjuntamente

Os dados experimentais foram ajustados pelo modelo de van Genuchten (1980), Equação 5, utilizando a relação fixa entre  $m$  e  $n$  da Equação 6, também proposta por van Genuchten (1980).

(5)

Onde:

$\alpha$  = parâmetro de ajuste dos dados experimentais; está relacionado com o valor da pressão de entrada de ar no solo;

$n$  = parâmetro de ajuste dos dados experimentais; relaciona-se com a inclinação no ponto de inflexão da curva característica;

$m$  = parâmetro de ajuste dos dados experimentais;

$\Psi_m$  = sucção matricial (kPa);

$\theta$  = umidade volumétrica correspondente a cada valor de sucção (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);

$\theta_s$  = umidade volumétrica na saturação (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);

$\theta_r$  = umidade volumétrica residual (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>).

(6)

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados obtidos do ajuste realizado com os dados da curva de retenção de água de todas as amostras ensaiadas.

**Tabela 3.** Parâmetros de ajuste de todas as amostras analisadas conjuntamente, utilizando van Genuchten (1980) – Valores de  $m$  e  $n$  linearmente dependentes

$\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$m$ (-)	R <sup>2</sup> (-)
1,35	1,41	0,29	0,82

**Tabela 4.** Média das umidades volumétricas de saturação e residual das amostras ensaiadas

$\theta_s$ médio (-)	Desv. padrão (-)	$\theta_r$ médio (-)	Desv. padrão (-)
0,423	0,07	0,072	0,03

A porosidade média das amostras ensaiadas é igual a 0,42.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Ensaios de evaporação

Foram realizados ensaios de evaporação na área do aterro sanitário, utilizando-se corpos de prova de solo compactados estaticamente, em cinco camadas, sob as condições ótimas obtidas no ensaio de compactação Proctor Normal. Os recipientes cilíndricos utilizados são de PVC, com diâmetro igual a 15,8 cm e altura igual a 15,0 cm. A base de cada cilindro, confeccionada em teflon, apresenta saída para adaptação de engate flexível, com o objetivo de permitir a saturação e/ou drenagem de água dos corpos de prova.

Na base dos cilindros, colocou-se disco de geotêxtil que foi posteriormente saturado. Após compactação, os corpos de prova foram saturados e, em seguida, submetidos ao processo de secagem ao ar livre na área do aterro sanitário. A perda de água por evaporação foi acompanhada ao longo do dia, mediante pesagem em intervalos de tempo regulares (10 minutos inicialmente, aumentando-se para 1 hora). Concomitantemente aos recipientes com amostras de solo, também foi colocado um recipiente (de iguais dimensões) apenas com água (Figura 3), para avaliar a evaporação potencial. As amostras eram protegidas em abrigo, quando da ocorrência de chuvas.



**Figura 3.** Experimentos: recipientes de PVC com solo compactado e com água expostos ao processo de evaporação

Ao final de cada dia, os recipientes eram pesados, recolhidos para um abrigo e protegidos com filme plástico no topo, para minimizar as perdas de água durante a noite. Desta forma, neste período, os fluxos evaporativos praticamente inexistiam uma vez que havia condensação da água evaporada no filme plástico, retornando posteriormente para as amostras. No dia seguinte, pela manhã, o plástico era removido do topo e os recipientes eram pesados e colocados ao ar livre, para darem continuidade ao processo de secagem, mediante pesagens sucessivas obedecendo aos intervalos de tempo estabelecidos.

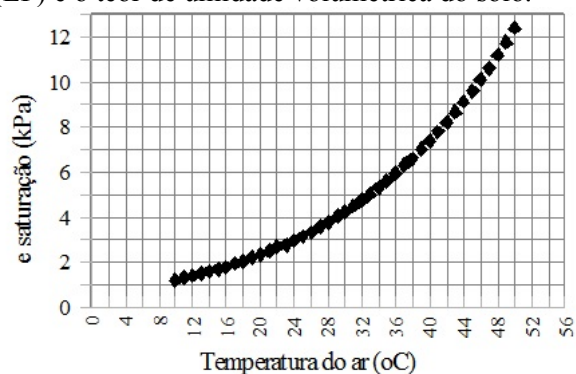
Os ensaios eram finalizados após a estabilização das leituras e o teor de umidade final foi determinado para o topo, plano médio e base das amostras.

Os dados climatológicos foram obtidos da estação climatológica portátil, instalada no topo do prédio da administração, dentro da área do aterro sanitário. Foram utilizados os registros diários de umidade relativa e temperatura do ar, velocidade dos ventos e radiação solar.

### 3.2 Utilização dos parâmetros solicitados nas equações

Para utilização da Equação 3, algumas aproximações foram realizadas, devido à ausência de ensaios em campo. A temperatura do solo foi substituída pela temperatura do ar, registrada na estação climatológica portátil, e a sucção foi calculada utilizando a equação de van Genuchten (1980), em função da variação no teor de umidade do solo.

Com a perda de água das amostras de solo, durante o ensaio de evaporação, calculou-se a variação de umidade durante todo o ensaio e obteve-se uma expressão que relaciona a evaporação da água no solo (ER), denominada evaporação real, a evaporação registrada no recipiente contendo água (EP) e o teor de umidade volumétrica do solo.



Para as Equações 1 e 2, a pressão de vapor do ar acima da superfície evaporante ( $e_{sa}$ ), na saturação, foi obtida em função da temperatura do ar, no gráfico pressão de vapor na saturação x temperatura (equação de Tetens, 1930), apresentado na Figura 4, e a pressão parcial de vapor ( $e_a$ ) foi calculada em função de ( $e_{sa}$ ) e da umidade relativa do ar, medida na estação climatológica portátil.

**Figura 4.** Pressão de vapor na saturação - temperatura do ar

Os dados climatológicos utilizados nas Equações 1, 2, 3 e 4 são o resultado da média aritmética dos registros diários de 2 anos anteriores ao ano estudado.

A velocidade dos ventos ( $u_2$ ) foi corrigida, utilizando a Equação 7, de acordo com Pereira e outros (1997), uma vez que a estação portátil se encontrava a aproximadamente 6m de altura com relação ao solo.

$$(7)$$

Onde:

$u_2$  – velocidade dos ventos, medida 2m acima do solo (km/h);

$u_z$  – velocidade dos ventos, medida na altura  $z$  metros em que se encontra o equipamento, com relação ao solo (km/h).



## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

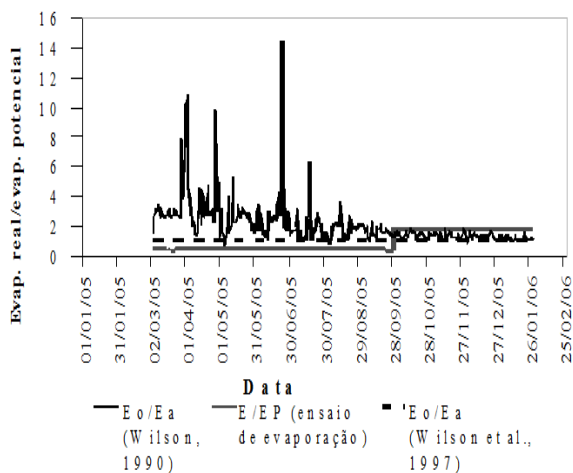
A Figura 5 apresenta o resultado dos ensaios de evaporação, realizados na área do aterro sanitário.

**Figura 5.** Ajuste da curva experimental de evaporação no solo e na água

A Figura 5 mostra uma relação linear crescente entre o teor de umidade do solo e a evaporação normalizada (ER/EP), confirmando o fato de que quanto maior o teor de umidade de um solo, maior será o seu potencial de evaporação. Para o solo estudado, obteve-se a relação apresentada pela Equação 8, válida para  $(ER/EP) > 0$  e  $\theta < n$ , sendo "n" a porosidade do solo.

(8)

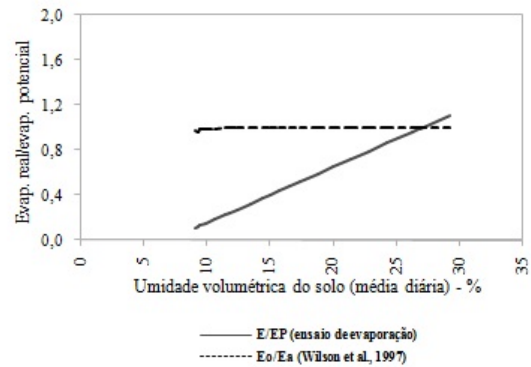
A Figura 6 apresenta o resultado da simulação, utilizando os métodos propostos por Wilson (1990) e Wilson et al. (1997), comparados às medições experimentais realizadas, para o período de 01 (um) ano.



**Figura 6.** Evaporação normalizada: comparação entre os métodos propostos por Wilson (1990), Wilson et al. (1997) e resultados experimentais

Para o solo estudado, a Figura 6 mostra que o método proposto por Wilson et al. (1997), Equação 4, para previsão da evaporação em solos, representou melhor a evaporação medida, quando comparado à proposta inicial de Wilson (1990), Equação 2, indicando que a relação direta entre a umidade relativa nos poros do solo e a umidade relativa do ar e, conseqüentemente, a pressão de vapor exercem influência significativa no processo de evaporação.

A Figura 7 apresenta a variação da evaporação normalizada em função do teor de umidade volumétrica, para os experimentos realizados e para os cálculos utilizando a equação proposta por Wilson et al. (1997).



**Figura 7.** Evaporação normalizada em função da umidade volumétrica do solo: método proposto por Wilson et al. (1997) e resultados experimentais

Observa-se, na Figura 7, que para o estudo realizado, a equação proposta por Wilson et al. (1997) apresenta valores próximos da unidade, para a relação evaporação real-evaporação potencial, independente do teor de umidade volumétrica do solo, para o intervalo estudado (9% - 29,34%), que corresponde a sucções variando entre 900kPa e 1,94kPa. Para o solo analisado, a Equação 4 apresentou resultados próximos à unidade, conforme verificado por Wilson et al. (1997) para sucção inferior a 3000 kPa, comportando-se como se o solo permanecesse na condição saturada.

Os resultados dos experimentos realizados mostram que, para umidade volumétrica do solo abaixo de 27% (sucção acima de 3kPa, no processo de secagem) e  $(ER/EP)$  inferior a 0,96, as características de retenção de água do solo começam a influenciar nos fluxos evaporativos. Para umidade volumétrica em torno de 10% e sucção correspondente de 360 kPa, a evaporação no solo corresponde a 15% da evaporação na água.

Fazendo variar os valores de sucção calculados e, aumentando de cerca de 100 vezes, verificou-se para o solo estudado, que a relação  $(ER/EP)$ , obtida por meio da Equação 4, torna-se inferior a 1 a partir de valores de sucção acima de 3513 kPa, conforme previsto por Wilson et al. (1997), aproximando-se dos valores calculados pela Equação 8, obtida experimentalmente. Observou-se também que a evaporação normalizada tende a zero, utilizando a Equação 4, para valores de sucção superiores a 21 000 kPa no solo estudado, uma areia média a fina siltosa, estando abaixo do valor previsto por Wilson et al. (1997), que estudaram areias, siltes e argilas.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para o solo estudado, utilizando a Equação 4, mostraram valores unitários indicando que o solo evapora a uma taxa igual à da água, sem considerar a influência das propriedades do solo, para o nível de sucção estudada (inferior a 1

000 kPa), conforme verificado por Wilson et al. (1997).

Para os experimentos realizados com amostras de espessura igual a 15cm, muito superior à espessura utilizada por Wilson et al. (1997), de no máximo 0,4 cm, os resultados experimentais e obtidos por meio da Equação 4 apresentaram comportamento conforme Wilson et al. (1997) verificaram em seus estudos. Faz-se necessário avaliar espessuras maiores, com o objetivo de reproduzir as condições reais de campo e projeto, para sistemas de cobertura de aterros sanitários, por exemplo.

Os parâmetros climatológicos e a sucção precisam ser determinados, durante os experimentos de evaporação.

Deve-se considerar que os dados utilizados para a temperatura do ar nas Equações 2, 3 e 4 foram medidos na estação portátil, situada acima da superfície evaporante. Além disto, a temperatura utilizada para o cálculo de " $h_s$ ", não foi medida no solo.

Os ensaios de evaporação no solo precisariam ser repetidos por vários anos sucessivos, para melhor avaliar a Equação 8 obtida, sob diferentes condições climatológicas.

## 6 REFERÊNCIAS

- ABNT/NBR 7181 (1984): "Solo - análise granulométrica", 13p.
- ABNT/NBR 6459 (1984): "Solo - determinação do limite de liquidez", 6p.
- ABNT/NBR 7180 (1984): "Solo - determinação do limite de plasticidade", 3p.
- ABNT/NBR 6508 (1984): "Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica".
- ABNT/NBR 7182 (1986): "Ensaio de Compactação".
- Albright, W. H.; Benson, C. H.; Gee, G. W.; Abichou, T.; Roesler, A. C. e Rock, S. A. (2003): Examining the Alternatives. Civil Engineering, May 2003, 70-75pp.
- Blight, G. E. & Fourie, A. B. (1999): Leachate Generation in Landfills in Semi Arid Climates. Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engng., 137, Oct., pp. 181-188.
- Blight, G. E.; Fourie, A. B.; Novella, P. e Pieterse, T. (2003): Store and Release Landfill Covers in Semi-arid Climates: Experiments in South Africa. Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 6-10 October, 1-10pp.
- Borma, L. S. e Karam Filho, J. (2004): Aspectos Teóricos da Modelagem do Balanço Hídrico no Sistema Solo-planta-atmosfera. Anais 5º. Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, 25-27 de agosto de 2004, v. 1. São Carlos-SP, 217-222.
- Cavalcanti, Susana. S.; Sato, H. K.; Lima, O. A. L. (2001). Geofísica elétrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do aterro metropolitano centro, Salvador, Bahia. Revista Brasileira de Geofísica, v. 19, n. 2.
- Capelo Neto, J.; Mota, S.; Silva, Fernando J. A. da (1999). Geração de Percolado em Aterro Sanitário no Semi-Árido Nordeste: uma abordagem quantitativa. Rev. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 4, n. 3, jul./set., n. 4, out./dez. p. 160-167.
- Christoph Wels, S.L.; Newman, G. (2001). Modelling of Alternative Cover Scenarios for Mine Rock Piles at the Zortman and Landusky Mine Sites. In: National Association of Abandoned Mine Lands Annual Conference, 2001, Alberta, Ohio.
- Daniel, D.E. & Koerner, R.M. (1993): Cover Systems. In: Daniel, D.E. (ed), Geotechnical Practice for Waste Disposal, 1 ed, chapter 18, London, UK, Chapman & Hall.
- Dunne, Thomas e Leopold, L. B. (1978). Water in Environmental Planning. New York: W.H. Freeman and Company. 818p.
- Dwyer, Stephen F. (2001): Finding a Better Cover. Civil Engineering, v. 71, nº. 1, 58-63pp.
- Koener, R.M.; Daniel, D.E. (1997): Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps. 1 ed. New York, ASCE Press.
- Machado, Sandro L.; Dourado, Kleber. A. (2001). Novas técnicas para obtenção da curva característica de sucção do solo. In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 4., Porto Alegre-RS. Anais... Porto Alegre-RS. v. 1, p. 325-336.
- Marques, M.; Manzano, M. (2003). Hydrological Performance of Sanitary Landfills in Different Climatic Regions in Brazil. In: International Waste Management and Landfill Symposium, 9., 2003, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy. Proceedings Sardinia... Cagliari, Italy.
- Mateus, Maria do Socorro C. S. (2008) Proposta de Modelo para Avaliação do Balanço Hídrico de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso do Aterro Metropolitano Centro de Salvador-BA. Tese de Doutorado - UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), COPPE, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro - RJ.
- Penman, H. L. (1948) Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1993: 120 -145.
- Reichardt, Klaus (1985): Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera. Editora Manole Ltda.

- Swason, Darren. A. (1995): Predictive Modelling of Moisture Movement in Engineered Soil Covers for Acid Generating Mine Waste. M.Sc, Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- Ubaldo, Mariluce de Oliveira (2005) Uso de cinzas de carvão na composição de uma cobertura de rejeitos de mineração. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro-RJ, 150p.
- van Genuchten, M. TH. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Proc. Soil Sci. Soc. Am., Vol. 44:5, 892-898.
- Wilson, G. W. (1990) Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems. Ph. D. Thesis. University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Wilson, G. W.; Barbour, S. L.; Fredlund, D. G. (1995): The Prediction of Evaporative Fluxes from Unsaturated Soil Surfaces. Unsaturated Soils, Alonso & Delage (eds), pp. 423-429.
- Wilson, G. W.; Fredlund, D. G.; Barbour, S. L. (1997): The Effect of Soil Suction on Evaporative Fluxes from Soil Surfaces. Can. Geotech. J. 34 pp. 145-155.