

CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS TROPICAIS APLICADAS COMO BARREIRAS NATURAIS CONTRA A CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS

Ana Cristina Strava Corrêa¹; Tácito Cunha Sousa² & Newton Moreira de Souza³

Resumo - O processo de ocupação de áreas urbanas desenvolve-se quase sempre associado a problemas de poluição dos solos e aquíferos subterrâneos. O alto custo dos processos de remediação de solos e águas subterrâneas faz com que as intervenções levem em consideração aspectos preventivos, tais como a vulnerabilidade do ambiente receptor. Nessa pesquisa, observaram-se aspectos relativos aos solos tropicais lateríticos que os aponta como barreiras naturais contra a contaminação das águas subterrâneas.

Os solos estudados foram retirados de duas áreas indicadas nas cartas de áreas potenciais para disposição de resíduos sólidos, no Distrito Federal. O comportamento dos solos e o monitoramento de suas propriedades foram feitos a partir de ensaios de coluna com água destilada, solução salina e chorume. Os resultados obtidos dessa campanha embasaram a proposição de um roteiro para seleção de áreas menos vulneráveis aos processos de percolação dos contaminantes.

Abstract - Urban areas are always associated to soil and aquifer pollution problems. Remediation activity are known as highly specialized task and high costs are always involved. This makes prevention a better way to go. Environmental vulnerability is considered as one of the factors affecting decision for human intervention. This research looked closely the tropical lateritic soil characteristics as a natural contamination barrier.

The tested soils were sampled from two potential disposal sites for solid waste in Federal District, Brazil. Testing its properties included the flush column test with three different fluids: distilled water, saline solution and leachate. The campaign results permitted the proposal of site selection for potential aquifer hazard interventions.

Palavras-Chave - contaminação de aquíferos; barreiras naturais; solos tropicais.

¹ Especialista em Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas - SPO Área 5, Q.3, bloco L – 61-4455273 – astrava@ana.gov.br

² Pesquisador da Universidade de Brasília - Campus Universitário Darcy Ribeiro – Faculdade de Tecnologia – SG12 - 61-3072711 – tacitocs@unb.br

³ Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília- Campus Universitário Darcy Ribeiro – Faculdade de Tecnologia – SG12 - 61-3072711 – nmsouza@unb.br

INTRODUÇÃO

O reconhecimento de algumas características dos solos auxilia na triagem de novas áreas para disposição de Resíduos Sólidos Urbanos, segundo os critérios de ZUQUETTE (1987), ROWE (1995) e POHL (1996). Os trabalhos apresentados por ZUQUETTE (1987) e POHL (1996) foram desenvolvidos com solos tropicais. Já as recomendações de ROWE (1995), servem como referência para escolha de materiais adequados, segundo o autor, para a construção de barreiras de argila sob aterros sanitários. A Tabela 1 abaixo resume as principais características do solo local que, segundo cada autor, estão relacionadas com a maior capacidade de confinamento e/ou atenuação de contaminantes.

Tabela 1 – Atributos do solo segundo as metodologias de ZUQUETTE (1987), ROWE (1995) e POHL (1996)

Atributos	ZUQUETTE (1987)	ROWE (1995)	POHL (1996)
Declividade do terreno	2 – 10%	-	-
Teor de argila	Em torno de 25%	15 a 20%	Maior teor
CTC	>5 meq/100g	>10 meq/100g	Maior CTC
pH	Alcalino	-	Alcalino
Condutividade hidráulica	$<10^{-6}$ cm/s	$<10^{-7}$ cm/s	Menor k
Profundidade NA	>4 m da base do aterro	-	-
Espessura da camada	-	3 – 4 m*	-
Reatividade com chorume	-	k <= com água	-
Densidade seca (γ_d)	-	-	Menor γ_d
Superfície específica	-	-	Maior SE
Estruturação do solo	-	-	Menor estruturação
Matéria orgânica	-	-	Maior conteúdo de MO
Teor de óxidos e hidróxidos	-	-	Maior teor de Fe e Mn

*Nesse tópico, o autor se refere à espessura da barreira compactada.

A comparação das características locais de algumas áreas selecionadas no Distrito Federal, com o auxílio de Sistema de Informações Geográficas (SIG), segundo SOUZA (1998) e ANDRADE (1999), resultaria na exclusão de quase todas as áreas.

Uma das mais evidentes discrepâncias entre os solos selecionados e as recomendações acima consiste na baixa capacidade de troca catiônica dos solos do Distrito Federal que em quase todas as áreas selecionadas está abaixo de 4 meq/100mg (EMBRAPA, 1978). Segundo os autores citados na Tabela 1, tanto a CTC alta, quanto o pH alcalino favorecem os processos químicos de retenção de cátions. O requisito de pH alcalino também não é atendido em nenhuma das áreas selecionadas, estando em torno de 5,0 o pH medido nesses solos.

Para esses solos, que apresentam percentuais de argila acima de 60%, altos valores de porosidade indicam um grau de estruturação significativo. Essa característica, com a qual se preocupou POHL (1996), ao recomendar solos menos estruturados, é responsável pela alta permeabilidade dos solos tropicais.

Entretanto, longe de serem solos não reativos, resultados de estudos com os solos tropicais têm indicado uma boa capacidade de atenuação (JUNQUEIRA, 2000; POHL, 1996 e BOSCOV, 1997).

MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de investigar o comportamento desses solos quando submetidos a percolação de contaminantes, foi realizada uma campanha de laboratório. Esses ensaios tiveram por objetivo a identificação dos parâmetros relevantes para mensuração da capacidade de confinamento dos solos tropicais, na condição de solos de base de aterros sanitários. Os experimentos de laboratório consistiram basicamente da montagem de permeâmetros especiais, com monitoramento da condutividade hidráulica e ensaios de coluna.

Para observação da compatibilidade solo-chorume, foram realizados ensaios de coluna com permeâmetro de paredes rígidas. O equipamento foi especialmente construído com material notoriamente inerte: acrílico e aço-inox. Como líquidos permeantes, foram utilizados água destilada, solução salina a 1000ppm de NaCl e chorume proveniente de uma das células do campo experimental do aterro do Jóquei Clube de Brasília. Os ensaios utilizados, para caracterização dos solos encontram-se resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Campanha de laboratório para caracterização dos solos ensaiados

Propriedade do solo	Objetivo	Tipo de ensaio
Densidade seca	Relacionar com a permeabilidade “in situ” do solo natural	Balança hidrostática
Densidade real do grãos / porosidade	Avaliar o grau de estruturação das partículas do solo.	Balão volumétrico
Análise granulométrica	Estimar a quantidade de argila (parâmetro relevante para construção de barreiras). Com o solo contaminado, permite verificar a compatibilidade do solo com contaminantes.	Peneiramento e Granulômetro a laser.
Peso específico máximo e umidade ótima	Moldagem dos corpos de prova nos permeômetros, com amostras deformadas.	Ensaio de compactação Proctor normal.
Permeabilidade	Avaliar a capacidade de retenção hidráulica do solo compactado em laboratório. A permeabilidade natural foi medida em campo.	Lab.: Permeômetro, carga variável; Campo: Boletim 04/96 da ABGE.
pH	Avaliar a condição de ambiente favorável à mobilidade de íons e avaliar a capacidade de tamponamento do solo.	Medida direta por eletrodo de pH
Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	Relacionar com a capacidade de retenção de contaminantes	Soma de cátions trocáveis e Azul de Metileno
Matéria orgânica	Avaliar a interferência do conteúdo de matéria orgânica na contenção / digestão de contaminantes.	Método titulométrico com dinifelamina
Análise química do solo	Avaliar a quantidade de óxidos de Fe e Al, cuja presença interfere nos mecanismos de sorção de contaminantes e na estrutura dos poros	Ataques químicos e Mehlich-I
Mineralogia	Avaliar o tipo de argilomineral presente na fração argila do solo	Difratometria por Raio-X
Limites de Atterberg (w_L , w_p)	Verificar a consistência do solo antes e após a contaminação	Método do penetrômetro
Sucção	Identificar a variação da curva característica em função da presença de contaminantes	Método do papel filtro
Interação solo/contaminante	Observar os principais mecanismos de retenção / atenuação de contaminantes	Ensaio de coluna e expansão livre.
Biomassa	Obter parâmetro indicativo da presença de bactérias e outros organismos vivos na massa de solo submetido a contaminação	Respirometria medida pela titulação de CO_2 presente em amostras incubadas.

Os três tipos de solos escolhidos para realização dos ensaios foram retirados de duas áreas indicadas nas cartas de áreas potenciais para disposição de RSU, para o Distrito Federal, nos estudos de SOUZA (1998) e ANDRADE (1999). A Tabela 3 apresenta as principais características de cada um, sendo suas denominações arbitradas como SAM 3, SAM 2 e SOB2.

Tabela 3 – Características físicas das amostras de solo utilizadas

Característica	SAM 3	SAM 2	SOB 2
Localização	ETE de Samambaia	ETE de Samambaia	Sobradinho - DF440
Profundidade (metros)	3	2	2
Umidade natural (%)	27	33	26
Densidade real dos grãos (kN/m ³)	28,22	27,83	26,75
Densidade aparente seca (kN/m ³)	16,76	13,72	10,00
Índice de vazios	0,68	1,02	1,78
Porosidade (%)	40	50	64
Classificação MCT	NS'	NS'	LA-LA'
Mineralogia da fração fina	Caolinita, ilita e quartzo com traços de goethita	Caolinita, ilita e gibbsita, traços de goethita	Caolinita, gibbsita e traços de ilita e hematita
LL	52	48	48
LP	24	37	41
Argila (%)	20	22	42
Silte (%)	77	69	50
Areia (%)	3	5	8

Obs: SAM 3 - solo proveniente de Samambaia, coletado na profundidade de 3 m.

SAM 2 - solo proveniente de Samambaia, coletado na profundidade de 2 m.

SOB 2 - solo proveniente de Sobradinho, coletado na profundidade de 2 m.

Segundo a classificação de MARTINS (2000), que considera a diferenciação do grau de intemperismo, os solos SOB 2, SAM 2 e SAM 3, são amostras de solo laterítico, zona mosqueada e saprólito, respectivamente.

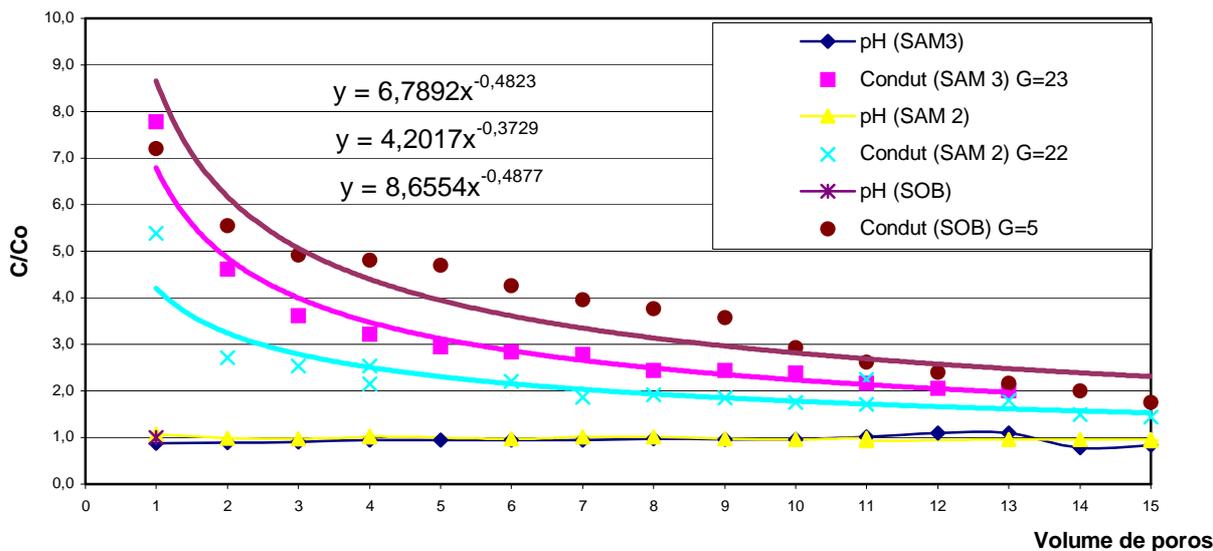
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaio de Coluna

De maneira geral, os resultados obtidos são indicativos de uma capacidade de confinamento relativamente boa e inesperada para o solo siltoso proveniente de Samambaia (SAM 2 e SAM 3), que não apresenta características adequadas para ser empregado na construção de barreiras de solo natural. Já o solo SOB 2 é representante típico da argila porosa de Brasília e, considerando os indicadores bioquímicos avaliados, foi o que apresentou melhor desempenho na atenuação dos compostos orgânicos, na condição de solo compactado.

A Figura 1 apresenta o resultado do monitoramento da coluna lixiviada com água destilada. O decréscimo da concentração relativa de íons em solução no solo foi mais suave para o solo SOB 2, possivelmente influenciado pela maior presença de partículas agregadas. Outra observação importante é que a condutividade elétrica da água intersticial dos solos era da ordem de 10 a 20 vezes menor do que aquela medida no chorume utilizado.

Ensaio de Coluna com Água Destilada



	SOB 2	SAM 2	SAM 3
Gradiente	10	11	12
K (cm/s)	2×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-3}

Figura 1 - Solos SOB 2, SAM 2 e SAM 3 permeados com água destilada nos gradientes indicados.

Efluentes monitorados em termos de concentração relativa de pH e condutividade elétrica.

Desempenho físico dos solos

Embora não ocorra isoladamente, o desempenho quanto a retenção física de contaminantes pelo solo pode ser avaliado por meio do monitoramento da turbidez da solução efluente.

A turbidez é provocada pela presença de partículas em suspensão e tem, portanto, relação com o teor de sólidos suspensos na solução. Por outro lado, sólidos solúveis, ou dissolvidos, que são maioria no chorume, podem não imprimir aumento significativo de turbidez. Já a condutividade elétrica tem relação direta com o teor de sólidos dissolvidos e pode ser utilizada na avaliação dos mesmos. A turbidez efluente encontra-se registrada na Figura 2. A condutividade elétrica, apresentada no mesmo gráfico, permite a avaliação do ponto de esgotamento da capacidade de atenuação química do solo e também é indicadora da proporção de sólidos dissolvidos presentes na solução.

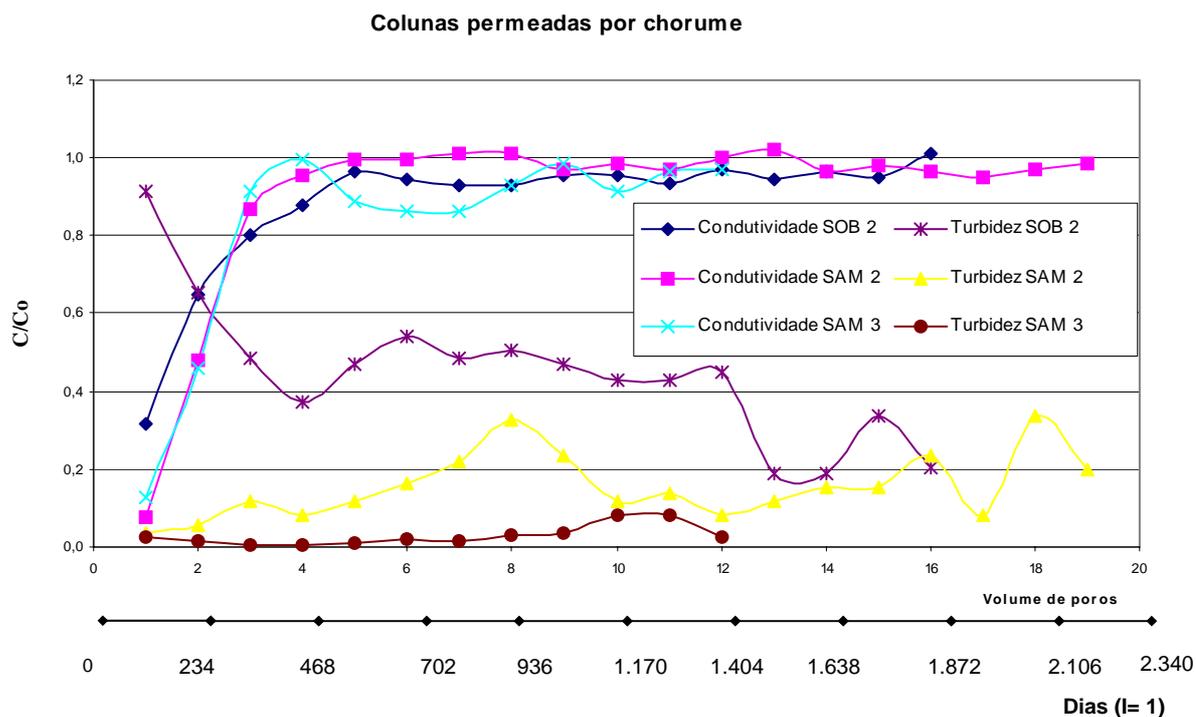


Figura 2 - Turbidez e condutividade elétrica relativas, efluentes das colunas permeadas com chorume, para os solos SOB 2, SAM 2 e SAM 3. Os ensaios foram desenvolvidos com gradientes hidráulicos de até 34. A escala temporal, em dias, foi calculada estimando-se um gradiente de campo de aproximadamente 1.

Em termos de retenção de partículas em suspensão, pode-se dizer que os três solos tiveram desempenho notórios, refletidos na retenção média de 60% da turbidez afluente. O valor de turbidez registrado, em termos absolutos para o chorume bruto variou de 151 a 77 UT. Tanto os teores de condutividade elétrica, como a turbidez efluente foram compatíveis com as grandezas de sólidos dissolvidos e suspensos.

O solo SOB 2 apresentou eficiência crescente na remoção da turbidez, condição que pode estar associada à colmatação dos poros do solo ou à geração de gases decorrentes da atividade biológica no solo, que reduziu a velocidade efetiva. Ambas hipóteses seriam compatíveis com a redução da permeabilidade, que passou de 3×10^{-7} cm/s no início do ensaio para 9×10^{-8} cm/s registrada durante a coleta dos últimos volumes de poros. Já a condutividade passou a oscilar próxima da condição de equilíbrio ($C/Co=1$), a partir do 5º volume de poros.

Pesquisa mais recente, em fase de conclusão realizada no curso de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, a partir de ensaios de percolação em coluna de solos proveniente do aterro sanitário Jóquei Clube de Brasília, tem demonstrado a existência de uma difusão secundária para os solos tropicais.

Esse processo desempenha importante papel na atenuação física de contaminantes. Verificada após vários ensaios realizados com água destilada e solução salina de NaCl, essa propriedade pode ser justificada pelas características geotécnicas dos solos tropicais, que possuem porosidade superior a 60%. A elevada porosidade está relacionada ao fato dos solos tropicais possuírem estrutura em forma de agregados de argilominerais criando uma matriz argilosa.

O processo secundário é um fenômeno físico-químico (dispersão + difusão) que se desenvolve em velocidade bem abaixo da velocidade de percolação preferencial, que ocorre nos canais de fluxo preferencial. Os resultados da pesquisa mostram que quanto maior o gradiente hidráulico imposto ao ensaio de coluna, maior será o tempo necessário para o equilíbrio da mistura entre o fluido percolado e o líquido retido nos poros dos agregados. A consideração desse fenômeno pode explicar, em parte, as diferenças encontradas entre os ensaios de coluna e a real migração dos contaminantes no solo que se processa de forma bem mais lenta.

Desempenho químico dos solos

Foram tomados como indicadores da atividade química dos solos a condutividade elétrica e a salinidade. O teor de ferro total também foi monitorado devido, à grande quantidade do mesmo no chorume (2 a 4mg/L). Outro parâmetro importante na regulação dos processos de sorção é o pH, pois a solubilização de alguns compostos está diretamente atrelada às condições de acidez do meio. Desta forma, a Figura 3 foi organizada de tal forma que se pode avaliar o comportamento desses indicadores para cada um dos solos, separadamente. Observa-se que a salinidade e a condutividade caminham juntas e atingem o pico entre o 4º e 5º volume de poros, independentemente do tipo de solo, com valor unitário de C/Co. Entretanto, para os solos SOB 2 e SAM 3, passam a oscilar entre 0,8 e 1 até o final do experimento, apresentando uma pequena, mas sistemática, fração de atenuação.

Na mesma Figura 3, foram incluídas as respectivas curvas efluentes de condutividade elétrica, nas colunas permeadas com solução salina. Essa comparação permite deduzir que o chorume é mais agressivo que a solução salina a 1000 ppm de NaCl. Possivelmente, a sinergia entre os constituintes do chorume permitam que a maior eficiência no "ataque" ao solo. De maneira geral, os três solos mostraram sinais de saturação química mais rápida quando permeados com chorume.

O pH efluente foi afetado pela capacidade tampão do solo. O pH do chorume, sempre acima de 8, foi tamponado pelo solo, de pH 5. O esgotamento dessa capacidade de tamponamento foi verificada por volta do mesmo volume de poros, para o qual a condutividade e a salinidade atingiram o equilíbrio químico.

Nos três solos, o ferro efluente não ultrapassou 50% da concentração no chorume. No solo SOB 2, mais intemperizado, observou-se uma fase de crescente liberação de ferro, que ocorre até o 6º volume de poros - ponto coincidente com o equilíbrio químico. A partir daí, a retenção do ferro

fica mais evidente e os teores no efluente caem para 20% do valor afluyente e se mantêm relativamente constantes até o final do experimento.

No solo SAM 2, a média de ferro no efluente também se manteve em torno de 20% da concentração no chorume. Mas foi no solo SAM 3, representante de um perfil menos intemperizado, que a atenuação foi mais constante e eficaz - manteve-se constante, em torno de 10% da concentração do chorume afluyente.

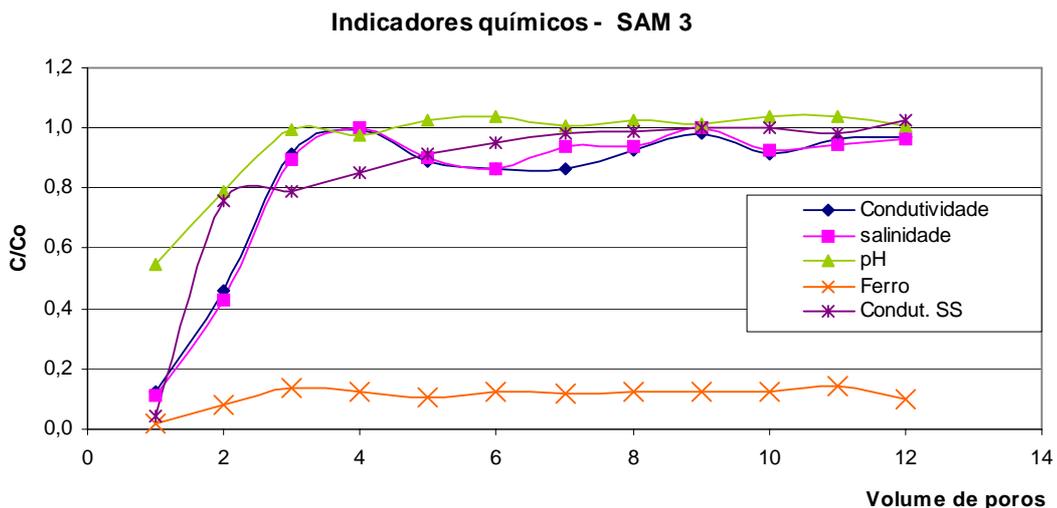
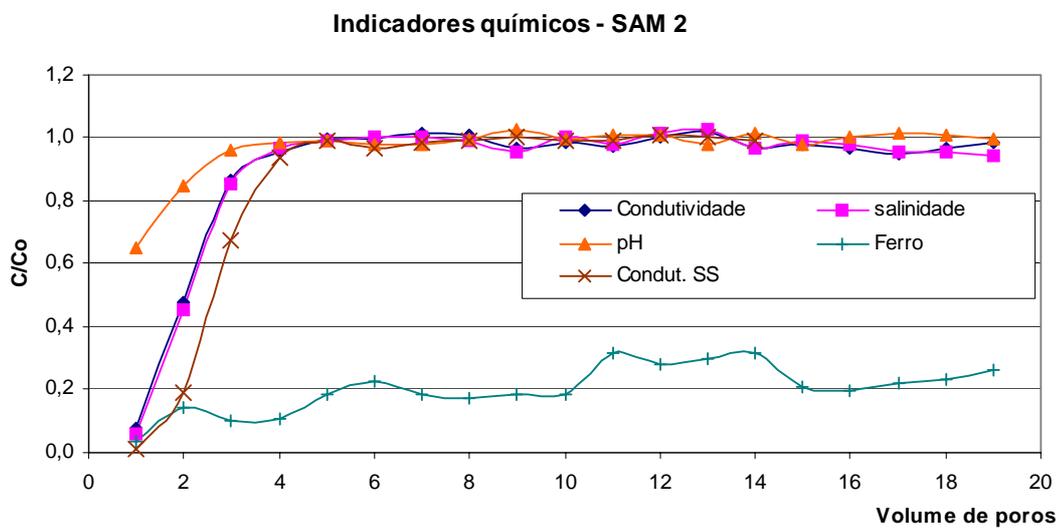
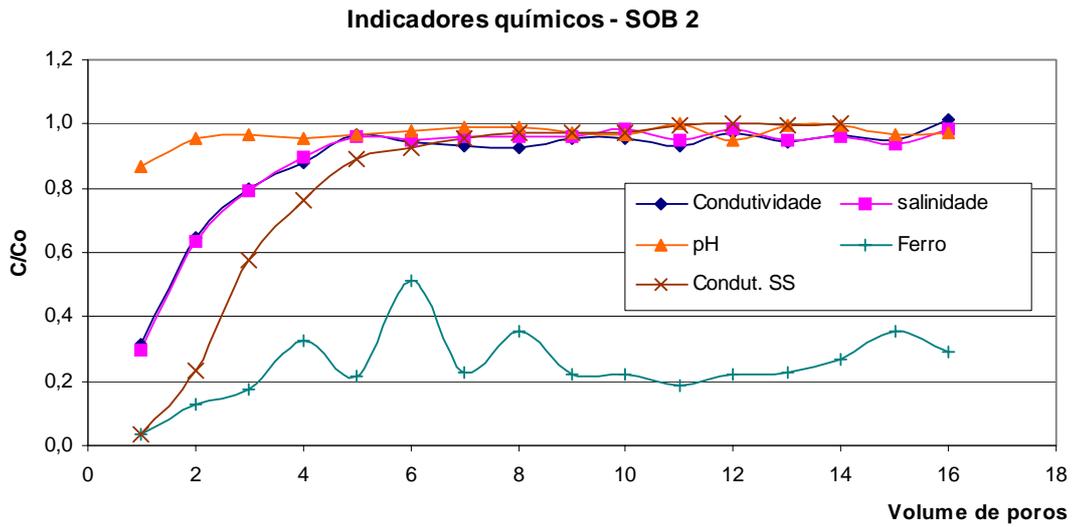


Figura 3 - Monitoramento químico nas colunas de solo SOB 2 (acima), SAM 2 (meio) e SAM 3 (abaixo) permeadas com chorume. As curvas de condutividade SS correspondem às colunas permeadas com solução salina. Para gradiente unitário, os tempos de campo corresponderiam a 2.160 dias para as colunas SOB 2 e SAM 2, e a 1.200 dias para SAM3.

Desempenho bioquímico dos solos

A amônia e a DQO foram monitorados como indicadores da atenuação bioquímica no solo. Embora seja um parâmetro não conservativo, a amônia é uma importante fonte de nitrogênio para a atividade microbiológica e não pode ser desprezada como indicadora dessa atividade. Por outro lado, a DQO é um indicador conservador e também sofre atenuação devido à atividade biológica. A Figura 4 apresenta as curvas obtidas do monitoramento dos indicadores bioquímicos.

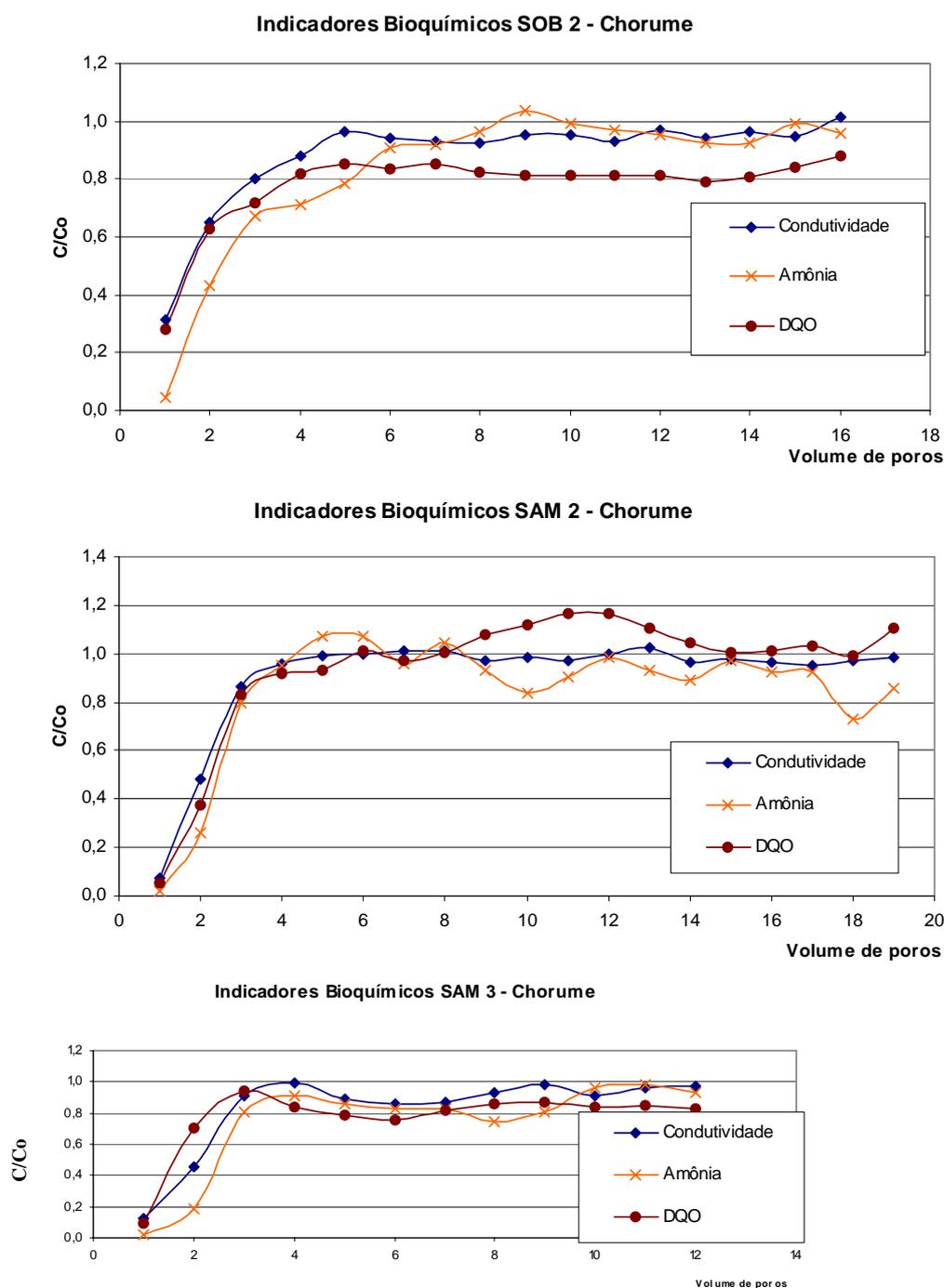


Figura 4– Valores de condutividade, corrigidos para 20°C, observados para diferentes fluidos permeantes, nas colunas de solo SOB 2, SAM 2 e SAM 3

A DQO foi o parâmetro que melhor representou a atenuação dos compostos orgânicos. POHL (1996) também observou a atenuação dos compostos orgânicos por meio do monitoramento do Carbono Orgânico Total, concluindo que os solos tropicais apresentaram um ótimo desempenho na atenuação destes ($C/C_0 < 0,7$).

Os principais aspectos analisados nessa etapa da pesquisa centraram-se na busca da relação das características dos solos tropicais com sua capacidade de atenuação / retenção de contaminantes. A grande parcela de atenuação observada ficou por conta da atividade biológica, que no solo tropical é favorecida, provavelmente devido aos seguintes fatores:

- sua matriz estruturada de poros favorece a fixação e proliferação de colônias dos microrganismos responsáveis pela degradação dos contaminantes;
- o clima quente da região tropical com temperaturas acima de 20°C, favorece o crescimento bacteriano, ao contrário do que acontece nas regiões de baixas temperaturas, nos climas temperados, que inibe o crescimento de microrganismos no solo;
- possui elevados teores de óxidos e hidróxidos, que disponibilizam elétrons para atividade bioquímica e podem desempenhar um papel importante na atenuação de ânions (SCHROEDER et MELEAR, 1999).

Alterações de comportamento do solo contaminado

Ensaio de granulometria

A análise dos resultados obtidos evidenciou a atuação do chorume sobre os aglomerados das partículas de solo.

Observou-se que o chorume atua como um dispersante para agregados de solo, como aqueles que ficam preservados durante o peneiramento dos solos saprolíticos, representados por SAM 2 e SAM 3. Percebe-se que, nas ligações mais fortes como a cimentação de micro-estruturas argilosas laterizadas, como as do solo SOB 2, o poder defloculante do chorume se restringiu a ampliar parcialmente a fração argila, removendo parte das concreções que apresentavam comportamento de areia fina.

Determinação das curvas características

As curvas características têm importância maior na indicação do comportamento do solo no campo pois, na condição de base de um aterro, a zona completamente saturada é limitada. As forças de sucção do solo passam a ser relevantes no processo de avanço da pluma de contaminantes. No início do processo de saturação, a força da gravidade que atua sobre a massa do fluido junta-se à força de sucção matricial, que é máxima na condição de solo seco. Com o umedecimento

progressivo da frente de saturação, as forças de sucção matricial diminuem, passando a ter importância a sucção osmótica.

Se por um lado a introdução de contaminantes no solo provocou a desagregação da fração de comportamento areno-siltoso do solo, por outro as curvas características indicam uma variação na capacidade de retenção de umidade no solo. As curvas características foram transformadas de acordo com o método desenvolvido em CAMAPUM DE CARVALHO et LEROUNEL (2000). Esse, consiste da determinação do índice de vazios para corpo de prova após o período de incubação dos mesmos. Uma vez obtida a sucção correspondente a cada corpo de prova, plota-se a curva da sucção multiplicada pelo índice de vazios versus o grau de saturação ou umidade do ponto. A transformação permite a obtenção de curvas características, que independem do índice de vazios e por isso podem ser comparadas a outras, traçadas para diferentes graus de compactação.

As curvas, mostradas na Figura 5, referem-se às curvas transformadas de sucção matricial e total dos solos SOB 2, SAM 2 e SAM 3, antes e após da contaminação com chorume. Observa-se que, para todos os três solos, as curvas que apresentam menor capacidade de sucção correspondem aos solos contaminados com chorume.

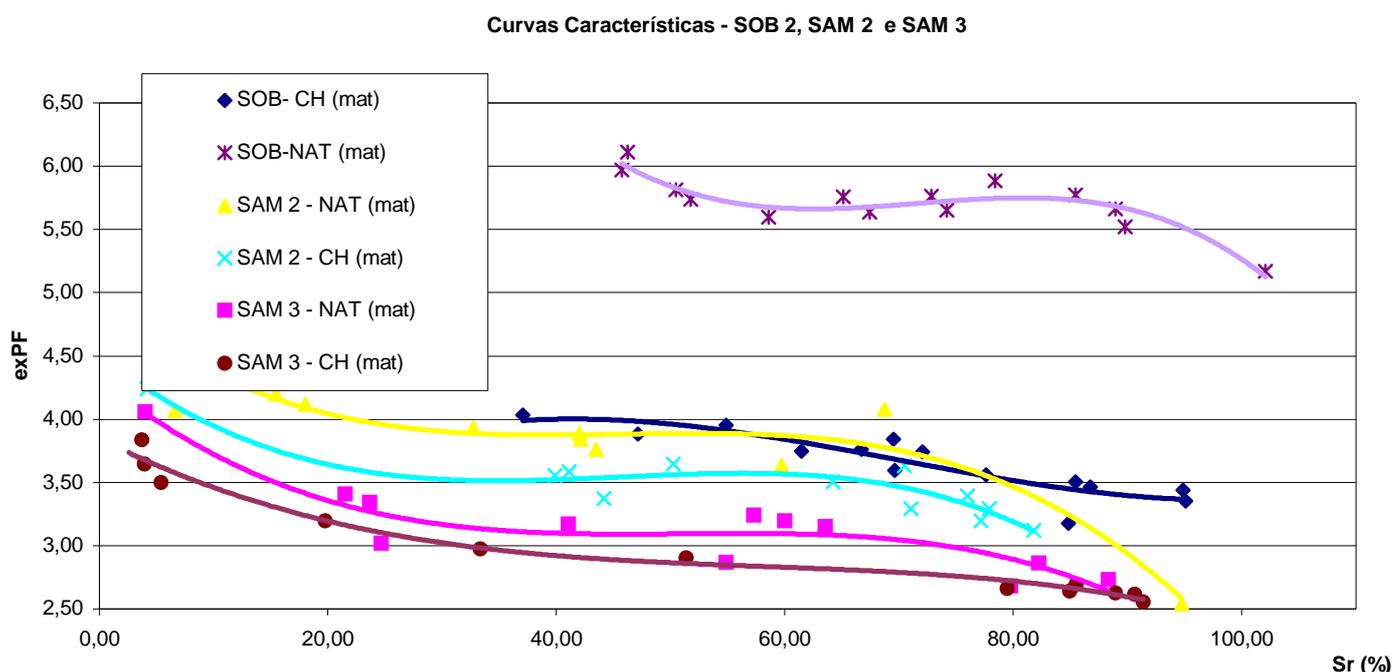


Figura 5 - Curvas características, de sucção matricial, transformadas em função do índice de vazios, para os solos SOB 2, SAM 2 e SAM 3. As curvas foram traçadas para as condições natural e após contaminação com chorume.

Ensaio de expansão livre

Os ensaios de expansão livre são extremamente simples de execução e oferecem uma ótima resposta quanto à compatibilidade do sistema solo - contaminante. Descrito em LAMBE et WHITMAN (1969) e proposto por SHACKELFORD (1994) para a verificação da reatividade do solo quando exposto à contaminação, o ensaio consiste na observação do volume ocupado pelo solo após sedimentação em proveta contendo a solução a ser estudada.

A Figura 6 representa de forma gráfica os resultados observados para os três tipos de solo. Foram colocados, inicialmente, 50 mL de solo seco, o qual foi agitado em 200 mL de solução. Como "brancos", foram utilizadas água destilada e solução salina de NaCl a 2%. Como "brancos", foram utilizadas água destilada e solução salina de NaCl a 2%.

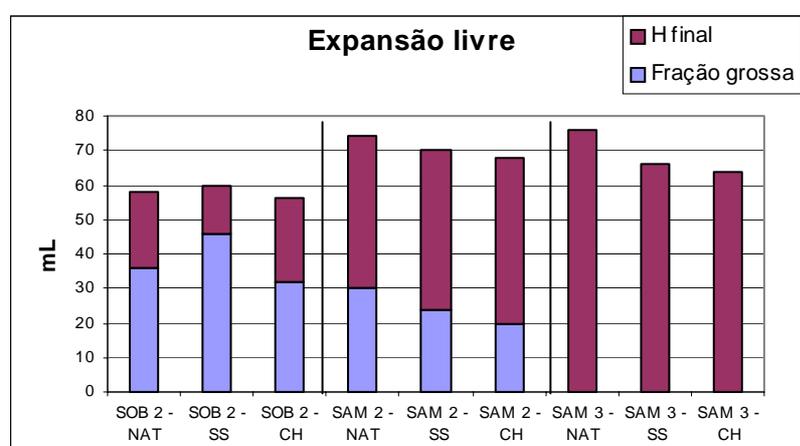


Figura 6 - Alturas finais de decantação dos solos SOB 2, SAM 2 e SAM 3, expostos a diferentes soluções: NAT (água destilada), SS (solução NaCl a 2%) e CH (chorume).

As alturas finais para os solos expostos ao chorume foram todas inferiores à altura final das provetas que continham água destilada. Os valores de expansão livre, para os solos em água destilada, mostraram-se 4, 9 e 19% maiores que as expansões dos solos SOB 2, SAM 2 e SAM 3, respectivamente, em chorume.

Determinação da biomassa do solo

Os ensaios para determinação da biomassa objetivaram a verificação da intensidade da atividade microbiana, nos solos onde havia a suspeita de atenuação bioquímica de contaminantes. Os resultados apresentados na Tabela 4 demonstram que nos solos contaminados a atividade microbiana era mais intensa e que parte do carbono medido estava alocado em células vivas de microrganismos.

Tabela 4 - Biomassa microbiana de acordo com o tipo de tratamento do solo

TRATAMENTO	SAM 3			SAM 2			SOB 2		
	C _b (mg /kg)	^(a) C (g/kg)	^(b) C _b /C (%)	C _b (mg/kg)	C (g/kg)	C _b /C (%)	C _b (mg/kg)	C (g/kg)	C _b /C (%)
Na Cl	89,9	1	9	71,3	2	4	120,9	8	2
Chorume	133,3	2	7	133,3	2	7	210,8	7	3
Ch/SS	1,5	2		1,8	1		1,7	0,9	

(a) - Carbono Orgânico determinado por extração química (anexo II)

(b) C_b/C - relação entre carbono da biomassa e carbono orgânico do solo

Dos resultados obtidos pode-se inferir que :

- Como esperado, mesmo em profundidade (2 e 3 metros), os solos possuem atividade microbiana, em comparação com as amostras de referência, ou "brancos", tratados com solução salina;
- A biomassa do solo laterítico é sensivelmente superior a dos solos saprolíticos, resultado esse também coerente com o horizonte do solo do qual foi retirado;
- O estímulo ao crescimento da biomassa no solo, proporcionada pela contaminação com chorume teve efeitos semelhantes em todos os solos. A proporção do aumento da biomassa após a contaminação esteve entre 1,5 e 1,8 vezes a biomassa inicial presente nos solos;
- A proporcionalidade do crescimento da biomassa após a contaminação pode ser indicativa da atuação do chorume como estimulante para o crescimento das bactérias existentes no solo e não indutor de um maior número de bactérias, embora esse fato não exclua a possibilidade, muito provável, do processo ter introduzido novas espécies, em substituição a outras mais sensíveis.
- A comparação da capacidade de atenuação bioquímica dos diferentes horizontes estudados (solo laterítico, zona mosqueada e saprolito) fica comprometida devido às condições diferenciadas da atividade microbiana inicial. O solo SOB 2, representante do horizonte de solo laterítico, apresentou uma biomassa inicial de quase o dobro dos solos saprolíticos. Essa condição pode justificar o fato da DQO sofrer atenuação durante todas as etapas do ensaio. O tempo de aclimação dos microrganismos pode ter sido menor do que nas colunas de solos saprolíticos e sua atividade consumiu a DQO em um tempo de contato menor.

PROPOSIÇÃO DE UM ROTEIRO PARA AVALIAÇÃO DOS SOLOS TROPICAIS

O comportamento dos solos tropicais, saprolíticos ou lateríticos, na condição de base de um aterro sanitário, pode ser inferido pelos ensaios de compatibilidade (granulometria, curvas características e expansão livre). A redução da sucção, para todos os graus de saturação, aliada à redução da permeabilidade, são indícios de que a infiltração do contaminante poderá ser dificultada.

O roteiro abaixo foi desenvolvido com o intuito de orientar pequenas e médias prefeituras, na identificação de solos que possuam características apropriadas ao confinamento dos resíduos sólidos urbanos.

Esta etapa deve ser precedida da avaliação dos aspectos gerais que norteiam a escolha de áreas dentro de critérios econômicos, ambientais e geopolíticos.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros que podem ser considerados relevantes para efeito da otimização da capacidade de confinamento / atenuação dos solos tropicais e os respectivos pesos a eles associados.

Tabela 5 - Ponderação de atributos locais para identificação de novas áreas para confinamento RSU

Indicadores	Relação com a capacidade de confinamento do solo	Determinação	Valores	Pesos
Densidade seca (γ_d)	Tipicamente baixa nos solos tropicais, a densidade seca tem relação direta com a permeabilidade dos solos. Valores muito baixos devem ser evitados, por reduzirem o tempo de contato entre o solo e o contaminante. Por outro lado, em alguns solos compactados observou-se menor desempenho na atenuação de compostos orgânicos, levando a crer que existe uma densidade seca ótima que maximize o tempo de contato solo -chorume, sem comprometer a atenuação bioquímica.	Método da balança hidrostática, a partir de amostras indeformadas.	$\gamma_d < 10 \text{ kN/m}^3$	1
			$10 < \gamma_d < 15 \text{ kN/m}^3$	8
			$\gamma_d > 15 \text{ kN/m}^3$	10
Permeabilidade (K)	De acordo com o tópico anterior, observou-se uma faixa de valores de permeabilidade que favorece a atenuação bioquímica. Deve-se levar em consideração que para permeabilidades muito baixas ($< 10^{-8} \text{ cm/s}$) o processo de difusão passa a ser mais significativo no transporte de contaminantes.	Métodos de determinação de campo em furos de sondagem, ou em laboratório, em permeâmetros de paredes rígidas para amostras deformadas.	$K > 10^{-6} \text{ cm/s}$	1
			$10^{-6} > K > 10^{-8} \text{ cm/s}$	8
			$K < 10^{-8} \text{ cm/s}$	10
Horizonte de intemperismo	O grau de intemperismo dos solos tropicais pode ser avaliado por meio da estratificação dos horizontes em campo. A camada superficial identificada por MARTINS (2000) como <i>solum</i> , tem espessura variável e textura fina. Quando submetida a contaminação, tem-se mostrado um bom substrato para desenvolvimento de processos bioquímicos de atenuação. A zona mosqueada é identificada como um horizonte de características muito heterogêneas ⁴ e deve ser evitada na condição de base para o recebimento de RSU.	Identificação em campo dos horizontes de intemperismo.	Solos lateríticos	10
			Zona mosqueada	1
			Solos saprolíticos	5
Grau de estruturação das partículas	Solos tropicais geralmente possuem algum grau de estruturação das partículas mais finas provocado pelo intemperismo sofrido ao longo de seu amadurecimento. Essa condição estabelece uma dinâmica de retenção de contaminantes em	Ensaios de granulometria com e sem defloculante no solo natural - noção do grau de estruturação - e no solo contaminado -	Colapso de microestruturas após contaminação	10
			Curvas sem alteração	1

⁴ CARDOSO (2001)

Indicadores	Relação com a capacidade de confinamento do solo	Determinação	Valores	Pesos
	microporos, também podem ser utilizados como substrato para fixação de bactérias.	noção da atuação do contaminante sobre a microestrutura do solo.	Aumento de microestruturas após contaminação	0
Dupla camada de difusão iônica	O comportamento de solos argilosos está normalmente associado às alterações da dupla camada de difusão iônica das partículas desagregadas. Se o contaminante provoca o colapso da dupla camada de difusão, as partículas tendem a flocular. Esse arranjo floculado, por sua vez, provoca o aumento da permeabilidade do solo. Já quando o contaminante favorece o aumento da espessura da dupla camada, verifica-se a redução da permeabilidade, devido ao arranjo de partículas dispersas. Essa condição também favorece o aumento da superfície de contato entre o contaminante e as partículas de solo.	Ensaio de expansão livre, com água destilada (E_{AD}) e contaminante (E_{CH}).	$E_{AD} > E_{CH}$	10
			$E_{AD} = E_{CH}$	1
			$E_{AD} < E_{CH}$	0
Capacidade de sucção do solo	Devido à sua porosidade natural, o transporte de contaminantes nos solos tropicais geralmente ocorre na zona vadosa. A força de sucção, nessas condições, condiciona o tamanho da franja capilar que pode se estabelecer dentro da pluma de contaminação.	Determinação da curva característica do solo natural e contaminado. A comparação deve ser feita para as mesmas condições de índices de vazios.	Redução da capacidade de sucção após contaminação (>30%)	10
			Redução da capacidade de sucção após contaminação (até 30%)	5
			Sem alteração	1
			Aumento da capacidade de sucção após contaminação	0
Teor de óxidos e hidróxidos	A presença de gibbsita e goethita em maiores quantidades são indicadores de solos mais amadurecidos, drenados e laterizados, e conseqüentemente com maior quantidade de óxidos e hidróxidos. POHL (1996) observou que solos com maior teor de óxidos e hidróxidos atenuavam metais, mesmo sob condições de pH ácido. SCHROEDER et MELEAR (1999) explicam que hidróxidos de ferro e alumínio adsorvem ânions e podem ter importância significativa na atenuação de compostos orgânicos.	Mineralogia por raio X, ATG ou extração química; determinação da relação sílica alumínio (K_i)	Teor de gibbsita \geq 10% e/ou $K_i < 2$	10
			Teor de gibbsita $<$ 10% e/ou $K_i \geq 2$	5

Os pesos arbitrados e suas respectivas faixas de valores de atributos, foram baseados nos resultados obtidos nessa pesquisa e em outras fontes citadas ao longo da revisão bibliográfica. Constituem-se em "tentativas" de primeira mão para delimitar valores e certamente serão aprimorados e/ ou corrigidos, com o avanço de novas pesquisas sobre a capacidade de atenuação dos solos tropicais.

A média dos valores, obtidos conforme indicadores da Tabela 5, pode ser utilizada para prognóstico comparativo do desempenho de solos tropicais na retenção de chorume, em uma análise expedita. Os valores foram arbitrados de tal forma que poderia se estabelecer a média mínima de 5 pontos para consideração de uma área de disposição de RSU. Por outro lado, esse método é mais útil na comparação entre algumas alternativas locais, sendo que os ensaios necessários para obtenção da média, com exceção da mineralogia, podem ser facilmente obtidos em qualquer laboratório de análises de solos.

A aplicação do método foi feita para os solos avaliados (SOB 2, SAM 2 e SAM 3) e os valores arbitrados em função dos resultados dos ensaios de coluna mostraram-se coerentes.

As Tabelas 6 e 7 abaixo apresentam a análise comparativa para os solos nas condições de campo e compactado, respectivamente. Observa-se que ao avaliar o solo como substrato para receber o chorume, o solo SAM 3 é o que oferece melhores condições de confinamento. Por outro lado, comparando os mesmos solos para uso como barreira compactada, o solo SOB 2 destaca-se sobre os demais.

Tabela 6 - Prognóstico comparativo do desempenho dos solos naturais como receptores de RSU.

INDICADOR	SOB 2	SAM 2	SAM 3
γ_d	1	8	10
K	1	8	8
Horizonte	10	1	5
Granulometria	10	10	10
Expansão	1	10	10
Sucção	10	5	5
Mineralogia	10	10	5
Média	6,14	7,42	7,57

Tabela 7 - Prognóstico comparativo do desempenho dos solos compactados como barreiras

INDICADOR	SOB 2	SAM 2	SAM 3
γ_d	8	8	8
K	8	8	8
Horizonte	10	1	5
Granulometria	10	10	10
Expansão	1	10	10
Sucção	10	5	5
Mineralogia	10	10	5
Média	8,14	7,42	7,28

CONCLUSÃO

Dentro do escopo do presente trabalho, procurou-se explorar a lacuna existente com relação aos atributos específicos dos solos tropicais que influem na sua capacidade de retenção/atenuação de contaminantes provenientes de aterros sanitários.

A aplicação dos parâmetros convencionados na literatura não condiz com as características dos solos tropicais. Dessa comparação, observou-se que os solos tropicais do Distrito Federal que correspondiam às áreas mais adequadas, segundo critérios de seleção regionais, não seriam passíveis de atuar na condição de solos de base ou como barreiras naturais dos novos aterros de RSU. O conflito entre essas recomendações e a capacidade de confinamento dos solos tropicais verificada em outros trabalhos, fica, então, evidente.

Para solos tropicais, investigar características locais, tais como CTC, teor máximo de argila e pH são inadequados, porque:

- A fração argila dos solos tropicais é, na maioria das vezes, composta por argilominerais de baixa CTC, como a caulinita. O levantamento das características dos solos do DF mostrou que, segundo os dados da EMBRAPA, a CTC dos solos do Distrito Federal, que atenderam as condições de viabilidade em escala regional, é praticamente constante e gira em torno de 5 meq/100g de solo. Para os solos estudados, esse parâmetro foi de pouca utilidade, devido à sua uniformidade;
- A estruturação dos solos tropicais faz deles solos argilosos com comportamento diferenciado. Apesar dos altos teores de argila, os mesmos, em diversas situações, apresentam comportamento de solos arenosos. Um exemplo clássico é o de sua alta porosidade natural, que lhe confere a permeabilidade de solos arenosos. A limitação do teor de argila preconizado para "barreiras", portanto, fica sem sentido para solos tropicais.
- A recomendação de solos "ligeiramente alcalinos" também é dispensável nas regiões de solos tropicais, pois uma de suas características mais marcantes é justamente a acidez. Apesar dessa característica, tem-se observado boa capacidade de imobilização de metais por tais solos, como foi observado por POHL (1996) e BOSCOV (1997).

No lugar desses atributos, fatores mais adequados aos solos tropicais seriam: (i) a avaliação de seu perfil de intemperismo, com caracterização dos horizontes presentes nas áreas de estudo; (ii) a espessura da camada de material inconsolidado; (iii) o teor de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio; (iv) a resposta aos ensaios de compatibilidade solo-chorume que, de certa forma, se relacionam ao teor de agregação; e porosimetria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDRADE, F. (1999). Uso de Sistemas de Informação Geográfica na Identificação de áreas potenciais para a instalação de aterros sanitários no Distrito Federal. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, DF, 131p.
- [2] BOSCOV, M. E. G. (1997). Contribuição ao projeto de sistemas de contenção de resíduos perigosos utilizando solos lateríticos. *Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, São Paulo, 269p.
- [3] CAMAPUM de CARVALHO, J. et PEREIRA, J. H. F. (2001). Estudo do comportamento mecânico dos solos não saturados com base na sucção normalizada. *4^o Simp. Bras. Solos Não Saturados*, Gehling, W Y Y et Schnaid, F (ed), Porto Alegre, RS, pp 134-170.
- [4] EMBRAPA (1978). Boletim Técnico no. 53.
- [5] JUNQUEIRA, F.F. (2000). Análise do comportamento de resíduos sólidos urbanos e sistemas dreno-filtrantes em diferentes escalas, com referência ao Aterro do Jóquei Clube - DF. Tese de Doutorado em Geotecnia, UnB, Brasília, DF, publicação 06/2000, 261p.
- [6] LAMBE, T. W. et WHITMAN, R. V.(1995). Mecânica dos Solos.(espanhol) *Editora Limusa – México*, 5a reimpressão, 582 p.
- [7] MARTINS, E. S. (2000). Petrografia, mineralogia e geomorfologia de rególitos lateríticos no Distrito Federal. *Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Inst. Geociências*, Brasília, DF. 196p.
- [8] POHL, D. H. (1996). Tropical Residual Soils: Applications in Solid Waste Containment. Tese submetida pela Universidade de Drexel, EUA, 325p.
- [9] ROWE, R. K. (1995). Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities. E & FN SPON, Londres, RU, 390p.
- [10] SCHROEDER, P.A. et MELEAR, N.D. (1999) Stable carbon isotope signatures preserved in authigenic gibbsite from a forested granitic-regolith: Panola Mt., Georgia, USA. *Geoderma, Elsevier*, 91: 261-279.
- [11] SHACKELFORD, C. D. (1994). Waste-Soil Interactions that Alter Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil. ASTM STP 1142, David E. Daniel and Stephen J. Trautwein, Eds., *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, pp.111-169.
- [12] SOUZA, N. M. (1998). Uso de técnicas de cartografia digital nos estudos de novas áreas para disposição de resíduos sólidos no Distrito Federal. Relatório Final do Pós-doutorado na *Technische Universität*, Berlim, Alemanha, 80p.
- [13] ZUQUETTE, L (1987). Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras. Tese (doutorado),Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, SP, 3v, 673p.