

### III-049 - ATERROS SANITÁRIOS SUSTENTÁVEIS PARA PEQUENAS CIDADES NEGLIGENCIADAS: O MÉTODO SEMIMECANIZADO DE TRINCHEIRA EM VILLANUEVA, HONDURAS

**Stewart M. Oakley<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil e Master of Science (Arizona State University), Ph. D. (Oregon State University), Professor da California State University, Consultor.

**Luciana Coêlho Mendonça**

Engenheira Civil (UFPB), Mestre e Doutora em Hidráulica e Saneamento (EESC/USP), Professora Adjunto da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

**Sérgio Rolim Mendonça**

Engenheiro Civil (UFPB) e Sanitarista (USP), Master of Science em Controle da Poluição Ambiental (Leeds University), Professor Emérito da UFPB, funcionário de carreira aposentado da OPAS / OMS, Consultor.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Department of Civil Engineering, California State University – Chico – California – 95929 – USA  
- Tel: +1 (530) 898-4976 - Fax: +1 (530) 898-4576 - e-mail: [soakley@csuchico.edu](mailto:soakley@csuchico.edu)

#### RESUMO

Lixão é a prática mais comum para a disposição de resíduos sólidos urbanos nas regiões em desenvolvimento e aterros sanitários têm sido tradicionalmente enfocados para grandes cidades. No entanto, há milhares de cidades com menos de 50.000 habitantes que correspondem a 19 a 45% da população total nos países da América Latina. Essas pequenas cidades não têm condições de operar um aterro sanitário como é proposto para grandes cidades, onde equipamentos pesados são usados para espalhar e compactar os resíduos em células diárias, e depois escavar, transportar e aplicar cobertura. Nas grandes cidades, o chorume é gerenciado com sistemas de coleta e tratamento. Este trabalho apresenta uma abordagem alternativa para as cidades de pequeno porte, conhecido como o método semimecanizado de trincheira, que foi desenvolvido em Villanueva, Honduras. Neste método, uma escavadeira hidráulica é usada durante um a três dias para escavar uma trincheira com capacidade para receber resíduos por pelo menos um mês. Os caminhões podem facilmente descarregar seus resíduos na vala e os resíduos são naturalmente compactados em poucos meses, devido à decomposição e seu peso. Depois deste período, as trincheiras são recarregadas e cobertas. A área superficial exposta é mínima, pois apenas a superfície de topo dos resíduos é exposta, sendo o restante coberto pelos lados e fundo da trincheira. O material excedente de escavação da trincheira pode ser usado no local ou externamente em aterros de obras de engenharia. Este aterro sanitário foi explorado durante 15 anos, em uma área total de cerca de 11ha para uma população que cresceu de 23.000 para 48.000 habitantes, com área requerida de 0,2m<sup>2</sup>/pessoa.ano. O aterro sanitário exigiu uma razão cobertura/resíduo de 0,2 e, ao longo dos 15 anos, produziu 298.101m<sup>3</sup> de solo excedente, que é valorizado e utilizado no local. O aterro foi operado exclusivamente pelo município com um custo operacional em 2010 estimado em US\$4,60 por tonelada. Os resultados do balanço hídrico de Villanueva mostram que a produção de chorume é insignificante nas trincheiras cobertas e é de 700m<sup>3</sup>/ano (60m<sup>3</sup>/ha.ano) em duas trincheiras abertas, para operação diária. Se fosse um lixão, a produção de chorume seria de 3.882m<sup>3</sup>/ha.ano e haveria escoamento contaminado de 5.014m<sup>3</sup>/ha.ano. Um modelo para estimar a diluição do chorume gerado (700m<sup>3</sup>/ano) sugere que o chorume será diluído por um fator de 0,01 no aquífero. Villanueva, portanto, serve como um exemplo ideal de como um aterro sanitário de cidade de pequeno porte pode ser operado de forma sustentável, com efeitos mínimos sobre as águas subterrâneas. Assim este método semimecanizado de trincheira atende as recomendações da NBR15.849/2010 para disposição adequada de resíduos sólidos em cidades brasileiras de pequeno porte.

**PALAVRAS-CHAVE:** disposição sustentável, resíduos sólidos, aterros sanitários, semimecanizado, pequeno porte.

## INTRODUÇÃO

Disposição a céu aberto – lixão – é a prática mais comum de disposição de resíduos sólidos urbanos na América Latina. Projeto e operação de aterros sanitários modernos, com confinamento, compactação e aplicação diária de material de cobertura, coleta e tratamento do chorume e manejo de biogás, geralmente não existem, exceto em cidades muito grandes (UNEP e CalRecovery, 2005). A ênfase nessas grandes cidades é entendida pela magnitude dos problemas de disposição dos resíduos e pelos recursos técnico-financeiros disponíveis, tanto locais como internacionais, para grandes centros urbanos. Todavia, na Tabela 1, onde é apresentada a distribuição da população de alguns países da América Latina – daqueles que possuem dados disponíveis, observa-se que as pequenas cidades latinoamericanas com menos de 200.000 habitantes podem abranger de 26,3 a 47,6% da população total do país; cidades com população inferior a 50.000hab, de 19,1 to 44,7%; e cidades com população menor de 20.000hab, de 11,4 a 27,5% (UN-HABITAT, 2006).

Essas numerosas cidades de pequeno porte certamente não possuem apoio governamental para a disposição de resíduos e não são capazes de operar um aterro sanitário de maneira adequada, como é proposto para as grandes cidades, onde equipamentos pesados são usados para espalhar e compactar os resíduos em células diárias, escavar, transportar e aplicar a cobertura diária. Apesar de haver alguns bons exemplos, na literatura, de aterros sanitários sustentáveis para pequenas cidades (Jaramillo, 2002; Lange *et al.*, 2002), a maioria dos livros e manuais de projeto usados por profissionais tem o foco em tecnologia de larga escala com confinamento, operação totalmente mecanizada e manejo do chorume e gases.

Esta ênfase impõe sérias restrições técnicas quanto às opções de disposição apropriadas à escala, condições locais e recursos de cidades de pequeno porte. Isto é muito importante nos países como o Brasil, em que a recente legislação nacional (NBR 15.849/2010) recomenda para cidades de pequeno porte com produção menor que 20ton/dia, que a disposição de seus resíduos seja realizada em aterros sanitários de pequeno porte, em que há predominância da operação manual e simplicidade em relação às instalações de grande porte (ABNT, 2010).

**Tabela 1: Distribuição da População em Pequenas Cidades da América Latina<sup>a</sup>.**

País	População Total	Percentual da População Total (População Estimada em Pequenas Cidades - hab)		
		<200.000	<50.000	<20.000
Argentina	36.896.000	30,2 (11.143.000)	19,1 (7.047.000)	11,4 (4.206.000)
Brasil	174.161.000	41,6 (72.451.000)	24,3 (42.321.000)	15,0 (26.124.000)
Chile	15.412.000	38,6 (5.949.000)	21,2 (3.267.000)	14,3 (2.204.000)
Colômbia	41.683.000	26,3 (10.963.000)	19,4 (8.086.500)	14,8 (6.169.000)
Costa Rica	3.929.000	47,6 (1.870.000)	44,7 (1.756.000)	27,5 (1.080.000)
Guatemala	11.229.000	35,3 (3.964.000)	30,6 (3.436.000)	25,8 (2.897.000)
Honduras	6.196.000	26,3 (1.629.548)	19,5 (1.208.220)	13,0 (805.480)
Peru	25.663.000		19,8 (5.081.000)	14,7 (3.772.000)

<sup>a</sup> 2000/2001

Fonte: UN-HABITAT (2006)

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados de um aterro sanitário tecnicamente adequado e sustentável para pequenas cidades, usando o método semimecanizado de trincheira desenvolvido em Villanueva, Honduras.

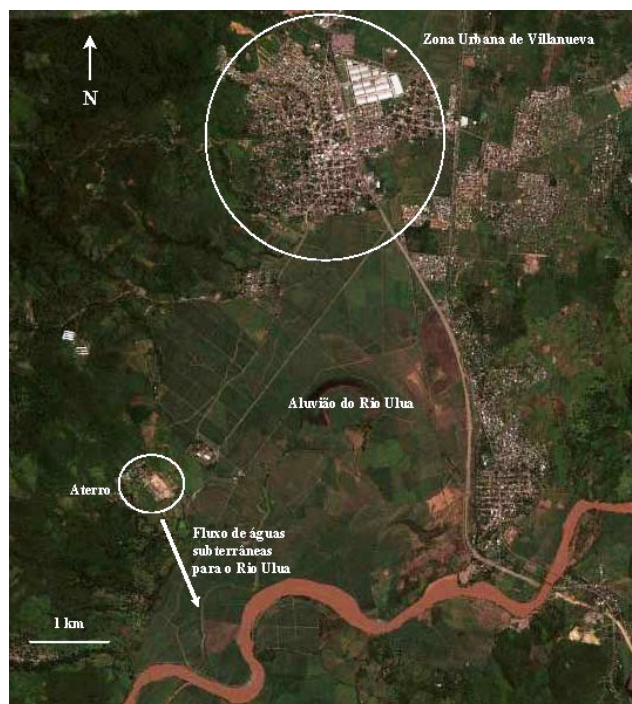
## METODOLOGIA

*Método semimecanizado de trincheira – Projeto.* A base racional por trás deste método é eliminar o uso de equipamentos pesados para escavação, compactação e espalhamento dos resíduos, e colocação da cobertura, para reduzir custos e promover a sustentabilidade. Uma escavadeira hidráulica é usada por um a três dias de operação para escavar uma trincheira que pode comportar de um a dois meses de acúmulo de resíduos sólidos. Como os resíduos são empilhados verticalmente na profundidade da trincheira diariamente, a área superficial exposta é minimizada e o peso do lixo promove a compactação natural. A redução de volume devido à decomposição biológica também reduz o volume em 30 a 40% em alguns meses em climas tropicais, permitindo que as trincheiras sejam parcialmente recarregadas em uma data posterior antes de serem finalmente cobertas. O chorume é controlado através da atenuação natural em vez de coleta e tratamento. O espaçamento entre as trincheiras é baseado na força de cisalhamento do solo e pode ser tão pequena quanto 1,50m em solos argilosos. O procedimento de projeto para seleção de escavadeira, profundidade máxima da trincheira, espaçamento entre as trincheiras, dimensões da célula diária e a estimativa de produção de lixiviados serão apresentadas posteriormente.

## RESULTADOS

### *Antecedentes*

O município de Villanueva (população urbana com cerca de 48.000 habitantes) está localizado a 30 quilômetros ao sul da cidade de San Pedro Sula, no departamento de Cortés, em Honduras. Villanueva está dentro da planície aluvial das planícies do Caribe na parte ocidental do Vale do Sula, principal região agrícola do país. O Rio Ulua, um dos rios mais importantes e maiores em Honduras, está localizado a 5 km ao sul do centro da cidade, como mostrado na Figura 1. O aterro de Villanueva está localizado a 4,5 km a sudoeste do centro da cidade e a 2 km ao norte do Rio Ulua (Figura 1). O aterro está localizado no vale aluvial do Rio Ulua, com um solo argiloso com profundidade de 10 metros e profundidades das águas subterrâneas, variando de 8 a 10m. As águas subterrâneas fluem do sul para poços municipais de Villanueva, com o Rio Ulua sendo o ponto de descarga final (Brown e Caldwell, 2002). A escolha do local do aterro foi baseada no conhecimento local do sentido de fluxo das águas subterrâneas e ponto de descarga.



**Figura 1:** Área urbana de Villanueva: localização do aterro e direção do fluxo de água subterrânea para o Rio Ulua (Imagem de satélite – cortesia de GeoEye.)

*Método semimecanizado de trincheira com compactação manual, Fase I, 1994-1999.*

O aterro, que começou a operar em 1994 em 5,6 hectares adquiridos pelo município, foi originalmente concebido como um aterro sanitário manual, utilizando o método da trincheira semelhante ao proposto por Jaramillo (2002). Trincheiras com 3m de profundidade, 3 a 4m de largura e 40 a 60m de comprimento foram projetadas para durar aproximadamente um mês e foram construídas com uma escavadeira de propriedade do município. Os resíduos depositados diariamente foram compactados manualmente a uma profundidade de 1m e cobertas com 0,3m de solo excedente das escavações da trincheira. A coleta de chorume não foi realizada, com base na seleção local, e chaminés construídas com pedras rochosas foram usadas para a ventilação de metano. Após 5 anos, o método manual foi abandonado, devido à dificuldade de compactação manual e ao aumento do volume de resíduos, juntamente com a perda significativa do volume de vala com material de cobertura.

*Método semimecanizado de trincheira com compactação natural, Fases I, II & III, 2000 - Atual.*

Os engenheiros da prefeitura experimentaram diferentes propostas de dimensões da trincheira, espaçamento e preenchimento e, gradualmente, desenvolveram o método semimecanizado de trincheira com compactação natural. As trincheiras foram escavadas a uma profundidade média de 5m, 5m de largura e 60m de comprimento ( $1.500\text{m}^3$ ) durante 36 horas, usando uma escavadeira alugada, de médio porte - 138CV (Figura 2). Uma segunda trincheira foi escavada em um local pré-selecionado, não contíguo à primeira que estava sendo preenchida. Uma descarga controlada de resíduos foi feita para preencher trincheiras na vertical para formar a célula diária, produzindo uma superfície mínima exposta. As trincheiras foram então gradualmente preenchidas longitudinalmente, com células diárias (Figura 3). Uma trincheira de  $1.500\text{m}^3$  atualmente dura de 3 semanas a um mês até ser preenchida. Depois de encher uma trincheira, a mesma foi deixada aberta por 3 a 4 semanas para permitir a compactação através de biodegradação natural semiaeróbia e sedimentação (de compressão e separação natural dos sólidos), que reduziu o volume de resíduos em 30 a 40% (Figura 4). A trincheira foi então recarregada e coberta com 1m do solo excedente. Por tentativa e erro, o espaçamento mínimo ideal entre as valas de paredes verticais foi de 1,5m para o solo argiloso siltoso. Para se obter esse espaçamento, as trincheiras foram deixadas cheias por, no mínimo, seis meses para permitir a estabilização dos resíduos antes de uma trincheira adjacente ser escavada. Finalmente o solo excedente das escavações de trincheiras foi armazenado e posteriormente valorizado para uso local (por exemplo, construção de estradas) (Figura 2b). Novamente, com base na seleção do local, a gestão do chorume não foi realizada e chaminés construídas com pedras rochosas foram utilizadas para a ventilação de metano.



**Figura 2:** a) As paredes verticais da trincheira (5m x 5m x 60m) foram escavadas com uma escavadeira de médio porte (138CV,  $1\text{m}^3$  caçamba) em 36 horas e tiveram duração de três semanas a um mês até ser preenchida. O metano foi gerenciado com chaminés construídas com pedras rochosas. b) Superávit do solo das escavações de trincheiras pôde ser armazenado e valorizado para uso local ou externo.





**Figura 3:** a) Os resíduos foram despejados na vala com inclinação controlada para formar a célula diária, que tem um volume e superfície mínimos. Observe o material excedente da escavação da trincheira. b) Um mínimo de área superficial foi exposta, pois a trincheira foi preenchida ao longo de seu comprimento, em células diárias.



**Figura 4:** a) A trincheira cheia foi deixada aberta por três a quatro semanas para permitir a compactação natural devido à decomposição e sedimentação por compressão e separação natural dos sólidos (pequenas partículas migram através dos espaços vazios). b) A trincheira foi preenchida e deixada por três semanas, resultando em ganho de aproximadamente 30 a 40% do volume devido à compactação natural.

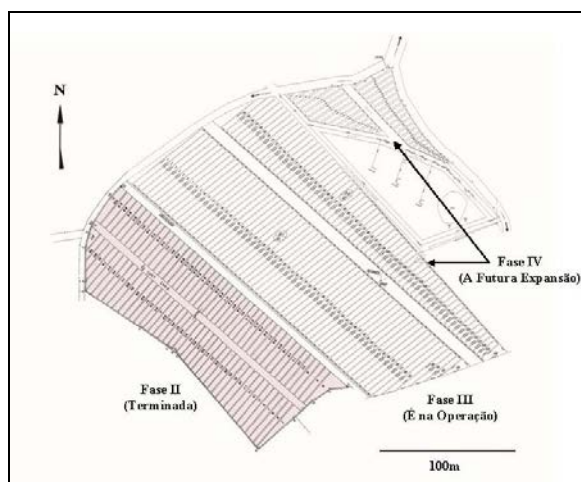
Este método tem sido usado com sucesso desde 2000. Na Figura 5, é mostrada imagem de satélite do local em 2010. A Fase I (5,6ha) foi concluída em 2002 e a Fase II (3,5ha), em 2006. A Fase III (3,5ha) está em funcionamento e será encerrada em 2012, quando a Fase IV dará início à operação. Apesar da proximidade das numerosas habitações que podem ser vistas na Figura 5, os residentes nas proximidades nunca se queixaram sobre o aterro e tem havido apenas alguns problemas com vetores, lixo ou maus odores. Os planos de trabalho projetados pelos engenheiros da prefeitura para as últimas três fases são mostrados na Figura 6.



**Figura 5:** O aterro sanitário de Villanueva em 2010. Fase I (5,6ha) foi concluída em 2002 e Fase II, em 2006. Fase III está atualmente em operação. Os vizinhos nunca se queixaram da operação do aterro (Imagem de satélite - cortesia de GeoEye.)

*Resumo da operação, 1994-2010.*

Na Tabela 2, estão apresentadas as estimativas da quantidade de resíduos, área utilizada, coberturas necessárias e os volumes excedentes de solo para a operação do aterro de 1994 a 2010. As quantidades foram estimadas a partir do volume de trincheiras cheias, assumindo uma densidade final no local de  $400\text{kg/m}^3$  (Villanueva não pesa os resíduos recebidos, uma vez que não tem uma balança - condição típica de aterros de pequenas cidades - mas os operadores estimam os volumes de descargas dos caminhões ao longo dos anos). A área total requerida para 15 anos de operação foi de 11,4ha, correspondendo a  $0,2\text{m}^2/\text{pessoa.ano}$  (assumindo 20% de área adicional para estradas, etc.) Um volume estimado acumulado de  $372.626\text{m}^3$  de resíduos foi enterrado e  $74.525\text{m}^3$  de cobertura foi necessária, dando uma razão cobertura/resíduo de 0,20 para cobertura final e produzindo um excedente de  $298.101\text{m}^3$  de solo, que é armazenado para valorização futura (Figura 5b). Na Tabela 3, são mostrados os custos operacionais para 2010, estimados em US\$4,60 por tonelada.



**Figura 6:** Projeto do aterro sanitário de Villanueva desenvolvido pelos engenheiros da prefeitura. Fase II (3,5ha) foi iniciada em 2002 e terminou em 2006. Fase III (3,5ha) está atualmente em operação e estará concluída em 2012. Fase IV está reservada para 2012.

Tabela 2: Produção de resíduos, área, cobertura necessária e solo excedente para o aterro sanitário semimecanizado de trincheira de Villanueva, 1994-2010

Ano	População	Produção de resíduos sólidos <sup>1</sup>					Área do aterro sanitário <sup>2</sup>			Cobertura necessária <sup>3</sup>		Solo Excedente	
		$M_d$ ton/dia	$V_d$ m <sup>3</sup> /dia	$V_m$ m <sup>3</sup> /mês	$V_a$ m <sup>3</sup> /ano	$\Sigma V_a$ m <sup>3</sup> <sup>a</sup>	$A_{TTS}$ ha/ano	$\Sigma A_{TTS}$ ha	$\Sigma A_{TLF}$ ha	$V_c$ m <sup>3</sup> /ano	$\Sigma V_c$ m <sup>3</sup>	$V_{Surplus}$ m <sup>3</sup> /ano	$\Sigma V_{Surplus}$ m <sup>3</sup>
1994	23.369	16,4	41	1.227	14.927	14.927	0,38	0,38	0,45	2.985	2.985	11.942	11.942
1995	24.445	17,1	43	1.283	15.614	30.541	0,40	0,78	0,93	3.123	6.108	12.491	24.433
1996	25.570	17,9	45	1.342	16.333	46.874	0,42	1,19	1,43	3.267	9.375	13.066	37.499
1997	26.747	18,7	47	1.404	17.085	63.959	0,44	1,63	1,95	3.417	12.792	13.668	51.167
1998	27.978	19,6	49	1.469	17.871	81.830	0,46	2,08	2,50	3.574	16.366	14.297	65.464
1999	29.266	20,5	51	1.536	18.694	100.524	0,48	2,56	3,07	3.739	20.105	14.955	80.419
2000	30.613	21,4	54	1.607	19.554	120.078	0,50	3,06	3,67	3.911	24.016	15.643	96.062
2001	32.022	22,4	56	1.681	20.454	140.532	0,52	3,58	4,30	4.091	28.106	16.363	112.425
2002	33.496	23,4	59	1.759	21.396	161.927	0,55	4,13	4,95	4.279	32.385	17.116	129.542
2003	35.038	24,5	61	1.839	22.380	184.307	0,57	4,70	5,64	4.476	36.861	17.904	147.446
2004	36.650	25,7	64	1.924	23.410	207.718	0,60	5,30	6,36	4.682	41.544	18.728	166.174
2005	38.337	26,8	67	2.013	24.488	232.206	0,63	5,93	7,12	4.898	46.441	19.590	185.765
2006	40.102	28,1	70	2.105	25.615	257.821	0,66	6,59	7,90	5.123	51.564	20.492	206.257
2007	41.948	29,4	73	2.202	26.794	284.615	0,69	7,27	8,73	5.359	56.923	21.435	227.692
2008	43.878	30,7	77	2.304	28.027	312.642	0,72	7,99	9,59	5.605	62.528	22.422	250.114
2009	45.898	32,1	80	2.410	29.317	341.960	0,75	8,75	10,50	5.863	68.392	23.454	273.568
2010	48.011	33,6	84	2.521	30.667	372.626	0,79	9,54	11,44	6.133	74.525	24.533	298.101

1.  $M_d$  - Massa disposta diária, assumindo produção de 0,7 kg/pessoa.  $\Sigma V_a$  - Volume acumulado de resíduo nas trincheiras, considerando densidade de 400kg/m<sup>3</sup>.

2.  $A_{TTS}$  - Área total do sistema de trincheiras com espaçamento de 1,5m entre as trincheiras.  $\Sigma A_{TTS}$  - Área total acumulada no sistema de trincheiras.

$\Sigma A_{TLF}$  - Área total do aterro acumulada ( $\Sigma A_{TTS} + 20\%$ ). A área total acumulada do aterro necessária é de 0,2m<sup>2</sup>/pessoa.ano.

3. A razão cobertura final/resíduo é de 0,2 e é assumido que 1,0m de solo deve ser aplicado para ter-se cobertura final mínima de 0,5m.



**Tabela 3: Custos Operacionais do Aterro Sanitário Semimecanizado de Villanueva, 2010**

Mão de obra	Número	Valor/Mês (US\$)	Total/Mês (US\$)
<i>Operador chefe</i>	1	368	368
<i>Operador</i>	5	289	1.445
Equipamento Pesado	Horas	Valor/Hora	
<i>Escavadora</i>	36	79	2.844
<b>Total:</b>			<b>4.657</b>
<b>Ton/mês</b>			<b>1.012</b>
<b>Custo/ton (US\$)</b>			<b>4,60</b>

## PROJETO E OPERAÇÃO DE ATERROS SEMIMECANIZADOS COM BASE NA EXPERIÊNCIA DE VILLANUEVA

### *Crítérios de seleção do local.*

Os critérios específicos mais importantes para seleção do local para aterros sanitários semimecanizados de trincheiras, com a atenuação natural de chorume são: i) condições hidrogeológicas e ii) características do solo. As condições hidrogeológicas principais incluem a profundidade, estratigrafia e permeabilidade do aquífero, a direção e a magnitude do fluxo das águas subterrâneas, e o ponto de descarga das águas subterrâneas. As características importantes do solo são: coesão, resistência ao cisalhamento e profundidade das águas subterrâneas.

Enquanto os estudos de engenharia devem ser realizados para avaliar adequadamente um local, um pequeno município terá o mínimo de recursos para fazer isso (projetos financiados internacionalmente para cidades de pequeno porte devem concentrar os seus esforços neste sentido). Conhecimento local, no entanto, também pode ser um recurso valioso. O local de Villanueva, por exemplo, foi escolhido porque a profundidade das águas subterrâneas, direção de fluxo e ponto de descarga já eram conhecidos a partir de dados municipais e particulares, e as características do solo eram bem conhecidas a partir da experiência de construção. Assim assumiu-se que a contaminação das águas subterrâneas por chorume não seria um problema desde o ponto de descarga das águas subterrâneas até o Rio Ulua, a jusante do aterro (Figura 4). Estudos hidrogeológicos realizados em 2002, que serão discutido a seguir, apoiam essa suposição baseada em conhecimento local há 8 anos passados.

### *Seleção da escavadeira (Figura 7).*

O projeto de um aterro sanitário semimecanizado de trincheira elimina a necessidade do uso contínuo de equipamento pesado, que normalmente é muito superior aos recursos disponíveis das pequenas cidades. Uma escavadeira hidráulica (ou talvez uma retroescavadeira para uma população muito pequena) é o equipamento mais eficiente para escavar uma trincheira estreita e profunda. O objetivo é selecionar uma escavadeira de tamanho suficiente para escavar, em 1 a 3 dias, uma trincheira que será usada pelo menos várias semanas a um mês. Escavadeiras de médio porte (84-285 CV) estão disponíveis em todo o mundo e podem ser alugadas por menos de US\$ 100/hora. Em Honduras, por exemplo, o aluguel de uma escavadeira média é de US\$ 79/hora (2010), um preço que inclui o operador e entrega no local.

Na Figura 7, é mostrado o tempo necessário para escavar uma trincheira mensal *versus* população para escavadeira de 80HP e de outros tamanhos. Presume-se que a produção *per capita* é de 0,6kg/dia, a densidade de 200kg/m<sup>3</sup> de resíduos, e o tempo de ciclo de máquina é 30 segundos em média para o solo semi-duro, o que dá um fator de segurança acima de operação normal para a maioria das escavadeiras (Caterpillar, 2003). Como visto na Figura 7, escavadeiras podem facilmente servir à populações de até 75.000 habitantes, trabalhando de 8 a 24 horas por mês. A máquina de tamanho certo com um operador competente está disponível para ser alugada e é selecionada pelo engenheiro de projeto. Retroescavadeiras são viáveis para usar também, mas apenas para populações menores que 5.000 habitantes.

### *Profundidade máxima da trincheira.*

Para um determinado volume de resíduos, o total de área superficial exposta da trincheira é limitada pela profundidade da trincheira, independentemente da largura e comprimento (Oakley, 2005). A profundidade da trincheira, por sua vez é limitada pela escavadeira usada ou pelas características de cisalhamento do solo.



Baseado em escavadeiras - Pequenas e médias escavadeiras (84 a 286CV) podem escavar até uma profundidade máxima de 4,4 a 7,4m, e retroescavadeiras (78 a 110HP), até 4 a 5m (Caterpillar, 2003). Assim as máquinas não são operadas em seus limites com desgaste excessivo. Como regra prática, pode-se admitir que uma escavadeira de médio porte facilmente escava uma trincheira de 4 a 5m e uma retroescavadeira, cerca de 3m (Oakley, 2005).

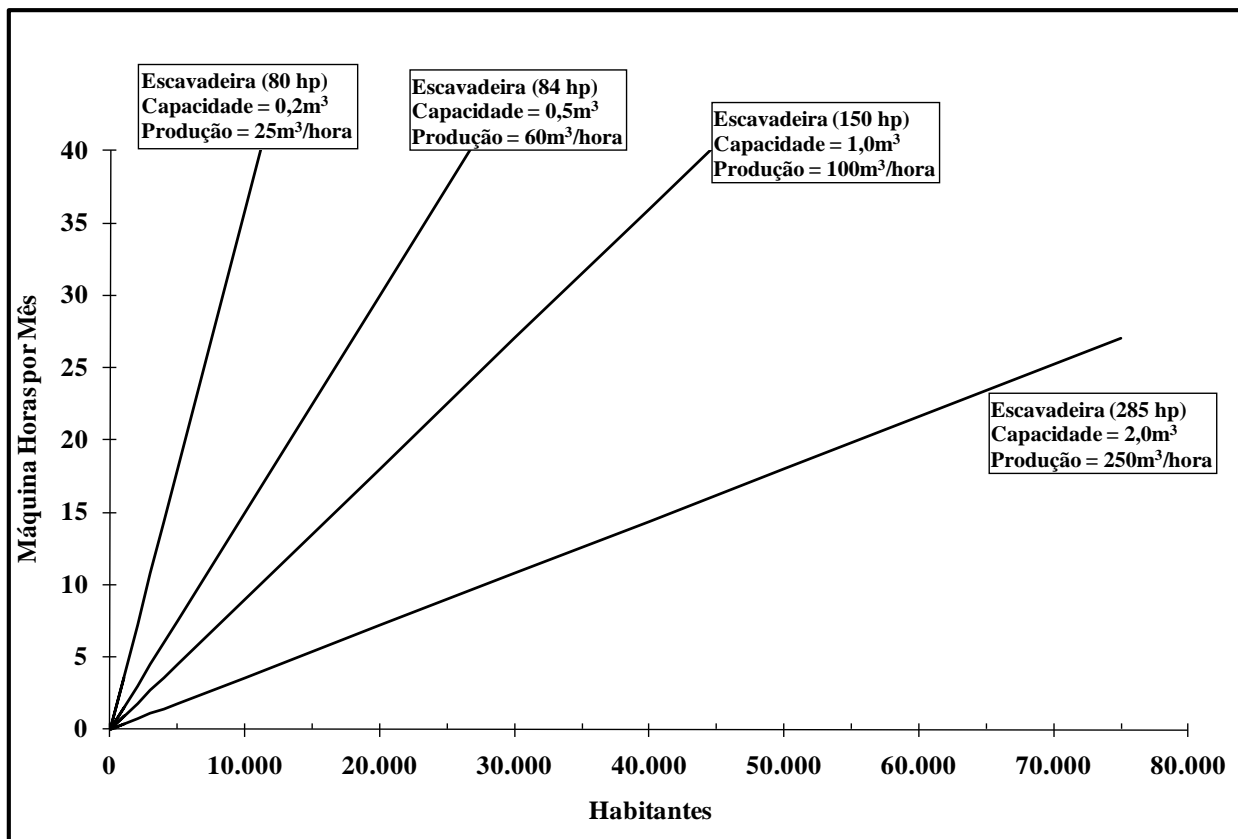


Figura 7: Estimativa de horas necessárias para escavar uma vala mensal *versus* população, usando escavadeiras de vários tamanhos. Presume-se a geração de resíduos de 0,6kg/pessoa.dia e densidade de resíduos soltos de 200kg/m³.

Com base na força de cisalhamento do solo em solos coesivos - A profundidade máxima da trincheira baseada na resistência ao cisalhamento do solo deve ser inferior à profundidade crítica e razão entre a profundidade crítica e a profundidade da trincheira é o fator segurança. A equação da profundidade crítica, para trincheiras verticais abertas é definida como (Xanthakos, 1979):

$$H_c = \frac{4c[\tan(45 + \Phi / 2)] - 2q}{\gamma} \quad (1)$$

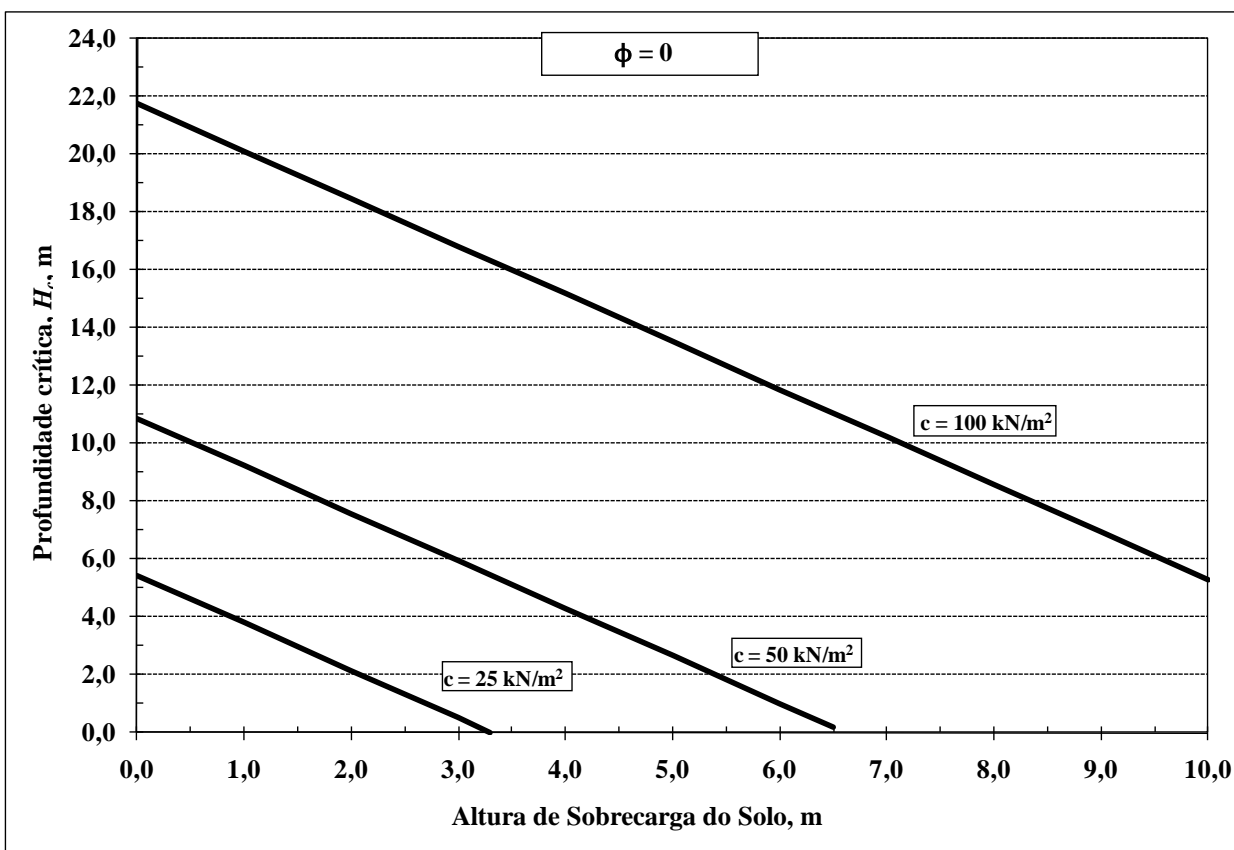
em que  $H_c$  é a profundidade crítica (m),  $c$  é a coesão (kN/m²),  $\Phi$  é o ângulo interno de atrito (graus),  $q$  é a sobrecarga na superfície do solo (kN/m²) e  $\gamma$  é o peso específico do solo (kN/m³). Trincheiras verticais só podem ser escavadas em solos coesivos. Na Figura 8, é apresentado um exemplo de  $H_c$  *versus* profundidade de sobrecarga do solo (ou seja, o solo escavado empilhados ao lado da trincheira) para solos argilosos com três valores diferentes de coesão (McCarthy, 2007) para  $\phi = 0^\circ$ . Conforme sugerido pela figura, trincheiras verticais com 4 a 5m de sobrecarga de solo escavado deverá ser facilmente exequível em solos argilosos firmes. Na Figura 2a, está apresentada uma trincheira vertical de 5m em paredes de solo areno-argiloso no aterro sanitário de Villanueva. Apesar da profundidade máxima da trincheira de Villanueva ter sido determinada por tentativa e erro, é preferível, quando os recursos permitirem, realizar estudos de teste de cisalhamento do solo para determinar a profundidade máxima, utilizando paredes verticais em qualquer local em potencial. Trincheira com paredes inclinadas pode ser usada para melhorar a estabilidade (Terzaghi e Peck, 1967), mas essas trincheiras

são mais difíceis de escavar e só devem ser usadas quando as condições do solo não permitirem as de paredes verticais.

#### Espaçamento entre trincheiras.

O espaçamento entre as trincheiras é um parâmetro importante de projeto para minimizar a área total necessária para o aterro, de acordo com a seguinte equação

$$A_{TTS} = n(w)(l) + (n-1)(b)(l) \quad (2)$$



**Figura 8: Profundidade crítica,  $H_c$ , das paredes verticais das trincheiras escavadas no solo versus altura adicional adjacente à parede da trincheira para três faixas de coesão. O ângulo de atrito,  $\Phi$ , é assumido como sendo  $0^\circ$ . Os valores de coesão são típicos de solos argilosos como relatado por McCarthy (2007).**

em que  $A_{TTS}$  é a área total do sistema de trincheiras para um determinado tempo ( $\text{m}^2$ ),  $n$  é o número de trincheiras cheias,  $w$  é a largura,  $l$  é o comprimento e  $b$  é a distância entre trincheiras (todos os parâmetros em m) (Oakley, 2005).

O valor mínimo de  $b$  depende não só do solo original, mas também das propriedades ao cisalhamento dos resíduos depositados na trincheira adjacente. Vários estudos têm demonstrado que a coesão e ângulo de atrito de resíduos sólidos em aterros sanitários são semelhantes aos de solos coesivos e que trincheiras estáveis foram escavadas em resíduos depositados, com paredes verticais superiores a 6m (Qian *et al.*, 2002). Como um exemplo, escavações estáveis com 5m de paredes verticais em resíduos em decomposição, que nunca foram compactados com máquinas, são rotineiramente deixadas a céu aberto para a disposição de resíduos hospitalares, sem quaisquer problemas de estabilidade em lixões em San Pedro Sula e Tegucigalpa, Honduras. No entanto, trincheiras adjacentes não devem ser escavadas, até que os resíduos depositados tenham tempo para ser estabilizados e desenvolver resistência mais forte ao cisalhamento. A sobrecarga de solo escavado em cima de uma trincheira cheia também pode aumentar a tensão de cisalhamento de resíduos pelo aumento das tensões normais sobre os resíduos (Qian *et al.*, 2002). A experiência de Villanueva mostrou que trincheiras

cheias devem ser mantidas, durante pelo menos seis meses, antes de uma trincheira adjacente ser escavada a uma distância de 1,5m. A escavação da trincheira e o planejamento de enchimento, portanto, requerem um uso alternado de locais pré-selecionados dentro do aterro, em vez de escavações contíguas e de enchimento (Figura 1).

*Projeto e operação de células diárias e trincheira.*

Uma vez que a profundidade da trincheira é definida, a largura deve ser determinada para acomodar caminhões de descarga na trincheira. A largura deve deixar espaço suficiente para a descarga dos caminhões e varia de 3 a 5 m, dependendo do tamanho dos caminhões (Figura 3a).

O comprimento e o volume da célula diária são estimados a partir do volume de resíduos a serem depositados e devem ser controlados durante a operação. As dimensões são calculadas da seguinte maneira:

$$l_d = \frac{V_d}{H \cdot w} \quad (3)$$

em que  $l_d$  é o comprimento da célula diária (m),  $V_d$  é o volume de resíduos depositados diariamente ( $m^3$ ),  $H$  é a profundidade da trincheira (m) e  $w$  é a largura da trincheira (m). O comprimento deve ser longo o suficiente para dois a três caminhões descarregarem ao mesmo tempo, mas curto o suficiente para que no final do dia, a célula é cheia até o topo da trincheira (Figura 3a, b). É tarefa do operador controlar o enchimento das trincheiras com células diárias (Figuras 1 e 6). Os objetivos são minimizar a área superfície total exposta diariamente, promover condições semiaeróbias para a biodegradação e aumentar a compactação inicial com a pressão de sobrecarga dos resíduos.

Depois que uma trincheira é preenchida com células diárias, é deixada por um período (por exemplo, 3 a 4 semanas) em que ocorre redução do volume da trincheira, através da biodegradação, compactação dos resíduos por sobrecarga e separação natural dos sólidos. Em Villanueva aproximadamente 30 a 40% do volume da trincheira é adquirida e, em seguida, a trincheira é recarregada e coberta (Figura 4a, b).

*Estimativa de produção de chorume com um método modificado de balanço hídrico.*

Pode-se esperar que cidades pequenas não tenham os recursos técnicos ou financeiros para estudos sofisticados de produção de chorume, usando programas de computador como o HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) ou Avaliação Hidrológica de Desempenho de Aterro, em português, desenvolvido pela EPA (Environmental Protection Agency) dos EUA (Qian *et al.*, 2002). Provavelmente essas cidades não terão recursos para monitoramento de chorume durante a operação e após o encerramento do aterro sanitário. Entretanto um método modificado de balanço hídrico, incorporando os dados publicados no programa CLIMWAT 2.0 baixado do site da Organização para a Alimentação e Agricultura das Nações Unidas (FAO, 2006), pode ser facilmente utilizado por engenheiros locais para a estimativa de produção de chorume. Um balanço hídrico simples é considerado como método aceitável na regulamentação brasileira para determinar se será necessária ou não uma gestão de chorume em um aterro sanitário (ABNT, 2010).

Usando uma modificação da equação do balanço hídrico apresentado originalmente por Fenn *et al.* (1975), a produção de chorume pode ser estimada pelas seguintes equações:

$$q_L = P - RO - \Delta S - A(ET_C) = I - \Delta S - A(ET_C) \quad (4)$$

$$I = P - RO; ET_C = K_C ET_0 \quad (5)$$

em que  $q_L$  é a percolação de águas pluviais através da cobertura do solo e nos resíduos enterrados,  $P$  é a precipitação,  $RO$  é o escoamento,  $I$  é a infiltração de água no solo ( $P-RO$ ),  $\Delta S$  é a mudança no armazenamento de umidade do solo e  $A(ET_C)$  é a evapotranspiração real da camada de cobertura do solo ao contrário da evapotranspiração potencial,  $ET_C$  (todos os parâmetros em mm/mês ou mm/ano). Na Eq. (5),  $ET_0$  é a evapotranspiração de referência para determinadas condições climáticas e  $K_C$  é o coeficiente de cultura, que é função da vegetação, tipo de solo, condições antecedentes de umidade do solo (Allen *et al.*, 1998). A

evapotranspiração potencial ( $ET_C$ ), calculada pela Eq. (5), é igual à evapotranspiração atual,  $A(ET_C)$ , apenas quando a umidade do solo é a capacidade de campo (Fenn *et al.*, 1975).

$RO$  é função do tipo de solo, intensidade de precipitação, cobertura vegetal e das condições antecedentes de umidade (Schwab *et al.*, 1981; SCS, 1972). Vários autores têm notado erros significativos na utilização de coeficientes de escoamento empíricos, como os desenvolvidos para uso na fórmula racional, em modelos de produção de chorume. Esses coeficientes superestimam  $RO$  porque foram desenvolvidos para alta intensidade, eventos de baixa frequência, como em 5 anos ou 10 anos de tempestades (Dass *et al.*, 1977; McBean *et al.*, 1995; Bagchi, 1994). Por esta razão, o método do Soil Conservation Service (SCS, 1972) deve ser usado para calcular  $RO$  para cada evento de precipitação em uma base mensal (Dass *et al.*, 1977). O método SCS leva em consideração a intensidade da precipitação, as condições antecedentes de umidade, tipo de solo e cobertura vegetal para cada evento de chuva.

Os resultados do balanço hídrico no aterro sanitário de Villanueva, usando as equações (4) e (5) e as metodologias de Fenn *et al.* (1977), SCS (1972) e Thornwaite e Mather (1957) são apresentados na Tabela 4. Assumiu-se que as trincheiras foram cobertas com pelo menos 0,5m do solo plantados com capim, como visto na Figura 5. A maioria das trincheiras cobertas tem uma cobertura de capim que cresce naturalmente e se espalha rapidamente no local. Os resultados mostram que o aterro sanitário de Villanueva não deve gerar volume significativo de chorume após as trincheiras serem cobertas (este tipo de análise não foi realizado no projeto original do aterro).



**Tabela 4: Balanço hídrico para o aterro sanitário de Villanueva, assumindo trincheiras cheias e cobertas com 0,5m de solo argiloso plantado com capim ( $K_C = 1,0$ )**  
**(Profundidade da raiz = 0,3m e retenção de água pelo solo = 100mm)**

Mês	$P^a$ mm	AMC <sup>b</sup>	$F_{RO}^c$	RO mm	$I = P - RO$ mm	$ET_0 = ET_C^a$ mm	$I - ET_C$ mm	$\Sigma \text{ NEG } (I - ET_C)$	ST mm	$\Delta ST$ mm	A ( $ET_C$ ) mm	$q_L$ mm
Janeiro	72,0	seco	0	0	72,0	98,4	-26,4	-189,4	14,0	-5,0	77,0	0
Fevereiro	59,6	seco	0	0	59,6	118,5	-58,9	-248,3	8,0	-6,0	65,6	0
Março	32,0	seco	0	0	32,0	147,6	-115,6	-363,9	2,0	-6,0	38,0	0
Abril	32,1	seco	0	0	32,1	154,8	-122,7	-486,6	1,0	-1,0	33,1	0
Maio	62,9	seco	0	0	62,9	156,9	-94,0	-580,6	1,0	0	62,9	0
Junho	142,4	médio	0,15	21,4	121,0	140,4	-19,4	-600,0	1,0	0	121,0	0
Julho	110,2	médio	0,15	16,5	93,7	135,6	-41,9	-641,9	1,0	0	93,7	0
Agosto	105,7	médio	0,15	15,9	89,8	134,1	-44,3	-686,1	1,0	0	89,8	0
Setembro	151,7	médio	0,15	22,8	128,9	128,4	0,5		1,5	0,5	128,4	0
Outubro	147,8	médio	0,15	22,2	125,6	116,7	8,9		10,4	8,9	116,7	0
Novembro	135,3	médio	0,15	20,3	115,0	109,8	5,2		15,6	5,2	109,8	0
Dezembro	121,7	médio	0,15	18,3	103,4	99,9	3,5	-163,0	19,0	3,5	99,9	0
<b>Total</b>	<b>1.173,4</b>			<b>137,2</b>	<b>1.036,2</b>	<b>1.541,1</b>	<b>-504,9</b>				<b>1.036,0</b>	<b>0</b>

<sup>a</sup> Dados de precipitação e evapotranspiração da estação meteorológica La Mesa, San Pedro Sula, Honduras, publicados no CLIMWAT 2.0 (FAO, 2006)

<sup>b</sup> Condições antecedentes de umidade do solo para solo argiloso (SCS, 1972): Seco – abaixo do limite de umidade; Médio – nível médio de umidade; Úmido – acima do limite de umidade

<sup>c</sup> Fração de escoamento calculado usando a metodologia do Soil Conservation Service (SCS, 1972). É assumido que o escoamento seja proveniente de um evento de chuva de 25mm; maiores quantidades de precipitação traria uma maior fração de escoamento (SCS, 1972). A maioria dos eventos de chuva durante todo o ano é menor que 25mm como determinado pelo resumo global dos dados de precipitação diária para a estação de La Mesa (National Climate Data Center; < <http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdoselect.cmd?datasetabbv=GSOD&countryabbv=&georegionabbv=> ).

Abrir trincheiras irá produzir chorume, no entanto, na Tabela 5, é mostrada a produção de chorume em uma trincheira aberta com uma área inferior a 300m<sup>2</sup> (5 m x 60 m). Foi assumido que 100% de precipitação produz chorume, ou seja,  $ET_0 = 0$  e os resíduos estão na sua capacidade de campo para retenção de água. Estima-se que duas trincheiras deixadas descobertas durante a operação, gerariam assim 700m<sup>3</sup>/ano de chorume. Essa quantidade, no entanto, atingiria apenas cerca de 60m<sup>3</sup>/ha.ano se toda área do aterro (11,4ha) fosse considerada. Apesar de não ser praticada em Villanueva, a produção de chorume, a partir de trincheiras abertas, pode ser muito reduzida ou eliminada com o uso de coberturas temporárias durante o enchimento da trincheira, tal como proposto pela Jaramillo (2002) e usado por Lange *et al.* (2002), em um aterro sanitário no Brasil, em que o telhado da trincheira era feito de materiais locais e poderia ser criado ou desmontado em 4 horas.

**Tabela 5: Balanço hídrico para uma trincheira aberta ( $A_T = 300\text{m}^2$ ) e  $ET_0 = 0$  ( $q_L = P$ ).**

Mês	$P = q_L$ mm	Chorume m <sup>3</sup> /trincheira	* Chorume <sup>a</sup> m <sup>3</sup> /ha
Janeiro	72,0	22	-
Fevereiro	59,6	18	-
Março	32,0	10	-
Abril	32,1	10	-
Maio	62,9	19	-
Junho	142,4	43	-
Julho	110,2	33	-
Agosto	105,7	32	-
Setembro	151,7	46	-
Outubro	147,8	44	-
Novembro	135,3	41	-
Dezembro	121,7	37	-
<b>Total</b>	<b>1.173,4</b>	<b>352</b>	<b>60</b>

\* Valor máximo de chorume previsto.

<sup>a</sup>Assumindo que duas trincheiras são sempre abertas e a área é a total do aterro sanitário = 11,4ha.

Lixões produzem quantidade significativa de chorume, além de escoamento contaminado. Na Tabela 6, são mostrados os resultados de um balanço hídrico para o local de Villanueva, caso fosse um lixão. Foi assumido que os resíduos se comportariam semelhante à palha, o que reduz ETC por 50%; solos nus também têm valores mais baixos para KC como relatado por Allen *et al.* (1998). Há uma maior fração de RO neste exemplo porque o solo permanece úmido durante todo o ano (SCS, 1972). Para as considerações utilizadas na Tabela 6, 3882m<sup>3</sup>/ha.ano de chorume (65 vezes maior do que 2 trincheiras abertas) e 5014m<sup>3</sup>/ha.ano do escoamento contaminado seriam gerados.

Com relação à qualidade das águas subterrâneas e superficiais, o aterro sanitário de Villanueva é, assim, uma melhoria dramática sobre o que existiria (um lixão), caso o município não tivesse tomado a iniciativa de desenvolver e operar seu próprio aterro. A ênfase excessiva dada à gestão do chorume por projetistas, órgãos regulamentadores e agências de financiamento pode impedir a consideração de soluções sustentáveis para as cidades pequenas, como esta.

*Geração de chorume em trincheiras abertas: efeitos de diluição nas águas subterrâneas.*

Estimativa da atenuação dos componentes não-conservadores e conservadores na zona não saturada, bem como a utilização de modelos de transporte de contaminantes, está além dos recursos de pequenas cidades. Modelos simples de análise, no entanto, podem ser usados para estimar os possíveis efeitos do chorume quando atinge águas subterrâneas (Bagchi, 1994; McBean *et al.*, 1995). Como exemplo, quando as taxas de produção de chorume e as velocidades de fluxo das águas subterrâneas são conhecidas ou podem ser razoavelmente estimadas, um modelo de mistura completa para a diluição pode ser usada para estimar as concentrações constituintes conservadores a jusante do aterro. O chorume é normalmente mais denso que a água doce por

causa das elevadas concentrações de sólidos totais dissolvidos (Christensen *et al.*, 1994) e, assim, a mistura com a profundidade é uma hipótese razoável quando os dados são escassos. No caso de um aterro por meio de trincheiras, como Villanueva, a equação a seguir poderá ser aplicada:

$$\frac{C_m}{C_0} = \frac{q_L w}{(3,5 \times 10^{10}) v_D h + q_L w} \quad (6)$$

em que  $C_m$  é a concentração de constituintes de mistura completa no aquífero e  $C_0$  é a concentração inicial de constituintes no chorume quando atinge águas subterrâneas (mg/L),  $q_L$  é a entrada de chorume nas águas subterrâneas (mm/ano),  $w$  é a largura da trincheira aberta (m),  $v_D$  é a velocidade de Darcy das águas subterrâneas (m/s),  $h$  é a profundidade de mistura do aquífero (m), e  $3,5 \times 10^{10}$  é o fator de conversão de m/s para mm/ano.

Na Eq. (6), é assumido que a direção da vazão de águas subterrâneas é perpendicular ao comprimento das trincheiras (no caso de Villanueva). Também foi assumido que a zona de mistura não é maior que o comprimento da trincheira aberta. Uma revisão da literatura de plumas de chorume em aterros sanitários na Europa e América do Norte mostrou que essas plumas geralmente não excedem a largura do aterro (Christensen *et al.*, 1994), assim esta deve ser uma hipótese realista quando não há dados para assumir o contrário.

**Tabela 6: Balanço hídrico para Villanueva, assumindo um lixão com resíduos não compactados e cobertura com solo argiloso\*.**

Mês	P mm	AMC <sup>a</sup>	$F_{RO}$ <sup>b</sup>	RO	$I = P - RO$ mm	$ET_C$ <sup>c</sup> mm	$I - ET_C$ mm	$AET_C$ mm	$q_L$ mm	Chorume m <sup>3</sup> /ha	Escoa- mento m <sup>3</sup> /ha
Janeiro	72,0	médio	0,17	12,2	59,8	9,8	49,9	9,8	49,9	499	122
Fevereiro	59,6	médio	0,17	10,1	49,5	11,9	37,6	11,9	37,6	376	101
Março	32,0	médio	0,17	5,4	26,6	14,8	11,8	14,8	11,8	118	54
Abril	32,1	médio	0,17	5,5	26,6	15,5	11,2	15,5	11,2	112	55
Mai	62,9	médio	0,17	10,7	52,2	15,7	36,5	15,7	36,5	365	107
Junho	142,4	úmido	0,5	71,2	71,2	35,1	36,1	35,1	36,1	361	712
Julho	110,2	úmido	0,5	55,1	55,1	33,9	21,2	33,9	21,2	212	551
Agosto	105,7	úmido	0,5	52,9	52,9	33,5	19,3	33,5	19,3	193	529
Setembro	151,7	úmido	0,5	75,9	75,9	32,1	43,8	32,1	43,8	438	759
Outubro	147,8	úmido	0,5	73,9	73,9	29,2	44,7	29,2	44,7	447	739
Novembro	135,3	úmido	0,5	67,7	67,7	27,5	40,2	27,5	40,2	402	677
Dezembro	121,7	úmido	0,5	60,9	60,9	25,0	35,9	25,0	35,9	359	609
<b>Total</b>	<b>1.173,4</b>			<b>501,4</b>	<b>672,0</b>	<b>283,8</b>	<b>388,2</b>	<b>283,8</b>	<b>388,2</b>	<b>3.882</b>	<b>5.014</b>

\*A fonte de dados e a metodologia são os mesmos da Tabela 4.

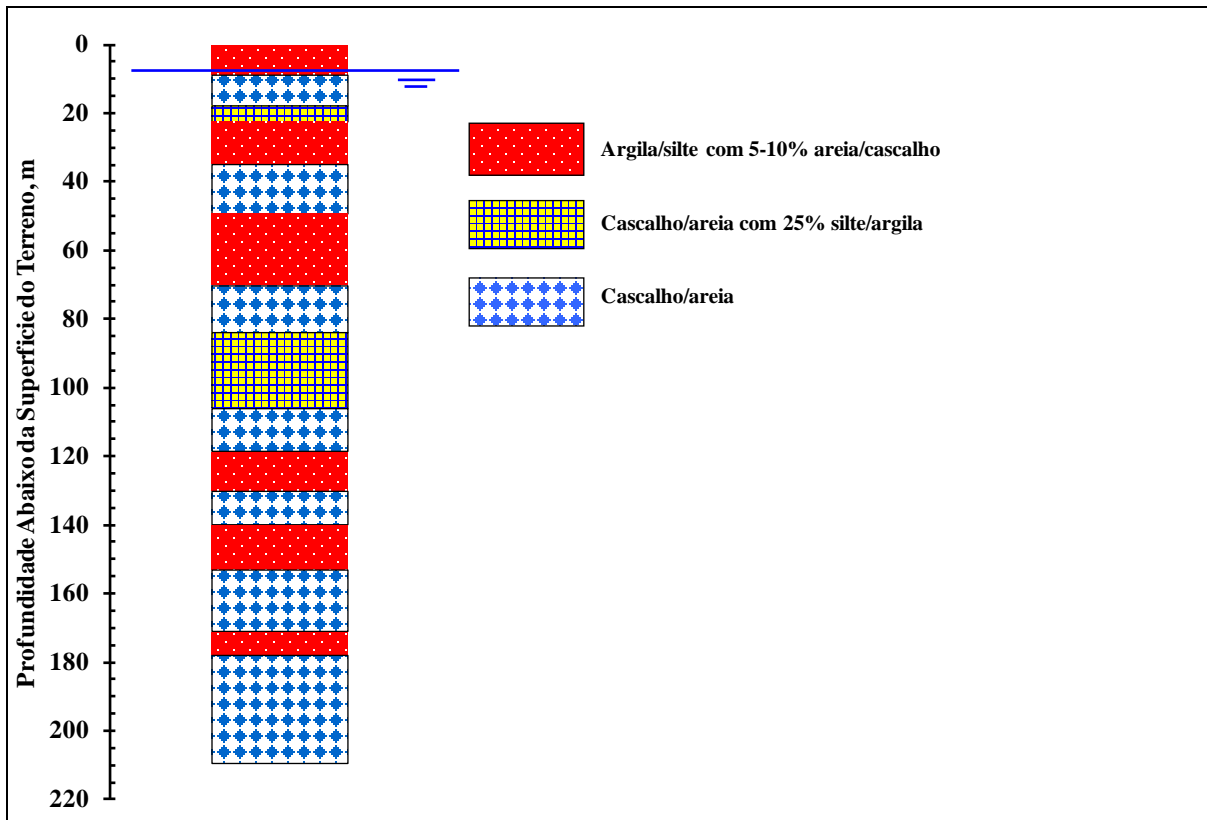
<sup>a</sup> Condições antecedentes de umidade do solo para solo argiloso assumidas como a média da estação seca (Janeiro a Maio) e da estação úmida (Junho a Dezembro).

<sup>b</sup> Fração do escoamento estimado assumindo que os resíduos cobrem o solo nu têm um efeito atenuante na vegetação de mesma forma que diminui o escoamento (SCS, 1972).

<sup>c</sup>  $ET_C = 0,5 K_C ET_0$ . Foi assumido que  $K_C = 0,2$  para AMC médio e 0,5 para AMC úmido, e que  $ET_C$  é reduzido em 50% como resultado dos resíduos cobrindo o solo nu, tendo efeito similar para palha (Allen *et al.*, 1998).

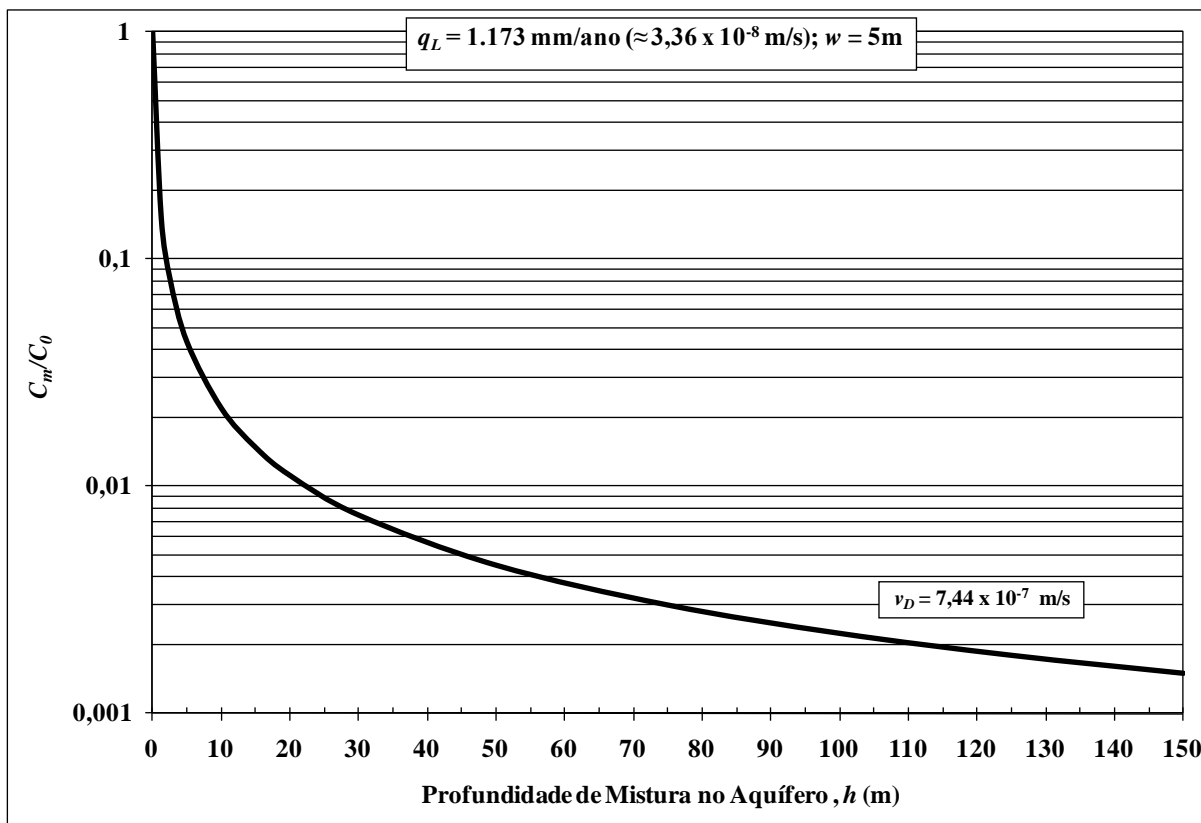
Além de uma estimativa de  $q_L$  pelo método do balanço hídrico, a permeabilidade hidráulica e o gradiente devem ser conhecidos ou estimados para o cálculo da velocidade de Darcy,  $v_D$ . Quando o aterro sanitário de Villanueva foi concebido em 1994, não havia dados para estimar  $v_D$  (embora fosse conhecido que o fluxo das águas subterrâneas descarregava no Rio Ulua). Em 2002, como parte de um projeto de avaliação de recursos hídricos subterrâneos, poços de sondagem exploratórios e poços foram construídos no vale aluvial próximo ao aterro, Figura 1 (Brown e Caldwell, 2002). A estratigrafia do poço de sondagem mais próximo ao aterro geralmente mostrou que alternância entre grão fino e de textura granulada de depósitos aluviais de 9 a 18m de espessura foi encontrada desde a superfície até a profundidade total do poço, Figura 9 (Brown e Caldwell, 2002). A permeabilidade foi medida ao longo do vale aluvial (Aluvião do Rio Ulua) até o ponto de descarga no

Rio Ulua. O valor dos depósitos de granulometria grossa foi estimado em 15m/dia e os depósitos de granulometria fina em 1 a 5m/dia (Brown e Caldwell, 2002). O gradiente hidráulico do aterro até o Rio Ulua é estimado em 0,0043, usando dados do modelo de águas subterrâneas, desenvolvido por Brown e Caldwell (2002). Com esses dados foi possível calcular o  $v_D$  e usar a Eq. (6) para desenhar a curva da diluição ( $C_m/C_0$ ), como uma função da profundidade de mistura ( $h$ ), Figura 10.



**Figura 9: Estratigrafia de poço perto do aterro. Desenho adaptado a partir de dados fornecidos por Brown e Caldwell (2002).**





**Figura 10:** Fator de diluição,  $C_m/C_0$ , versus profundidade de mistura do aquífero,  $h$ , para o chorume gerado por uma trincheira aberta com uma largura de 5m. A velocidade de Darcy foi calculada usando uma permeabilidade média de 15m/dia para o aquífero aluvial e um gradiente hidráulico de 0,0043, estimado a partir dos dados fornecidos por Brown e Caldwell (2002).

O poço de sondagem (Figura 9) mostra que o aquífero é composto de aproximadamente 15m de depósitos de cascalho/areia antes de um depósito de 10m de argila ser atingido. A profundidade de mistura provavelmente seria de 15m, no máximo, por causa da baixa permeabilidade do depósito de argila. De acordo com a Figura 10, uma profundidade de mistura de 15m produz uma diluição da ordem de 0,01. Esse valor estimado está de acordo com a diluição relatada de plumas de chorume na ordem de 0,01 para aterros na Europa e América do Norte, onde os aquíferos são compostos principalmente por depósitos de areia e cascalho (Christensen *et al.*, 1994). Nota-se que os exames bioquímicos e/ou atenuação físico-químico e dispersão também ocorrerão no aquífero e vão baixar ainda mais as concentrações de contaminantes. A hipótese de mistura completa, portanto, produz estimativas conservadoras das concentrações.

Estes resultados sugerem que o chorume das trincheiras abertas, em Villanueva será diluído para cerca de 1% de sua concentração original, quando atinge e se mistura ao aquífero. Se o depósito de cascalho/brita for mais profundo ou se a velocidade de Darcy for maior devido a um acentuado gradiente hidráulico (por exemplo, Harter (2003) relata velocidades de Darcy de  $10^{-6}$  a  $10^{-4}$  m/s na areia/cascalho em aquíferos na Califórnia), a diluição poderia facilmente ser muito maior. Finalmente, todos os constituintes do chorume, independentemente da sua concentração, não irão se acumular no aquífero, pois atingem o Rio Ulua a 2 km ao sul do aterro. Como a produção de chorume no aterro diminui ao longo do tempo, as concentrações dos constituintes do chorume no aquífero também vão diminuir. O Ulua tem uma vazão média de  $370\text{m}^3/\text{s}$  (Thattai *et al.*, 2003), ou 32 milhões de  $\text{m}^3/\text{dia}$ , portanto, para quaisquer contaminantes do chorume que atingirem, o rio os diluiria a níveis insignificantes.

#### Valorização do solo excedente.

O método semimecanizado de trincheira produz quantidades significativas de solo excedente. Durante um período de 15 anos em Villanueva, estima-se que o volume de terra excedente produzido foi de 80% do volume dos resíduos enterrados (Tabela 2). Este solo excedente tem potencial para ser valorizado para uso local ou

externo, o que minimiza os custos de operação e promove a sustentabilidade para os municípios. Nenhum outro método de aterro sanitário tem este benefício potencial.

## CONCLUSÕES

O uso de lixões é a prática mais comum para a disposição de resíduos sólidos urbanos nas regiões em desenvolvimento da América Latina. Embora a concepção e a operação do aterro sanitário tenham tradicionalmente sido focadas em grandes cidades, cidades com menos de 50.000 habitantes podem corresponder de 19 a 45% da população total dos países na América Latina. Essas pequenas cidades são notadamente carentes em termos de apoio do governo para a disposição de resíduos e não podem dar-se ao luxo de operar um aterro sanitário na forma como é proposta para as grandes cidades, onde equipamentos pesados são usados para espalhar e compactar os resíduos em células diárias e, em seguida, escavar, transportar e aplicar cobertura diária, coletar e tratar o chorume. Este trabalho apresenta uma abordagem alternativa que está provada e é sustentável para pequenas cidades.

O método de aterro sanitário semimecanizado, desenvolvido em Villanueva, Honduras, foi explorado durante 15 anos, com uma área total de cerca de 11 hectares para uma população que cresceu de 23.000 para 48.000 habitantes, resultando em um requerimento de área de  $0,2\text{m}^2/\text{pessoa.ano}$ . O aterro sanitário exige uma relação cobertura/resíduos de 0,2 e produziu um excedente de  $298.101\text{m}^3$  de solo que é armazenado e disponibilizado para valorização. O aterro foi operado exclusivamente pelo município com um custo operacional em 2010, estimado em US\$4,60 por tonelada.

Projeto de engenharia e critérios de operação, baseados na experiência Villanueva, podem ser usados para projetar aterros de pequenas cidades. Critérios principais incluem: condições hidrogeológicas e características do solo para a seleção do local; seleção da escavadeira; profundidade máxima da trincheira baseada em escavadeiras ou resistência ao cisalhamento do solo; espaçamento de valas; funcionamento da célula diária; estimativa de geração de chorume utilizando o método do balanço hídrico e estimativa dos efeitos de diluição do chorume atingindo as águas subterrâneas.

No caso de Villanueva, os resultados do balanço hídrico mostram a produção insignificante de chorume em trincheiras cobertas e  $700\text{m}^3/\text{ano}$  ( $60\text{m}^3/\text{ha.ano}$ ) em duas trincheiras abertas necessárias para a operação diária. Se o local fosse um lixão, a produção de chorume estimada seria de  $3.882\text{m}^3/\text{ha.ano}$  e o escoamento contaminado de  $5.014\text{m}^3/\text{ha.ano}$ . O aterro sanitário por meio de trincheiras semimecanizado é, portanto, uma melhoria significativa sobre um lixão.

Um modelo simples para estimar a diluição do chorume gerado ( $700\text{m}^3/\text{ano}$ ), com base em dados de fluxo das águas subterrâneas do aquífero e estratigrafia em Villanueva, sugere que o chorume será diluído por um fator de 0,01 no aquífero. Contaminantes do chorume, no entanto, não irão se acumular porque as descargas do aquífero no Rio Ulua se situam a 2 km ao sul do aterro. Como a produção de chorume diminui ao longo do tempo, os constituintes do chorume no aquífero também irão diminuir. O local de Villanueva serve, portanto, como um exemplo ideal de um aterro sanitário de cidade de pequeno porte com a atenuação natural de chorume e que pode ser explorado de forma sustentável, com efeitos mínimos sobre as águas subterrâneas.

Assim o método semimecanizado de trincheira, desenvolvido em Villanueva, atende as recomendações da NBR15.849/2010 para disposição adequada de resíduos sólidos em cidades brasileiras de pequeno porte.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. NBR 15849 Resíduos sólidos urbanos - Aterros sanitários de pequeno porte - Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2010.
2. ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. Crop Evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.
3. BAGCHI, A. Design, Construction and Monitoring of Landfills. 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Sons, New York, 1994.

4. BROWN and CALDWELL. Groundwater Resources Monitoring Report and Management Plan, Villanueva, Republic of Honduras, C. A. Prepared for US Agency for International Development, Tegucigalpa, Honduras. Contract No. 522-C-00-01-00287-00. 2002  
<[http://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PNACU594.pdf](http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNACU594.pdf)>
5. CATERPILLAR INC. Caterpillar Performance Handbook. Edition 34, Peoria, Illinois, 2003.
6. CHRISTENSEN, T. H., KJELDSEN, P., ALBRECHTSEN, H., HERON, G., NIELSEN, P. H., BJERG, P. L., HOLM, P. E. Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 24(2), 119-202, 1994.
7. DASS, P., TAMKE, G. B., STOFFEL, C. M. Leachate production at sanitary landfill sites. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 103, 981-988, 1977.
8. FAO. CLIMWAT 2.0 for CROPWAT. Water Resources, Development and Management Service and the Environment and Natural Resources Service, FAO, Rome, 2006.  
[www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_climwat.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html)
9. FENN, D. G., HANLEY, K. J., DEGEARE, T. V. Use of the Water Balance Method for Predicting Leachate Generation from Solid Wastes Sites. EPA/530/SW-168, Office of Solid Waste Management Programs, US EPA, 1975.
10. HARTER, T. Basic Concepts of Groundwater Hydrology. ANR Publication 8083, Div. of Agriculture and Natural Resources, University of California, 2003.
11. JARAMILLO, J. Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, OPS/CEPIS (Organización Panamericana de Salud/Centro Panamericana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente), Publicación 02.93, 2002.
12. LANGE, L. C., SIMÕES, G. F., FANTONI, C., FERREIRA, A., SILVA, F. V. B. Implantação e operação de um aterro sustentável para pequena comunidade, in: Borges de Castilhos Junior, A., Lange, L. C., Paulo, L., Pessin, N. (Organizadores), Alternativas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos para Pequenas Comunidades (coletânea de trabalhos técnicos), Projeto PROSAB, ABES, p. 29-35, Rio de Janeiro, 2002.
13. McBEAN, E. A., ROVERS, F. A., FARQUHAR, G. J. Solid Waste Landfill Engineering and Design. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
14. MCCARTHY, D. F. Essentials of Soil Mechanics and Foundations. 7<sup>th</sup> Edition, Pearson, Upper Saddle River, New Jersey, 2007.
15. OAKLEY, S. M. Manual de Diseño y Operación de Rellenos Sanitarios en Honduras. USAID-Honduras/Red Regional de Agua y Saneamiento para Centro América/Fondo Hondureño de Inversión Social, Tegucigalpa, Honduras, 2005.
16. QIAN, X., KOERNER, R. M., GRAY, D. H. Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.
17. SCHWAB, G. O., FREVERT, R. K., EDMISTER, T. W., BARNES, K. K. Soil and Water Conservation Engineering. 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley & Sons, New York, 1981.
18. SCS (Soil Conservation Service). National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. US Department of Agriculture, Washington, DC, 1972.
19. TERZAGHI, K., PECK, R. B. Soil Mechanics in Engineering Practice. 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley & Sons, New York, 1967.
20. THATTAI, D., KJERFVE, B., HEYMAN, W. D. Hydrometeorology and variability of water discharge and sediment load in the inner Gulf of Honduras, Western Caribbean. Journal of Hydrometeorology, Vol. 4, 985-995, 2003.
21. THORNWAITE, C. W., MATHER, J. R. Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance. Publications in Climatology, Vol. 8, No. 1, Laboratory of Climatology, Drexel Institute of Technology, 1957.
22. UN-HABITAT (United Nations Human Settlements Programme) Meeting Development Goals in Small Urban Centres: Water and Sanitation in the World's Cities. Earthscan, London, England, 2006.
23. UNEP (United Nations Environment Program) and CalRecovery. Solid Waste Management. Volume II: Regional Overviews and Information Sources. International Environmental Technology Centre, UNEP, Osaka, Japan, 2005.
24. XANTHAKOS, P. Slurry Walls. McGraw-Hill, New York, 1979.