

II-033 - REMOÇÃO DE LODOS DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO PRIMÁRIAS: UM PROBLEMA NA SUSTENTABILIDADE PARA CIDADES E MUNICÍPIOS POBRES

Stewart M. Oakley⁽¹⁾

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⁽¹⁾: 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

RESUMO

Lagoas de estabilização com valorização de efluentes para reúso têm sido consideradas uma opção de tratamento adequado e sustentável de esgotos para os municípios pobres com recursos escassos. O acúmulo de lodo nas lagoas primárias também é uma questão de sustentabilidade, pois o lodo das lagoas deve ser removido a cada 2 a 15 anos, dependendo do tipo de lagoa. No entanto, só é dada atenção superficial ao planejamento de remoção de lodo, nos manuais de literatura e de projeto de lagoas. A maioria dos sistemas de lagoas na América Latina foi concebida sem um plano de remoção de lodo e sem o custo amortizado desta remoção incluídos no orçamento anual de operação e manutenção. Muitas destas lagoas têm profundidade de acúmulo de lodo superior a 1,00m, que dificultará e encarecerá a remoção deste lodo, contribuindo para o risco das lagoas serem abandonadas. Para que as lagoas sejam sustentáveis, a remoção de lodo deverá ser integrada ao projeto e à operação. Este trabalho apresenta um método para a remoção de lodo seco de lagoas primárias que pode ser utilizado pelos municípios pobres. Neste método, a secagem do lodo é realizada pelas plantas enraizadas no lodo: o lodo seca pela evapotranspiração das plantas e pela drenagem através de seu sistema radicular. O lodo é removido com uma escavadeira que pode manobrar facilmente em lodos sólidos e semissólidos dentro da lagoa. O método foi testado na remoção de lodos de uma lagoa primária em Tela, Honduras. A profundidade de lodo na lagoa primária foi reduzida de 4 para 1 m com o uso da planta *Ludwigia octovalvis* e, desta forma, foi obtido lodo seco a um teor de sólidos totais de 18% (TS = 18%). Os dados mostram que tanto a evapotranspiração como a drenagem contribuíram para a secagem do lodo, apesar desta secagem ter sido iniciada no início da estação chuvosa. Uma escavadeira entrou na lagoa após 60 dias de secagem e foi capaz de remover 3.100m³ de lodo em 9 dias não contínuos com a ajuda de uma pá carregadeira. O custo total foi de US\$13.716 ou US\$ 4,47/m³ de lodo removido, que foi pago com recursos do município. Com base nos dados de Tela, foram feitas considerações de projeto que incluem o papel da evapotranspiração das plantas e de drenagem através do sistema radicular das mesmas, disposição no local para a inativação dos helmintos e financiamento municipal através das taxas de coleta de esgoto. O método apresentado neste artigo foi comprovado ser sustentável e de baixo custo, e foi pago pelo município, sem ajuda externa, e serve como um modelo para as operações de remoção de lodos de lagoas de estabilização em municípios e cidades pobres.

PALAVRAS-CHAVE: Lagoas de estabilização, sustentabilidade, remoção de lodo, esgoto.

INTRODUÇÃO

Lagoas de estabilização têm sido consideradas uma opção de tratamento adequado de esgotos para regiões em desenvolvimento em todo o mundo. Além de ser uma tecnologia de tratamento simples e de baixo custo, os efluentes da lagoa também podem ser valorizados para reúso na agricultura e na aquicultura, de acordo com as recomendações da Organização Mundial de Saúde (OMS). Essa valorização do efluente pode ser um componente primordial para a sustentabilidade operacional a longo prazo em municípios com escassos recursos.

O acúmulo de lodo nas lagoas primárias também é uma questão crítica para a sustentabilidade operacional a longo prazo, sabendo que, em climas tropicais e subtropicais, deve-se remover o lodo de lagoas anaeróbias a cada 2 a 5 anos e, de lagoas facultativas a cada 5 a 15 anos. Quando mencionado na literatura (Mara, 2003; Shilton, 2005), o detalhamento do processo de remoção de lodo de lagoas primárias, como parte integrante do projeto global de tratamento, é apresentado superficialmente, com exceção do texto de Gonçalves (1999). Como resultado, nas regiões em desenvolvimento, muitos sistemas de lagoas de estabilização têm sido concebidos sem planejamento de remoção de lodo e sem o custo amortizado desta remoção, incluídos no orçamento anual de operação e manutenção. Algumas destas lagoas têm profundidade de acúmulo de lodo superior a 1,00m, que dificultará e encarecerá a remoção deste lodo. Se os atuais e futuros sistemas de lagoas forem sustentáveis a longo prazo, é imperativo que a remoção de lodo seja integrada ao projeto e ao orçamento operacional o mais rapidamente possível.

Gonçalves (1999) divide os métodos de remoção de lodo de lagoas em duas categorias gerais: i) remoção por via úmida, em que a lagoa é mantida em operação e o lodo é bombeado ou dragado para caminhões ou leitos de secagem; e ii) remoção a seco, em que a lagoa é retirada de operação e drenada, e o lodo seco é retirado manualmente ou com equipamentos pesados. Carré *et al.* (1990) e Picot *et al.* (2005), em dois estudos de caso na França, apresentaram resultados detalhados de remoção de lodo úmido de lagoas de estabilização. A tecnologia utilizada nesses estudos de caso (bombas de lodo, caminhões a vácuo, centrífugas para desidratação), no entanto, geralmente não está disponível para regiões em desenvolvimento e o custo final da remoção de lodo com sólidos totais de 10% variou de US\$ 13 para US\$ 114 por m³ (dólares de 2009): um custo insustentável para cidades ou municípios pobres. Infelizmente, há poucos dados publicados na literatura de projeto e de custo de remoção de lodo seco das lagoas em regiões em desenvolvimento.

Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- 1) Apresentar um método para a remoção de lodo de lagoas de estabilização primárias, que pode ser utilizado por municípios pobres. Neste método, a secagem de lodo é efetuada através da evapotranspiração de plantas enraizadas no lodo e sua remoção é realizada com uma escavadeira hidráulica que entra na lagoa.
- 2) Apresentar dados de custo de um estudo de caso em Tela, Honduras.

METODOLOGIA

Considerações Teóricas

O lodo normalmente forma uma crosta superficial nas lagoas primárias, com aproximadamente 0,15m de espessura durante a secagem, que restringe ainda mais as perdas de água por evaporação (US EPA, 1987). Para os sistemas que não têm um plano de remoção de lodo, a tendência será não secar a lagoa, a menos que o lodo seja retirado mecanicamente, o que é muito difícil de se realizar caso a camada de lodo seja superior a 1,00m, pois equipamentos pesados não conseguem se locomover facilmente dentro da lagoa. Este problema pode ser superado se houver plantas se enraizando dentro do lodo antes da formação da crosta. Neste caso, as perdas de água por evaporação irão ocorrer até a profundidade das raízes das plantas.

Depois de uma lagoa primária ter sido drenada para remoção do lodo, o tempo necessário para secar antes de sua remoção por equipamentos pode ser estimado a partir da seguinte equação adaptada de US EPA (1987),

$$t_d = \frac{h_o \cdot \left(1 - \frac{TS_o}{TS_f}\right) (1 - D_s)}{K_C \cdot (ET_0 - I)_n} \quad (1)$$

em que t_d é o tempo de secagem (dias), h_o é a profundidade inicial do lodo (m), TS_o é a percentagem inicial de sólidos totais no lodo, TS_f é a percentagem final de sólidos totais no lodo, D_s é a fração decimal de drenagem de água do lodo, K_C é o coeficiente de evapotranspiração para o tipo de superfície do lodo (ex., com ou sem vegetação), ET_0 é a evapotranspiração de referência para determinadas condições climáticas, e I é a infiltração

de água de chuva no lodo. O termo $(ET_0 - I)_n$ é a evapotranspiração de referência mínima líquida para n dias secos contínuos, utilizada no projeto (m/dia).

A infiltração, I , é definida por

$$I = (P - RO)(1 - D_I) \quad (2)$$

em que I é a infiltração, P é a precipitação, RO é o escoamento superficial do lodo (todos em mm/dia ou m/dia), e D_I é a fração decimal de infiltração de água que não é absorvida ou drenada do lodo.

As Equações 1 e 2 diferem de equações de projeto utilizadas para secagem de lodo em leitos de secagem (US EPA, 1987) e em lagoas primárias (Gonçalves, 1999). O escoamento superficial do lodo, que não ocorre em leitos de secagem, vai ocorrer em uma lagoa primária como resultado do acúmulo exagerado do lodo, principalmente na entrada da lagoa, mas também em áreas onde existem zonas mortas (Gonçalves, 1999). Devido a esse acúmulo de lodo, as camadas superiores do lodo úmido também serão drenadas em alguns dias (D_S) após a lagoa ser esvaziada. Finalmente, uma vez que o lodo secou além do limite plástico e se tornou um sólido, o mesmo não irá reidratar quando molhado (Dillard, 1981). Assim as camadas de lodo seco não irão absorver toda a água escoada e drenarão uma fração desta água (D_I), um fenômeno que normalmente ocorre em leitos de secagem (Arceivala, 1998). Plantas enraizadas no lodo também formam caminhos para a infiltração de água a ser drenada, o que levou ao desenvolvimento dos leitos com plantas aquáticas para secagem de lodo (Metcalf & Eddy, 2003).

Valores diários e mensais de ET_0 e P podem ser obtidos a partir dos valores publicados de evapotranspiração e da precipitação em um determinado local, como os disponíveis em CLIMWAT 2.0 (FAO, 2006). O coeficiente de evapotranspiração, K_C , que pode variar de 0,6 para uma superfície de lodo sem vegetação (US EPA, 1987) para 1,2 para algumas plantas enraizadas no lodo, também pode ser encontrado em materiais publicados (Allen *et al.*, 1998). RO da superfície de lodo de uma lagoa, uma vez tenha sido drenada, deve ser estimado utilizando o Soil Conservation Service (SCS), método que leva em consideração as condições de umidade antecedente, a intensidade de precipitação e cobertura vegetal para cada evento de chuva (SCS, 1972).

Como exemplo, na Tabela 1 são mostrados a evapotranspiração, precipitação e dados de escoamento superficial para Tela, que fica situada na costa norte tropical de Honduras. Nesta tabela, assume-se que o lodo é coberto por uma vegetação de gramíneas ($K_C = 1$) e que a fração de RO é de 0,45 usando o método SCS (SCS, 1972). Como visto na tabela, os meses de Março, Abril, Maio e Junho têm evapotranspiração líquida significativa e este deve ser o período de projeto usado para a secagem. Fevereiro seria utilizado para a drenagem da lagoa e preparação inicial do local como o plantio de uma cobertura vegetal.

Tabela 1: Dados de Evapotranspiração Líquida para Tela, Honduras

Mês	ET_0^a mm/dia	P^a mm/dia	RO^b mm/dia	$I = P - RO$ mm/dia	$ET_0 - I$ mm/dia	$ET_0 - I$ m/dia
Janeiro	2,9	8,35	3,76	4,60	-1,70	-0,00170
Fevereiro	3,49	7,39	3,33	4,07	-0,58	-0,00058
Março	4,08	3,74	1,68	2,06	2,02	0,00202
Abril	4,19	2,77	1,25	1,52	2,67	0,00267
Maio	4,08	2,61	1,18	1,44	2,64	0,00264
Junho	3,71	4,90	2,21	2,70	1,02	0,00102
Julho	3,81	6,55	2,95	3,60	0,21	0,00021
Agosto	3,72	7,42	3,34	4,08	-0,36	-0,00036
Setembro	3,63	7,73	3,48	4,25	-0,62	-0,00062
Outubro	3,29	13,16	5,92	7,24	-3,95	-0,00395
Novembro	3,29	12,93	5,82	7,11	-3,82	-0,00382
Dezembro	2,98	13,29	5,98	7,31	-4,33	-0,00433

^a Dados da estação meteorológica de Tela, Honduras, publicados no CLIMWAT 2.0 (FAO, 2006).

^b 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 Tela (National Climate Data Center; www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdoselect.cmd?datasetabbv=GSOD&countryabbv=&georegionabbv= >).

Devido ao termo $K_C \cdot (ET_0 - I)_n$ variar de mês a mês, é conveniente reorganizar a Equação 1 em uma base mensal para a seguinte forma:

$$h_{mi} = \frac{t_{di} \cdot K_C \cdot (ET_0 - I)_{mi}}{\left(1 - \frac{TS_o}{TS_f}\right)(1 - D_s)} \quad (3)$$

em que h_{mi} é a profundidade total que o lodo é seco a partir de TS_o a TS_f durante o mês i , t_{di} é o número de dias do mês i , e $(ET_0 - I)_{mi}$ é a evapotranspiração líquida diária durante o mês i . A profundidade total de lodo, h_T , que é secado de TS_o para TS_f durante o período de secagem é então a soma de cada mês individual, no qual ocorre a secagem:

$$h_T = \sum_i h_{mi} \quad (4)$$

Na Figura 1, está plotada a Equação 3 com a utilização dos dados de Tela, apresentados na Tabela 1 para a secagem de $TS_o = 12\%$ a $TS_f = 18\%$. Estudos anteriores tinham mostrado que o TS_o inicial era de 12% e que o lodo mudaria para um sólido com teor de sólidos totais de aproximadamente 18%, que poderia ser removido com escavadeiras. Nesta Figura, assume-se que plantas enraizadas como as espécies de *Ludwigia* crescem na superfície do lodo e o desidratam através da evapotranspiração com $K_C = 1,10$, um valor típico de plantas aquáticas usadas em wetlands (Allen *et al.*, 1998). A profundidade de secagem é, portanto, equivalente à profundidade do sistema radicular das plantas. Supõe-se também que as camadas superiores do lodo seriam drenadas nos primeiros sete dias com $D_s = 0,5$, que é um valor típico para lodos anaeróbios bem digeridos (Arceivala, 1998), e que não há drenagem de água de infiltração ($D_I = 0$). Os efeitos da secagem sobre uma superfície de lodo sem vegetação são mostrados para comparação.

Na Figura 1, é mostrado que teoricamente é possível secar o lodo de lagoas a um sólido ($TS_f \approx 18\%$) em uma profundidade de aproximadamente 0,9m, usando a evapotranspiração de plantas. Entretanto lodos sem vegetação apenas secariam a uma profundidade de 0,2 a 0,3m e permaneceriam a ser lodo líquido ou semissólido abaixo desta profundidade. Isto torna extremamente difícil a remoção do lodo mecanicamente, especialmente se a profundidade do lodo for maior que 1,0m. Gonçalves (1999) constatou casos em que a maquinaria pesada ficou presa em lagoas no Brasil, na tentativa de se locomover no lodo profundo que não foi secado até se tornar sólido. A não ser que um método sustentável seja desenvolvido para remoção de lodo de lagoas primárias, muitos dos sistemas de lagoas construídos em toda a América Latina, nos últimos 15 anos, podem ser abandonados, por se encherem com lodo em profundidades muito elevadas, dificultando bastante sua remoção.

Após a secagem através da evapotranspiração, a profundidade final do lodo (equivalente à profundidade do sistema radicular) e o volume final podem ser estimados pelas seguintes equações (US EPA, 1987):

$$h_f = h_o \cdot \left(\frac{TS_o}{TS_f}\right) \quad (5)$$

$$\frac{V_f}{V_o} = \frac{TS_o}{TS_f} \quad (6)$$

em que h_f é a profundidade final do lodo (m), h_o é a profundidade inicial do lodo (m) e V_f e V_o são os volumes final e inicial do lodo (m^3). Nas Equações 5 e 6, é assumido que a mudança em profundidade e volume se deve principalmente à perda de água, que é verdadeiro, desde que o lodo seja líquido ou semissólido. Uma alteração de 12 a 18% de TS, como mostrado na Figura 1, por exemplo, produziria uma redução de volume de 33%, com uma profundidade final igual a $0,67h_o$.

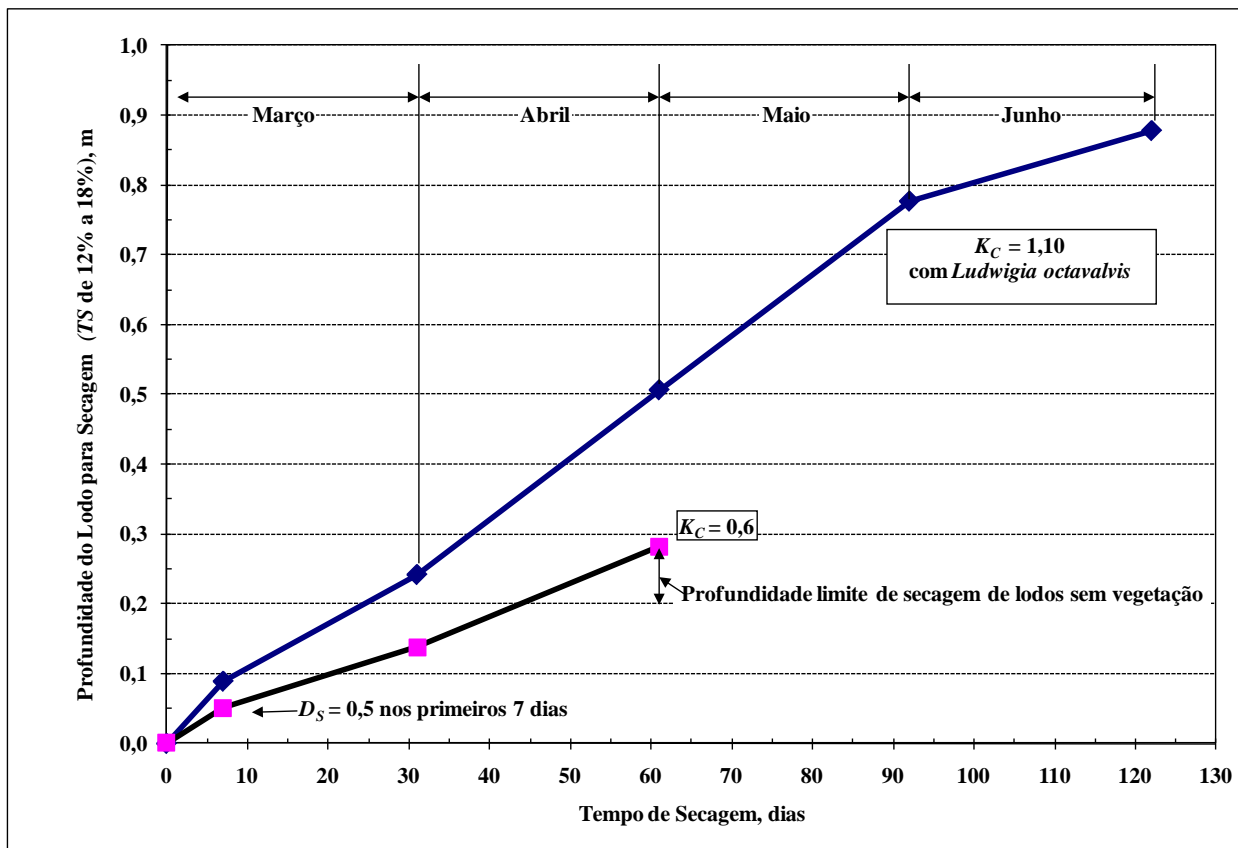


Figura 1: Profundidade de lodo seco com TS de 12% a 18% versus tempo de secagem para a lagoa de estabilização primária em Tela, Honduras. Assume-se que o lodo é drenado em sete dias após o esvaziamento da lagoa e que as plantas crescem na superfície de lodo com um $K_C = 1,10$. Uma superfície de lodo sem crescimento de plantas ($K_C = 0,6$) é mostrado para comparação.

Plano para Remoção de Lodo de Tela, Honduras

A metodologia acima foi usada para planejar a remoção de lodo da lagoa primária em Tela, Honduras. O sistema de tratamento de Tela consiste em 3 lagoas em série: uma lagoa anaeróbia com profundidade de 4m, uma lagoa facultativa secundária e uma lagoa de maturação (Figura 2). Estudos de monitoramento mostraram que a lagoa primária (lagoa anaeróbia) sempre foi operada como uma lagoa facultativa por causa da baixa taxa de carga orgânica (Oakley, 2005). Em 2003, um estudo batimétrico da lagoa primária mostrou que a profundidade de lodo era de 1,5m na entrada, reduzindo para 0,5m no ponto médio da lagoa (Figura 2). Estimou-se que o lodo ocupava um volume de $2.336m^3$ ($TS_o = 12\%$) de um volume total de $7.026m^3$, ou seja, 33,2% do volume líquido da lagoa.

No início de 2007, quando a lagoa estava em funcionamento contínuo por 15 anos, o lodo começou a surgir na superfície da entrada da lagoa, como mostrado na Figura 3. Foi estimado que o volume de lodo era de $3.500m^3$ e ocupava 50% do volume da lagoa. Neste momento, o município, em um esforço para evitar a perda do sistema, decidiu remover o lodo da lagoa, contratando uma empresa privada, pois o município não tem equipamento ou pessoal necessário para realizar esse trabalho por conta própria: uma situação comum em muitos municípios pequenos na América Latina. A Universidade do Estado da Califórnia – Chico prestou assistência técnica para o plano de remoção de lodo, que foi desenvolvido nas seguintes etapas: i) construir um canal de *bypass*; ii) drenar a lagoa primária durante o mês de fevereiro, iii) permitir a secagem do lodo durante os meses de março a junho, seguindo a metodologia e o cronograma de tempo acima referidos, e iv) remoção do lodo seco com uma escavadeira em um período mais curto possível e reenchimento da lagoa para reiniciar a operação.

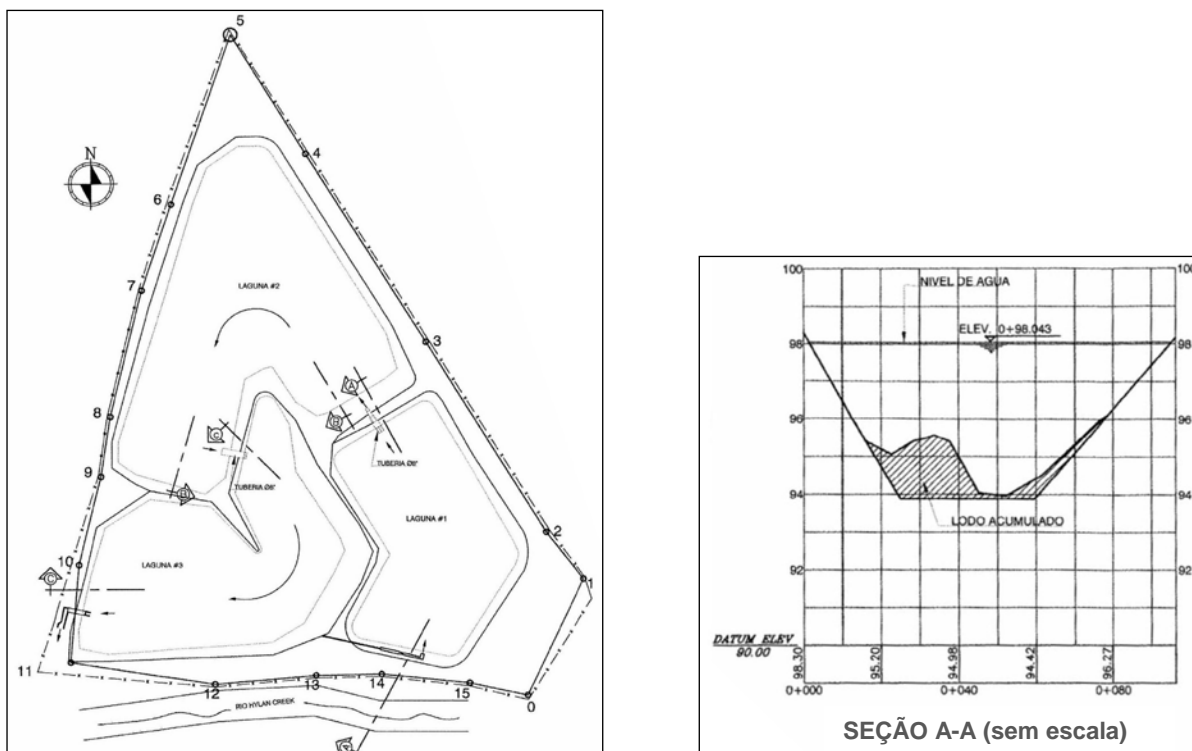


Figura 2: Sistema de lagoa de estabilização em Tela, Honduras. Na seção A-A, é mostrada a profundidade de lodo da lagoa primária, medida em 2003 por batimetria.



Figura 3: Entrada da lagoa primária (2007) e surgimento na superfície da lagoa de parte do lodo que estava a 4,0m de profundidade. Neste momento, foi estimado que o volume de lodo era de 3.500m^3 e ocupava 50% do volume da lagoa.

RESULTADOS

Remoção do Lodo

Como resultado dos atrasos no financiamento para o Departamento de Obras Públicas, que era a entidade responsável pela operação do sistema de lagoas, o projeto de remoção de lodo só foi iniciado após março de 2007. A partir daí, foi decidido continuar com o plano de remoção de lodo apesar do início da estação chuvosa, a fim de evitar o acúmulo de lodo por mais um ano e falha potencial do sistema de tratamento. Depois que o canal de *bypass* foi construído de março a junho, a lagoa primária foi drenada por bombeamento de 11 a 23 de Julho de 2007, um mês depois do último mês ideal para secagem de lodo (Tabela 1 e Figura 1).

Após a drenagem da lagoa, a planta *Ludwigia octovalvis* começou a crescer imediatamente e se espalhou sobre a superfície inteira do lodo na primeira metade da lagoa (Figuras 4 e 5). Até o final de agosto, a profundidade do lodo na entrada tinha diminuído pelo menos 0,5m e a água tinha sido drenada do lodo na segunda metade da lagoa (Figuras 4 e 5).

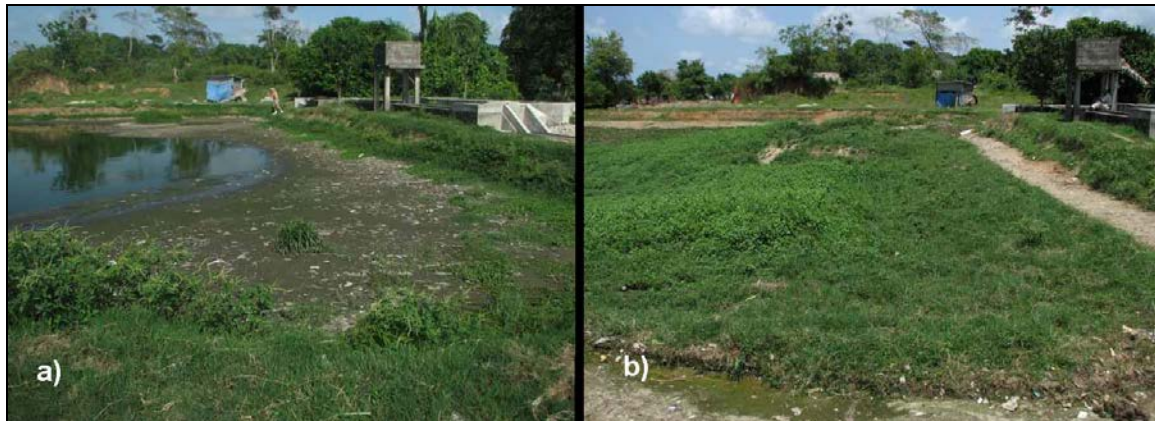


Figura 4: a) Entrada da lagoa primária durante o escoamento, em julho. A profundidade de lodo está entre 3,5 e 4,0m. b) Entrada após um mês da drenagem, em agosto. Observa-se crescimento extensivo de *Ludwigia octovalvis* na superfície do lodo e diminuição da profundidade superior a 0,5m.



Figura 5: a) Crescimento de *Ludwigia octovalvis* na superfície do lodo como visto na entrada da lagoa primária, em agosto. As espécies de plantas cobriram 100% da superfície do lodo na primeira metade do volume da lagoa, onde a maioria do lodo se acumula. Observa-se depósito de areia na entrada lagoa: o sistema não possui caixa de areia. b) A lagoa vista do ponto de descarga. Observa-se a drenagem da água da primeira metade da lagoa, com o maior acúmulo de lodo que na segunda metade. Esta água teve que ser periodicamente bombeada, especialmente após precipitação (a bomba e a tubulação podem ser vistas à direita da foto).

Em setembro, o lodo na entrada estava suficientemente seco, ou seja, sólido, em 0,5 a 1,0m de profundidade, para que uma escavadeira pudesse entrar na lagoa para começar a remoção de lodo (Figura 6). O TS_0 foi estimado em pelo menos 18%, com base em experiência passada com as análises de lodo neste local (Oakley, 2005). Uma vez que de 1,0 a 2,0m do topo do lodo foi removido, a escavadeira permaneceu em uma plataforma sólida, enquanto a pá carregadeira empurrava o lodo para uma distância de 1,0m do caminhão. A escavadeira, em seguida, descarregava o lodo no caminhão, que jogava o lodo sobre os taludes do sistema de lagoas (Figuras 7 e 8). O volume de lodo removido foi calculado pelo número total de caçambas descarregadas pelo caminhão.



Figura 6: Remoção do lodo sólido ($TS_0 \geq 18\%$) pela escavadeira, em setembro, dois meses após a drenagem da lagoa. A consistência de lodo era sólida até 1,0m ou mais de profundidade, permitindo que a escavadeira manobrasse sem dificuldade.



Figura 7: Após remoção da camada superior do lodo, foi usada uma combinação escavadeira/pá carregadeira para retirar a camada inferior do lodo (camada semilíquida).



Figura 8: Descarte do lodo sobre um dos taludes da lagoa primária.

O contratado removeu 1.967m^3 de lodo em 48 horas de uso das máquinas e, em 30 de setembro, terminou a primeira metade da lagoa, que continha todo o lodo profundo (maior que 1,0m), correspondendo a aproximadamente dois terços do volume total do lodo. Assim, em seis dias, foi possível remover uma média de $328\text{m}^3/\text{dia}$ de lodo sólido e semissólido, que variou em profundidade 1 a 3 m. Depois de setembro, um conflito com o município sobre pagamentos levou o contratado a abandonar o local. Devido a problemas políticos no município e ao início da estação das chuvas, a lagoa permaneceu vazia até o mês de julho seguinte, quando um segundo empreiteiro foi contratado para concluir a remoção de lodo. Este segundo contratado utilizou a mesma metodologia do primeiro e removeu 1.100m^3 em 24 horas de máquina, com remoção média de $367\text{m}^3/\text{dia}$. O lodo da segunda metade da lagoa, no entanto, foi inferior a 1,0m de profundidade (Figura 5b) e muito mais fácil de remover. A lagoa foi reenchida e foi retornada a operação em agosto de 2008.

O custo total em 2010, conforme exibido na Tabela 2, foi de US\$ 13.716 ou US\$ $4,47/\text{m}^3$ (com $TS_f = 18\%$) e foi pago pelo fundo geral da prefeitura de Tela.

Tabela 2: Custo Final de Remoção de Lodo em 2010

Remoção de Lodo	Custo (US\$ 1,00)
Fase I (1.967 m ³)	9.200
Fase II (1.100 m ³)	4.516
Custo Total de Remoção de Lodo	13.716
Custo por m³	4,47
Custo por pessoa por ano	0,08

CONSIDERAÇÕES PARA PROJETO DE REMOÇÃO DE LODO, COM BASE NA EXPERIÊNCIA DE TELA

Papel da evapotranspiração e da drenagem

Apesar do pior momento possível para iniciar as atividades de remoção de lodo no início da estação chuvosa, o lodo profundo na entrada da lagoa passou de seco a sólido, diminuindo sua espessura em pelo menos 1,0m. Em consequência, foi removido todo o lodo da primeira metade da lagoa em dois meses. Os dados apresentados na Tabela 1 sugerem que a secagem de lodo não seria possível de ser realizada de julho a setembro. Embora os dados de precipitação apresentados na Tabela 1 sejam baseados em médias de longo prazo ao longo de décadas, a precipitação de um determinado mês pode variar muito de ano para ano (a evapotranspiração não é susceptível a alteração significativa). Dados de precipitação diária de estações meteorológicas em todo o mundo estão disponíveis para qualquer ano a partir do Centro Nacional de Dados Climáticos do governo dos EUA (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html>). Na Tabela 3, é apresentado o resumo dos dados de precipitação diária em Tela para os meses de julho a setembro de 2007. As médias de precipitação de longo prazo da Tabela 1 também estão incluídas para comparação.

Tabela 3: Dados de evapotranspiração líquida medidos de julho a setembro de 2007

Mes	ET_0^a mm/dia	P^a		$(ET_0 - I)^a$ m/dia	P^b		RO^c mm/dia	$I = P - RO$ mm/dia	$ET_0 - I$ mm/dia	$ET_0 - I$ m/dia
Julho		203	6,55		70,9	2,28				
(23-31) ^d	3,81			0,00021	24,1	3,45	0,30	3,15	0,66	0,00066
Agosto	3,72	230	7,42	-0,00036	89,9	2,90	0,48	2,42	1,30	0,00130
Setembro	3,63	232	7,73	-0,00062	101,1	3,37	1,17	2,20	1,43	0,00143

^a Dados da Tabela 1.

^b Dados de medição de julho, agosto e setembro de 2007, conforme relatado pelo resumo diário global pela estação meteorológica de Tela, Honduras (National Climatic Data Center;

<www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdoselect.cmd?datasetabbv=GSOD&countryabbv=&georegionabbv=>>).

^c Escoamento superficial calculado para cada evento de precipitação usando o método Soil Conservation Service Method (SCS, 1972).

^d Desde que foi iniciada a secagem de lodo, quando a lagoa estava vazia em 23 de julho, somente os dados de precipitação para 23 a 31 de julho estão incluídos nos cálculos.

Os dados de precipitação de 2007 mostram que os totais mensais de julho, agosto e setembro (70,9mm; 89,9mm e 101,1mm) representam, respectivamente, apenas 34,9%, 39,1% e 43,6% das médias de longo prazo. Como resultado, a evapotranspiração líquida ($ET_0 - I$) é positiva para os três meses e é muito maior, sendo 3,1 vezes maior para julho e 5,6 vezes maior para agosto do que o calculado a partir da média de longo prazo. Esses valores, contudo, ainda são apenas cerca de 50% menor daqueles calculados para o mês ideal para secagem de lodo (março a maio), como visto na Tabela 1.

Os valores apresentados na Tabela 3 não incluem a fração de drenagem de água do lodo, D_s , e a fração de infiltração que é drenada e não é absorvida, D_i . A plotagem da Equação 3 para os dados de 2007 com várias combinações de D_s e D_i é mostrado na Figura 9. Em três combinações, foi assumido que $D_s = 0,5$ para os

primeiros 7 dias de secagem após a lagoa ser esvaziada, valores típicos de lodos digeridos anaerobicamente em leitos de areia (Arceivala, 1998). Em uma das curvas, assumiu-se $D_s = 0,5$ para 30 dias, o que poderia ser possível para as camadas inferiores de lodo no fundo da lagoa. A água contida nestas camadas são drenadas gradualmente e desaparecem lentamente por gravidade ou por evaporação (Figura 4).

Diferentemente da Figura 1, assume-se na Figura 9 que há drenagem da água de infiltração (D_I) em três dos gráficos. Valor de $D_I = 0,43$ foi relatado por Arceivala (1998) como um valor médio para lodos anaerobicamente digeridos em leitos de secagem de areia. Provavelmente este é um valor mínimo para lodos de lagoa com o crescimento de plantas, pois os caules e raízes das plantas formam vias permanentes para drenagem contínua da água de infiltração, como tem sido demonstrado com o uso de plantas aquáticas para secagem de lodo (Metcalf & Eddy, 2003; US EPA, 1987). Um valor que se aproxima de $D_I = 1,0$ (100% de drenagem da água de infiltração) pode ser possível para essas camadas de lodos com sistemas de raízes que tenham secado até se tornar sólidos, pois estes lodos secos não reidratam quando molhados (Dillard, 1981).

A experiência em Tela demonstra que a drenagem (D_I) desempenha um papel significativo na secagem já que somente a evapotranspiração das plantas não poderia secar o lodo com as profundidades encontradas no campo. Neste caso, a máxima profundidade para formar um sólido com TS igual a 18% deveria ter sido somente 0,3m ou menos, como se pode observar na parte inferior do gráfico na Figura 9 com D_I igual a zero. O valor da evapotranspiração líquida obtido foi maior que os valores mostrados na Tabela 3 devido à drenagem D_I .

Pode-se concluir que o crescimento significativo de *Ludwigia* e a concomitante evapotranspiração, a altura e a inclinação do lodo acumulado e a drenagem da água (incluindo RO , D_s e D_I), no sentido da descarga da lagoa, desempenharam também importantes papéis na secagem do lodo.

Assim as considerações para o projeto da lagoa primária e a concepção da remoção de lodo incluem o seguinte:

1. O fundo das lagoas primárias deve ser projetado com uma inclinação para o lado de descarga do efluente para que a água seja drenada dos depósitos de lodo. Na Figura 9, são apresentadas são várias combinações de D_s e D_I , utilizando as equações 2 e 3 com os dados de 2007 da Tabela 3.
2. O projeto detalhado do processo de secagem de lodo utilizando os dados de evapotranspiração deve ser incluído no projeto de todos os sistemas de lagoas primárias. É provável que muitos sistemas de lagoas entrarão em colapso no futuro por falta de um planejamento para remoção de lodo.
3. Plantas aquáticas usadas em wetlands com crescimento rápido, como as espécies de *Ludwigia*, devem ser plantadas ou deve-se permitir seu crescimento imediatamente após o esvaziamento da lagoa. Plantas promovem a desidratação, tanto através da evapotranspiração e drenagem, e, sem o crescimento das plantas, os lodos profundos não vão secar a sólidos em profundidades maiores que 0,2 a 0,3m.

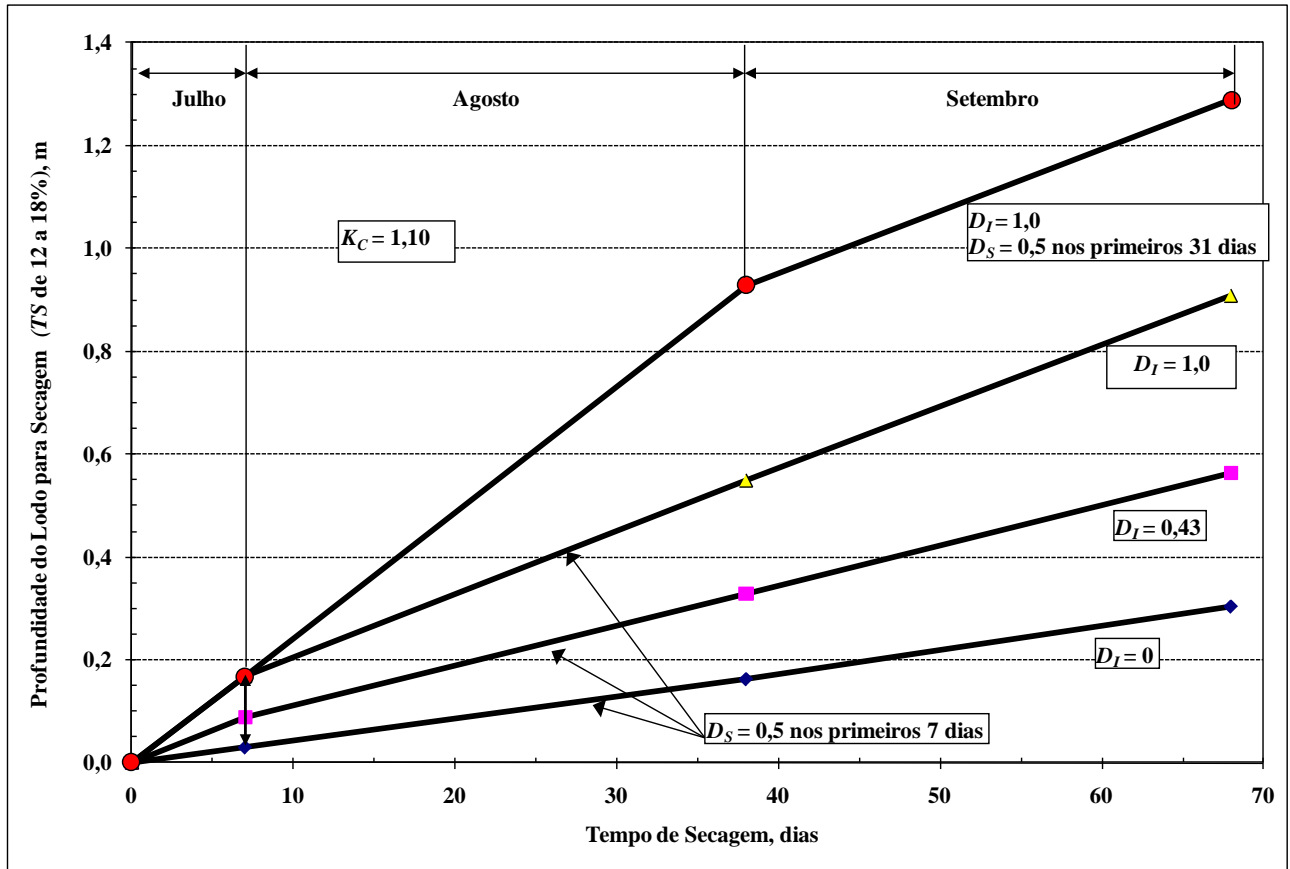


Figura 9: Profundidade de lodo seco com TS entre 12 e 18% versus tempo de secagem para a lagoa primária em Tela para várias combinações de D_S e D_I .

Seleção e Uso de Equipamentos Pesados

Há pouca ou nenhuma publicação com foco na seleção e utilização de equipamentos pesados para remoção de lodos de lagoas primárias drenadas. As escavadeiras, que foram brevemente mencionadas, são adequadas apenas para lodos sólidos rasos, com profundidade menor que 0,5m (Gonçalves, 1999; Oakley, 2005) e não podem trabalhar em lodos semissólidos profundos, porque as esteiras deslizam e perdem tração (Oakley, 2005). A escavadeira exibida na Figura 7 não pôde entrar na lagoa quando o lodo estava na profundidade mostrada na Figura 6, mas foi capaz de ser manobrada, conforme pode ser observado na Figura 7, porque o lodo não era muito profundo e as esteiras estavam sobre a argila compacta do fundo da lagoa.

Como demonstrado neste estudo de caso de Tela, uma escavadeira é capaz de manobrar em lodo profundo semissólido sem atolar. Mesmo que as esteiras escorreguem no lodo úmido profundo, a escavadeira ainda poderá mover-se e usar a lança e a concha. Uma vez que o lodo de fundo é removido, uma rampa pode ser construída para que um caminhão trator possa entrar na lagoa. Uma escavadeira é mais eficiente quando está parada, e, em seguida, a pá carregadeira tem um papel importante empurrando o lodo para a escavadeira (Figura 7). Pelo menos uma escavadeira de médio porte (cerca de 150CV), com uma caçamba de 1,0m³ deve ser usada em lodos com uma profundidade superior a 0,5m. Uma escavadeira deste tamanho normalmente pode ser alugada por menos de US\$100/hora (incluindo o operador) na América Latina.

Disposição no Próprio Local

Lodos de lagoas que tratam esgotos domésticos contêm ovos viáveis de helmintos. Portanto todos os projetos de sistemas de lagoas devem incluir um local onde os lodos escavados possam ser armazenados por, pelo menos, um ano para atender às orientações da Organização Mundial de Saúde para a inativação de ovos de helmintos (WHO, 2006). No caso de Tela, a única opção disponível era a de eliminar o lodo nos taludes da lagoa. Quando a remoção do lodo começou, cinco amostras foram coletadas em vários locais e analisadas para verificação da presença de ovos de helmintos. Conforme demonstrado na Tabela 4, a concentração de ovos viáveis variou de 0,4 a 25,0 ovos viáveis/ grama de lodo seco. Após um ano, sob temperaturas superiores a 20°C, o lodo deve estar essencialmente livre de ovos viáveis e pode ser usado externamente na agricultura.

(WHO, 2006). A gestão de lodos, portanto, deve ser cuidadosamente controlada, o que pode ser um problema em muitos municípios pequenos.

Tabela 4: Concentrações de ovos de helmintos no lodo seco amostrado durante a remoção

Número da Amostra	Localização da Amostragem	Número de ovos viáveis/ g lodo seco
1	Entrada da lagoa a 4m de profundidade	25,0
2	Superfície de lodo no meio da lagoa	1,6
3	Superfície de lodo no meio da lagoa	0,4
4	Saída da lagoa no talude	4,5
5	Lodo no início da descarga no talude	5,1

Financiamento

Existem muito poucos exemplos na literatura de pequenos municípios latinoamericanos que financiam a remoção de lodo de seus próprios sistemas de tratamento de esgoto por lagoas de estabilização. Dois estudos relataram a remoção de lodo de lagoas em pequenas cidades, mas estes estudos têm sido financiados por organismos internacionais como a União Europeia, que financiou a remoção de lodo de um sistema de lagoas na Nicarágua (Oakley, 2005) ou o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), que financiou a remoção de lodo em 17 sistemas de lagoas na Nicarágua, a um custo de aproximadamente US\$ 58.000 por sistema em 1995 (Oakley, 1999).

Este é um dos poucos estudos a indicar que o próprio município financia a remoção de lodo com recursos próprios. O sistema de tratamento de esgoto por lagoas de estabilização em Tela serve a uma população de aproximadamente 10.000 pessoas e há 2.500 conexões de esgoto que alimentam o sistema de lagoas. A taxa mensal para ligações é mostrada na Tabela 5. A taxa mensal varia dependendo da localização e da quantidade de bombeamento necessária para alcançar o sistema de tratamento.

Tabela 5: Taxas de esgoto e arrecadação da população servida pelo sistema de lagoas de estabilização para tratamento do esgoto de Tela^a

Número de Conexões	Taxa Mensal /Conexão US\$	Arrecadação Mensal US\$	Arrecadação Anual US\$
2.000	2,89	5.789	69.474
500	3,68	1.842	22.105
TOTAL		7.631	91.575

^a Valores em US\$ (2010).

Em comparação com a arrecadação anual das taxas de esgoto, o custo total de remoção de lodo de US\$ 13.716 (Tabela 2), durante um período de 15 anos, é uma porcentagem muito pequena da arrecadação total obtida a partir de taxas de cobrança. Assim como na maioria dos pequenos municípios latinoamericanos, os administradores políticos da cidade de Tela costumam usar a arrecadação para outros fins, independentemente da fonte, e os recursos obtidos não retornam necessariamente aos setores em que foram gerados. O primeiro empreiteiro abandonou o local porque não foi pago pelo município e é provável que os recursos prometidos para o Departamento de Obras Públicas foram gastos em outros projetos mais visíveis durante um ano eleitoral. No entanto, os recursos do ano seguinte foram disponibilizados para finalizar este projeto, que é o projeto de remoção de lodo mais bem sucedido até hoje na América Central, financiado totalmente pelo município.

CONCLUSÕES

A remoção de lodo de lagoas de estabilização primárias é uma questão urgente para a sustentabilidade dos diversos sistemas existentes em cidades e municípios pobres da América Latina e de regiões em desenvolvimento do mundo. Infelizmente há muito poucos exemplos e estudos de caso na literatura apresentando métodos e custos apropriados para os recursos de pequenas cidades pobres. Este trabalho apresenta um método que é sustentável e de baixo custo, que foi realizado e pago pelo município, sem ajuda externa, e serve como um modelo de baixo custo para operações de remoção de lodo de lagoas de estabilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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.
2. ARCEIVALA, S. J. Wastewater Treatment for Pollution Control. 2nd Edition. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi. 1998.
3. CARRÉ, J.; LAIGRE, M. P.; LEGAS, M. Sludge removal from some wastewater stabilization ponds. *Water Science and Technology*, 22(3-4): 247, 1990.
4. DILLARD, F. J. Chapter 2: Sludge Characteristics. In Eckenfelder, WW. and Santhanam, C.J. (Eds.). *Sludge Treatment*. Marcel Dekker, New York, pp. 13-29, 1981.
5. 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>
6. GONÇALVES, R. F. (Coordenação), 1999. Gerenciamento do Lodo de Lagoas de Estabilização Não Mecanizadas. PROSAB (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico), Rio de Janeiro, Brasil.
7. METCALF & EDDY. Wastewater Engineering. 4th Ed. McGraw-Hill, New York, 2003.
8. MARA, D. Wastewater Treatment in Developing Countries. Earthscan, London, 2004.
9. OAKLEY, S. M.; POCASANGRE, A.; FLORES, C.; MONGE, J.; ESTRADA, M. Waste Stabilization Pond Use in Central America: The Experiences of El Salvador, Guatemala, Honduras, and Nicaragua, *Water Science and Technology*, Vol. 42, Nos. 10-11, pp. 51-58, 2000.
10. OAKLEY, S. Lagunas de Estabilización en Honduras: Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad. USAID-Honduras/Red Regional de Agua y Saneamiento para Centro América/Fondo Hondureño de Inversión Social, Tegucigalpa, Honduras, 2005.
11. PICOT, B.; SAMBUCCO, J.P.; BROUILLET, J.L.; RIVIERE, Y. Wastewater stabilisation ponds: Sludge accumulation, technical and financial study on desludging and sludge disposal. Case studies in France. *Water Science and Technology*, 51(12), 227-234, 2005.
12. SCS (Soil Conservation Service), National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. US Department of Agriculture, Washington, DC., 1972.
13. SHILTON, A. Ed. Pond Treatment Technology. IWA Publishing, London, 2005.
14. US EPA. *Design Manual: Dewatering Municipal Wastewater Sludges*. US Environmental Protection Agency, EPA-625/1-87/014, Cincinnati, Ohio, USA, 1987.
15. WHO (World Health Organization). Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta, and Greywater, Volume 4 Excreta and greywater use in agriculture, World Health Organization, Geneva, 2006.