

## **I-125 - APLICAÇÃO DE MODELAGEM ESTOCÁSTICA NO DIMENSIONAMENTO DE LEITOS DE SECAGEM DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

**Vívian Ane Lopes Cabral**

Engenheira Ambiental, Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestranda em Engenharia Civil, Área de Concentração Engenharia Sanitária e Ambiental (UFV)

**Demétrius Brito Viana<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Ambiental (UFV). Mestre em Engenharia Civil, Área de Concentração Engenharia Sanitária e Ambiental (UFV).

**Rafael Kopschitz Xavier Bastos**

Engenheiro Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora. Especialização em Engenharia de Saúde Pública, Escola Nacional de Saúde Pública - FIOCRUZ. PhD em Engenharia Sanitária, University of Leeds, UK. Professor e pesquisador do Departamento de Engenharia Civil, UFV.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Universidade Federal de Viçosa Departamento de Engenharia Civil, Av. PH Rolfs, s/n. Campus Universitário. Viçosa – MG. 36570-000. Brasil. Tel.: +55(31) 3892-2352 – Fax: +55(31)3892-2819. e-mail: ane.cabral@yahoo.com.br.

### **RESUMO**

Apresenta-se neste trabalho um exercício de dimensionamento de leito de secagem para o desaguamento de lodo do decantador de estação de tratamento de água (ETA) com emprego de modelagem estocástica, isto é, considerando incertezas associadas às variáveis de entrada do modelo de dimensionamento: vazão, turbidez da água bruta, dose de sulfato de alumínio e concentração de sólidos no lodo armazenado no decantador (dados primários de controle operacional da ETA da Universidade Federal de Viçosa – UFV); densidade de sólidos no lodo, altura da camada de lodo no leito e concentração de sólidos na torta (dados de literatura). Foram testados três cenários: três, seis e doze meses de armazenamento do lodo no decantador. As estimativas de volume de lodo acumulado no decantador e, por conseguinte, as de demanda de área para o leito de secagem, não foram elevadas, e não foram observadas grandes diferenças entre os três cenários considerados. Em decorrência da modelagem estocástica os resultados de demanda de área são expressos em termos de distribuição de probabilidades e discutidos em termos do significado das escolhas: margem de segurança e custos associados a eventuais sub ou superdimensionamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Leito de secagem, lodo de ETA, modelagem estocástica.

### **INTRODUÇÃO**

O tratamento do lodo de estações de tratamento de água (ETAs) visa, basicamente, à remoção de água, de forma a viabilizar o transporte e a disposição final do resíduo. Para tanto, podem ser utilizados sistemas naturais, como lagoas de lodo e leitos de secagem, ou processos mecanizados, como centrífugas e filtros-prensa. Os processos naturais apresentam grande potencial de aplicação onde haja condições climáticas favoráveis e disponibilidade de área. Comparativamente às lagoas de lodo, os leitos de secagem apresentam como vantagens adicionais a obtenção, em menor tempo, de torta de lodo desidratado com maior concentração de sólidos, além de operação manutenção mais fáceis (REALI, 1999).

O dimensionamento de leitos de secagem de lodo de ETAs não é normatizado e, usualmente, são adotadas abordagens tão simples quanto a estimativa da área necessária com base no volume e na altura lodo a serem mantidos no leito de secagem (ou da taxa de aplicação de sólidos por unidade de área, em  $\text{kg m}^{-2}$ ) (RICHTER, 2001). Entretanto, para isso é preciso que se disponha de dados de produção de massa de sólidos por volume de água tratada. Idealmente, tal informação deve advir de medições de campo e do cômputo de balanço de massa ao longo da ETA. Na ausência dessas informações, se pode recorrer a modelos preditivos empíricos que relacionam a produção de sólidos com as características da água e do tratamento empregado.

Porém, nessa abordagem, como em qualquer modelo preditivo, incertezas em torno das variáveis de entrada são propagadas através do modelo e se fazem refletir na variável resposta, podendo, por fim, comprometer a

confiabilidade do projeto. Nos chamados modelos determinísticos, as variáveis de entrada são assumidas em valores únicos e, por conseguinte, a resposta é também expressa por meio de um único valor, sujeito a sub ou superestimativas; assim, é preciso critério na definição dos valores das variáveis de entrada, por exemplo, valores típicos ou médios. Alternativamente, a modelagem estocástica permite considerar incertezas (incerteza propriamente dita e variabilidade) associadas ou inerentes a cada variável de entrada de um modelo. Nessa abordagem, as variáveis de entrada são descritas em intervalos de valores e de acordo com determinada distribuição de probabilidades, a propagação das incertezas através do modelo é realizada por meio de técnicas de amostragem aleatória e, por conseguinte, os resultados também são expressos em termos de distribuição de probabilidades (MORGAN e HENRION, 2007), proporcionando, assim, flexibilidade na tomada de decisão, ou seja, permitindo cotejar aspectos técnicos e econômicos para a solução final.

Com tal abordagem, apresenta-se neste trabalho um exercício de dimensionamento de leitos de secagem para o desaguamento do lodo do decantador da Estação de Tratamento de Água da Universidade Federal de Viçosa (ETA UFV).

## MATERIAL E MÉTODOS

Para estimativa da produção de sólidos foi utilizado o modelo empírico para ETAs que empregam sulfato de alumínio como coagulante, expresso na Equação 1 (CORDEIRO, 1981, citado por REALI *et al.*, 1999). A estimativa se faz em termos de massa de sólidos sedimentados por metro cúbico de água tratada num determinado período de acúmulo de lodo no decantador, em função da turbidez da água bruta e da dose de coagulante aplicada. Considerou-se, neste trabalho, que toda a massa de sólidos gerados na ETA UFV seria acumulada na etapa de decantação.

$$M_s = \frac{(k_1 D + k_2 T)}{1000} \times Q \times t \quad \text{equação (1)}$$

Onde:  $M_s$  = produção de sólidos (kg de sólidos por  $m^3$  de água tratada);  $D$  = dose de sulfato de alumínio ( $mg L^{-1}$ );  $T$  = turbidez da água bruta (uT);  $Q$  = vazão de água tratada ( $m^3 s^{-1}$ );  $t$  = período de acúmulo de lodo (s);  $K_1$  = relação estequiométrica entre a dose de coagulante e formação do precipitado de hidróxido (adimensional);  $K_2$  = relação entre sólidos suspensos totais e turbidez (adimensional)

A partir dessa estimativa da massa de sólidos armazenada no decantador é possível estimar a massa de lodo correspondente, em função da concentração de sólidos esperada no lodo, bem como o volume de lodo, considerando uma dada densidade do lodo. O cálculo da área da unidade de desaguamento de lodo, neste caso um leito de secagem convencional, é baseado no volume de lodo a desaguar e da altura da camada de lodo no leito (Equações 2, 3 e 4).

$$M_L = M_s / C \quad \text{equação (2)}$$

$$V_L = M_L / \delta_L \quad \text{equação (3)}$$

$$A = V_L / h \quad \text{equação (4)}$$

Onde:  $M_L$  = estimativa da massa de lodo gerada;  $M_s$  = massa de sólidos estimada;  $C$  = concentração de sólidos esperada no lodo;  $V_L$  = volume de lodo;  $\delta_L$  = densidade do lodo;  $A$  = área do leito de secagem;  $h$  = altura de lodo no leito de secagem

Para o ajuste de funções densidade de probabilidades às variáveis turbidez da água bruta, dose de coagulante e vazão da ETA, foi utilizado o banco de dados de monitoramento horário da ETA UFV referente ao período de janeiro de 2005 a fevereiro de 2011. Para testar a aderência das séries de dados a funções densidade de probabilidades foram utilizados os testes Qui-quadrado ( $\chi^2$ ), Kolmogorov Smirnov (KS), Anderson Darling (AD), além do gráfico de probabilidades. Para as variáveis sobre as quais não se dispunha de séries de dados, foram adotadas faixas de valores (por exemplo, com base em informações de literatura) e distribuições uniformes ou triangulares. Os modelos expressos nas equações acima foram simulados por meio de 10.000 iterações com emprego da técnica de amostragem aleatória (das variáveis de entrada dos modelos) de Hipercubos Latinos. Todos esses testes e simulações foram feitos com o programa @ Risk versão 5.5 (Palisade Corporation).

Os resultados obtidos das simulações no @Risk foram expressos por meio de histogramas de frequência e gráficos de distribuição acumulada, considerando três períodos de acúmulo de lodo no decantador: três, seis e 12 meses (abrangendo períodos de estiagem e chuva). O volume de lodo acumulado no decantador, em cada período e, assim, o volume a ser desaguado no leito de secagem, foram comparados a fim de subsidiar a decisão sobre intervalos entre lavagens do decantador.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As faixas de valores e as funções densidade de probabilidade adotadas para cada variável, além dos parâmetros que definem essas funções, estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Variáveis de entrada dos parâmetros avaliados para o dimensionamento do leito de secagem para a ETA UFV, com as respectivas distribuições de probabilidades adotadas e os parâmetros que as definem.**

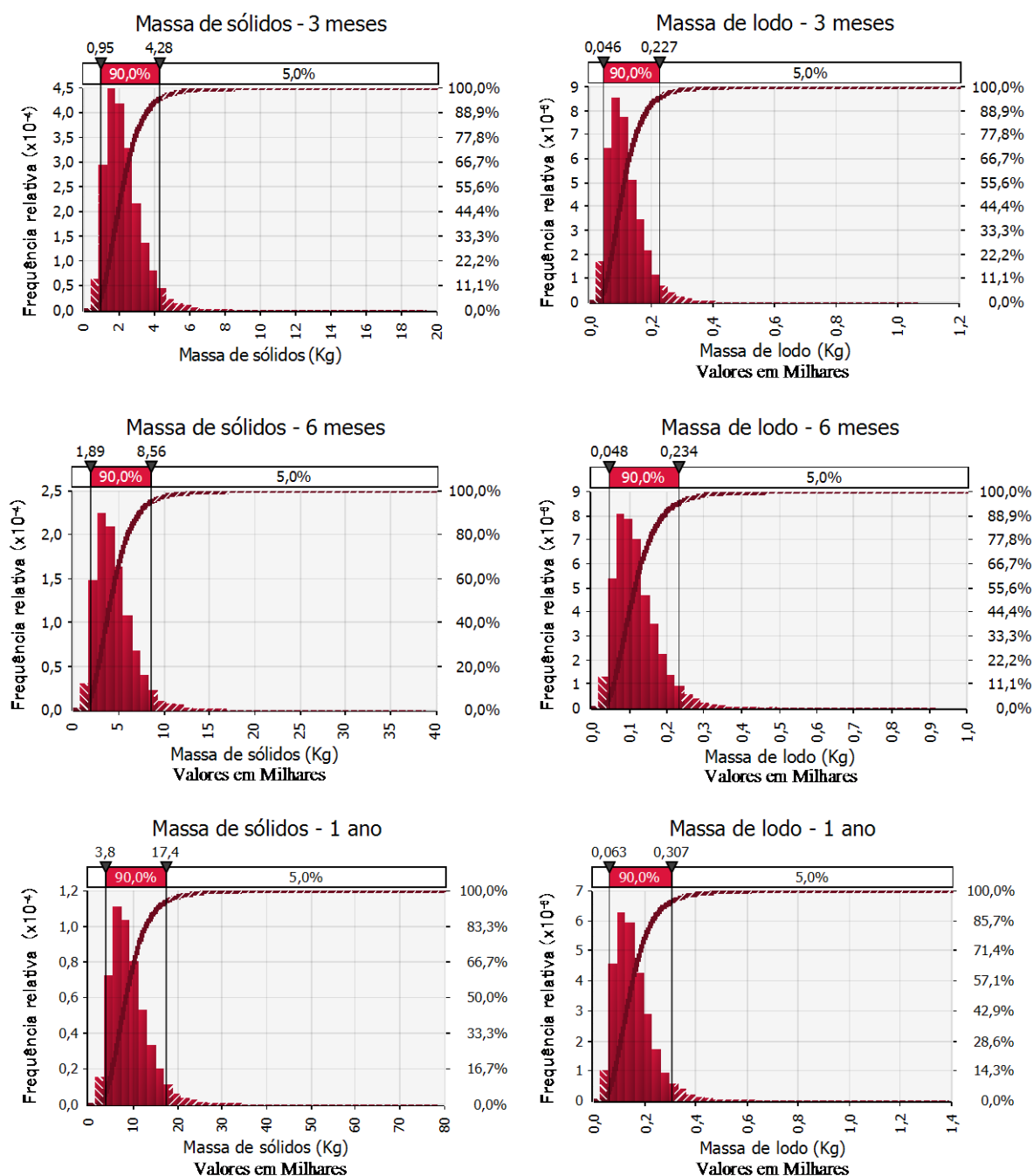
Variáveis de entrada	Distribuição	Fonte	Média $\pm$ desvio-padrão <sup>(3)</sup> ou valor mais provável <sup>(4)</sup>	Mín.	Máx.
Turbidez da água bruta (uT)	Lognormal	ETA UFV <sup>(1)</sup>	19,07 $\pm$ 22,22	-	-
Dose de coagulante (mg L <sup>-1</sup> )	Log logística	ETA UFV <sup>(1)</sup>	3,95 $\pm$ 9,28	-	-
Vazão (L s <sup>-1</sup> )	Triangular	ETA UFV <sup>(1)</sup>	50 <sup>(4)</sup>	40	70
K <sub>2</sub>	Uniforme	Literatura	-	0,5	2
Concentração de sólidos no lodo - 3 meses (%)	Uniforme	Literatura	-	1,5	2,5
Concentração sólidos no lodo - 6 meses (%)	Uniforme	ETA UFV <sup>(2)</sup>	-	2,9	4,84
Concentração de sólidos no lodo -12 meses (%)	Uniforme	ETA UFV <sup>(2)</sup>	-	4,5	7,5
Densidade dos sólidos (kg m <sup>-3</sup> )	Uniforme	Literatura e ETA UFV <sup>(2)</sup>	-	1300	1682,5
Altura da camada de lodo no leito (m)	Uniforme	Literatura	-	0,2	0,6
Concentração de sólidos na torta (%)	Uniforme	Literatura	-	20	25

(1) dados horários, janeiro de 2005 a fevereiro de 2011; (2) dados pontuais.

A Tabela 2 apresenta os resultados da previsão das massas de sólidos e de lodo acumulados no decantador, para os três períodos analisados, em termos da mediana e 95° percentis das distribuições de frequência resultantes. Na Figura 1 apresentam-se os histogramas de distribuição de probabilidades, e as respectivas curvas de frequência acumulada, das estimativas de massa de sólidos e de lodo para os períodos avaliados.

**Tabela 2 – Estimativas das massas (kg) de sólidos e de lodo armazenados no decantador da ETA UFV ao longo de três, seis e 12 meses (medianas e percentis 95%).**

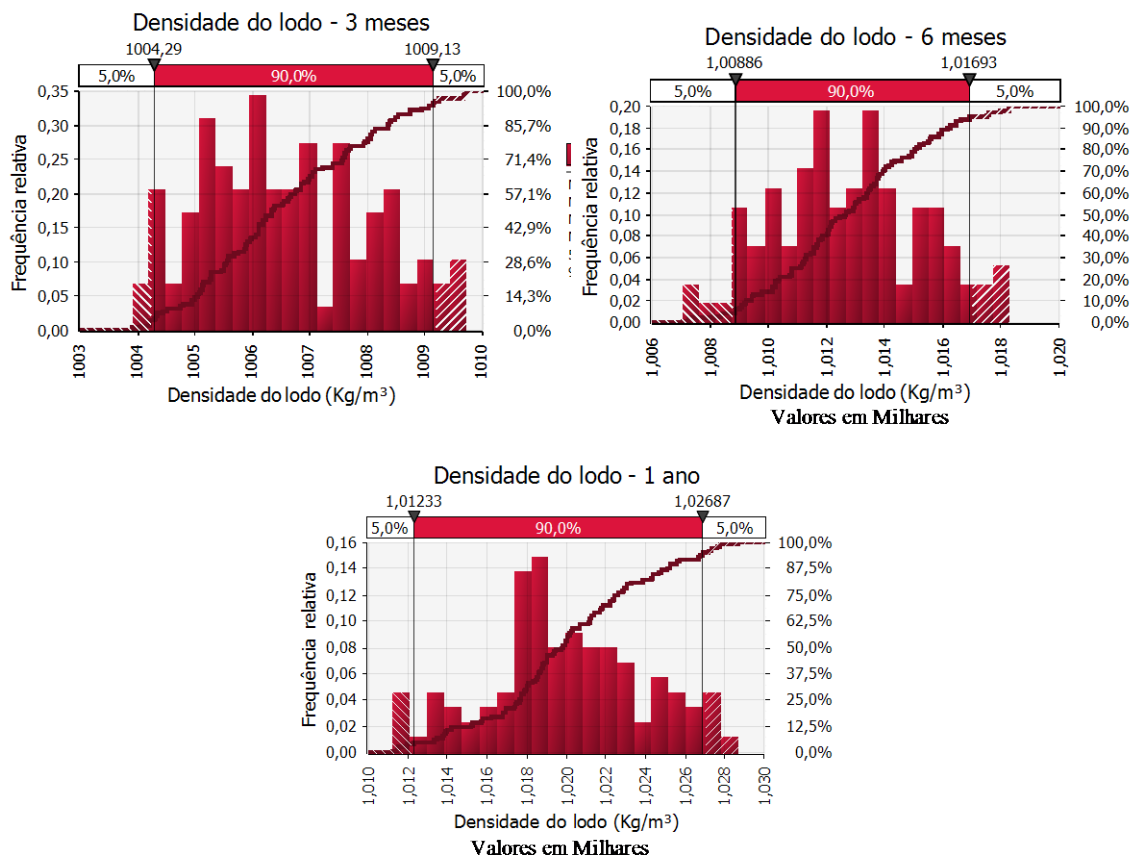
Período de acúmulo no decantador	Variável estimada	Mediana	95%
3 meses	Massa de sólidos	2.066,8	4.280
	Massa de lodo	104.631,3	226.600,1
6 meses	Massa de sólidos	4.133,5	8.559,9
	Massa de lodo	108.279,8	23.4151,8
12 meses	Massa de sólidos	8.381,8	17.357,6
	Massa de lodo	141.693,1	307.186,7



**Figura 1 – Histogramas das distribuições de probabilidades e curvas de frequência acumulada das estimativas das massas de sólidos e de lodo armazenados no decantador da ETA UFV ao longo de três, seis e 12 meses.**

As estimativas efetuadas indicam geração de sólidos relativamente baixa na ETA UFV, se comparada com valores obtidos em outros estudos (SARON e LEITE, 2003; SOUZA e CORDEIRO, 2005). Isso se deve, certamente, à turbidez predominantemente baixa da água bruta (mediana de 9,3 uT), pois a estimativa de sólidos se baseia na turbidez da água bruta e na dose de coagulante empregada e estas variáveis são correlacionadas. A ETA UFV é de pequeno porte (vazão em torno de  $50 \text{ L s}^{-1}$ ) e isso também ajuda a explicar as baixas estimativas de massa de sólidos acumulada no decantador, para os três períodos analisados. Naturalmente, a massa de sólidos acumulada no decantador aumenta (consideravelmente) com o passar do tempo, na medida em que aumenta o volume total de água tratada.

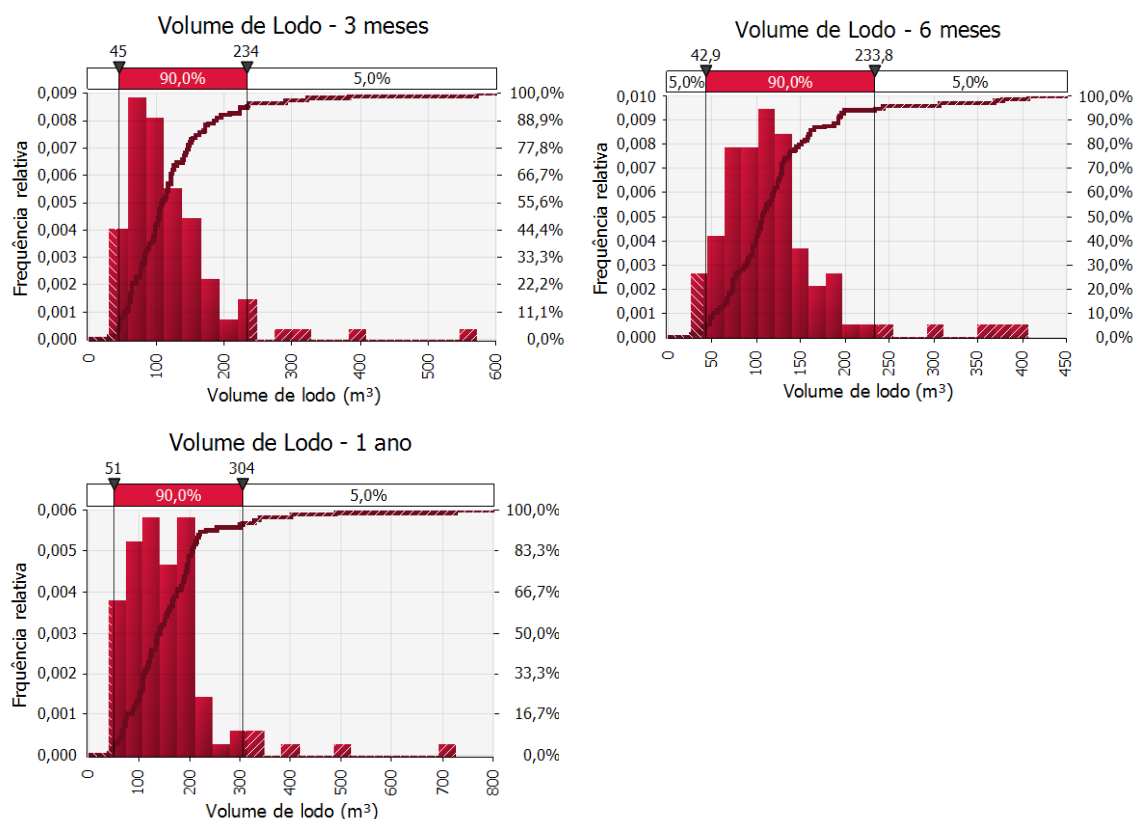
Em termos de massa de lodo úmido acumulado no decantador, o comportamento é diferente. Ocorre, sim, incremento ao longo do tempo, porém este é bem mais discreto do que observado para a massa de sólidos, e isso é devido ao adensamento natural do lodo mantido no interior do decantador por longos períodos de tempos (REALI *et al.*, 1999). Em resumo, as estimativas de massa de lodo acumulada ao longo dos três períodos considerados (três, seis e 12 meses) não diferiram tanto entre si. Com base nas estimativas de densidade (Figura 2) e de massa do lodo acumulado no decantador, foram feitas estimativas de volume de lodo a ser descartado do decantador e encaminhado para processos de desaguamento (Tabela 3 e Figura 3).



**Figura 2 – Histogramas das distribuições de probabilidade e curvas de frequência acumulada das estimativas de densidade do lodo armazenado no decantador da ETA UFV ao longo de três, seis e 12 meses.**

**Tabela 3 – Estimativa do volume de lodo (m<sup>3</sup>) armazenado no decantador da ETA UFV ao longo de três, seis e 12 meses (mediana e percentis 95%).**

Período de acúmulo	Mediana	95%
3 meses	103,4	234
6 meses	106,4	234
12 meses	138	304



**Figura 3 – Histogramas das distribuições de probabilidade e curvas de frequência acumulada das estimativas do volume de lodo armazenado no decantador da ETA UFV ao longo de três, seis e 12 meses.**

Verifica-se que as estimativas de volume de lodo acumulado no decantador não são altas, inclusive sem grandes diferenças entre os três períodos considerados. Isso é resultado do aumento apenas discreto da massa de lodo de um período para outro, que como já comentado, é devido ao incremento da concentração de sólidos no lodo e, por outro lado, ao decréscimo da massa de água associada ao lodo. Nota-se que praticamente não há diferenças entre as estimativas de volumes de lodo gerados em três e seis meses de operação da ETA UFV, porque a concentração de sólidos esperada para seis meses é praticamente o dobro da de três meses. Mesmo quando se considera período de um ano, o incremento de volume de lodo acumulado não é tão elevado (em torno de 20% se tomadas as medianas como referência)

Em resumo, esses resultados sugerem que as operações de limpeza do decantador da ETA UFV possam se dar em intervalos relativamente longos, sem que isso represente grande aumento de volume de lodo armazenado e, portanto, de demanda de área para a implantação de unidade de desaguamento de lodo. Acredita-se que a adoção de intervalo mais longos deva, inclusive, favorecer o próprio processo de desaguamento, devido ao adensamento do lodo no leito. Dependendo do tempo de armazenamento, o decantador passa a funcionar como um decantador-adensador. Com efeito, isso foi verificado durante experimento de desaguamento de lodo da ETA UFV em leito de secagem piloto, em que o lodo retirado do decantador, com período de retenção de 12 meses, apresentava concentração de sólidos de 6,5% (BATISTA e CABRAL, 2011). Tais condições, como citado por Richter (2001), além de minimizarem a área necessária ao desaguamento, diminuem o tempo de secagem do lodo no leito.

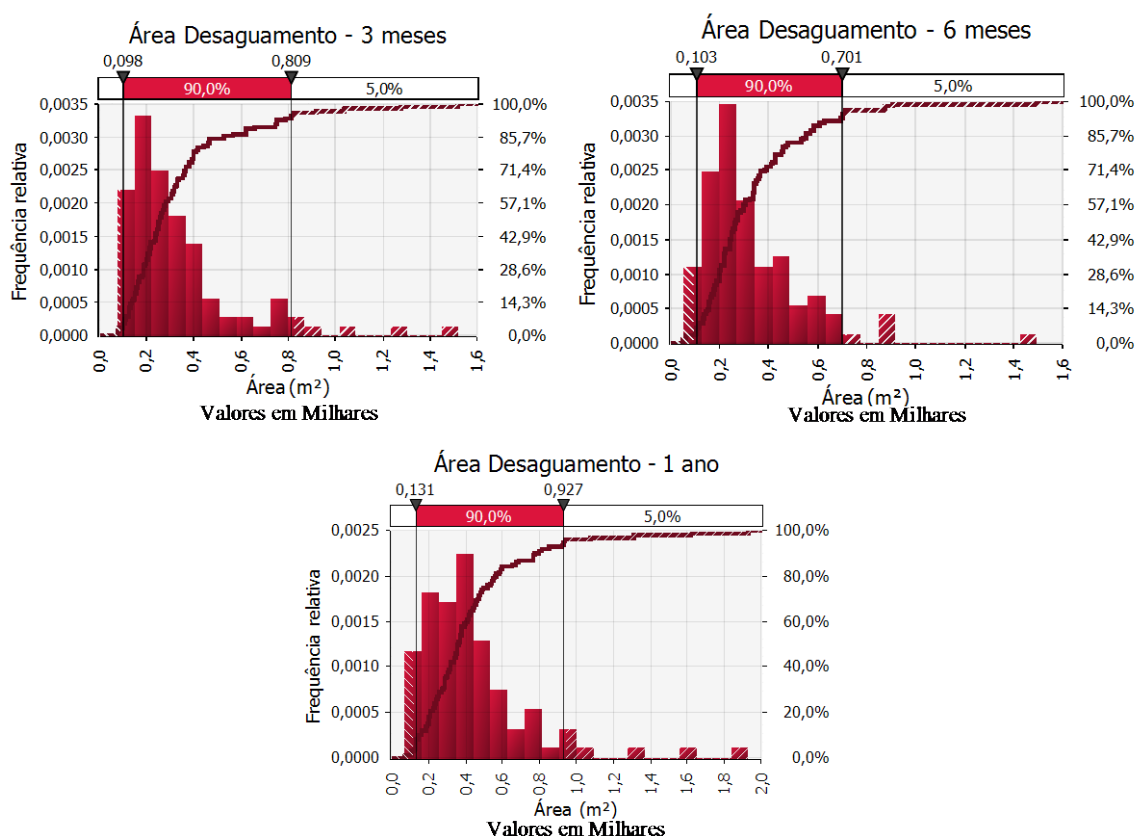
A Tabela 4 e a Figura 4 apresentam os resultados de previsão de demanda de área para a implantação de leitos de secagem para o desaguamento dos volumes estimados de lodo, expressos em termos das medianas e 95º percentis das distribuições de frequência resultantes nos três cenários considerados para o acúmulo de lodo no decantador: três, seis e 12 meses.



**Tabela 4 – Estimativa da demanda de área ( $m^2$ ) para o desaguamento do lodo armazenado no decantador da ETA UFV ao longo de três, seis e 12 meses (medianas e percentis 95%).**

Período de acúmulo	Mediana	95%
3 meses	252,8	809,3
6 meses	262,2	701,4
12 meses	360,0	926,8

As estimativas de demanda de área não foram elevadas. Mesmo tomando como referência o valor do percentil 95% referente a 12 meses de armazenamento de lodo no decantador, a estimativa de área necessária seria inferior ao sugerido por Richter (2001) como limite prático para utilização do leito de secagem como unidade de desaguamento do lodo ( $1.500 m^2$ ). A opção pelo valor do percentil 95% constituiria solução com margem de segurança, porém conservadora. Ou seja, considerando as incertezas em torno dos parâmetros de projeto, a probabilidade de que a área excetuada se mostre insuficiente seria de apenas 5%. Na prática, essa solução pode representar superdimensionamento da unidade e consequente aumento desnecessário de custos. A adoção da mediana implica redução acentuada de área e, assim, economia na construção. Porém a segurança do dimensionamento cai. Entretanto, o eventual subdimensionamento do leito de secagem resultaria apenas em taxa de aplicação de sólidos acima do previsto e consequências tais como aumento do tempo de desaguamento do lodo e, ou produção de torta menos desidratada, nada mais.



**Figura 4 – Histogramas das distribuições de probabilidade e curvas de frequência acumulada das estimativas da área necessária ao desaguamento do lodo armazenado no decantador da ETA UFV ao longo de três, seis e 12 meses.**

## CONCLUSÕES

De forma talvez pioneira, apresenta-se aqui um estudo de caso de dimensionamento de leito de secagem de lodo de ETA com base em modelagem estocástica, isto é, levando em consideração incertezas em torno de variáveis de entrada do modelo de dimensionamento. Os resultados, expressos em termos de distribuição de probabilidades, permitem flexibilidade na tomada de decisão de acordo com aspectos técnicos e econômicos. O exercício aqui desenvolvido teve como base formulações empíricas disponíveis na literatura, cujas variáveis de entrada se encontram referendadas em bancos de dados de monitoramento da ETA em questão, outras apenas em dados de literatura. Sugere-se, pois, que refinamentos futuros da técnica e dos modelos aqui empregados tenham por base, ao máximo possível, dados de campo e específicos de cada ETA em análise. Testes de análise de sensibilidade poderão apontar quais variáveis de entrada impactam de forma mais determinante os resultados e que, portanto, merecem mais atenção e, ou melhor apropriação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 10004 – Resíduos sólidos – classificação*. Rio de Janeiro, 2004.
2. BATISTA, L.A.; CABRAL, V.A.L. *Ensaio com lodo do decantador da ETA UFV: caracterização, desaguamento em leito de secagem e possibilidades de aproveitamento*. Projeto Final de Curso, Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2011.
3. CORDEIRO, J.S. Remoção natural de água de lodos de ETAs utilizando leitos de secagem e lagoas de lodo. In: REALI, M.A.P. (coordenador). *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. 240p. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 1999.
4. PALISADE CORPORATION. Manual do usuário. @Risk. *Add-In do Microsoft® Excel para simulação e análise de riscos*, versão 5.5, 2009.
5. REALI, M.A.P. (coordenador). *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. 240p. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 1999.
6. RICHTER, C.A. *Tratamento de lodos de estações de tratamento de águas*. 102p. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2001.
7. SARON, A.; LEITE, V.M.B. Quantificação de lodo em estação de tratamento de água. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, João Pessoa/PB. *Anais...* ABES, 2003.
8. SOUZA, F.G.C. ; CORDEIRO, J.S. Quantificação de sólidos em estação de tratamento de água convencional de ciclo completo com decantador de alta taxa. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Campo Grande - MS. *Anais...* ABES, 2005.