

II-381 - AVALIAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE N, P E K E METAIS PESADOS NO LODO DE ESGOTO HIGIENIZADO COM Ca(OH)_2 , VISANDO A DISPOSIÇÃO AGRÍCOLA EM SOLO DA REGIÃO AMAZÔNICA

Lia Martins Pereira⁽¹⁾

Engenheira Sanitarista pela Universidade Federal do Pará. Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC/UFPA). Doutoranda em Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA/UFPA). Professora substituta da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental (FAESA/UFPA).

Neyson Martins Mendonça⁽²⁾

Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal do Pará. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo (USP). Professor do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental (FAESA/UFPA).

Luiza Carla Girard Mendes Teixeira⁽³⁾

Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará. Mestre em Engenharia Civil (opção Saneamento) pela Universidade de São Paulo. Doutora em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido pela Universidade Federal do Pará. PhD em Tratamento Avançado de Esgotos Domésticos no Departamento de engenharia Química e Tecnologia de Meio Ambiente da Universidade de Valladolid-Espanha.

Brenda Gonçalves Piteira Carvalho⁽⁴⁾

Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental na Universidade Federal do Pará. Bolsista CNPq vinculada ao Grupo de Estudos em Gerenciamento de Água e Reuso de Efluentes (GESA).

Leila Pereira Palheta⁽⁵⁾

Bacharel em Biomedicina pela Escola Superior da Amazônia (Esamaz). Bolsista CNPq vinculada ao Grupo de Estudos em Gerenciamento de Água e Reuso de Efluentes (GESA).

Endereço⁽¹⁾: Rua Augusto Corrêa, s/n - Guamá - Belém - PA - CEP 66075-110 - Brasil - Tel: (91) 3201-7252 - e-mail: liapereira@ufpa.br

RESUMO

O lodo de esgoto é um material residual gerado no tratamento de esgoto, rico em matéria orgânica e nutrientes, sendo seu reaproveitamento como biofóssido na agricultura uma forma ambientalmente viável. Entretanto, a possível presença de poluentes como metais pesados e patógenos são fatores que podem provocar impactos ambientais negativos. Por isso, a legislação ambiental estabelece valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e torna obrigatória a etapa de higienização do lodo para redução de patógenos. A cal hidratada (Ca(OH)_2) é um produto muito utilizado na higienização de lodo de esgoto. Assim, neste trabalho, objetivou-se investigar a disponibilidade de N, P e K e metais pesados no lodo higienizado com Ca(OH)_2 em dosagens de 25% e 50%, proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Vila da Barca, visando a sua utilização como biofóssido na adubação das culturas de açaí, cupuaçu e coco, em solos do Estado do Pará. Os resultados encontrados, permitiram realizar importantes constatações, tais como: a avaliação quanto a influência das dosagens testadas de Ca(OH)_2 , revelou que as maiores concentrações médias das variáveis verificadas no lodo foram observadas na dosagem de 25%, sendo o nitrogênio o nutriente mais disponível em ambas as dosagens testadas. Quanto a aplicabilidade do lodo higienizado no solo, os resultados expressaram que o efeito sobre o pH demonstrou que o lodo higienizado possui valor abaixo da necessidade de calagem para correção da acidez do solo avaliado, sendo necessário fazer a complementação da calagem do solo para as culturas testadas. Outra constatação importante quanto à aplicação no solo é que aproximadamente 100% dos metais avaliados obtiveram concentrações acima dos valores de prevenção estabelecidos na legislação ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Agente alcalinizante – Influência, Higienização do lodo de esgoto, Disposição agrícola.

INTRODUÇÃO

O tratamento de esgotos resulta na produção de efluentes líquidos e de resíduos sólidos. O lodo de esgoto, é um resíduo rico em matéria orgânica e nutrientes. Quando descarregado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), geralmente, passa por processo de desidratação (secagem), tornando-se, mais um passivo ambiental que deve ser disposto de forma adequada. A busca por soluções que não seja apenas o descarte desse material e, que não causem impacto ao meio ambiente, vem tornando-se uma preocupação crescente não só aqui como em outros países. Diversas técnicas são utilizadas para o reaproveitamento adequado do lodo de esgoto, de acordo com Bettiol e Camargo (2006), dentre elas estão: reuso industrial (produção de agregado leve, fabricação de tijolos e cerâmica); conversão em óleo combustível; recuperação de solos (recuperação de áreas degradadas); uso agrícola e florestal (aplicação direta no solo, compostagem, fertilizante), etc.

Vários estudos no Brasil comprovaram a eficácia do uso agrícola de lodo de esgoto, entretanto, a possível presença de poluentes como metais pesados, patógenos e compostos orgânicos persistentes são fatores que podem provocar impactos ambientais negativos. Uma vez adicionados ao solo, alguns dos poluentes podem entrar na cadeia alimentar ou acumular-se no próprio solo, no ar, nas águas superficiais, nos sedimentos e nas águas subterrâneas.

O uso agrícola do lodo de esgoto é uma forma ambientalmente viável de dispor esse material, mas que deverá ser realizada sem oferecer riscos à saúde e ao meio ambiente; atendendo ao disposto nas Resoluções CONAMA Nº 375/2006, que torna obrigatória a etapa de higienização do lodo para redução de patógenos e CONAMA Nº 420/2009, que, entre outras coisas, dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas.

Assim, esse trabalho objetivou, especificamente, investigar a disponibilidade de N, P e K e metais pesados no lodo higienizado com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em dosagens de 25% e 50%, oriundo de sistema de tratamento de esgoto sanitário, visando a sua utilização como bio-sólido na adubação das culturas de açaí, cupuaçu e coco em solos do Estado do Pará (região amazônica).

As análises experimentais foram realizadas no Laboratório Multiusuário de Tratabilidade de Águas (LAMAG), localizado na Universidade Federal do Pará (UFPA) e contou com a colaboração da Companhia de Saneamento do Pará - COSANPA e da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Amazônia Oriental.

MATERIAIS E MÉTODOS

O lodo selecionado para o desenvolvimento da pesquisa é anaeróbico, proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Vila da Barca, localizada no município de Belém, Estado do Pará – Brasil. A ETE é constituída de sistema composto de: Reator de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente + Biofiltro Aerado Submerso + Decantador Secundário + Desinfecção com radiação Ultra-violeta (UASB+BFs+DS+UV).

DELINEAMENTO DAS FASES EXPERIMENTAIS (FASES I E II)

Fase I: Higienização do lodo.

Esta fase realizou-se em duas sub-fases: 1 – Investigação da disponibilidade de N, P, K e metais pesados, antes da higienização do lodo; e 2 – Investigação da disponibilidade de N, P, K e metais pesados após a higienização do lodo com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, em dosagens de 25% e 50%.

Fase II: Estimativa da taxa de aplicação do lodo higienizado no solo.

Nesta fase objetivou-se estimar através de cálculos a taxa de aplicação do lodo higienizado em um solo do Estado do Pará, em culturas aptas para aplicação (açaí, cupuaçu e coco), considerando as recomendações quanto à aptidão do solo, as quantidades a serem aplicadas, à incorporação ao solo, a reatividade da cal e o aumento das concentrações de substâncias inorgânicas (metais pesados) presentes no solo.

PLANO DE MONITORAMENTO EXPERIMENTAL

No plano de monitoramento experimental foram previstas duas campanhas de amostragem, com quatro coletas cada, para subsidiar as determinações das variáveis propostas nas fases I e II da pesquisa. Também foram descritos os procedimentos utilizados para monitoramento experimental e análise dos resultados.

- Coleta e preparação das amostras.

Amostras representativas de lodo (50 litros) foram coletadas (quinzenalmente, com intervalo de 30 dias entre as campanhas) na válvula de descarte do reator UASB da ETE Vila da Barca e transportadas até o L AMAG (UFPA). Na preparação no laboratório, as amostras passaram por processo de secagem ao ar livre, para eventual redução do teor de umidade de 98% para 5%. Após a secagem foram maceradas manualmente em almofariz de porcelana e, em seguida, passadas em peneira com malha de abertura de 2 mm, visando garantir uma maior homogeneidade e representatividade das amostras para realização dos protocolos experimentais.

- Procedimentos analíticos experimentais.

A realização das análises experimentais das variáveis N, P e K foram procedidas de acordo com o Manual de Métodos de Análise do Solo - Embrapa (1997). Quanto a determinação das concentrações de metais pesados, foram realizadas de acordo com os métodos 3050 e 3051, estabelecidos na EPA SW-846 (1995b).

- Análise dos resultados das Fases I e II.

A análise dos resultados de determinação das variáveis propostas neste trabalho de pesquisa foi realizada através de análises de Estatística descritiva (Fases I e II) e Estatística Analítica, somente para Fase I.

Para Fase I (higienização do lodo), a estatística descritiva possibilitou avaliar as variações nos dados amostrais do lodo higienizado, com dosagens de 25% e 50% de Ca(OH)_2 . Foram realizadas inferências (Média, Máximo, Mínimo e gráficos). Enquanto que, com a aplicação da estatística analítica objetivou-se identificar qual a melhor dosagem (25% e 50%) de Ca(OH)_2 a ser utilizada na higienização do lodo a ser aplicado para fins agrícolas. Na avaliação através de estatística analítica foram realizadas inferências com: Teste Hipóteses Paramétrico e Não-Paramétrico.

A aplicação dos testes de hipóteses, foi precedida de teste de normalidade para avaliar a distribuição dos dados amostrais. O teste de normalidade aplicado foi o *Shapiro-Wilk* (teste W). O mesmo foi escolhido, pois calcula amostras: $2 < n < 50$. O resultado do teste é obtido dividindo-se o quadrado da combinação linear apropriada dos valores ordenados da amostra pela variância simétrica estimada (Ayes, 2012).

Para a Fase II (Estimativa da taxa de aplicação do lodo higienizado no solo), a estatística descritiva possibilitou avaliar, através de gráficos, as variações nos dados amostrais, ou seja, as concentrações das variáveis estudadas no lodo higienizado a dosagens de 25% e 50% de Ca(OH)_2 . Para aplicação de análises estatísticas os softwares utilizados na avaliação dos resultados das variáveis analisadas neste trabalho foram o Minitab 13.1 e o Biostat 5.0.

RESULTADOS OBITIDOS FASE I – HIGIENIZAÇÃO DO LODO

a) Avaliação dos resultados através de Estatística Descritiva.

A estatística descritiva possibilitou avaliar as variações nos dados amostrais do lodo higienizado, com dosagens de 0%, 25% e 50% de Ca(OH)_2 . Os resultados quanto as concentrações médias de N_{kj} , P e K e metais pesados no lodo da ETE Vila da Barca, antes e depois da higienização com Ca(OH)_2 são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Concentrações das variáveis analisadas no lodo antes e após higienização com Ca(OH)_2 .

Lodo				Não-higienizado			Higienizado 25%			Higienizado 50%		
Estatística descritiva		n*		Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	Média
Variáveis	g/kg	N_{Kj} **	8	10,08	11,62	10,96	9,38	10,36	9,94	7,28	8,82	7,74
		P	8	0,04	0,05	0,04	0,03	0,05	0,05	0,03	0,05	0,04
		K	8	0,09	0,11	0,10	0,09	0,10	0,09	0,07	0,10	0,09
	Metais pesados (mg/kg)	As	8	0,65	1,13	0,83	0,54	0,82	0,65	0,5	0,67	0,57
		Ba	8	179,9	275,7	207,55	156,6	186	175,58	137,9	171,3	161,34
		Cr	8	43,38	113,9	69,34	28,82	40,47	35,5	29,53	34,89	31,57
		Cu	8	138,4	189,8	156,01	88,79	130,6	105,2	77,74	101,7	87,52
		Ni	8	11,24	30,3	14,53	7,64	10,63	9,2	7,43	9,66	8,18
		Pb	8	34,73	81,38	42,69	23,06	32,57	27,09	21,75	24,85	23,06
		Se	8	0,04	0,21	0,10	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
		Zn	8	797,3	1141	941,55	630,3	860,4	724,8	589,1	729,4	643,19

* - Número de Amostras.

** - Nitrogênio Kjeldahl.

Desta forma, com base nos valores médios dessas substâncias apresentados na Tabela 1, é possível afirmar que após a higienização a concentração de N_{Kj} sofreu uma pequena redução após a mistura com cal a dosagem de 25%, se comparado ao lodo não-higienizado, de 10,96g/kg para 9,94g/kg (Figura 1 - a). Essa perda foi mais acentuada na dosagem de 50%, de 10,96g/kg para 7,74 g/kg.

Comparando os valores médios de P e K no lodo não higienizado e pós-higienização, verifica-se que não houve alterações consideráveis nas concentrações (Figura 1- b e c). A concentração de K é baixa porque esse elemento é altamente solúvel em água e durante o de tratamento de esgoto sai diluído no efluente.

Os valores expressos na Tabela 1 indicaram que houve redução nas concentrações de todos os metais pesados analisados no lodo após higienização, nas duas dosagens de Ca(OH)_2 utilizadas (Figura 2). Quanto à variação entre as dosagens do agente alcalinizante, verificou-se que a redução mais acentuada nas concentrações dessas substâncias ocorreu no lodo higienizado à dosagem de 50%. O metal que apresentou maior concentração entre os elementos analisados foi o Zn. Contudo, é importante ressaltar que todos os elementos analisados no lodo não-higienizado e higienizado, em ambas dosagens de cal testadas, apresentaram valores que não ultrapassam o limite para aplicação em solo agrícola, estabelecido na Resolução CONAMA N° 375/2006.

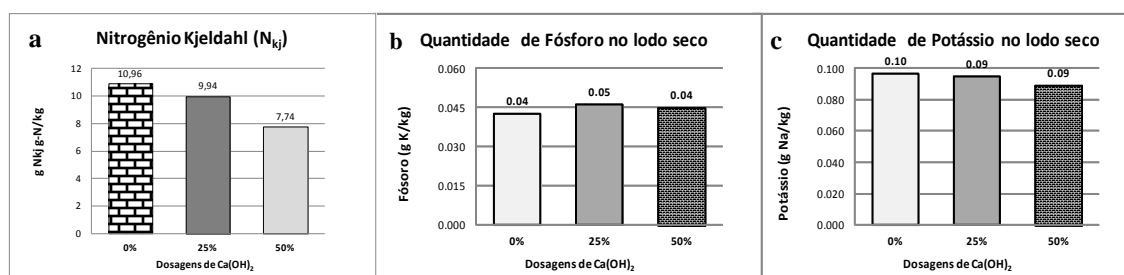


Figura 1: Valores médios de Nitrogênio Kjeldahl (a), Fósforo (b) e Potássio (c), antes e após higienização do lodo.

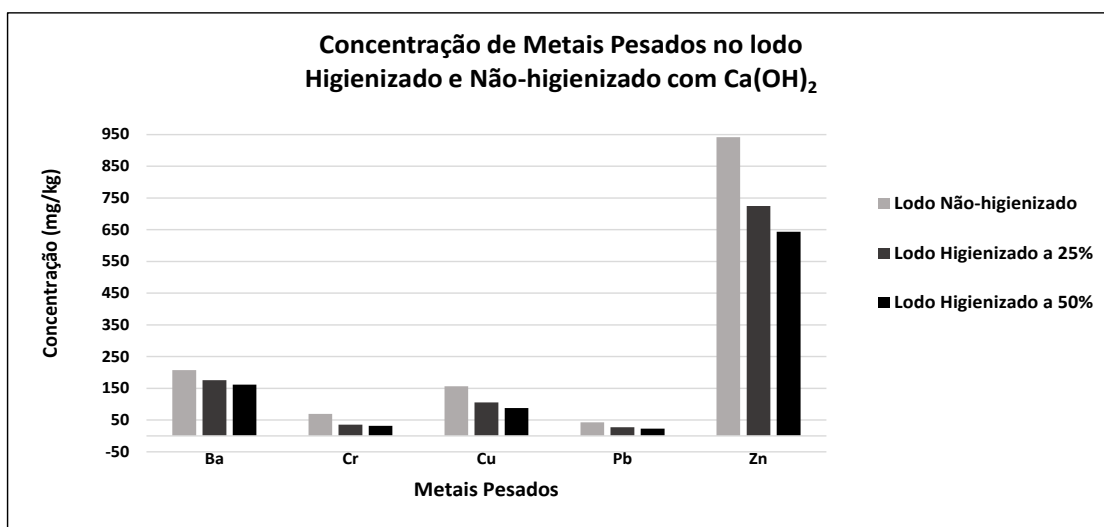


Figura 2: Valores médios de metais pesados, antes e após higienização do lodo.

Quanto à avaliação da disponibilidade de nitrogênio nas amostras de lodo, visando o aproveitamento nutricional para as culturas testadas para o solo avaliado, foi necessário realizar, primeiramente, o fracionamento das formas nitrogenadas no lodo, antes e depois da higienização com Ca(OH)_2 . Vale ressaltar que estes resultados foram calculados pelo produto da fração de mineralização do lodo (20%) com a soma das formas nitrogenadas (N_{Kj} , N_{NH_3} e $\text{N}_{\text{NO}_3} + \text{N}_{\text{NO}_2}$), através da Equação 1, descrita na Resolução CONAMA N° 375/2006. A disponibilidade média de nitrogênio encontrada nas amostras de lodo analisadas foi respectivamente 2,55, 2,29 e 1,75 g/kg, para o lodo bruto e higienizado a 25% e 50%, descritos na Tabela 2.

$$\text{N disponível (g/kg)} = (\text{FM}/100) \times (\text{N}_{\text{Kj}} - \text{N}_{\text{NH}_3}) + \text{N}_{\text{NH}_3} + (\text{N}_{\text{NO}_3} + \text{N}_{\text{NO}_2}) \quad \text{Equação (1)}$$

Em que: FM = Fração de mineralização do nitrogênio (%); N_{Kj} = Nitrogênio Keldahl = Nitrogênio orgânico + Nitrogênio amoniacal; N_{NH_3} = Nitrogênio amoniacal; N_{NO_3} e N_{NO_2} = Nitrogênio nitrato e nitrito.

Tabela 2: Disponibilidade de nitrogênio no lodo, antes e depois da higienização.

Situação do lodo	N_{Kj} (g/kg)	N_{NH_3} (g/kg)	$\text{N}_{\text{NO}_3} + \text{N}_{\text{NO}_2}$ (g/kg)	N- disponível (g/kg)
Não higienizado	10,96	0,16	0,23	2,55
Higienizado com Ca(OH)_2 a 25%	9,94	0,14	0,19	2,29
Higienizado com Ca(OH)_2 a 50%	7,74	0,14	0,09	1,75

De acordo com os valores apresentados na Tabela 2, é seguro afirmar que a quantidade de nitrogênio disponível no lodo higienizado a 25% de cal (5,71 kg N/ano) é suficiente para adubar 60% da área agricultável em hectare para a cultura de cupuaçu e 57% da cultura de dendê, durante o primeiro ano. De acordo com Castro *et al.* (2007), estas culturas possuem como recomendação da quantidade de nitrogênio na adubação 9,6 kg N/ha e 10 kg N/ha, respectivamente, em um ano. Os percentuais de 40% e 43% de nitrogênio que faltarão na adubação poderão ser supridos com adubação mineral. No entanto, para aplicação do lodo higienizado com Ca(OH)_2 a 25% no solo devem ser consideradas, além das exigências nutricionais das culturas beneficiadas, as características do solo a ser adubado.

b) Avaliação dos resultados através de Estatística Analítica.

Na avaliação das variáveis estudadas (N, P e K e metais pesados) através de testes de hipóteses paramétricos (teste *t-student*) e não-paramétricos (teste *Wilconcon-W*), as seguintes hipóteses foram formuladas:

H_0 = A média das concentrações de N (N_{kj} , N_{NH_3} e $N_{NO_3} + N_{NO_2}$), P e K e metais pesados no lodo é igual nas dosagens de 25% e 50% de $Ca(OH)_2$.

H_1 = A média das concentrações de N (N_{kj} , N_{NH_3} e $N_{NO_3} + N_{NO_2}$), P e K e metais pesados no lodo é diferente nas dosagens de 25% e 50% de $Ca(OH)_2$.

Como pré-requisito para aplicação dos testes de hipóteses, os dados representantes das variáveis em estudo foram analisados quanto a sua distribuição amostral, através de *teste de Normalidade*. Os testes de hipóteses foram aplicados no par de escores dos mesmos indivíduos (25% e 50%) das variáveis representativas no estudo. Foi aplicado o teste *t-student* para as variáveis que apresentaram distribuição normal (paramétrica), com o nível de significância (α) igual a 0,05 para um intervalo de confiança de 95% e graus de liberdade igual a 7 (sete), onde $(n-1) = (8-1) = 7$. Os dados amostrais das variáveis que apresentaram uma distribuição não-paramétrica tiveram suas hipóteses testadas com o teste *Wilconxon (W)*, aplicado com o nível de significância (α) igual a 0,01 para um intervalo de confiança de 99%. Sendo, que nos dois testes aplicados para rejeitar ou deixar de rejeitar a hipótese nula (H_0) foi observado no resultado do teste o valor p . Se o valor $p \leq \alpha$ rejeitar H_0 ; se o valor $p \geq \alpha$, deixar de rejeitar H_0 . Os resultados dos testes estão ilustrados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Resultado do teste de hipóteses, t-student e Wilconxon (W), aplicado nos pares de variáveis representativas da disponibilidade de nitrogênio no lodo higienizado com $Ca(OH)_2$.

Hipóteses	Nº de pares	Graus de liberdade	t* ou T**	p (bilateral)	Resultado	Teste aplicado
N_{Norg} 25% e 50%	8	7	11,4649	$< 0,0001$	$p < \alpha$	t-student
N_{NH_3} 25% e 50%	8	7	9,0000	0,7532	$p > \alpha$	Wilconxon
N_{Nkj} 25% e 50%	8	7	12,0607	$< 0,0001$	$p < \alpha$	t-student
$N_{NO_3} + N_{NO_2}$ 25% e 50%	8	7	6,0000	0,0929	$p > \alpha$	Wilconxon

Tabela 4: Resultado do teste de hipóteses, t-student, aplicado nos pares de variáveis representativas dos metais pesados no lodo higienizado com $Ca(OH)_2$.

Hipóteses	Nº de pares	Graus de liberdade	t	p (bilateral)	Resultado	Teste aplicado
As 25% e 50%	8	7	2,7174	0,0298	$p < \alpha$	t-student
Ba 25% e 50%	8	7	6,6949	$< 0,0001$	$p < \alpha$	t-student
Cr 25% e 50%	8	7	3,5267	0,0096	$p < \alpha$	t-student
Cu 25% e 50%	8	7	5,1285	0,0014	$p < \alpha$	t-student
Ni 25% e 50%	8	7	2,3064	0,0544	$p > \alpha$	t-student
Pb 25% e 50%	8	7	4,4727	0,0029	$p < \alpha$	t-student
Se 25% e 50%	8	7	- 0,7276	0,4904	$p > \alpha$	t-student
Zn 25% e 50%	8	7	3,8794	0,0060	$p < \alpha$	t-student

De acordo com resultado apresentado na Tabela 3, o teste *t-student* forneceu informações indicando que foi aceita a hipótese alternativa (H_1), pois apresentou valores entre as duas dosagens do agente alcalinizante com diferenças muito acentuadas, especialmente, maior redução nos valores médios das variáveis N_{org} e N_{kj} , após a mistura lodo/ $Ca(OH)_2$ na dosagem de 50%. Quanto ao resultado do teste *Wilconxon* foi aceita a hipótese nula (H_0), ou seja, não houve variação significativa na concentração das variáveis P , K e N_{H_3} e $N_{O_2} + N_{O_3}$, após a higienização do lodo, em ambas as dosagens do agente alcalinizante testado.

Quanto aos resultados apresentados na Tabela 4, o teste de hipóteses escolhido para avaliar as variáveis representativas dos metais pesados estudadas no lodo higienizado foi o *t-student*, pois os dados avaliados apresentaram somente distribuição normal (distribuição paramétrica). O teste indicou que há evidência suficiente para garantir a rejeição da afirmativa da hipótese nula (H_0) para os seguintes pares de variáveis: As, Ba, Cr, Cu, Pb e Zn. Então, para esses pares de variáveis foi aceita a hipótese alternativa (H_1) onde a média desses pares de variáveis é diferente nas referidas dosagens de cal utilizada na higienização do lodo. Desta forma, é seguro afirmar, para um intervalo de confiança de 95% e através do valor t positivo, que houve redução mais acentuada nos valores dessas variáveis após a mistura lodo/ $Ca(OH)_2$ na dosagem de 50%.

Quanto aos pares de variáveis, Ni e Se, o teste forneceu informações indicando que há evidência suficiente para garantir a aceitação da afirmativa da hipótese nula (H_0). Desta forma, é possível afirmar que não houve variação considerável entre as dosagens (25% e 50%) de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, para essas duas variáveis.

RESULTADOS OBITIDOS FASE II – ESTIMATIVA DA TAXA DE APLICAÇÃO DO LODO NO SOLO

Segundo Andreoli *et al.* (2001), a taxa de aplicação do bio sólido no solo, além de ser um instrumento de controle da fertilidade, constitui-se em mais um instrumento técnico de avaliação e controle da segurança do uso de bio sólidos. Assim, viabilizando o planejamento cuidadoso para evitar que a aplicação comprometa a qualidade da água superficial ou subterrânea, bem como o potencial produtivo do solo. Porém, neste estudo, a avaliação da taxa de aplicação do lodo higienizado não foi realizada através de ensaios experimentais. Desta forma, esta taxa foi estimada através de cálculos que incluíram: as taxas de aplicação de nutrientes (N_{kj} , P e K); o poder reativo da cal e o acúmulo de metais no solo após aplicação do lodo higienizado, levando em consideração as características do solo selecionado para avaliação. No cálculo foram utilizados dados da análise química de um latossolo amarelo do município de Marabá – PA (Tabela 5), estudado por Reis (2009).

Considerando que o lodo que gerou o bio sólido sofreu reação alcalina, deve-se observar o poder reativo da cal utilizada, evitando-se o aumento excessivo do pH do solo após aplicação, que pode provocar desequilíbrio de nutrientes no mesmo. Sendo que a reatividade da cal é função do Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) da cal utilizada na higienização do lodo em relação ao solo na agricultura. No Brasil, grande parte dos solos possuem pH ácido, havendo necessidade de aplicar corretivos para melhorar o potencial produtivo, uso do lodo higienizado com cal poderá substituir a aplicação do calcário, em dosagens adequadas. Também foram observadas as recomendações de adubação, indicadas em Castro *et al.* (2007), para as três culturas para aplicação do bio sólido (Tabela 6).

As Tabelas 5 e 6 apresentam, respectivamente, os atributos químicos de um solo do município de Marabá-PA (latossolo amarelo) e as recomendação de adubação para culturas selecionadas no estudo em solos do Estado do Pará.

Tabela 5: Atributos químicos de um solo do município de Marabá (latossolo amarelo)

Profundidade (m)	pH em H_2O	Al^{+++} (cmol. dm^{-3})	H+L (cmol. dm^{-3})	Ca (cmol. dm^{-3})	Mg (cmol. dm^{-3})	K (cmol. dm^{-3})	Na (cmol. dm^{-3})	Soma das bases	CTC*	V1** (%)
0,20	4.1	1.30	5.1	0.36	0.23	0.17	0.07	0.83	5.93	14.00
0,40	4.1	0.43	4.9	0.16	0.10	0.12	0.05	0.43	5.33	8.00

* - Capacidade de Troca Catiônica do solo

** - Saturação de bases do solo = Soma das bases do solo/CTC = $(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K}) / \text{CTC}$

Tabela 6: Recomendação de adubação para culturas em solos do Estado do Pará.

Variáveis	Açaí	Cupuaçu	Coco
N_{kj} (g.planta ⁻¹)	45	30	112
P (g.planta ⁻¹)	30	50	200
K (g.planta ⁻¹)	80	40	300
V2 (V% p/ cultura)	60	50	45
Profundidade da cova (m)	0.20	0.40	0.40

Definidas a demandas de nutrientes para as culturas selecionadas para aplicação do lodo higienizado, em ambas as dosagens de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, os seguintes cálculos foram efetuados para avaliar a aplicação do bio sólido:

- A verificação do efeito sobre o pH do solo (verificação da necessidade de calagem do solo – NC).

A necessidade de calagem do solo foi calculada de acordo com a Equação 2.

$$\text{NC (ton.ha}^{-1}\text{)} = (\text{V2} - \text{V1}) \times \text{CTC} \times f \times \text{PRNT}$$

Equação (2)

NC = necessidade de calação (ton.ha⁻¹)
V2 = V% para cultura
V1 = V% do solo
CTC = Capacidade de Troca Catiônica do solo
f = fator de incorporação (0,20 ou 0,40 m para biossólido) = 1
PRNT = Poder Relativo de Neutralização da Ca(OH)₂ = 120

Ao analisar os resultados sobre o efeito da adição do lodo calcado com Ca(OH)₂ sobre o pH do solo, notou-se que a cal adicionada com aplicação do lodo higienizado em ambas as dosagens (25% e 50%), para adubar as três culturas selecionadas, não superou a necessidade de calagem do solo, demonstrando que o lodo higienizado a ser adicionado no solo possui valor abaixo da necessidade de calagem para correção da acidez. Desta forma, sendo necessário fazer a complementação de calagem, que para as culturas testadas no solo avaliado. Entretanto, foi somente para adubação da cultura de coco, que o lodo higienizado a dosagem de 50% adicionou 1519 kg Ca(OH)₂/ha, valor mais aproximado da necessidade de calagem do solo 1640 kg Ca(OH)₂/ha, ilustrado na Figura 3.

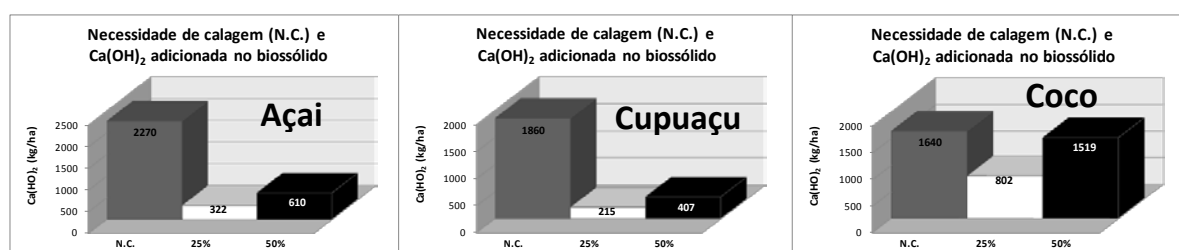


Figura 3 – Efeito do pH no solo com adubação do açaí, cupuaçu e coco.

- Cálculo da verificação do fornecimento de nutrientes e complementação mineral.

Na verificação do fornecimento de nutrientes e complementação mineral, para as três culturas testadas no solo avaliado, foram utilizadas as Equações 3, 4 e 5, para realização dos seguintes cálculos:

- ✓ Conteúdo disponível de nutrientes no biossólido (%) - Qdisp

$$Q_{disp} (\%) = \text{concentração do nutriente no biossólido} \times 0,5 \quad \text{Equação (3)}$$

- ✓ Quantidade aplicada (kg.ha⁻¹) – Qapl

$$Q_{apl} = (Q_{disp}/100) \times T_x \cdot apl. \quad \text{Equação (4)}$$

- ✓ Complementação de nutrientes (kg.ha⁻¹) – Compl.

$$Compl. (kg.ha^{-1}) = \text{Recomendação do nutriente} - Q_{apl} \quad \text{Equação (5)}$$

Os resultados dos cálculos estimados para verificação do fornecimento de nutrientes e necessidade de complementação mineral, para as três culturas testadas, podem ser observados nas Tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7: Fornecimento de nutrientes e complementação mineral para adubação da cultura de açaí.

Nutriente	Concentração do nutriente (mg.kg ⁻¹)		Conteúdo disponível no biossólido (%)		Quantidade aplicada (kg.ha ⁻¹)		Recomendação do nutriente (kg.ha ⁻¹)	Complementação necessária (kg.ha ⁻¹)	
	25%	50%	25%	50%	25%	50%		25%	50%
N _{ki}	9.8	7.6	4.9	3.8	45.00	45.00	45	0.00	0.00
P	0.05	0.04	0.0003	0.0002	0.30	0.30	30	29.70	29.70
K	0.09	0.09	0.0005	0.0005	0.80	0.80	80	79.20	79.20

Tabela 8: Fornecimento de nutrientes e complementação mineral para adubação da cultura de cupuaçu.

Nutriente	Concentração do nutriente (mg.kg ⁻¹)		Conteúdo disponível no biossólido (%)		Quantidade aplicada (kg.ha ⁻¹)		Recomendação do nutriente (kg.ha ⁻¹)	Complementação necessária (kg.ha ⁻¹)	
	25%	50%	25%	50%	25%	50%		25%	50%
N _{kj}	9.8	7.6	4.9	3.8	30.00	30.00	30	0.00	0.00
P	0.05	0.04	0.0003	0.0002	0.50	0.50	50	49.50	49.50
K	0.09	0.09	0.0005	0.0005	0.40	0.40	40	39.60	39.60

Tabela 9: Fornecimento de nutrientes e complementação mineral para adubação da cultura de coco.

Nutriente	Concentração do nutriente (mg.kg ⁻¹)		Conteúdo disponível no biossólido (%)		Quantidade aplicada (kg.ha ⁻¹)		Recomendação do nutriente (kg.ha ⁻¹)	Complementação necessária (kg.ha ⁻¹)	
	25%	50%	25%	50%	25%	50%		25%	50%
N _{kj}	9.8	7.6	4.9	3.8	112.00	112.00	112	0.00	0.00
P	0.05	0.04	0.0003	0.0002	2.00	2.00	200	198.00	198.00
K	0.09	0.09	0.0005	0.0005	3.00	3.00	300	297.00	297.00

Os valores encontrados de aporte de nutrientes para as três culturas testadas, ilustrados nas Tabelas 7, 8 e 9, não ultrapassaram os limites recomendados para lodo higienizado, em ambas as dosagens de cal testadas, eliminando o risco de lixiviação de nutrientes excedentes. Também demonstraram que há necessidade de complementação nutricional de P e K para adubação das três culturas, com exceção para o nitrogênio total (na forma Keldahl) que atende 100% da recomendação nutricional das culturas no solo selecionado para avaliação no estudo.

- Cálculo da área necessária para disposição do lodo higienizado gerado no reator UASB.

Para realização do cálculo foram consideradas: a estimativa da produção do lodo no reator UASB em função da população média atendida; a produção mássica percapita do lodo entre 12 e 18 g SS/hab.dia e produção volumétrica percapita de 0,2 a 0,6 L/hab.dia (Andreoli *et al.*, 2001). Para estimar a área necessária para aplicação do biossólido gerado com o lodo higienizado as Equações 6, 7 e 8 foram utilizadas.

Dados:

População média atendida – 1000 hab.

Produção mássica percapita do lodo – 15 g SS/hab.dia

Produção volumétrica percapita – 0,4 L/hab.dia

Peso específico do lodo – 1,05

$$\text{Carga do lodo (kg SS/dia)} = (\text{População} \times \text{Produção mássica}) / 1000 \quad \text{Equação (6)}$$

$$\text{Vazão do lodo (m}^3\text{/dia)} = (\text{Produção volumétrica percapita} \times \text{População}) / 1000 \quad \text{Equação (7)}$$

$$\text{Área necessária (ha.ano}^{-1} \text{ ou m}^2\text{.ano}^{-1}) = (\text{Tx.apl. Nutriente}) / (\text{carga de SS no lodo}) \quad \text{Equação (8)}$$

As áreas estimadas para disposição do lodo higienizado, em ambas as dosagens de Ca(OH)₂, de acordo com taxa de aplicação de nutrientes e culturas selecionadas, podem ser observadas na Figura 4.

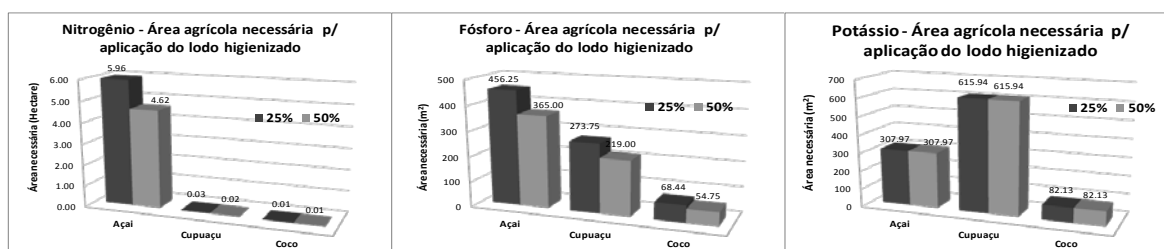


Figura 4 – Área agrícola necessária (nitrogênio, potássio e fósforo).

Os resultados do cálculo da área agrícola a ser atendida com o lodo demonstram que a cultura de açaí é a que mais se beneficia do nitrogênio disponível no lodo caçado, atendendo áreas de 5,96 ha e 4,62 ha, nas dosagens de 25% e 50%, respectivamente (Figura 4). Enquanto que, as áreas atendidas, em função da disponibilidade de P e K, obtiveram valores muito pequenos, variando, respectivamente, entre 54,75 e 656,25 m² e 82,13 e 615,94 m².

- *Cálculo do acúmulo de metais pesados no solo após a aplicação do lodo caçado as dosagens de 25% e 50% de Ca(OH)₂ em latossolo amarelo do Estado do Pará, para adubação das culturas de açaí, cupuaçu e coco.*

O conteúdo de metais pesados nos bio sólidos, em geral, é superior ao encontrado nos solos, e seus limites de toxicidade são bastante estreitos, o que se reflete na necessidade de acompanhamento constante das quantidades destes elementos aplicados ao solo (Andreoli *et al.*, 2001). Assim, intencionando avaliar se as concentrações finais encontradas para os elementos analisados irão ou não ultrapassar os valores orientadores de prevenção e aporte agrícola máximo para metais pesados, dispostos na resolução N° 420/2009 do CONAMA.

O cálculo foi baseado em dados de teores de metais encontrados no solo do Estado do Pará, município de Marabá, (latossolo amarelo) em estudo realizado por Birani (2010), Tabela 5, e as concentrações de metais pesados encontradas no lodo higienizado produzido no sistema de tratamento de esgoto da Vila da Barca. As equações utilizadas na avaliação do acúmulo metais estão descritas abaixo.

- ✓ Cálculo da quantidade de cada metal adicionado – Qmetal (g/ha)

$$Q_{\text{metal}} \text{ (g/ha)} = \text{BIOseca} \times T_{\text{metal}}$$

Equação (9)

Qmetal = quantidade de elemento aplicado (g/ha)

BIOseca = Tx. de aplicação do bio sólido – lodo caçado (t/ha)

Tmetal = teor do elemento no bio sólido – lodo caçado (mg/kg m.s.)

- ✓ Cálculo do acréscimo sobre o teor no solo (latossolo amarelo do estado do Pará)

$$T_{\text{solo}} \text{ (mg/kg de solo)} = Q_{\text{metal}} \times 1000 / (d \times 10.000 \times f)$$

Equação (10)

Tsolo = acréscimo do teor no solo (mg/kg de solo)

d = peso específico do solo (kg/m³) = 1200

10.000 = área de 1 ha em (m²)

f = profundidade de incorporação (m)

Os resultados dos cálculos do acréscimo sobre o teor de metais no solo (latossolo amarelo do Estado do Pará) e os valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença dessas substâncias químicas, para valores de prevenção e de aporte máximo agrícola, dispostos na Resolução CONAMA N° 420/2009, podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9: Teores de metais no solo após incorporação do lodo caçado em dosagens de 25% e 50% de Ca(OH)₂, para adubação das culturas de açaí, cupuaçu e coco.

Metais	Teores de metais latossolo amarelo	Concentração total de metais após adição do lodo caçado em latossolo no Estado do Pará						Resolução CONAMA N° 420/2009	
		Açaí		Cupuaçu		Coco		Valor de prevenção	Aporte Máx.
		25%	50%	25%	50%	25%	50%		
Ba	127	194.19	206.61	149.40	153.54	210.61	127.35	150	300
Cr	127	140.58	142.58	131.53	132.19	143.90	127.27	75	150
Cu	113	153.26	156.18	126.42	127.39	163.10	132.39	60	200
Ni	40	43.52	44.04	41.17	41.35	44.38	40.07	30	70
Pb	118	128.37	129.38	121.46	121.79	130.90	123.02	72	180
Zn	114	391.35	426.92	206.45	218.31	459.14	114.13	300	450

Comparando as concentrações de metais pesados (Ba, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn) no solo com os de prevenção e de aporte máximo agrícola, dispostos na Resolução CONAMA Nº 420/2009, notou-se que aproximadamente 100% dos metais avaliados obtiveram concentrações acima dos valores de prevenção, em ambas as dosagens de cal testadas e para as três culturas selecionadas, com exceções para: o elemento Ba na dosagem de 25%, para cultura de cupuaçu e 50% para coco; Zn em ambas as dosagens para cultura de cupuaçu e na dosagem de 50% para coco, que obtiveram valores dentro do limite de prevenção.

Alguns solos brasileiros possuem concentrações dessas substâncias mais elevadas do que os valores orientadores de prevenção e aporte máximo agrícola, dispostos na legislação brasileira. Contudo, é importante ressaltar que os teores de metais encontrados por Birani (2010) em latossolo amarelo, no Estado do Pará, são para os elementos Cd, Cr, Cu, Ni, e Pb maiores que o valor de prevenção disposto pelo CONAMA no Brasil. Isso demonstra que os solos estudados no Estado do Pará possuem concentrações de vários metais pesados mais elevadas que as concentrações encontradas nos solos analisados para obtenção dos valores nacionais de prevenção.

CONCLUSÕES

Com base nas avaliações feitas no trabalho, concluiu-se que:

A avaliação quanto a influência das dosagens testadas de Ca(OH)_2 , revelou que as maiores concentrações médias das variáveis verificadas no lodo foram observadas na dosagem de 25%.

A avaliação mediante testes de hipóteses revelou equivalência entre os pares de dosagens de cal para P, K, NH_3 e NO_2+NO_3 . Então, é possível afirmar que não houve variação considerável nos valores médios dessas variáveis entre as dosagens de Ca(OH)_2 testadas.

Considerando o resultado do teste de hipóteses aplicados as variáveis representativas dos metais pesados, é seguro afirmar, que houve redução mais acentuada nos valores dessas variáveis após a mistura lodo/ Ca(OH)_2 na dosagem de 50%. Sendo esta dosagem a mais eficiente na redução das concentrações médias da maioria dos metais pesados estudados no lodo higienizado, gerado no sistema de tratamento de esgoto da ETE Vila da Barca (UASB+BFS+DS).

A verificação do efeito sobre o pH demonstrou que o lodo higienizado possui valor abaixo da necessidade de calagem para correção da acidez do solo. Desta forma, sendo necessário fazer a complementação da calagem para as culturas testadas no solo avaliado.

O fornecimento de nutrientes e complementação mineral para adubação das três culturas testadas demonstrou que o nitrogênio é o nutriente mais disponível no lodo avaliado, atendendo 100% da recomendação nutricional das culturas.

Os metais pesados analisados no lodo não-higienizado e higienizado, em ambas dosagens de cal testadas, apresentaram valores que não ultrapassam o limite para aplicação em solo agrícola, estabelecido na Resolução CONAMA Nº 375/2006. Entretanto, os resultados expressaram que aproximadamente 100% dos metais avaliados obteriam concentrações acima dos valores de prevenção estabelecidos na legislação ambiental. Contudo, é importante ressaltar que os teores de metais encontrados por Birani (2010) em latossolo amarelo, no Estado do Pará, são para os elementos Cr, Cu, Ni, Pb e Zn maiores que o valor de prevenção disposto pelo CONAMA no Brasil.

Como a dinâmica dos metais no solo depende de muitos fatores peculiares a cada região, entre eles: conteúdo original, textura, matéria orgânica, tipo de argila, intensidade de intemperismo, pH e capacidade de troca catiônica. É importante recomendar a definição de valores orientadores para os solos em cada Estado da federação, já que a definição de valores orientadores genéricos para vários tipos de solos em um país com extensão territorial tão grande é possível correr o risco de permitir acúmulo excessivo de alguns elementos e/ou a inviabilização do uso de outros em solos de determinadas regiões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDREOLI, C. V.; SPERLING M. V.; FERNANDES F. (2001). Lodo de esgotos: Tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. v. 6, 484 p.
2. AYRES MAUEL (2012). Elementos de Bioestatística: A seiva do açaizeiro. Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, Universidade Federal do Pará. Belém, PA, 588 p.
3. BETTIOL, W.; CAMARGO O. A. (2006). Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura – Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 349p. il.
4. BIRANI S. M. (2010). Teores de metais disponíveis e atributos químicos em solos do Estado do Pará. Ms.Thesis, Universidade Federal da Amazônia, Belém, pp 114.
5. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (2009). Resolução Nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas
6. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (2006). Resolução Nº 375: Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente, 32 p.
7. CASTRO M. S., VIÉGAS I. J. M., BRASIL E. C. Recomendações de adubação e calagem para o estado do Pará. Belém-PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2007. 262p.
8. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA (1997). Manual de métodos de análise de solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro (EMBRAPA-CNPQ. Documentos ; 1) 212p. : il.
9. REIS M. S. (2009). Características químicas dos solos de uma toposequência sob pastagem em uma frente pioneira da Amazônia oriental. Revista de ciência agrária, Belém, n. 52, p. 37-47, jul./dez.
10. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1995b). Test methods for evaluating solid waste. Vol. IA: Laboratory manual physical/chemical methods, SW 846, 3rd ed. U.S..Gov. Print. office, Washington, DC.