

III-164 - AVALIAÇÃO DA TOLERÂNCIA DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS FLUTUANTES AO LIXIVIADO GERADO EM ATERRO SANITÁRIO

Elaine Cristina de Souza Kurscheidt⁽¹⁾

Professora do Centro de Educação Profissional Irmão Mário Cristóvão (TECPUC). Engenheira Ambiental e Segurança do Trabalho pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR). Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA) pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Consultora em Estudo de Impacto de Vizinhança.

Selma Aparecida Cubas⁽²⁾

Professora Titular do Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental e do Curso de Engenharia Civil da Universidade Positivo (UP). Engenheira Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR) e Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC, USP).

Miguel Mansur Aisse⁽³⁾

Professor Associado do Mestrado e Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA) e do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC, USP). Doutor em Engenharia Civil pela Escola Politécnica (USP).

Leila Teresinha Maranhão⁽⁴⁾

Professora Titular do Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental e do Curso de Ciências Biológicas da Universidade Positivo (UP). Bióloga pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR). Mestre em Botânica pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Doutora em Ciências Florestais pela UFPR.

Endereço⁽¹⁾: Rua: Terezina, 502 – casa 02 - Cajuru - Curitiba – PR - CEP: 82920-270 - País - Tel: +55 (41) 9607-4226 - e-mail: elaineek@onda.com.br

RESUMO

A fitorremediação utiliza plantas para tratamento da água, esgoto, no setor industrial e urbano. Também é aplicada para o tratamento de lixiviado gerado em aterros sanitários. Sua principal vantagem, quando comparada às demais formas de tratamento, refere-se à aplicação *in situ* e ao custo reduzido, sendo as macrófitas aquáticas que crescem em *wetlands* empregadas como agentes de despoluição de lixiviado. As macrófitas requerem nutrientes, disponibilizados pelos poluentes, para o seu crescimento e desenvolvimento, o que facilita a acumulação e fixação na biomassa. Suas raízes favorecem a estabilização aeróbia da matéria orgânica devido ao acréscimo de oxigênio no sistema. Os poluentes, entretanto, devem estar dentro dos limites de tolerância das plantas utilizadas, para não comprometer o tratamento. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi avaliar a tolerância das macrófitas aquáticas flutuantes *Pistia stratiotes* (alface-da-água) e *Eichhornia crassipes* (aguapé) frente a diferentes diluições de lixiviado gerado em aterro sanitário, visando contribuir para a compreensão do comportamento das mesmas frente ao poluente e para a sua utilização no tratamento. O experimento utilizou de 15 aquários de vidro para avaliação da tolerância para cada espécie. Os aquários foram ainda, envoltos com papel alumínio com o objetivo de impedir a incidência de luminosidade e sua interferência sobre o lixiviado. Foram coletadas 6 plantas de *E. crassipes* e 10 plantas de *P. stratiotes* para cada aquário, totalizando 90 e 150 plantas, respectivamente. A quantificação das plantas no término de cada ensaio permitiu mensurar a sobrevivência e avaliar seu desenvolvimento. As análises físico-químicas (DQO, DBO₅, NT e P) foram realizadas com a finalidade de avaliar a concentração de entrada do lixiviado. Observou-se que a *E. crassipes* foi a que apresentou maior tolerância nas menores concentrações e uma maior quantidade de plantas mortas nas maiores concentrações. A *P. stratiotes* apresentou sensibilidade no controle com água destilada, das 30 plantas cerca de 50% tiveram amarelamento das folhas e pouco desenvolvimento vegetativo. Nas maiores concentrações a *P. stratiotes* apresentou bom desenvolvimento vegetativo. Isto significa que o desenvolvimento de *P. stratiotes* ocorre mesmo em altas concentrações de DQO e NT nestes sistemas.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro Sanitário, Fitorremediação, Lixiviado, Macrófitas Aquáticas.

INTRODUÇÃO

O aumento da população urbana no Brasil, além de elevar a produção e o consumo, provocou maior geração dos resíduos sólidos urbanos. Na década de 50, o uso de lixão era prática comum e a disposição em todo o País era assim distribuída: 76% são dispostos a céu aberto, 23% em aterros sanitários e controlados, e apenas 1% em usina de compostagem e incineração (LIMA, 1995; VILHENA e D'ALMEIDA, 2000).

Todas essas disposições têm como consequências, além de vários impactos ambientais, dois subprodutos derivados da decomposição dos resíduos: o gás metano e o lixiviado. Devido à variabilidade e complexidade de tratamento, o lixiviado recebe atualmente especial atenção dentro de aterros sanitários, porque os tratamentos convencionais não proporcionam eficiência na depuração, retenção e remoção dos poluentes (MORAIS et al., 2006).

Por esta razão o uso da fitorremediação vem se intensificando aos longos dos anos principalmente para o pré-tratamento da água, tratamento de esgoto, no setor industrial e urbano, entre outros (KADLEC, 1985). Também é aplicada para o tratamento de lixiviado gerado em aterros sanitários. Sua principal vantagem quando comparada às demais formas de tratamento refere-se à aplicação *in situ* e ao custo reduzido, sendo empregadas como agentes de despoluição de lixiviado as macrófitas aquáticas que crescem em *wetlands* (CALLI, MERTOGLU; INANC, 2005). As macrófitas requerem nutrientes, disponibilizados pelos poluentes, para o seu crescimento e desenvolvimento, o que facilita a acumulação e fixação na biomassa. Suas raízes favorecem a estabilização aeróbia da matéria orgânica devido ao acréscimo de oxigênio no sistema. Os poluentes, entretanto, devem estar dentro dos limites de tolerância das plantas utilizadas, para não comprometer o tratamento (LARCHER, 2000). Alguns trabalhos já comprovaram sua eficiência de remoção de poluentes do lixiviado em diversos aterros sanitários, por exemplo, no Aterro Sanitário de Piraí, Mannarino et al. (2006), cita remoções 57% de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅) e 41% Demanda Química de Oxigênio (DQO), utilizando *Typha angustifolia*.

Preussler (2008) analisou a eficiência da área alagável natural do pós-tratamento do chorume do Aterro Sanitário de Guaratuba/PR para remoção da matéria orgânica, nitrogênio, fosfato e metais pesados. As macrófitas estudadas no sistema foram *Typha domingensis* Pers., *Hedychium coronarium* J. König e *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf. A remoção média de eficiência do tratamento foi 85% para DBO₅, 81% de DQO, 83% de Nitrogênio Amoniacal, e 100% para Fosfato. A eficiência total de remoção de Zn ao longo do tratamento variou de 62% a 89%.

Silva, Maranhão e Preussler (2010) avaliaram a eficiência de tratamento usando macrófitas aquáticas: *Echinochloa polystachya* (Kunth) Hitchc, *Pistia stratiotes* L., e a *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, que ocorrem naturalmente na região do entorno do Aterro Sanitário de Curitiba, para o pós-tratamento do chorume. O sistema piloto compreendeu em dois bioensaios: o primeiro realizado em aquários apenas com as espécies flutuantes e o segundo foi realizado em caixa d'água. A primeira caixa, para a espécie emergente, com substrato (pedra brita de diferentes granulometrias, membrana de geotêxtil para impedir o entupimento do sistema) totalizando uma altura de 16,5 cm de pedra e as demais caixas para as espécies flutuantes. A pesquisa alcançou no Bioensaio 2, com a espécie *Echinochloa polystachya* (1º caixa), remoção de DBO₅, DQO e N-amoniacoal cerca de 64%, 64% e 83% respectivamente. Após o período de TDH de 11 dias, o efluente foi lançado a 2º caixa com *Pistia stratiotes* e o resultado na remoção de DBO₅, DQO foram de 22% e 4%, já o N-amoniacoal houve um aumento na sua concentração de 48%. Posteriormente, o efluente foi lançado na 3º caixa com *Eichhornia crassipes* e a eficiência de DBO₅, DQO e N-amoniacoal alcançou 27%, 46% e 96%, respectivamente.

A avaliação da tolerância das plantas nesse processo pode ser identificada como estudo preliminar, sendo que o primeiro aspecto a ser considerado para uso da fitorremediação se refere à análise da tolerância das plantas que serão empregadas no tratamento. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi avaliar a tolerância das macrófitas aquáticas flutuantes *Pistia stratiotes* (alface-da-água) e *Eichhornia crassipes* (aguapé) frente a diferentes diluições de lixiviado gerado em aterro sanitário, e contribuir com informações acerca de uma alternativa para o tratamento do mesmo utilizando macrófitas.

O trabalho foi executado em duas etapas. Na primeira, realizou-se um estudo preliminar para identificação do fator de diluição (FD) ideal para os sistemas *Pistia stratiotes* (alface-da-água) e *Eichhornia crassipes* (aguapé).

Posteriormente, foi realizada a análise de tolerância para cada espécime com fatores de diluições (FD) pré-determinados, além do levantamento da biomassa das macrófitas estudadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O lixiviado utilizado na presente pesquisa provém do tratamento realizado no Aterro Sanitário de Curitiba, Curitiba, PR. Este aterro operou durante 21 anos e encerrou suas atividades de disposição de resíduos em novembro de 2010. A tolerância foi testada para as macrófitas aquáticas flutuantes *Pistia stratiotes* (alface-da-água) e *Eichhornia crassipes* (aguapé) em 15 aquários de vidros. Essas macrófitas foram selecionadas para esse estudo porque ocorrem naturalmente nas *wetlands* naturais presentes na área do aterro.

• Delineamento experimental

Utilizaram-se cinco tratamentos com três aquários de vidro, totalizando 15 aquários com dimensão (0,243 x 0,394 x 0,494 m) e volume útil de 47,29 L cada. Os aquários foram ainda, envoltos com papel alumínio com o objetivo de impedir a incidência de luminosidade e sua interferência sobre a degradação natural de compostos presentes no lixiviado.

A Figura 1 apresenta o esquema de distribuição dos aquários para o estabelecimento do experimento.

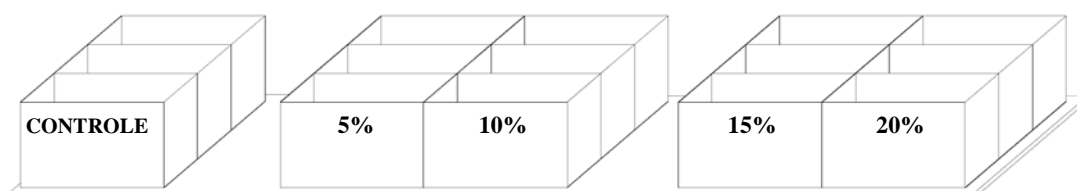


Figura 1: Esquema de distribuição dos Aquários

• Instalação do Sistema

Os experimentos foram conduzidos em Casa de Vegetação, localizada na Universidade Positivo, constituída por estrutura metálica, revestida com lona plástica transparente, piso paver vermelho e com área aproximada de 60 m².

• Estabelecimento dos Experimentos

Para determinação do fator de diluição ideal, o estudo da tolerância com macrófitas ocorreu em três momentos. Primeiramente, durante cinco dias de experimentação, foi realizada a análise da tolerância para ambas as macrófitas flutuantes com 20 plantas de espécie, com fator de diluição FD=1 (50% de diluição) (10 L de lixiviado + 10 L água da torneira) totalizando 20 litros em cada aquário. Posteriormente, foram definidos novos fatores de diluição: controle (água destilada) (0%); FD=3 (25%); FD=1 (50%); FD=0,33 (75%); 100% de lixiviado, apenas para a macrófita *Pistia stratiotes* por um período de 11 dias. 3º Terceiro: Em outra tentativa foram determinadas novas diluições: controle (água destilada), FD=19 (5%), FD=9 (10%), FD=5,6 (15%) e FD=4 (20%). As seguintes relações de água destilada/lixiviado: Controle 20:0; (5%) 19:1; (10%) 18:2; (15%) 17:3 e (20%) 16:4 foram utilizadas, com volume final de 20 L em cada aquário de efluente. As macrófitas coletadas na área do aterro foram lavadas com água destilada. Em cada aquário foram colocadas seis plantas jovens de *Eichhornia crassipes* e 10 plantas jovens de *Pistia stratiotes*. O período experimental foi de 30 dias para cada macrófita.

• Seleção das Macrófitas

As macrófitas flutuantes utilizadas foram determinadas após o levantamento fitossociológico, realizado na área do Aterro Sanitário de Curitiba, Curitiba, PR. As espécies flutuantes *Pistia stratiotes* (alface-da-água) e *Eichhornia crassipes* (aguapé) foram as que apresentaram maior área de cobertura na região (Tabela 1). A

experimentação ocorreu no período de 30 dias para cada macrófita. Foram coletadas seis plantas de *E. crassipes* e 10 plantas de *P. stratiotes* para cada aquário, totalizando 90 e 150 plantas, respectivamente. Esta alteração foi necessária devido ao tamanho do aguapé e principalmente para acomodação nos aquários, além de favorecer o desenvolvimento das plantas.

A Tabela 1 apresenta o resultado do levantamento fitossociológico obtido conforme o método de Braun-Blanquet (1979).

Tabela 1: Levantamento fitossociológico da Lagoa 1 do Aterro Sanitário de Curitiba.

ESPÉCIES	FA (%)	FR (%)	AC (m ²)	VC (%)	CR (%)
<i>Echinochloa polystachya</i>	40,00	23,05	0,09	0,16	17,17
<i>Pistia stratiotes</i>	51,67	29,78	0,17	0,28	31,54
<i>Eichhornia crassipes</i>	61,67	35,54	0,25	0,42	45,90

*FA frequência absoluta; FR frequência relativa; *AC área coberta pela espécie;

*VC valor de cobertura da espécie na parcela; *CR valor de cobertura relativa da espécie.

FONTE: Preussler (2011)

• Variáveis Físicas e Químicas Monitoradas

Durante todo o período experimental foram monitoradas as seguintes variáveis: pH, Oxigênio Dissolvido (OD), Condutividade Elétrica (CE) e Temperatura do efluente.

• Determinação da Concentração do Lixiviado

As análises físicas e químicas da concentração de entrada do lixiviado, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅), Nitrogênio Total (NT) e Fósforo (P), foram determinadas seguindo metodologia do *Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998).

• Índice de Sobrevivência (IS)

Durante o período experimental observou-se o índice de sobrevivência, o crescimento e desenvolvimento das plantas, bem como a presença de sintomas visíveis de injúria. A quantificação do número de plantas no término de cada ensaio permitiu mensurar a sobrevivência das mesmas.

• Análise da Biomassa

Para a determinação da biomassa empregou-se como base a metodologia proposta por Silva *et al.* (2007), modificada. Após o período de exposição, fez-se a retirada das plantas de cada aquário e determinou-se a biomassa fresca. Após as plantas foram secas em estufa a, aproximadamente, 80 °C até estabilização da massa. Posteriormente, foi feito o cálculo para determinação da biomassa.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de DQO, DBO₅, NT e P foram calculados a partir de uma caracterização inicial do lixiviado e facilitam na compreensão do comportamento das macrófitas.

Na Tabela 2 são apresentadas as concentrações de entrada dos contaminantes (DQO, DBO₅, NT e P).

Tabela 2: Concentrações de entrada dos contaminantes interferentes no desenvolvimento das macrófitas

PARÂMETROS		LIXIVIADO BRUTO	FD=3	FD=1	FD=0,33	FD=0
			25%	50%	75%	100%
DQO*		1138	285	569	854	1138
DBO ₅		542	136	271	407	542
NT		895	224	448	672	895
P		< LD**	-	-	-	-
VOLUME	Lixiviado	-	5	10	15	20
	Água destilada	-	15	10	5	0
	Total (L)	-	20	20	20	20

Nota: Todos os valores em mg.L⁻¹, exceto lixiviado e água destilada que estão em litros (L);

** < LD – menor que o limite de detecção.

• Estudos Preliminares (Fator de Diluição)

Primeiro: quando expostas ao lixiviado com FD=1 (50%) constatou-se que *E. crassipes* e *P. stratiotes*, em apenas cinco dias, demonstraram índice de sobrevivência (IS) de 0%. A Figura 2 (A e B) apresenta o aspecto de *E. crassipes* (aquapé) e *P. stratiotes* (alface-d'água) no início e final do experimento, respectivamente, após cinco dias de exposição ao lixiviado.





ETAPAS DE EXPERIMENTAÇÃO	AGUAPÉ (A) <i>Eichhornia crassipes</i>	ALFACE-D'ÁGUA (B) <i>Pistia stratiotes</i>
Início		
Final (após cinco dias)		

Figura 2: Avaliação preliminar da tolerância das macrófitas livres flutuantes *E. crassipes* (aquapé) e *P. stratiotes* (alface-d'água) ao lixiviado

Segundo: nas outras diluições, durante um período de 11 dias, foi analisada apenas *P. stratiotes* por apresentar maior sensibilidade ao contaminante, em que novos fatores de diluição foram utilizados: controle (água destilada) (0%); FD=3 (25%); FD=1 (50%); FD=0,33 (75%); 100% de lixiviado. Observou-se em apenas cinco dias, um índice de sobrevivência (IS) de 0%. Quanto às variáveis medidas (pH, OD e Condutividade), observou-se um aumento do pH no FD=3 (D=25%); FD=1 (D=50%); FD=0,33 (D=75%) e no lixiviado bruto (100%) quando comparado ao controle (0%), alcançando médias 8,46; 8,49; 8,51; 8,52 e 7,2, respectivamente, assim como na condutividade, com médias de 4.110; 7.550; 11.040 e 14.823 e 40,12 (µS.cm⁻¹). Os valores do oxigênio dissolvido apresentaram queda gradativa ao longo do tempo com 5,37 no controle e nas demais diluições 0,48; 0,29; 0,26 e 0,25 (mg.L⁻¹ de O₂). A Figura 3 (A, B e C) apresenta os parâmetros monitorados no período de 11 dias para cada fator de diluição, e 7 dias para OD.

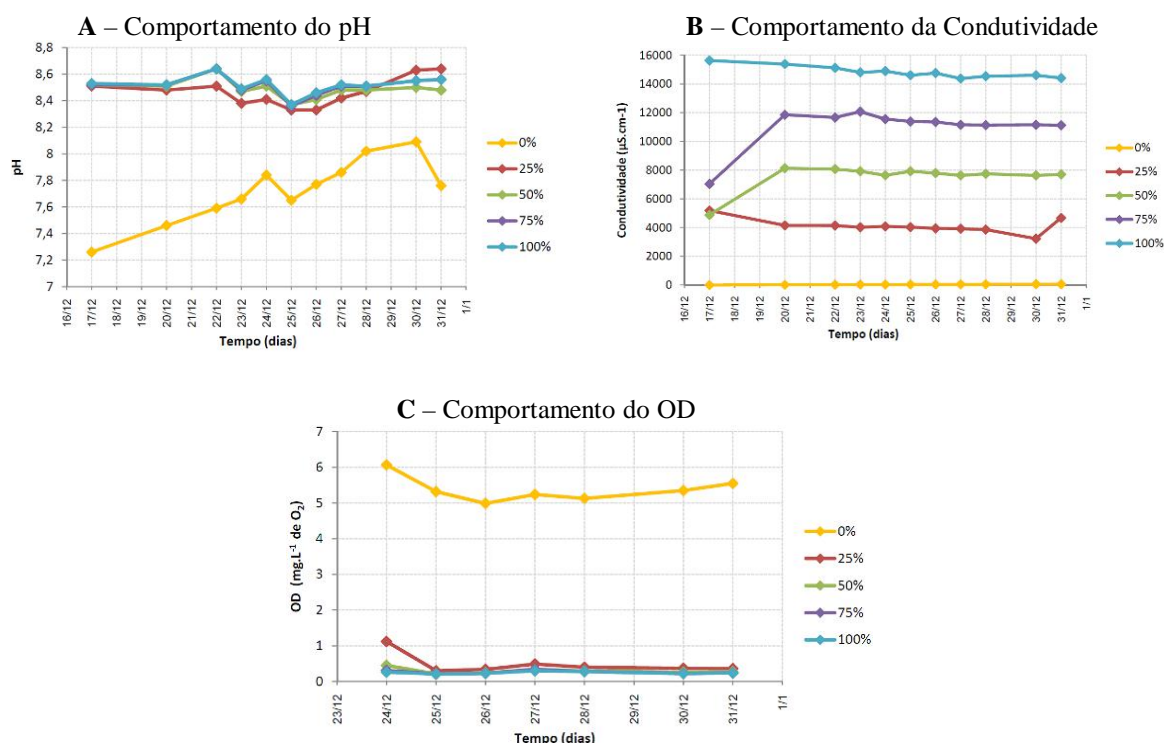


Figura 3: pH, Condutividade e OD empregando diferentes fatores de diluição do lixiviado para *P. stratiotes* em função do tempo (t)

Nas unidades experimentais a concentração de oxigênio do lixiviado é influenciada pela temperatura, sais dissolvidos presentes, atividades biológicas e meio suporte. Já a condutividade indica a concentração de poluentes, e os principais íons que influenciam são chamados de macronutrientes (MAINE, 2007; MARTINS *et al.*, 2007).

Observou-se que a alcalinidade aumentou de acordo com a diluição, sendo maior em 100% (sem diluição do lixiviado – lixiviado bruto) e menor em 0% (apenas com água deionizada – isenta de íons).

Embora estivesse na faixa considerada como ótima (4,0 a 9,5) para desenvolvimento dos microrganismos, o pH medido permaneceu acima de 7,0 em todos os tratamentos.

Pistia stratiotes apresentou comportamento diferenciado, variando de acordo com a concentração de poluentes. A espécie mostrou-se sensível em elevadas concentrações a partir dos FD=1 (50%); FD=0,33 (75%) e 100% de lixiviado, com a morte das plantas ocorrendo no terceiro dia do experimento.

As plantas submetidas ao FD=3 (25%) foram as que demonstraram maior tolerância, apresentando sintomas apenas ao final do quinto dia e no caso do controle, embora tenham apresentado clorose nas folhas e pouco desenvolvimento vegetativo, não foram observadas mortes.

A Tabela 3 apresenta o número de plantas que sobreviveram nos diferentes fatores de diluição.

Tabela 3: Quantidade de plantas de *P. stratiotes* tolerantes em função dos fatores de diluição realizados no estudo preliminar

ESTUDO PRELIMINAR DE TOLERÂNCIA COM LIXIVIADO					
DIAS	CONTROLE	FD = 3	FD = 1	FD = 0,33	LIXIVIADO BRUTO
	Diluição = 0%	25%	50%	75%	100%
1	30*	30	30	30	30
2	30	7**	7**	7**	7**
3	30	4	0	0	0
4	30	2	0	0	0
5	30	0	0	0	0

Nota: 30 und * Quantidade total de plantas colocadas nos fatores de diluição;

** Sobrevivência das plantas ao longo do experimento (und).

Terceiro: Diante desses resultados ficou estabelecido que, para a realização da experimentação da tolerância, o uso dos seguintes fatores de diluição: controle (água destilada) (0%); FD=19 (5%); FD=9 (10%); FD=5,6 (15%) e FD=4 (20%).

• Tolerância das Macrófitas

A presença de *E. crassipes* nas unidades experimentais demonstrou pequenas variações de pH, passando do alcalino para o ácido, nos FD=9 (10%); FD=5,6 (15%); FD=4 (20%). Dentre as variáveis medidas, o OD foi o que apresentou maior variação, principalmente, no FD=19 (5%) com queda gradativa ao longo do tempo, mas similar nas demais diluições. Com *P. stratiotes* o pH sofreu variação durante o período experimental, passou de alcalino para ácido nos FD=19 (5%) e FD=9 (10%) e permaneceu próximo ao neutro no controle (0%), FD=5,6 (15%) e FD=4 (20%).

A Figura 4 apresenta o comportamento do OD (A) nas unidades experimentais com aguapé e (B) e com alface-da-água, respectivamente.

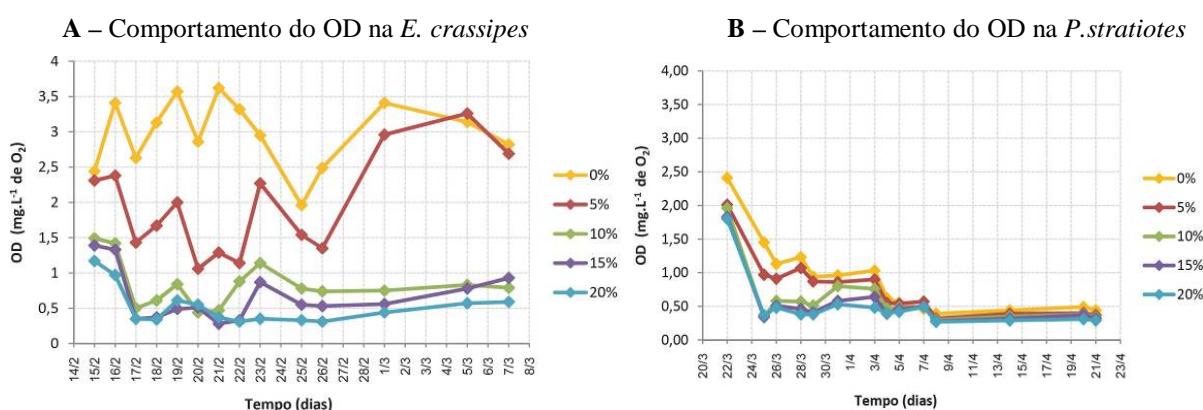


Figura 4: Comportamento do OD empregando diferentes fatores de diluição

As concentrações dos parâmetros analisados nos diferentes FD foram definidas a partir da concentração inicial no lixiviado em termo de DQO, DBO₅, NT e P, conforme Tabela 4.

O comportamento da *E. crassipes* ocorreu de diferentes formas e variou de acordo com a diluição. Ela apresentou maior sensibilidade no FD=4 (20%) e das 18 plantas empregadas sobreviveram apenas 10. Nos demais FD, *E. crassipes* respondeu satisfatoriamente, com morte de apenas uma planta no controle, no FD=19 (5%) e no FD=5,6 (15%). No FD=9 (10%) não foi registrado morte das plantas.

Tabela 4: Concentrações dos parâmetros analisados nos diferentes tratamentos em função da concentração inicial do lixiviado nos experimentos com *P. stratiotes* (P) e *E. crassipes* (E**).**

PARÂMETROS		LIXIVIADO BRUTO		FD=19		FD=9		FD=5,6		FD=4	
				5%		10%		15%		20%	
		P**	E**	P	E	P	E	P	E	P	E
DQO*		2207	1815	110	90,7	221	181,5	331	272,2	441	363
DBO ₅		303	57	15	2,8	30	5,7	45	8,5	61	11,4
NT		1068	1932	53	96,6	107	193,2	160	290	214	386,4
P		< LD	67	-	3,3	-	6,7	-	10	-	13,4
VOLUME	Lixiviado	-	-	1	1	2	2	3	3	4	4
	Água destilada	-	-	19	19	18	18	17	17	16	16
	Total (L)	-	-	20	20	20	20	20	20	20	20

Nota: Todos os valores em mg.L⁻¹, exceto lixiviado, água destilada estão em litros (L); P**: *P. stratiotes*; E**: *E. crassipes*

P. stratiotes demonstrou variações de acordo com os fatores de diluição. Ela apresentou sensibilidade no controle (0%), ou seja, das 30 plantas, cerca de 50% demonstraram clorose nas folhas e reduzido desenvolvimento. Nas demais diluições houve bom desenvolvimento. Nos FD=19 (5%), FD=9 (10%), FD=5,6 (15%) e FD=4 (20%) não foram registradas mortes, mas brotamento intenso. A Tabela 5 apresenta o índice de sobrevivência das plantas de *P. stratiotes* e *E. crassipes* em função dos FD no início e ao final 30 dias.

Tabela 5: Índice de sobrevivência *P. stratiotes* (P) e *E. crassipes* (E**) em função dos fatores de diluição no início e ao final de 30 dias.**

DIAS	CONTROLE		FD=19		FD=9		FD=5,6		FD=4	
	0%		5%		10%		15%		20%	
	P**	E**	P	E	P	E	P	E	P	E
1	10*	18*	10	18	10	18	10	18	10	18
30	± 12	17	> 20	17	> 20	18	> 20	17	> 20	10

Nota: * Sobrevivência das plantas ao longo do experimento (unidade); P**: *P. stratiotes*; E**: *E. crassipes*.

A tolerância foi comprovada ainda pela determinação da biomassa no início e final do experimento. Em *E. crassipes*, a biomassa inicial úmida e seca, foi de 326,8 g e 67,2 g, respectivamente. Apenas uma unidade experimental ultrapassou a média de biomassa úmida: FD=9 (10%) com média 332,8 g. Isto significa que o desenvolvimento de *E. crassipes* ocorre mesmo com altas concentrações de DQO e NT nestes sistemas. No FD=4 (20%) a biomassa foi reduzida para 6,8 g quando comparada ao controle, o que demonstra que, mesmo em pequenas concentrações, os poluentes do lixiviado podem ser fitotóxicos à *E. crassipes*.

Já em *P. stratiotes* a biomassa inicial úmida e seca foi de 59,6 g e 8,6 g, respectivamente. Três dos experimentos ultrapassaram esta média de biomassa úmida: FD=19 (5%), FD=9 (10%) e FD= 5,6 (15%) com médias 91,6 g; 106,4 g e 67,6 g, respectivamente. Isto significa que o desenvolvimento de *P. stratiotes* ocorreu mesmo em altas concentrações de DQO e NT, conforme apresenta a Tabela 6.

Tabela 6: Biomassa ao final do experimento com *P. stratiotes* (P) e *E. crassipes* (E**).**

BIOMASSA	CONTROLE		FD=19		FD=9		FD=5,6		FD=4	
	0%		5%		10%		15%		20%	
	P**	E**	P	E	P	E	P	E	P	E
Final úmida	9,6	210,5	91,6	247,2	106,4	332,8	67,6	265,6	23,0	203,7
Final seca	2,8	18,5	11,1	22,6	12,9	29,6	9,7	29,3	6,6	20,3
% Perda H ₂ O	71,0	91,2	88,0	90,9	88,0	91,1	86,0	89,0	71,0	90,0

Nota: Todos os valores em (g), exceto % perda H₂O; P**: *P. stratiotes*; E**: *E. crassipes*.

• **Comportamento das variáveis analisadas nas unidades com *Eichhornia crassipes* (Aguapé)**

As concentrações dos principais poluentes analisados nos diferentes FD foram definidas a partir da concentração inicial no lixiviado em termo de DQO, DBO₅, NT e P. A Tabela 7 apresenta as concentrações dos poluentes nos diferentes tratamentos em função da concentração inicial do lixiviado no experimento com *E. crassipes*, exceto para o controle que possui água destilada.

Tabela 7: Concentrações dos poluentes nos diferentes tratamentos em função da concentração inicial do lixiviado no experimento com *Eichhornia crassipes*

PARÂMETROS		LIXIVIADO BRUTO	FD=19	FD=9	FD=5,6	FD=4
			5%	10%	15%	20%
DQO*		1815	91	182	272	363
DBO ₅		57	3	6	8,5	11
NT		1932	97	193	290	386
P		67	3,3	6,7	10	13
VOLUME	Lixiviado	-	1	2	3	4
	Água destilada	-	19	18	17	16
	Total (L)	-	20	20	20	20

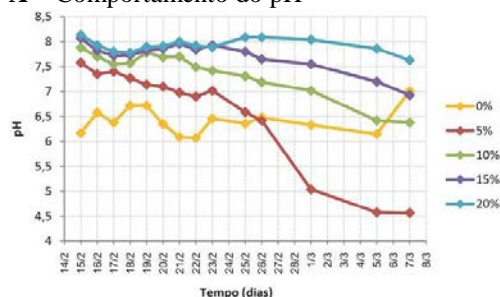
Nota: Todos os valores em mg.L⁻¹, exceto lixiviado e água destilada que estão em litros (L).

Durante o período experimental observou-se pequenas variações de pH, passando do alcalino para o ácido, nos FD=9 (10%); FD=5,6 (15%); FD=4 (20%). No FD=19 (5%) o pH do efluente passou de alcalino para ácido se comparado ao controle. Comportamento semelhante constatou-se na condutividade e temperatura, para todos os fatores de diluição. Dentre as variáveis medidas, o OD foi o que apresentou maior variabilidade principalmente no FD=19 (5%) com queda gradativa ao longo do tempo e similaridade nas demais diluições.

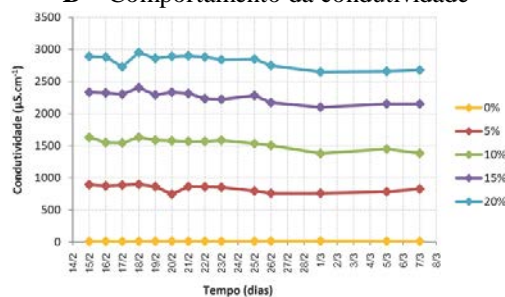
Foi observado nos primeiros dias do tratamento diminuição da concentração de OD e aumento dos valores de pH. Este comportamento, segundo Lima (2008) pode ser explicado pela formação da amônia através do processo de amonificação (transformação biológica de nitrogênio orgânico em amônia), sendo este o passo inicial da degradação aeróbia de compostos orgânicos nitrogenados.

A Figura 5 (A, B, C e D) apresenta o monitoramento das variáveis medidas (pH, OD, Condutividade e Temperatura do efluente) empregando diferentes fatores de diluição do lixiviado com *E. crassipes* em função do (t), durante os 14 dias de monitoramento.

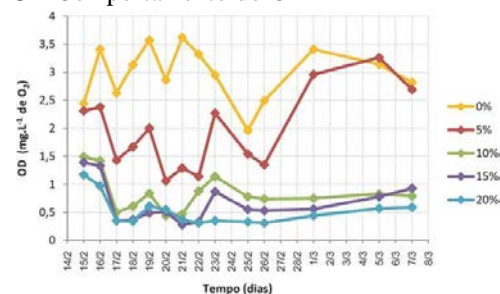
A – Comportamento do pH



B – Comportamento da condutividade



C – Comportamento do OD



D – Comportamento Temperatura do efluente

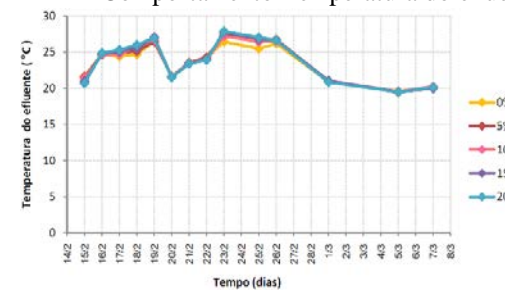


Figura 5: pH, OD, Condutividade, Temperatura do efluente empregando diferentes fatores de diluição do lixiviado com *Eichhornia crassipes* em função do tempo (t)

O comportamento da *Eichhornia crassipes* ocorreu de diferentes maneiras e variou de acordo com a diluição. A espécie apresentou maior sensibilidade no FD=4 (20%) e das 18 espécimes empregadas restaram apenas 10. Nos demais fatores de diluição a *E. crassipes* respondeu satisfatoriamente com morte de uma planta apenas no controle, no FD=19 (5%) e no FD=5,6 (15%). No FD=9 (10%) não foi registrado morte das plantas.

A Tabela 8 apresenta o número de plantas da *E. crassipes* em função dos fatores de diluição no início e ao final 30 dias.

Tabela 8: Número de plantas sobreviventes da *Eichhornia crassipes* em função dos fatores de diluição no início e ao final 30 dias

ÍNDICE DE SOBREVIVÊNCIA COM <i>Eichhornia crassipes</i>					
DIAS	CONTROLE	FD = 19	FD = 9	FD = 5,6	FD = 4
	0%	5%	10%	15%	20%
1	18*	18	18	18	18
30	17	17	18	17	10

* Sobrevivência das plantas ao longo do experimento

A quantidade de água na planta é elevada mesmo após a secagem natural, confirmada quando comparada com a biomassa seca. A média total de biomassa neste estudo, em todos os fatores de diluição, foi de 252 g para biomassa úmida e após secagem foi 24,11 g, com perda de 90,4% de água. A Figura 6 (A e B) apresenta a variabilidade da biomassa final após 30 dias de experimentação, em comparação com a média encontrada.

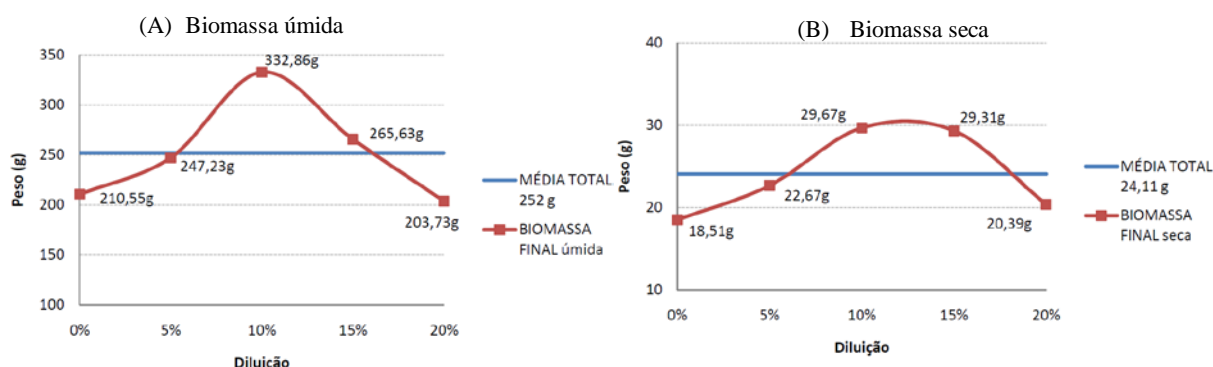


Figura 6: Variabilidade da biomassa final após 30 dias de experimentação com *Eichhornia crassipes*

• **Comportamento das variáveis analisadas nas unidades com *Pistia stratiotes* (Alface-da-água)**

As concentrações dos principais poluentes, analisados nos diferentes FD, foram definidas a partir da concentração inicial no lixiviado em termo de DQO, DBO₅, NT e P. A Tabela 9 apresenta as concentrações dos poluentes nos diferentes tratamentos em função da concentração inicial do lixiviado no experimento com *P. stratiotes*, exceto para o controle que possui água destilada.

Tabela 9: Concentrações dos poluentes nos diferentes tratamentos em função da concentração inicial do lixiviado no experimento com *Pistia stratiotes*

PARÂMETROS		LIXIVIADO BRUTO	FD=19	FD=9	FD=5,6	FD=4
			5%	10%	15%	20%
DQO*		2207	110	221	331	441
DBO ₅		303	15	30	45	61
NT		1068	53	107	160	214
P		< LD	-	-	-	-
VOLUME	Lixiviado	-	1	2	3	4
	Água destilada	-	19	18	17	16
	Total (L)	-	20	20	20	20

- Nota: Todos os valores em mg.L⁻¹, exceto lixiviado e água destilada que estão em litros (L);

Em relação aos parâmetros monitorados, o pH sofreu variação durante o período experimental, passou de alcalino para ácido nos FD=19 (5%) e FD=9 (10%) e permaneceu próximo à neutralidade no controle (0%), FD=5,6 (15%) e FD=4 (20%). Comportamento similar ocorreu com a condutividade, temperatura do efluente e oxigênio dissolvido em todos os fatores de diluição. A Figura 7 (A, B, C e D) apresenta os parâmetros monitorados durante 14 dias.

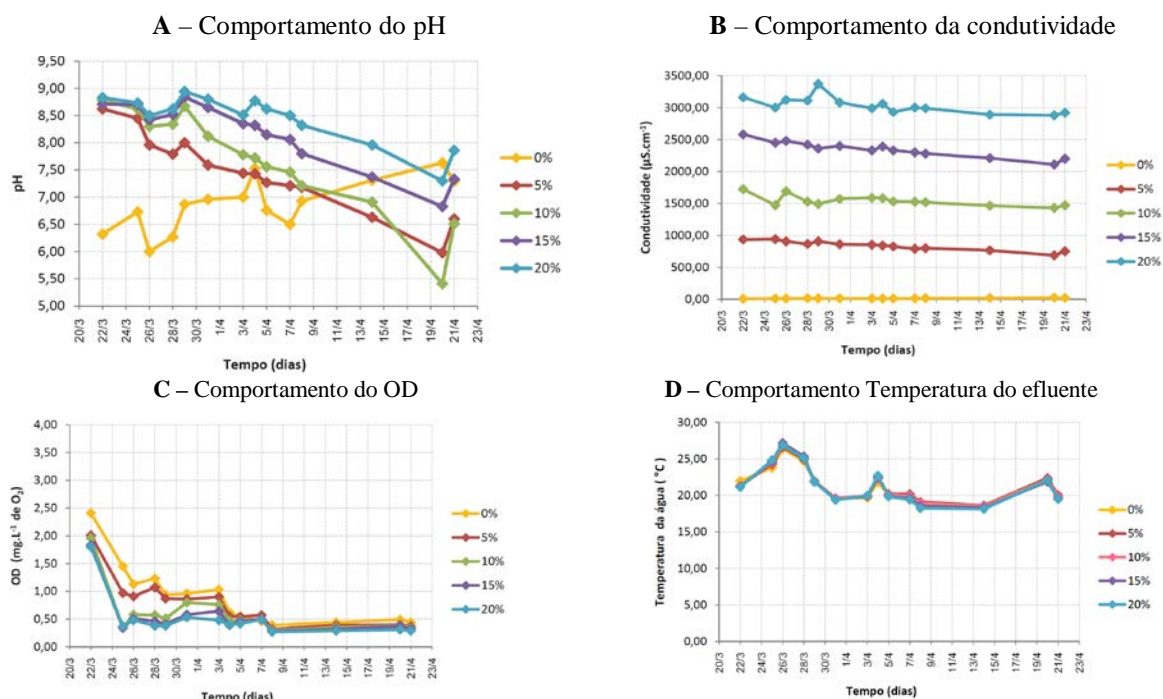


Figura 7: pH, OD, Condutividade, Temperatura do efluente empregando diferentes fatores de diluição do lixiviado com *Pistia stratiotes* em função do tempo (t)

O comportamento de *Pistia stratiotes* sofreu variações de acordo com os fatores de diluição. A espécie apresentou sensibilidade no controle (0%) com água destilada, das 30 plantas cerca de 50% tiveram clorose nas folhas e pouco desenvolvimento vegetativo. Esta clorose intensa pode ocorrer quando a macrófita reduz sua fotossíntese para manter-se viva, isto interfere diretamente nos teores de clorofila da planta (LARCHER, 2000). Nas demais diluições a *P. stratiotes* teve bom desenvolvimento nos FD=19 (5%), FD=9 (10%), FD=5,6 (15%) e FD=4 (20%) não foram registradas mortes, mas um brotamento intenso.

A Tabela 10 apresenta o número de plantas da *P. stratiotes* em função dos fatores de diluição no início e ao final de 30 dias.

Tabela 10: Número plantas de *Pistia stratiotes* em função dos fatores de diluição no início e ao final 30 dias

ÍNDICE DE SOBREVIVÊNCIA COM <i>Pistia stratiotes</i>					
DIAS	CONTROLE	FD = 19	FD = 9	FD = 5,6	FD = 4
	0%	5%	10%	15%	20%
1	10*	10	10	10	10
30	± 12	> 20	> 20	> 20	> 20

* Sobrevivência das plantas ao longo do experimento (unidade)

A Figura 8 (A e B) apresenta a variabilidade da biomassa final após 30 dias de experimentação, em comparação com a média encontrada.

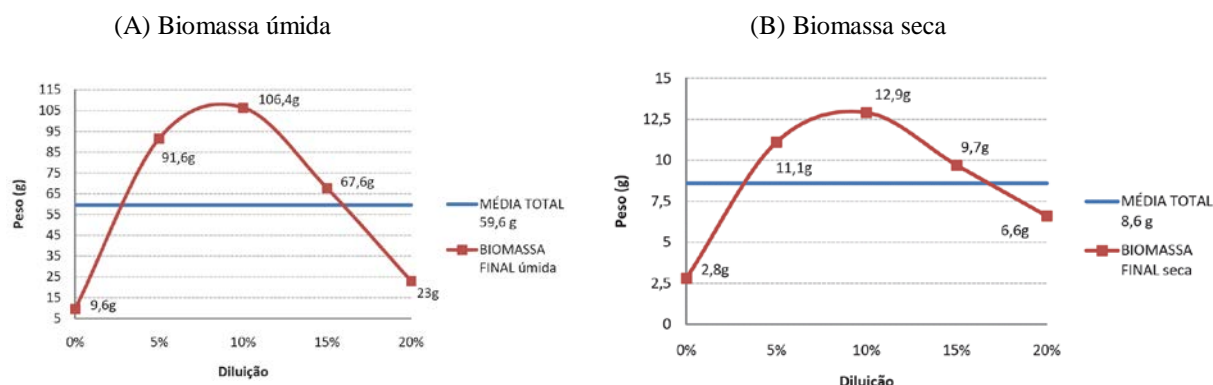


Figura 8: Variabilidade da biomassa final após 30 dias de experimentação com *Pistia stratiotes*

A quantidade de água na planta é elevada mesmo após a secagem natural, confirmada quando comparada com a biomassa seca. A média total de biomassa neste estudo, em todos os fatores de diluição, foi de 59,6 g para biomassa úmida e após secagem foi 8,6 g, com perda de 85,5% de água.

CONCLUSÕES

A macrófita mais sensível, ou seja, menos tolerante ao lixiviado foi a *Pistia stratiotes* (alface-d'água), quando relacionada ao fator de diluição superior FD=4 (20%) ocorreu a morte das plantas em 3 dias. A sua tolerância ao poluente foi inversamente proporcional ao aumento da concentração.

A *Eichhornia crassipes* apresentou boa tolerância nas menores diluições e menor desenvolvimento vegetativo no fator de diluição FD=4 (20%) com a morte de plantas no sistema.

Observou-se que as macrófitas flutuantes demonstraram limitações de desenvolvimento nas maiores concentrações de lixiviado, comportamento este também observado no aterro sanitário.

Como comprovado as macrófitas estudadas são sensíveis a elevadas cargas de poluentes, assim concentrações superiores a 25% de lixiviado foram extremamente prejudiciais.

Este estudo permitiu comprovar que a avaliação da tolerância das macrófitas frente ao lixiviado é fundamental, porque identifica as espécies adequadas (menos sensíveis) ao agente estressor, o que pode influenciar diretamente a eficiência de tratamento.

Dos estudos realizados em escala de bancada, concluiu-se que a seleção adequada das macrófitas pode proporcionar não só a melhoria da qualidade do lixiviado, como também um paisagem agradável ao ambiente, sem que sejam necessárias reformas onerosas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA – American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th ed., 1998.
2. BRAUN-BLANQUET J. Fitossociologia: base para el estudio de las comunidades vegetales. H. Blume ediciones. 820 p. 1979.
3. CALLI, B.; MERTOGLU, B.; INANC, B. Landfill leachate management in Istanbul: applications and alternatives. Chemosphere. v. 59 p. 819 - 829, 2005.
4. KADLEC, R. H.; HAMMER, D. E. Simplified computation of wetland vegetation cycles. In: PRINCE H. H. and D'ITRI F.M. Coastal Wetlands. Michigan : Lewis Publishing,. p. 141 -157, 1985.
5. KURSCHEIDT, E. C. S. Avaliação da fitorremediação como alternativa de pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário utilizando macrófitas. 2011. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.
6. LARCHER, W. Ecofisiologia Vegetal. Editora Pedagógica Universitária Ltda. São Paulo. p. 319, 2000.

7. LIMA, L. M. Q. Tratamento e Biorremediação. São Paulo: Hemus Editora Limitada, p. 261, 1995.
8. MAINE, M.A., SUN~E, N., HADAD, H., SA'NCHEZ, G., BONETTO, C. Removal efficiency of a constructed wetland for wastewater treatment according to vegetation dominance. *Chemosphere*, p. 1105 – 1113, 2007
9. MANNARINO, C. F.; FERREIRA, J. A.; CAMPOS, J. C.; RITTER, E. *Wetlands* para tratamento de lixiviados de aterros sanitários – experiências no aterro sanitário de pirai e no aterro metropolitano de Gramacho (Rj). *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.11, n. 2 , p. 108 – 112, 2006.
10. MORAIS, J. L.; SIRTORI, C. PERALTA-ZAMORA, P. G. Tratamento de chorume de aterro sanitário por fotocatalise heterogênea integrada a processo biológico convencional. *Revista Química Nova*, v. 29, n. 1, p. 20 – 23, 2006.
11. MARTINS, A. P. L.; REISSMANN, C. B.; BOEGER, M. R.;FAVARETTO, N.; OLIVEIRA, E. B. Capacidade da *Typha dominguensis* na fitorremediação de efluentes de tanques de piscicultura na Bacia do Iraí – Paraná. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 11, n. 3, p. 324 – 330, 2007.
12. PREUSSLER, K. H. Avaliação da eficiência do tratamento de uma área alagável natural adotada no aterro sanitário de Guaratuba, PR, Brasil para o pós-tratamento do chorume. 2008. 138 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental). Universidade Positivo. Curitiba, 2008.
13. PREUSSLER, K. H. Levantamento fitossociológico. Comunicação pessoal. 2011.
14. SILVA, J. M. Estudo de elementos-traço em macrófitas aquáticas da sub-bacia do Rio Madeira. Trabalho de conclusão de curso da Universidade Federal de Rondônia, 2007. 49 f. Disponível em: www.biogeoquimica.unir.br/classes/download.php?id=150. Acesso em: 20/07/11.
15. SILVA, S. C. A.; MARANHO, L. T.; PREUSSLER, K. H. Pós-tratamento do chorume gerado no Aterro Sanitário da Caximba, Curitiba/PR, Brasil por fitorremediação. Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade Positivo do Curso de Biologia, 2010.
16. VILHENA, A.; D'ALMEIDA, M. L. O. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, SP. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. São Paulo, SP: IPT/CEMPRE, p. 370, 2000. (Publicação IPT 2622).