

TOXICIDADE DO LODO GERADO PELO TRATAMENTO BIOLÓGICO DA  
ÁGUA DE PRODUÇÃO, NO TERMINAL MARÍTIMO ALMIRANTE  
BARROSO, MUNICÍPIO DE SÃO SEBASTIÃO, SP

**R.C. Guerra; D.F. Angelis**

Universidade Estadual Paulista, Departamento de Bioquímica e Microbiologia, Av. 24A, 1515, CEP 13506-900, Rio Claro, SP, Brasil. E-mail: guerra.ricardo@gmail.com

RESUMO

A exploração dos campos produtores de petróleo tem como característica a extração de uma parcela de água misturada ao óleo. Esta água deve ser separada do petróleo antes do processamento pelas refinarias, assim, originando um resíduo conhecido como Água de Produção (AP). Os sistemas projetados para o tratamento da AP empregam diferentes métodos, visando atingir maior eficiência na separação dos contaminantes da água. Entretanto, os processos de tratamento geram subprodutos que necessitam de posterior manuseio ou descarte. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a toxicidade do produto de solubilização do lodo gerado pelo tratamento da AP em reatores aeróbios, proveniente da estação piloto de tratamento do efluente do Terminal Marítimo Almirante Barroso. Foram testadas as espécies: *Barbarea verna* Mill., *Brassica oleracea* L., *Cucumis sativus* L. e *Eruca sativa* Mill., quanto à porcentagem de germinação, velocidade média de germinação e inibição ao crescimento da raiz e hipocótilo. Os resultados indicam maior sensibilidade da germinação de *B. verna* ao extrato solubilizado, as demais espécies apresentaram concentração crítica para a germinação entorno de 25% do extrato solubilizado. A inibição ao crescimento da raiz e hipocótilo indica maior resistência das espécies *E. sativa* e *B. oleracea*, a concentração de inibição ( $CI_{50}$ ) para essas espécies foi respectivamente de 23,61% e 16,64% para a raiz, para o hipocótilo a  $CI_{50}$  foi em torno de 18% para as duas espécies.

PALAVRAS-CHAVE: Salinidade, germinação, crescimento radicular, petróleo.

ABSTRACT

BIOLOGICAL SLUDGE TOXICITY, FROM PRODUCED WATER TREATMENT AT TERMINAL MARÍTIMO ALMIRANTE BARROSO, SÃO SEBASTIÃO, SÃO PAULO STATE, BRAZIL. One of oil production characteristics is the mixed water volume co-produced. This water contain must be eliminated before refinery processing, originating a wastewater known as Produced Water. These waste treatment systems are designed by a combination of different methodologies, looking for greater treatment efficiency. In the mean time, treatment processes generate byproducts that need an ultimate disposal. This paper objective is to evaluate the solubilization product toxicity, from a biological sludge, produced at a Pilot Produced Water Treatment Facility, located on Terminal Marítimo Almirante Barroso. The species: *Barbarea verna* Mill., *Brassica oleracea* L., *Cucumis sativus* L. and *Eruca sativa* Mill., were used for bioassays tests based on germination percentage, germination velocity and root/hypocotyls elongation. Results indicate *B. verna* greater solubilization product germination sensibility, the remaining species showed a critical concentration of solubilization product about 25%. The root/hypocotyls elongation tests indicate *E. sativa* and *B. oleracea* greater resistance, with root inhibitory concentration ( $IC_{50}$ ) of 23.61% and 16.64% respectively and,  $IC_{50}$  for hypocotyls about 18% for both species.

KEY WORDS: Salinity, germination, root elongation, petroleum.

INTRODUÇÃO

As atividades envolvidas na cadeia produtiva do petróleo desde sua extração, armazenamento, transporte e processamento para a produção de derivados, são responsáveis pela geração de diferentes tipos de

resíduos. Estes são originários das impurezas presentes na composição natural do óleo ou provenientes de seu processamento (REBHUN; GALIL, 1994). Entre os resíduos gerados destaca-se, particularmente pelo volume envolvido, a água de produção. Esta pode ser definida como a parcela de água que se separa do óleo

durante o armazenamento, composta primariamente pela água de formação (naturalmente presente na formação geológica onde se realiza a prospecção do petróleo) e água de injeção, quando processos de recuperação secundária do petróleo são empregados (HOLDWAY, 2002; HAYES; ARTHUR, 2004).

Além dos compostos lixiviados das rochas reservatório, naturalmente presentes na água de formação, uma grande variedade de produtos químicos é adicionada durante o processamento do petróleo. Estes aditivos químicos são empregados para resolver ou prevenir problemas operacionais (BURNS *et al.*, 1999). A toxicidade aguda destes compostos químicos contribui para a toxicidade geral da Água de Produção (HOLDWAY, 2002).

A maior parte das reservas brasileiras de petróleo encontra-se na Bacia de Campos, na margem continental dos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. A localização dos reservatórios em grandes profundidades (lâmina d'água superior a 2.000 m), contribui com o volume de água extraída junto ao petróleo, devido à elevada pressão e percolação da água do mar através do meio sedimentar (CASSELLA *et al.*, 2005).

O Terminal Marítimo de São Sebastião (TEBAR) é responsável pelo escoamento de aproximadamente 60% da produção nacional de petróleo para as refinarias localizadas no Estado de São Paulo. O óleo cru recebido pelo terminal é armazenado em tanques onde ocorre a separação óleo/água. A geração mensal de Água de Produção no TEBAR é entorno de 15.000 m<sup>3</sup>.

Os sistemas para o tratamento deste efluente são projetados com a combinação de diferentes metodologias de tratamento, visando atingir maior eficiência na separação e degradação dos contaminantes da água. Entretanto, todos os processos com potencial aplicação no tratamento da Água de Produção geram subprodutos que necessitam de posterior processamento e descarte, de acordo com critérios de proteção ambiental e saúde pública.

O impacto ambiental provocado pelo descarte da água produzida, geralmente, é avaliado pela toxicidade dos constituintes e pela quantidade de compostos orgânicos e inorgânicos presentes. Estes contaminantes podem causar diferentes efeitos sobre o ambiente. Acredita-se que os efeitos mais nocivos são aqueles relacionados aos compostos que permanecem em solução após o descarte da água produzida (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2000).

Os organismos vivos incorporam tanto os efeitos positivos quanto negativos dos impactos químicos e condições ambientais vivenciadas durante seu desenvolvimento, fornecendo uma medida mais direta da toxicidade do que análises químicas isoladas (KEDDY *et al.*, 1995). Desta forma, os testes de toxicidade representam uma ferramenta para o estudo dos efeitos de agentes tóxicos sobre organismos vivos, funda-

mentando-se no princípio da resposta dos organismos ser proporcional à dose do tóxico a que foram submetidos (JARDIM, 2004).

Durante os estágios iniciais de desenvolvimento, as sementes são mais sensíveis ao estresse ambiental. Assim, os efeitos de agentes tóxicos podem ser monitorados por meio de endpoints como sobrevivência, germinação e estágios iniciais de desenvolvimento (BARBERO *et al.*, 2001).

Os testes de toxicidade baseados na germinação de sementes e crescimento radicular têm sido propostos por diversas agências governamentais, como parte da avaliação do potencial de contaminação de resíduos e efluentes dispostos no ambiente (OECD, 1984; USEPA, 1996).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito tóxico da disposição do lodo gerado pela etapa de tratamento biológico da Água de Produção, proveniente de uma Estação Piloto de Tratamento de Efluentes (ETE piloto) instalada no TEBAR. A estação conta com três reatores biológicos aeróbios com biomassa em suspensão, operando em sistema de batelada seqüencial, delineados para a nitrificação/desnitrificação da amônia. A produção de lodo é estimada entorno de 120 kg/h, retirado dos reatores com 4% de sólidos e, após processo de secagem, espera-se obter teor de sólidos em torno de 80%.

Os ensaios de toxicidade foram realizados a partir da solubilização do lodo desidratado. O efeito de concentrações crescentes do extrato de solubilização do lodo, sobre a germinação e desenvolvimento inicial de plântulas de *Barbarea verna* Mill. (Agrião do seco), *Brassica oleracea* L. (Couve manteiga), *Cucumis sativus* L. (Pepino caipira) e *Eruca sativa* Mill. (Rúcula), foi avaliado como parte dos estudos sobre a disposição final deste resíduo e são apresentados neste trabalho.

## Metodologia

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Toxicidade de Águas da Universidade Estadual Paulista - Unesp, Campus de Rio Claro, SP. As sementes utilizadas na execução dos testes de germinação e de inibição do crescimento da raiz e hipocótilo foram adquiridas de um mesmo fornecedor (TopSeed®). Nos casos onde mais de um lote de sementes foi necessário para a realização do teste, procedeu-se a homogeneização das sementes, com o objetivo de uniformizar a amostra.

## Caracterização do lodo

Para melhor conhecimento das características do material estudado, o lodo coletado no reator de tratamento biológico da água de produção foi avaliado mediante parâmetros químicos, físicos e microbiológicos. Estes dados têm a intenção de apre-

sentar um conjunto de informações gerais sobre o resíduo estudado.

A análise da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e concentração de sólidos foram realizadas segundo CLESCERI *et al.* (1998). A determinação das bactérias heterotróficas foi realizada de acordo com CETESB (1978), a partir da observação dos tipos de colônias bacterianas encontradas, procedeu-se o isolamento e purificação da cultura em meio Plate Count Agar (PCA) contendo 50 g/L de NaCl.

### Desidratação do lodo

A concentração e secagem do Lodo foram realizadas a partir do material coletado no ponto de descarga de lodo do reator biológico instalado no TEBAR. Para a concentração inicial do material, o lodo foi filtrado à vácuo, em seguida, a torta de lodo resultante foi desidratada em estufa a 45° C por um período de 48 horas. Mediante este procedimento uma concentração de sólidos compatível com a existente no projeto da ETE piloto foi obtida.

### Solubilização do lodo

A obtenção do extrato solubilizado do lodo foi realizada a partir do lodo desidratado, segundo o método descrito pela Norma Técnica NBR 10.006 "Solubilização de resíduos - Procedimento" (ABNT, 2004a), como parte dos ensaios necessários à caracterização de resíduos sólidos.

Para a realização dos testes de germinação e inibição ao crescimento da raiz e hipocótilo, foram empregadas diluições do extrato solubilizado. Este material representa a fração do lodo desidratado sujeita à dissolução em água, desta forma, mais biodisponível. As soluções testadas variaram de 5 a 25% de concentração do extrato solubilizado, diluído em água desionizada. O tratamento controle era composto exclusivamente por água desionizada.

Tabela 1 - Valores de condutividade elétrica e potencial osmótico das diluições do extrato solubilizado, empregadas nos testes de germinação e inibição ao crescimento da raiz e hipocótilo.

Concentração extrato solubilizado (v/v)	Condutividade elétrica (dS.m <sup>-1</sup> ) a 25°C	Potencial osmótico (MPa)
5%	5,17	-0,19
10%	9,65	-0,35
15%	13,57	-0,50
20%	17,49	-0,64
25%	21,32	-0,78

A condutividade elétrica das diluições foi aferida em condutivímetro e, a partir dos valores obtidos calculou-se o potencial osmótico (Tabela 1) conforme FORSYTHE (1966), citado por SANTANA *et al.* (2003).

### Teste de germinação

Para cada espécie vegetal foram testadas no mínimo cinco diluições do extrato solubilizado, em três repetições contendo 50 sementes. As sementes foram acondicionadas em placa de petri, sobre papel de filtro previamente esterilizado. A cada placa foi adicionado 4mL da respectiva diluição testada e em seguida incubada em câmara climática (Estufa BOD) a 22 ± 1° C.

A contagem de sementes germinadas foi realizada em intervalos de 24 horas, considerando-se germinadas as sementes que apresentassem 2mm de protrusão da radícula. A porcentagem total de sementes germinadas por tratamento foi calculada, assim como, a velocidade média de germinação, obtida por meio do inverso do tempo médio de germinação (LABOURIAU, 1983).

Os dados percentuais de germinação foram transformados para arco seno ( $%G = \sqrt{x/100}$ ); a comparação entre as médias foi realizada pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade utilizando o software Biostat 4.0 (AYRES *et al.*, 2006).

### Teste de inibição da raiz e hipocótilo

A realização dos testes de inibição da raiz e do hipocótilo seguiu os procedimentos descritos por MORALES (2004). A partir dos resultados obtidos foi calculada a Concentração de Inibição de 50% (CI<sub>50</sub>) do conjunto de medidas da raiz e hipocótilo, em relação ao tratamento controle, para cada espécie vegetal.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização do lodo

A concentração de sólidos dissolvidos totais determinada para o lodo (Tabela 2), indica uma quantidade de sais pouco a cima da normalmente encontrada na água do mar, que apresenta em média 35 g/L (WHITTEN *et al.*, 2004), resultando no alto valor de condutividade elétrica encontrado no lodo.

A Tabela 3 apresenta um grupo de seis bactérias isoladas a partir do lodo, as espécies compreendem cocos e bacilos, predominantemente gram positivos com variada pigmentação das colônias.

A operação dos reatores da estação piloto do TEBAR não prevê a adição de inóculo microbiano. O desenvolvimento da biomassa ocorre a partir da própria

população microbiana presente no efluente, mediante o fornecimento de uma fonte de carbono externa para estimular seu crescimento.

Tabela 2 - Resultado das análises do lodo biológico da ETEpiloto/TEBAR.

Parâmetro	Valor	Unidade
pH	7,01	-
Condutividade	68,00	dS.m <sup>-1</sup>
DBO	300,53	mgO <sub>2</sub> /L
Sólidos dissolvidos totais	38,00	g/L
Sólidos suspensos totais	25,05	g/L
Sólidos suspensos voláteis	15,61	g/L
Bactérias heterotróficas	1,48.10 <sup>7</sup>	UFC

A contagem de bactérias heterotróficas, da ordem de 1,48.10<sup>7</sup> UFC, representa intensa atividade biológica do lodo, composto por microrganismos halotolerantes ou halófilos, adaptados às condições de salinidade do efluente em tratamento.

### Solubilização do lodo

A análise química do extrato solubilizado do lodo demonstra que na composição deste resíduo a concentração dos elementos: sódio, chumbo, ferro, manganês, bário e cloreto, encontra-se acima dos limites máximos estabelecidos para o ensaio de solubilização (Tabela 4). Assim, de acordo com a Norma Técnica NBR 10.004 "Resíduos Sólidos – Classificação" (ABNT, 2004b), este resíduo é classificado como: Classe II A, Não Perigoso – Não Inerte.

### Teste de germinação

O resultado dos testes de germinação é apresentado pela Tabela 5. De maneira geral observa-se que, entre o potencial osmótico de -0,5 e -0,64MPa, os efeitos deletérios do excesso de salinidade começam a causar diminuição significativa no percentual de germinação.

Entre as espécies testadas, *B. verna* demonstrou maior sensibilidade do processo de germinação ao aumento da concentração do extrato solubilizado. A partir do potencial osmótico de -0,35MPa é possível observar diferença significativa em relação ao tratamento controle, sendo o potencial de -0,78MPa responsável pela inibição total da germinação.

Com exceção de *B. verna*, as outras espécies testadas apresentaram taxa de inibição da germinação acima de 50%, apenas quando submetidas a 25% de concentração do extrato solubilizado (-0,78MPa).

A germinação de *B. oleracea* foi pouco afetada pelos potenciais osmóticos testados, sendo possível observar diferença significativa entre as diluições do extrato solubilizado, somente sob potencial osmótico de -0,78MPa. No intervalo entre 20 e 25% de concentração (-0,64 e -0,78MPa), observa-se diminuição de 33% na taxa de germinação de *B. oleracea*, indicando uma estreita faixa de pressão osmótica onde o ponto crítico em relação à capacidade de germinação é atingido.

A espécie *C. sativus* apresentou diminuição significativa em sua taxa de germinação sob potencial osmótico de -0,64MPa, atingindo 75% de diminuição da taxa de germinação, em relação ao controle, quando submetida ao potencial osmótico de -0,78MPa. TORRES *et al.* (2000) ao estudarem o efeito de diferentes concentrações salinas na germinação de *C. sativus*, encontraram diminuição da ordem de 36% sob potencial osmótico de -0,8MPa.

As sementes de *E. sativa* foram inibidas significativamente a partir do potencial osmótico de -0,5MPa. Sob potencial osmótico de -0,78MPa *E. sativa* apresentou porcentagem de germinação semelhante ao das espécies *B. oleracea* e *C. sativus*.

A Figura 1 apresenta os resultados obtidos para o cálculo da velocidade média de germinação das espécies testadas. Assim como os resultados obtidos para a porcentagem de germinação, o aumento da concentração do extrato solubilizado resultou em gradual diminuição da velocidade média de germinação. Desta forma, observa-se que o aumento do potencial osmótico das diluições testadas, aumentou o intervalo de tempo entre a primeira e última observação de germinação, resultando no retardamento deste processo.

Tabela 3 - Caracterização das bactérias isoladas do lodo biológico da ETEpiloto/TEBAR.

Morfologia celular	Coloração das colônias	Parede celular	Endosporos	EPS*
Coco	Laranja Claro	Gram +	-	+
Coco	Creme Escuro	Gram +	+	+
Coco	Laranja Brilhante	Gram -	-	-
Tetrade	Amarelo Claro	Gram +	-	-
Bacilo	Creme Claro	Gram +	-	-
Bacilo Curto	Creme Claro	Gram -	-	-

\*Produção de exopolissacarídeos.

Tabela 4 - Análises químicas do extrato solubilizado (mg.L<sup>-1</sup>), do lodo biológico da ETEpiloto/TEBAR.

Elementos químicos	Solubilização	LM <sup>1</sup>
Sódio	10,400	200,0
Potássio	369,0	*
Silício	4,4	*
Cálcio	1.583	*
Estrôncio	112,0	*
Magnésio	478,0	*
Chumbo	0,28	0,01
Ferro	0,79	0,3
Manganês	0,74	0,1
Cromo total	< 0,05	0,05
Fósforo	4,6	*
Alumínio	< 0,1	0,2
Zinco	0,026	5,0
Bário	4,02	0,7
Níquel	0,021	*
Boro	10,02	*
Prata	< 0,1	0,05
Cobre	< 0,008	1,0
Sulfato	270,0	400,0
Cloreto	23.000	250,0
Cádmio	< 0,005	0,005

LM - Limite Máximo Permissível para o Ensaio de Solubilização;

\*elementos químicos não considerados pela NBR 10.004 (Anexo G).

De maneira geral, à medida que aumentam as concentrações de sais no meio, observa-se a necessidade de mais tempo para a semente intumescer e germinar, logo, há uma menor velocidade de germinação (NÓBREGA *et al.*, 1999; ROSA *et al.*, 2005).

A comparação entre os resultados de porcentagem e velocidade média de germinação, demonstra a importância deste último parâmetro para a obtenção de uma melhor avaliação do comportamento das espécies durante o processo de germinação. Observa-se para a

espécie *C. sativus* que, mesmo em concentrações onde a taxa de germinação não diferiu do controle, permanecendo entorno de 100%, uma diminuição da velocidade média de germinação foi evidente. Comportamento semelhante pôde ser observado para a germinação de *B. oleracea*, entretanto com diminuição da velocidade média de germinação menos pronunciada.

#### Teste de inibição da radícula e hipocótilo

As Figuras 2 e 3 apresentam a regressão linear resultante do teste de inibição ao crescimento da raiz e hipocótilo. O conjunto de dados, para as quatro espécies testadas, apresentou um coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) entre 93 e 99 %, indicando um alto grau de correlação entre os dados obtidos experimentalmente e os valores de inibição calculados para a determinação da CI<sub>50</sub>.

Os valores obtidos no tratamento controle para o comprimento da raiz de *B. verna* apresentaram média de 18,30mm, com intervalo de confiança (IC95%) entre 16,45 e 19,85 mm, para o comprimento do hipocótilo, média de 22,93 mm (IC95% = 21,55 a 24,32 mm). Os valores calculados de CI<sub>50</sub> para a raiz e hipocótilo de *B. verna* apresentaram variação entre 13,13 e 10,18% de concentração do extrato solubilizado.

O tratamento controle de *B. oleracea*, para o comprimento da raiz, apresentou média de 42,38 mm (IC95% = 40,27 a 44,22 mm), o comprimento do hipocótilo foi em média 24,09 mm (IC95% = 22,70 a 25,26 mm) Os valores de CI<sub>50</sub> calculados para a inibição da raiz e hipocótilo de *B. oleracea* apresentaram variação entre 16,64 e 18,18% de concentração do extrato solubilizado.

A média encontrada para o comprimento das raízes de *C. sativus*, no tratamento controle, foi de 70,36 mm (IC95% = 67,57 a 72,68mm), o comprimento médio do hipocótilo foi de 28,62 mm (IC95% = 27,60 a 29,50 mm), os valores de CI<sub>50</sub> calculados para a inibição da raiz e hipocótilo de *C. sativus* variaram entre 11,27 e 11,69% de concentração do extrato solubilizado.

Tabela 5 - Porcentagem média de germinação para as espécies testadas, submetidas à concentrações crescentes do extrato solubilizado do lodo biológico, produzido pelo tratamento da água de produção pela ETEpiloto/TEBAR.

Espécie	Potencial osmótico					
	Controle	- 0,19MPa	- 0,35MPa	- 0,50MPa	- 0,64MPa	- 0,78MPa
Germinação (%)						
<i>B. verna</i>	96,6 aA	92,2 aA	53,3 bA	17,8 cA	4,4 dA	0,0 eA
<i>B. oleracea</i>	97,8 aA	95,4 aA	92,2 aB	77,8 aB	80,0 aB	46,7 bB
<i>C. sativus</i>	100 aA	100 aA	100 aB	98,3 aB	63,3 bB	25,0 cC
<i>E. sativa</i>	98,9 aA	96,7 aA	86,7 abB	78,3 bB	73,3 bB	33,3 cBC

Médias seguidas das mesmas letras, maiúscula para coluna e minúscula para linha, não diferem pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade.

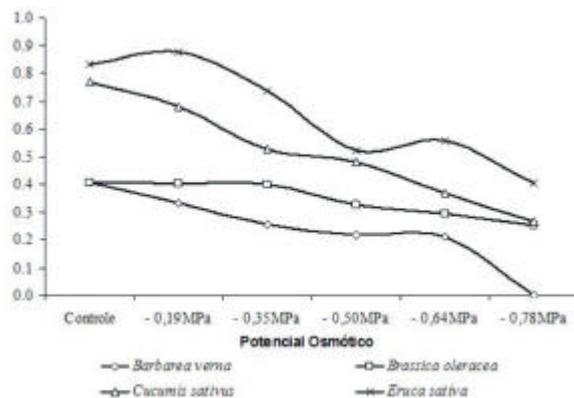


Fig. 1 - Velocidade média de germinação das espécies submetidas ao extrato solubilizado do lodo biológico, produzido pelo tratamento da água de produção na ETEpiloto/TEBAR.

Os valores obtidos no tratamento controle para o comprimento da raiz de *E. sativa*, apresentaram média

de 37,25 mm (IC95% = 34,50 a 40,06 mm), o comprimento do hipocótilo foi em média 30,98 mm (IC95% = 29,52 a 32,31 mm). *E. sativa* diferiu do padrão encontrado para as outras espécies testadas, apresentando maior variação entre o valor calculado da  $CI_{50}$  para a raiz e hipocótilo, 23,61% e 18,45%, respectivamente.

Os testes de germinação e inibição ao crescimento para a espécie *B. verna*, apresentaram resultados com comportamento semelhante. Frente ao aumento da concentração do extrato solubilizado, os dois testes indicaram inibição de 50% da amostra em torno de 10% de concentração.

As espécies *B. oleracea* e *E. sativa* não sofreram efeitos pronunciados sobre a porcentagem de germinação até a faixa de concentração compreendida entre 20 e 25% de concentração do extrato solubilizado (-0,64 e -0,78 MPa, respectivamente). As duas espécies também demonstraram maior resistência à inibição do crescimento pelo extrato solubilizado.

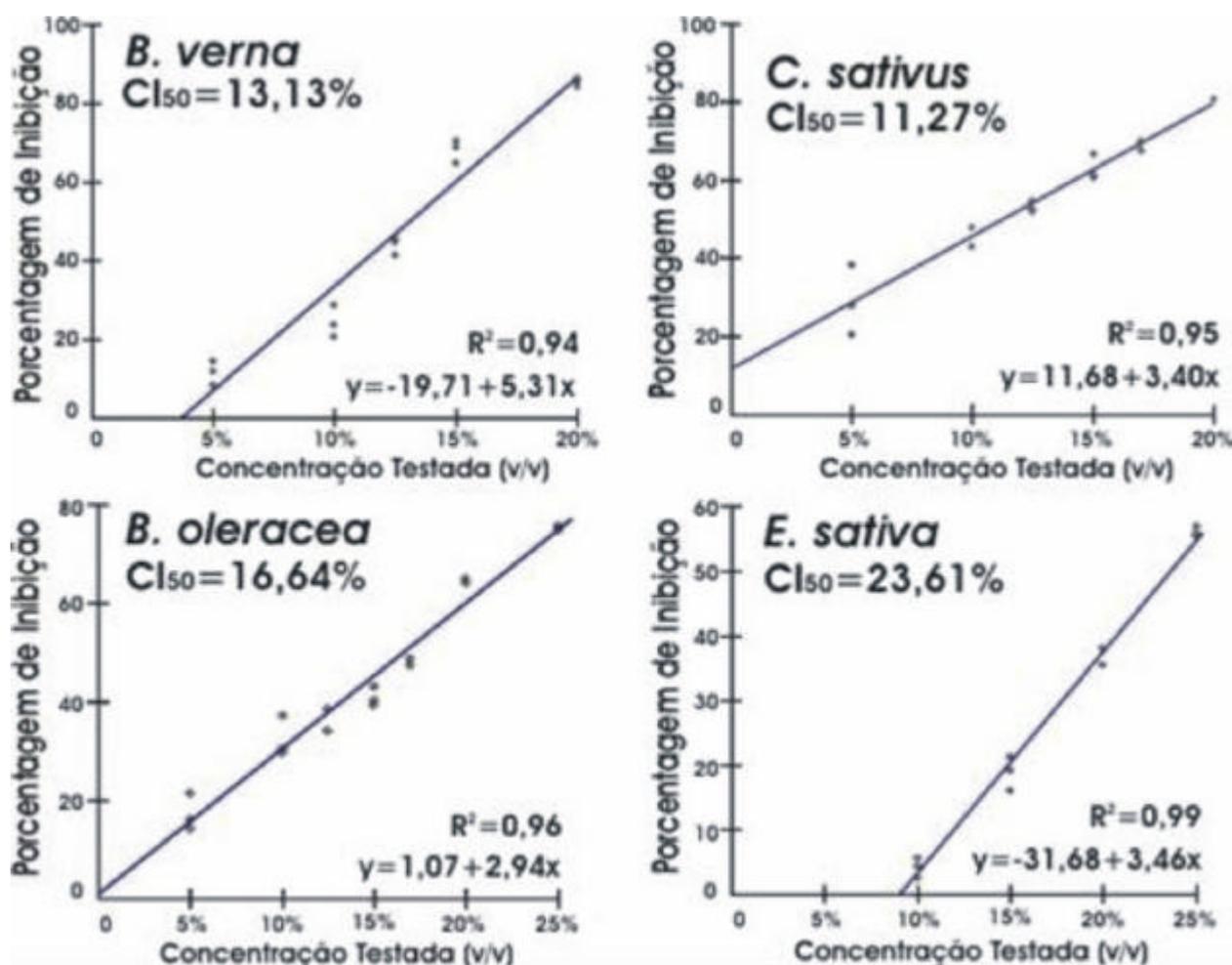


Fig. 2 - Regressão linear da porcentagem média de inibição do crescimento da raiz, em relação ao tratamento controle, das espécies testadas sob concentrações crescentes do extrato solubilizado do lodo biológico, produzido pelo tratamento da água de produção pela ETEpiloto/TEBAR.

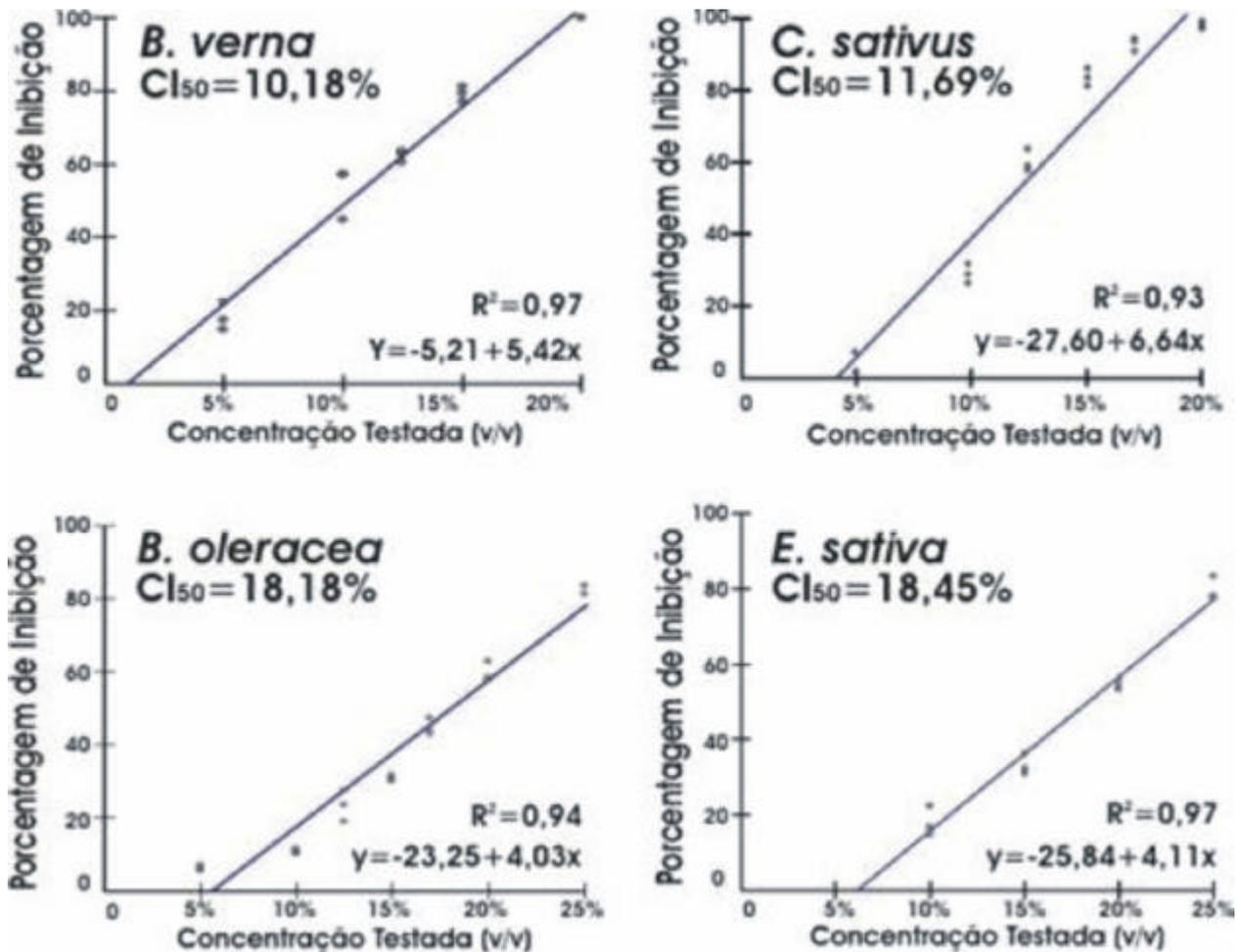


Fig. 3 - Regressão linear da porcentagem média de inibição do crescimento do hipocótilo, em relação ao tratamento controle, das espécies testadas sob concentrações crescentes do extrato solubilizado do lodo biológico, produzido pelo tratamento da água de produção pela ETEpiloto/TEBAR.

A diminuição da porcentagem de germinação de sementes submetidas ao estresse hídrico pode ser atribuída à redução das atividades enzimáticas (LABOURIAU, 1983). Segundo MACHADO *et al.* (2006) o potencial osmótico de soluções salinas pode atingir valores inferiores aos apresentados pelas células do embrião, dessa maneira, dificultando a absorção da água necessária para que a germinação seja possível. SANTOS *et al.* (1992) sugeriram que os efeitos tóxicos da salinidade sobre a germinação, ocorram não somente por dificultar a cinética da absorção de água, mas também por facilitar a entrada de íons em quantidades tóxicas nas sementes durante a embebição, sendo constatado que os efeitos provocados pelos sais são mais nocivos à germinação do que apenas o efeito osmótico.

Segundo HARRIS (1915) citado por CAMPOS; ASSUNÇÃO (1990), o grau de toxicidade de sais solúveis para a germinação de trigo, milho, beterraba, alfafa, aveia e cevada apresentou a seguinte ordem:  $NaCl > CaCl_2 > KCl > NaNO_3 > MgCl_2 > KNO_3 > MgNO_3 > Na_2CO_3$

$> K_2CO_3 > Na_2SO_4 > K_2SO_4 > MgSO_4$ .

O efeito tóxico observado nos testes realizados pode não estar exclusivamente relacionado ao potencial osmótico a que as sementes foram expostas. A condutividade elétrica das soluções testadas (Tabela 1) era devida aos sais presentes na água do mar, concentrados pela desidratação térmica do lodo. Entretanto, outros contaminantes provenientes da formação geológica ou contato da água com frações mais solúveis do petróleo foram encontrados pela análise química do extrato solubilizado, indicando que estes elementos podem ter contribuído para um maior efeito tóxico sobre as espécies vegetais testadas.

## CONCLUSÃO

O lodo produzido pelo reator da ETE piloto do TEBAR é classificado como um resíduo não perigoso, porém não inerte, devido à solubilização de alta concentração de sais e metais como: chumbo, ferro,

manganês e bário. Desta forma, dado o potencial de contaminação do resíduo, sua disposição final demanda medidas adequadas de proteção ambiental.

Apesar da alta concentração de bactérias heterotróficas encontrada no lodo, uma baixa diversidade dos tipos celulares foi observada.

No teste de germinação, com exceção da espécie *B. verna*, o efeito letal foi mais evidente somente sob a concentração de 25% do extrato solubilizado do lodo.

A velocidade média de germinação, para todas as espécies, foi diminuída em resposta ao aumento das concentrações testadas.

O teste de crescimento da raiz e hipocótilo apresentou o efeito inibitório de forma mais gradual, para níveis sub-letais de concentração do extrato solubilizado.

A associação de testes quantitativos (% de germinação) e qualitativos (crescimento) ofereceu um melhor conjunto de informações, ampliando as possibilidades de interpretação dos resultados.

#### AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Formação de Recursos Humanos para a Indústria de Petróleo e Gás PRH-05, pelo financiamento do projeto; ao Depto de Bioquímica e Microbiologia da UNESP/Rio Claro; à Divisão de Biotecnologia e Tratamento Ambientais (BTA) do Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES); ao pessoal de SMS e Tratamento de Resíduos do TEBAR.

#### REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR - 10.006 Solubilização de Resíduos*, 2p. 2004(a).
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR - 10.004 Resíduos Sólidos - Classificação*, 33p. 2004(b).
- AYRES, M.; AYRES JUNIOR, M.; AYRES, D. L.; SANTOS, A. S. *Bio Estat 4.0: aplicações estatísticas nas áreas de ciências biológicas e médicas*. Belém: Sociedade Civil Mamirauá, 2006.
- BARBERO, P.; BELTRAMI, M.; BAUDO, R.; ROSSI, D. Assessment of Lake Orta sediments phytotoxicity after the liming treatment. *J. Limnol.* v.60, n.2, p.269-276, 2001.
- BURNS, K.A.; CODI, S.; FURNAS, M.; HEGGIE, D.; HOLDWAY, D.; KING, B.; MCALLISTER, F. Dispersion and fate of produced formation water constituents in an australian northwest shelf shallow water ecosystem. *Marine Pollution Bulletin.* v.38, n.7, p.593-603, 1999.
- CAMPOS, I.S.; ASSUNÇÃO, M.V. Efeitos do cloreto de sódio na germinação e vigor de plântulas de arroz. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.25, n.6, p.837-843, 1990.
- CASSELLA, R.J.; OLIVEIRA, E.P.; MAGALHÃES O.I.B. Direct determination of vanadium in high saline produced waters from offshore petroleum exploration by electrothermal atomic absorption spectrometry. *Talanta*. 2005. Disponível em: <http://www.elsevier.com/locate/talanta >. Acesso em: 5 fev. 2006.
- CETESB - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. *Contagem Padrão de Colônias de Bactérias - L5.201*. São Paulo, CETESB, 1978. 11p.
- CLESCERI, L.S.; GREENBERG, A.E.; EATON, A.D. (Ed.). *Standard methods for examination of water and wastewater*. 20th ed. Baltimore: United Book Press, 1998.
- HAYES, T.; ARTHUR, D. Overview of emerging produced water treatment technologies. In: ANNUAL INTERNATIONAL PETROLEUM ENVIRONMENTAL CONFERENCE, 11, 2004, Albuquerque, *Proceeding*. Albuquerque, 2004.
- HOLDWAY, D.A. The acute and chronic effects of wastes associated with offshore oil and gas production on temperate and tropical marine ecological processes. *Marine Pollution Bulletin*, v.44, p.185-203, 2002.
- JARDIM, G.M. *Estudos ecotoxicológicos da água e do sedimento do Rio Corumbataí, SP*. 2004. 138p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"; Piracicaba, 2004.
- KEDDY, C.J.; GREENE, J.C.; BONNELL, M.A. Review of whole-organism bioassays: soil, freshwater sediment, and freshwater assessment in Canada. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.30, p.221-251, 1995.
- LABOURIAU, L.G. *A germinação das sementes*. Washington: OEA: 174p, 1983.
- MACHADO, N.B.N.; CUSTÓDIO, C.C.; COSTA, P.R.; DONA, F.L. Deficiência hídrica induzida por diferentes agentes osmóticos na germinação e vigor de sementes de feijão. *Revista Brasileira de Sementes*, v.28, n.1, p.142-148, 2006.
- MORALES, C.G. *Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de agua: estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones*. Cidade do México: IMTA, 2004. 142p.
- NOBREGA, G.M.N.; QUEIROZ, J.E.; SILVA, L.M.M.; SANTOS, R. V. Efeito da salinidade na germinação e desenvolvimento inicial da *Leucena*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, n.2, p.257-260, 1999.

- OECD. Terrestrial plants: Growth test. *OECD Guidelines for testing of chemicals*, Paris: OECD, 1984.
- OLIVEIRA, R.C.G.; OLIVEIRA, M.C.K. Remoção de contaminantes tóxicos dos efluentes líquidos oriundos da atividade de produção de petróleo no mar. *Boletim Técnico da Petrobras*, v.43, n.2, p.129-136, 2000.
- REBHUN, M.; GALIL, N. Technological strategies for protecting and improving the biological treatment of wastewater from a petrochemical complex. *Water Science and Technology*, v.29, n.9, p.133-141, 1994.
- ROSA, L.S.; FELIPPI, M.; NOGUEIRA, A.C.; GROSSI, F. Avaliação da germinação sob diferentes potenciais osmóticos e caracterização morfológica da semente e plântula de *Ateleia glazioviana* Baill (Timbó). *Cerne*, v.11, n.3, p.306-314, 2005.
- SANTANA, M.J.; CARVALHO, J.A.; SILVA, E.L.; MIGUEL, D.S. Efeito da irrigação com água salina em um solo cultivado com o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). *Ciência e Agrotecnologia*, v.27, n.2, p.443-450, 2003.
- SANTOS, V.L.M.; CALIL, A.C.; RUIZ, H.A.; ALVARENGA, E.M.; SANTOS, C.M. Efeito do estresse salino e hídrico na germinação e vigor de sementes de soja. *Revista Brasileira de Sementes*, v.14, n.2, p.189-194, 1992.
- TORRES, S. B.; VIEIRA, E. L.; MARCOS FILHO, J. Efeitos da salinidade na germinação e no desenvolvimento de plântulas de pepino. *Revista Brasileira de Sementes*, v.22, n.2, p.39-44, 2000.
- USEPA Ecological effects test guidelines. OPPTS 850.4200. *Seed Germination/Root Elongation Toxicity Test*. EPA 712-C-96-154. april 1996.
- WHITTEN, K.W.; GAILEY, K.D.; DAVIS, R.E. *General chemistry with quantitative analysis*. 7.ed. Philadelphia: Saunders College Publishing, 2004. p.1232.

Recebido em 13/07/07

Aceito em 09/02/09