

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

DISSERTAÇÃO

**Influência do Tratamento de Lavagem
de Resíduos de Perfuração de Poços de Petróleo no
Desenvolvimento de Plantas de Arroz (*Oryza sativa*)**

Leilane da Silva Lima

2013



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE LAVAGEM DE RESÍDUOS DE
PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO NO DESENVOLVIMENTO
DE PLANTAS DE ARROZ (*Oryza sativa*)**

LEILANE DA SILVA LIMA

Sob a Orientação do Professor
Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho

e Co-orientação do Professor
Everaldo Zonta

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo.

Seropédica, RJ
Março de 2013

633.18

L732i

T

Lima, Leilane da Silva, 1986-

Influência do tratamento de lavagem de resíduos de perfuração de poços de petróleo no desenvolvimento de plantas de arroz (*Oryza sativa*) / Leilane da Silva Lima. – 2013.

95 f.: il.

Orientador: Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, 2013.

Bibliografia: f. 74-79.

1. Arroz - Cultivo – Teses. 2. Arroz – Solos - Teses. 3. Solos - Poluição - Teses. 4. Resíduos industriais – Aspectos ambientais - Teses. 5. Resíduos industriais – Reaproveitamento – Teses. 6. Poços de petróleo - Perfuração – Teses. I. Amaral Sobrinho, Nelson Moura Brasil do, 1956-. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo. III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

LEILANE DA SILVA LIMA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 04/03/2013.

Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho Dr. UFRRJ
(Orientador)

Marcos Gervasio Pereira. Dr. UFRRJ

Fabiana Soares dos Santos. Dra. UFF

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade da vida e pela oportunidade de estudar na UFRRJ. Aqui conheci pessoas maravilhosas, vivi os melhores anos da minha vida e avancei na minha formação pessoal e profissional.

Agradeço a minha família, que sempre me deu suporte e incentivo para chegar até aqui. Nossa origem humilde foi a melhor base para o meu desenvolvimento, pois sempre foi dado grande valor à educação e às oportunidades provenientes dela. O esforço dos meus pais para que eu tivesse a melhor educação possível me fez acreditar que daria grandes passos. Meu pai sempre deixou claro que não teria como pagar uma universidade particular, e que meu irmão e eu deveríamos nos empenhar ao máximo para ingressarmos em uma boa universidade pública. E assim, nós dois viemos para a Rural, essa universidade maravilhosa.

Agradeço ao Michel, meu namorado e melhor amigo, que eu amo demais. Agradeço pela ajuda e parceria no desenvolvimento do nosso projeto que resultou nas nossas dissertações. Todas as dificuldades são superadas mais facilmente ao seu lado. Obrigada por fazer tudo o que faz por mim, não importa quanto esforço seja necessário. Sou muito abençoada por tê-lo ao meu lado.

Agradeço ao amigo Marcio Magalhães pela amizade e pela grande ajuda do início ao fim nessa dissertação. Obrigada por traduzir toda a estatística para uma linguagem mais compreensível por mim. Sua orientação fez com que tudo desse certo.

Ao professor e orientador Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho pela orientação e grande ajuda na interpretação dos meus resultados e esclarecimento das minhas dúvidas.

Aos amigos de laboratório Amanda, Bruna, Davi, Érica, Fábio, Filipe, Izabella, Matheus, Simone e Yusimi pela ajuda com as análises e apoio nos momentos de dificuldades. Um agradecimento especial à Adriana e ao Jair pela disposição e paciência com a leitura das minhas amostras, que foram muitas.

Ao CNPq pela bolsa concedida e ao CPGA-CS pelas oportunidades de aprendizado em um ótimo curso.

Aos colegas de curso e aos professores e funcionários do Departamento de Solos.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

BIOGRAFIA

Leilane da Silva Lima, filha de João Bôsko da Silva e Maria das Graças da Silva Lima, nasceu na cidade do Rio de Janeiro – RJ, em 27 de setembro de 1986. Concluiu em 2003 o Ensino Médio com curso Técnico em Informática, no CAP-UNIG. Em 2005 ingressou no curso de Graduação em Agronomia na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, com conclusão em 2009. Durante a graduação foi bolsista de Iniciação Científica pelo Laboratório de Química e Poluição do Solo (LQPS), com orientação do Professor Dr. Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho. Durante o ano de 2010 foi Bolsista de Aperfeiçoamento no LQPS. Em 2011 ingressou no curso de Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo da UFRRJ, com ênfase em Química e Poluição do Solo, sob orientação do Professor Dr. Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho.

RESUMO

LIMA, Leilane da Silva. **Influência do tratamento de lavagem de resíduos de perfuração de poços de petróleo no desenvolvimento de plantas de arroz (*Oryza sativa*)**. 2013. 95f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2013.

Uma grande questão ambiental é o impacto causado pela extração de materiais primários e pela deposição de resíduos. A indústria tenta mudar esse cenário com adequações ao longo da cadeia produtiva para diminuir os impactos ao meio ambiente. Entretanto, essa é uma área ainda pouco estudada. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desenvolvimento de plantas de arroz (*Oryza sativa*) em solos incubados com resíduos de perfuração de poço de petróleo tratados com lavagem para eliminar a influência do sódio e sob duas condições de umidade. Foram selecionados dois resíduos gerados durante a perfuração do Poço 7-SMC-50D-AL. Posteriormente, foi feita a sua lavagem em água, na proporção 1:5, visando diminuir os efeitos do sódio. Dessa forma, o tratamento de lavagem definiu duas condições: resíduo lavado e resíduo não lavado. A quantidade de resíduo adicionada ao solo foi definida de modo a atingir as concentrações de bário de 300 mg kg^{-1} , 600 mg kg^{-1} e 900 mg kg^{-1} . Os solos foram mantidos em duas condições de umidade (70% da capacidade de campo e reduzido com presença de lâmina de água). Durante a incubação dos vasos foi monitorado o potencial redox (Eh) até que, na condição de redução, fossem atingidos valores próximos de -200mV . Após atingir esses valores, aguardou-se 30 dias para o transplante das mudas de arroz e início da realização do ensaio. Foram coletadas amostras de cada unidade experimental, onde foram feitas análises dos elementos bário, ferro, manganês, cálcio, sódio e potássio. Foi realizado o plantio do arroz, permanecendo durante todo ciclo vegetativo (aproximadamente 3 meses) até serem colhidas as plantas para análise. Os resultados obtidos demonstraram que os resíduos do secador e da centrífuga, com e sem lavagem, na condição de oxidação, não interferiram na produção de matéria seca das plantas de arroz. Entretanto, a condição de redução do solo promoveu o aumento dos teores de bário absorvidos pelas plantas e redução nos de ferro. Nos tratamentos com resíduo e na condição de redução, a solubilização de bário combinada a uma deficiência moderada para ferro levou a uma possível interferência na produção de matéria seca.

Palavras chave: Tratamento de resíduo. Sódio. Fluido de perfuração.

ABSTRACT

LIMA, Leilane da Silva. **Influence of the treatment of dry waste from drilling of oil wells in the development of rice plants (*Oryza sativa*)**. 2013. 95p. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2013.

A major environmental issue is the impact caused by the extraction of primary materials and the waste disposal. The industry tries to change that with adjustments in the production chain to reduce impacts to the environment. However, this is a subject that has few studies. This study aimed to evaluate the development of rice plants (*Oryza sativa*) in soils incubated with waste from drilling oil wells, treated by washing to eliminate the influence of sodium and under two moisture conditions. Two residues generated during the drilling of the well 7-SMC-50D AL were selected. Subsequently, the residue washing was done in water with the 1:5 proportions, to reduce the effects of sodium. Thus, the washing treatment defined two conditions: washed and unwashed residues. The amount of residue added to the soil was set to achieve concentrations of barium of 300 mg kg⁻¹, 600 mg kg⁻¹ and 900 mg kg⁻¹. The soils were kept in two moisture conditions (70% of field capacity and waterlogged to get a reduced condition). During the incubation of vessels the redox potential (Eh) was monitored until values close to -200 mV was reached, in the reduction condition. After reaching these values, we waited up to 30 days before transplanting the rice seedlings and the test starting. Samples were collected from each experimental unit, and the elements barium, iron, manganese, calcium, sodium and potassium were analyzed. The rice was planted, and went throughout the vegetative cycle (approximately 3 months) until the plants were harvested for analysis. The results showed that the residues from the dryer and the centrifuge, with and without washing, in the oxidized condition, did not affect the dry matter yield of the rice plants. However, the soil reduction condition promoted increasing concentrations of barium absorbed by plants, and reduced the iron level. In the treatments with the residue and reduction condition, the solubilization of barium combined with a moderate iron deficiency possible interfered on dry matter production.

Keywords: Treatment of residue.Sodium.Fluid drilling.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Organograma para caracterização e classificação de resíduos. Fonte: Adaptado de NBR 10004 – ABNT (2004).....	4
Figura 2. Sistema de circulação e recuperação do fluido durante a perfuração do poço 7-SMC-50D-AL (Alagoas) e a geração dos diferentes resíduos e respectivos equipamentos. (Fonte: 5RCPP).....	10
Figura 3. A) Fases da perfuração; B) Sistema de secagem do cascalho e recuperação do fluido de perfuração. Poço 7-MSC-50D-AL. (Fotos: Freitas, 2010).....	11
Figura 4. Resíduos em repouso após a lavagem.....	18
Figura 5. Adição de água, medição de potencial redox e vasos dispostos em bancadas.....	20
Figura 6. Sementes germinadas em fitotron e mudas prontas para o plantio, com 20 dias.....	20
Figura 7. Plantio de quatro mudas e vaso pronto disposto em bancada.....	21
Figura 8. Plantas em desenvolvimento na casa de vegetação. Detalhe do enchimento dos grãos.....	21
Figura 9. Valores de potencial redox (Eh) do solo dos vasos em condição de oxidação após incorporação do resíduo da centrífuga, em duas condições de lavagem do resíduo (Lavado e Não Lavado) em função do tempo.....	23
Figura 10. Valores de potencial redox (Eh) do solo dos vasos em condição de redução após incorporação do resíduo da centrífuga, em duas condições de lavagem do resíduo (Lavado e Não Lavado) em função do tempo.....	24
Figura 11. Valores de potencial redox (Eh) do solo dos vasos em condição de oxidação após incorporação do resíduo do secador, em duas condições de lavagem do resíduo (Lavado e Não Lavado) em função do tempo.....	24
Figura 12. Valores de potencial redox (Eh) do solo dos vasos em condição de redução após incorporação do resíduo do secador, em duas condições de lavagem do resíduo (Lavado e Não Lavado) em função do tempo.....	25
Figura 13. Efeito da aplicação do resíduo do secador na disponibilidade de potássio (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.....	32
Figura 14. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na disponibilidade de potássio (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.....	33
Figura 15. Efeito da aplicação do resíduo do secador na disponibilidade de cálcio (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.....	39
Figura 16. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na disponibilidade de cálcio (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.....	39
Figura 17. Efeito da aplicação do resíduo do secador na disponibilidade de manganês (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.....	44
Figura 18. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na disponibilidade de manganês (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.....	45

Figura 19. Efeito da aplicação do resíduo do secador na disponibilidade de sódio (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.....	51
Figura 20. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na disponibilidade de sódio (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.....	52
Figura 21. Efeito da aplicação do resíduo do secador na disponibilidade de ferro (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.....	59
Figura 22. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na disponibilidade de ferro (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.....	60
Figura 23. Efeito da aplicação do resíduo do secador na disponibilidade de bário (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.....	67
Figura 24. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na disponibilidade de bário (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.....	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Valores orientadores para os solos (mg kg^{-1}).....	6
Tabela 2. Ensaio de Lixiviação - NBR 10005, nas amostras compostas dos resíduos de perfuração provenientes do secador e da centrífuga 2 em (mg L^{-1}).....	14
Tabela 3. Ensaio de Solubilização - NBR 10006, nas amostras compostas dos resíduos de perfuração provenientes do secador e da centrífuga 2 em (mg L^{-1}).....	15
Tabela 4. Teores pseudototais nas amostras compostas dos resíduos de perfuração.	16
Tabela 5. Atributos químicos do solo do entorno da área estudada.	16
Tabela 6. Concentrações pseudototais nas amostras de solo do entorno da área estudada.	17
Tabela 7. Atributos físicos do solo	17
Tabela 8. Quantidades dos resíduos aplicados no solo (Mg ha^{-1}) e dos elementos analisados (mg kg^{-1}) nas diferentes doses dos resíduos.....	19
Tabela 9. Valores de pH em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, nas diferentes doses, umidades e condições de lavagem.....	25
Tabela 10. Efeito da aplicação dos resíduos do secador e da centrífuga no pH do solo, nas diferentes doses.	26
Tabela 11. Eficiência de extração de metais dos resíduos do secador e da centrífuga.	27
Tabela 12. Produção de massa seca (g) pelas plantas de arroz nas diferentes condições de umidade, lavagem e doses de aplicação do resíduo do secador.	28
Tabela 13. Efeito da aplicação do resíduo do secador na produção de matéria seca em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.....	29
Tabela 14. Produção de massa seca (g) pelas plantas de arroz nas diferentes condições de umidade, lavagem e doses de aplicação do resíduo da centrífuga.	30
Tabela 15. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na produção de matéria seca em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.....	31
Tabela 16. Disponibilidade de potássio (mg kg^{-1}) em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, antes do plantio de arroz, nas diferentes doses, umidades e condições de lavagem.	32
Tabela 17. Concentração de potássio (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo do secador.	34
Tabela 18. Efeito da aplicação do resíduo do secador na concentração de potássio em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.....	35
Tabela 19. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na concentração de potássio em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.....	36
Tabela 20. Concentração de potássio (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo da centrífuga.	37

Tabela 21. Disponibilidade de cálcio (mg kg^{-1}) em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, antes do plantio de arroz, nas diferentes doses, umidades e condições de lavagem.	38
Tabela 22. Efeito da aplicação do resíduo do secador na concentração de cálcio em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.	40
Tabela 23. Concentração de cálcio (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo do secador.	41
Tabela 24. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na concentração de cálcio em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.	42
Tabela 25. Concentração de cálcio (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo da centrífuga.	43
Tabela 26. Disponibilidade de manganês ¹ (mg kg^{-1}) em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, antes do plantio de arroz, nas diferentes doses, umidades e condições de lavagem.	44
Tabela 27. Efeito da aplicação do resíduo do secador na concentração de manganês em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.	46
Tabela 28. Concentração de manganês (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo do secador.	47
Tabela 29. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na concentração de manganês em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.	48
Tabela 30. Concentração de manganês (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo da centrífuga.	49
Tabela 31. Disponibilidade de sódio (mg kg^{-1}) em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, antes do plantio de arroz, nas diferentes doses, umidades e condições de lavagem.	51
Tabela 32. Efeito da aplicação do resíduo do secador na concentração de sódio em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.	53
Tabela 33. Concentração de sódio (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo do secador.	54
Tabela 34. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na concentração de sódio em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.	55
Tabela 35. Concentração de sódio (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo da centrífuga.	56
Tabela 36. Condutividade elétrica (dS m^{-1}) em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, nas diferentes doses, umidades e condições de lavagem.	57
Tabela 37. Efeito da aplicação dos resíduos do secador e da centrífuga na condutividade elétrica (dS m^{-1}) do solo nas diferentes doses.	58

Tabela 38. Disponibilidade de ferro ¹ (mg kg ⁻¹) em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, antes do plantio de arroz, nas diferentes doses, umidades e condições de lavagem.	59
Tabela 39. Efeito da aplicação do resíduo do secador na concentração de ferro em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.	61
Tabela 40. Concentração de ferro (mg kg ⁻¹) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo do secador.	62
Tabela 41. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na concentração de ferro em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.	63
Tabela 42. Concentração de ferro (mg kg ⁻¹) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo da centrífuga.	64
Tabela 43. Disponibilidade de bário ¹ (mg kg ⁻¹) em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, antes do plantio de arroz, nas diferentes condições de umidade e de lavagem.	66
Tabela 44. Efeito da aplicação do resíduo do secador na concentração de bário em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.	68
Tabela 45. Concentração de bário (mg kg ⁻¹) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo do secador.	69
Tabela 46. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na concentração de bário em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.	70
Tabela 47. Concentração de bário (mg kg ⁻¹) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo da centrífuga.	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 Perfuração de Poços de Petróleo	2
2.2 Disposição de Resíduos	2
2.3 Classificação de Resíduos	3
2.4 Valores Orientadores dos Níveis de Contaminação	4
2.5 Efeitos Nocivos do Sódio no Solo	6
2.6 Efeitos Nocivos do Sódio Sobre as Culturas	7
2.7 Condições Oxirredutoras	8
3. MATERIAL E MÉTODOS	9
3.1 Perfuração do Poço de Petróleo e Obtenção do Cascalho	9
3.2 Coleta dos Resíduos e do Solo do Entorno	11
3.2.1 Geração das amostras compostas	12
3.2.2 Seleção dos resíduos	13
3.3 Caracterização do Cascalho e do Solo	13
3.3.1 Caracterização dos resíduos de perfuração	13
3.3.2 Caracterização do solo coletado no entorno do poço de petróleo	16
3.4 Lavagem dos Resíduos	17
3.5 Aplicação dos Resíduos no Solo	18
3.6 Teor de Umidade	19
3.7 Ensaio com Plantas	19
3.8 Análises Laboratoriais	21
3.8.1 Disponibilidade dos elementos	21
3.8.2 Teores pseudototais	22
3.8.3 Ensaio com plantas	22
3.8.4 Validação e análise dos dados	22
3.9 Análise Estatística	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1 Potencial Redox (Eh) e pH nos Vasos	23
4.2 Eficiência da Lavagem dos Resíduos	26
4.3 Produção de Matéria Seca	27
4.4 Concentração dos Elementos na Planta	31
4.4.1 Potássio	31
4.4.2 Cálcio	38
4.4.3 Manganês	43
4.4.4 Sódio	50
4.4.5 Ferro	58
4.4.6 Bário	65
5. CONCLUSÕES	73
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
7. ANEXOS	80

1. INTRODUÇÃO

Na história recente houve uma flexibilização do monopólio do petróleo com a abertura da exploração por empresas estrangeiras (LOVÓN CANCHUMANI, 2008). Conseqüentemente a questão ambiental ganhou novos pontos de discussão, como o impacto causado pela extração dos materiais primários e pela deposição de resíduos.

A população mundial está se voltando para a necessidade urgente de ações protetoras, para reduzir danos futuros ao meio ambiente, e também de ações reparadoras para os séculos de exploração dos recursos naturais. Essas são ações que dependem da mudança da mentalidade exploradora e da aquisição de novos conceitos de preservação e sustentabilidade, com o auxílio de normas adequadas para gestão ambiental. Esse foi o compromisso da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (CNUDS), a Rio + 20, que teve como proposta principal a renovação do compromisso político com o desenvolvimento sustentável.

Como matriz energética, a atividade petrolífera teve importante participação no desenvolvimento do país. Esse papel é mantido até os dias atuais, pois o consumo dos produtos dessa indústria ainda move a economia, o que sempre levou à aceitação da exploração do recurso independente dos impactos ambientais gerados.

Ciente da responsabilidade, a indústria petrolífera tenta mudar esse cenário com adequações ao longo da cadeia produtiva para diminuir os impactos sobre o meio ambiente. Os resíduos gerados da extração ao beneficiamento têm alto potencial poluidor. Os resíduos de perfuração de poços de petróleo contêm elementos tóxicos em altas concentrações, principalmente bário e sódio, decorrentes, principalmente, dos fluidos utilizados no processo, que podem ser liberados nos resíduos. Entretanto, estudos demonstram que se esses contaminantes forem tratados convenientemente, os resíduos podem ser dispostos ou reutilizados, até mesmo como condicionadores do solo, melhorando suas propriedades físicas e químicas (ZONTA et al., 2005 e SOUZA & LIMA, 2002).

Existem poucas informações sobre os efeitos da disposição desse material no solo (MILLER & PESARAN 1980; ODU & CHUKWURA, 1983), e a sua influência nas mudanças das condições de oxirredução (Eh) na dinâmica e absorção pelas plantas dos elementos potencialmente tóxicos presentes no resíduo. Magalhães et al. (2012), Lima et al. (2012) e Magalhães et al. (2011) observaram em seus estudos que baixos valores de Eh favoreceram a solubilização do sulfato de bário puro e baritina, acarretando no aumento do bário em solução e da sua absorção por plantas de arroz.

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desenvolvimento de plantas de arroz em solos incubados, em condição de oxidação e redução, com resíduos de perfuração de poço de petróleo tratados e não tratados com lavagem para eliminar a influência das altas concentrações de sódio.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Perfuração de Poços de Petróleo

Durante suas operações, a indústria petrolífera produz efluentes líquidos, gasosos e resíduos sólidos que podem ser nocivos ao meio ambiente e à saúde pública, e surgem desde a exploração e produção de petróleo e gás, no refino e transporte e na distribuição e revenda de combustíveis. Segundo Lima (2001), os impactos ambientais que podem advir da atividade de perfuração de um poço de petróleo podem ser resumidos em: danos à fauna e flora devido à remoção da vegetação no local onde será perfurado o poço; erosão provocada pela destruição da vegetação; agressões ao meio ambiente causadas pela disposição dos resíduos da perfuração, constituídos da mistura dos fluidos de perfuração com os fragmentos das rochas (cascalhos) perfuradas e que são dispostos em diques; e contaminação dos lençóis freáticos e aquíferos subterrâneos, causada por perdas dos fluidos de perfuração para as formações geológicas durante a perfuração.

Através da adesão a leis e regulamentos, elaborados por meio de consultas a todos os envolvidos, e tendo por objetivo os padrões internacionais, os efeitos nocivos podem ser reduzidos a níveis aceitáveis. Poluentes em potencial podem deixar de ser uma preocupação quando convenientemente tratados e adequadamente dispostos ou reciclados (SOUZA & LIMA, 2002).

A perfuração de um poço é realizada através de uma sonda. Na perfuração rotativa, método utilizado nos dias atuais para a perfuração de poços de petróleo (LIMA, 2001), as rochas são perfuradas pela ação da rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração, a qual consiste basicamente de comandos (tubos de paredes espessas) e tubos de perfuração (tubos de paredes finas) (THOMAS, 2001). As formações se fragmentam, e os fragmentos são carregados por um fluido - o fluido de perfuração - que é injetado pelo interior de tubos de aço até o fundo do poço, retornando à superfície pelo espaço anular entre o poço e as paredes externas da tubulação. O fluido é misturado à rocha moída, liberando as substâncias tóxicas que estavam em sua estrutura (POZEBON et al., 2005), conseqüentemente, tornando-se uma das principais influências nos teores dessas substâncias nos resíduos de perfuração (MELTON et al., 2000). À medida que o poço vai sendo aprofundado, novos tubos de aço são conectados à coluna que se encontra no poço. Na superfície, o cascalho e os sedimentos finos são separados do fluido através de vários equipamentos. Uma vez limpo, o fluido retorna ao poço (LINS & LUZ, 2003).

Entre os fluidos existentes encontram-se os fluidos de base aquosa (WBF) e o de base não aquosa (NAF). Os fluidos de perfuração de base água, ou fluidos salinos, são aqueles compostos por aproximadamente 90% em volume de água, com a adição de componentes tais como barita, argila, polímeros, lignosulfonatos etc. A água utilizada pode ser industrial, do mar ou soluções salinas (BURKE & VEIL, 1995). Ela promove um meio de dispersão para os materiais coloidais. Já nos fluidos de base nãoaquosa, a fase contínua é o óleo. Nesse caso, as gotas de água ficam encapsuladas pelo óleo ou outro composto, como uma emulsão inversa, tendo maior dificuldade de interagir com as camadas argilosas, o que é uma vantagem. Contudo, há a desvantagem de conferir maior grau de poluição e ter maior custo inicial (SOUZA & LIMA, 2002).

2.2 Disposição de Resíduos

A utilização de resíduos de plantas e de adubo animal na agricultura já era uma prática utilizada pelo homem desde a pré-história. A utilização de esgoto para a irrigação agrícola era prática comum no leste europeu, desde o século XVI. Esse resíduo tem recebido especial

atenção por parte da pesquisa, em função do grande problema ambiental que seu descarte inadequado apresenta. Diversos autores como Bettiol & Camargo (2000), Tsutiya et al. (2001) e Bettiol & Camargo (2006), já abordaram o uso agrícola de lodo de esgoto em seus estudos. No Brasil, a história do tratamento de resíduos em solo começou no final dos anos 70, com os resíduos oleosos de refinarias de petróleo, e posteriormente passou a ser utilizado por outras indústrias.

A aplicação de resíduos em áreas agrícolas somente deve ocorrer se houver interesse e benefício comprovado para o solo e, conseqüentemente, para a cultura, e que os locais de aplicação sejam mantidos ambientalmente seguros. São necessários estudos agrônômicos sobre as características e o desempenho dos resíduos, indicando os efeitos positivos no sistema solo-planta, seja como material corretivo ou fonte de nutrientes (PRADO & NATALE, 2005). Dessa forma, o resíduo deve ser caracterizado, definindo a sua origem, as etapas em que foi gerado, a quantidade gerada em cada etapa e os possíveis poluentes presentes. Caso haja benefícios em termos ambientais, a sua disposição no solo é considerada viável.

Um dos componentes dos resíduos de perfuração que pode ocasionar em periculosidade é o fluido (POZEBON et al., 2005). O fluido é utilizado principalmente na lubrificação e resfriamento da broca, transporte dos fragmentos de rocha gerados e manutenção da estabilidade do poço. Dentre os componentes mais utilizados nos fluidos de perfuração encontra-se a baritina ($BaSO_4$), soda cáustica (NaOH), cloreto de sódio (NaCl) e outros componentes sintéticos (CAENN et al., 2011), que dissolvidos nos resíduos da perfuração, podem trazer conseqüências graves ao meio ambiente. Excesso de sal no solo faz com que as plantas tenham, prematuramente, estresse hídrico, mesmo que quantidades substanciais de água estejam disponíveis (GARCIA E VAQUEIRO, 2001). Além disso, é possível que os íons desse sal sejam lixiviados e transportados até lençóis de água doce subterrâneos, alterando a qualidade dessas águas (SOUZA & LIMA, 2002). Para a utilização desses materiais é necessário considerar-se, também, o teor de metais pesados que, em níveis elevados, podem tornar-se tóxicos e limitar seu uso na atividade agrícola e contaminar o ambiente (ACCIOLY et al., 2000).

2.3 Classificação de Resíduos

Para classificar resíduos é necessário identificar o processo ou atividade que lhes deu origem, saber a sua constituição e suas características, comparando essas informações com algumas listagens de resíduos e substâncias de conhecido impacto à saúde e ao meio ambiente.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas -ABNT (2004), com base na norma NBR 10004, os resíduos sólidos são “Os resíduos nos estados: sólido e semi-sólidos que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição”. Então, é possível afirmar que são considerados resíduos sólidos qualquer lixo, refugo, lodo, lamas e borras resultantes de atividades de origem doméstica, profissional, agrícola, industrial, nuclear ou de serviço, que neles se depositam com a denominação genérica de lixo, o que se agrava constantemente em decorrência do crescimento demográfico dos núcleos urbanos e especialmente das áreas metropolitanas.

De acordo com a norma brasileira, os resíduos são classificados como resíduos classe I e resíduos classe II.

Os resíduos classe I são considerados resíduos perigosos, pois apresentam periculosidade, conseqüentemente, causando risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices, e ao meio ambiente, quando o resíduo for

gerenciado de forma inadequada, e/ou apresentem inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, ou constem nos anexos A ou B da referida norma.

Os resíduos classe II são considerados como resíduos não perigosos, e são divididos em resíduos classe II A (não inertes) e os resíduos classe II B (inertes).

Os resíduos classe II A (não inertes) são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes. Nos termos desta Norma, essa classe de resíduo pode ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Os resíduos classe II B são inertes. São quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, e submetidos ao teste de solubilidade, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G da norma.

A Figura 1 mostra o organograma do protocolo para caracterização e classificação dos resíduos.

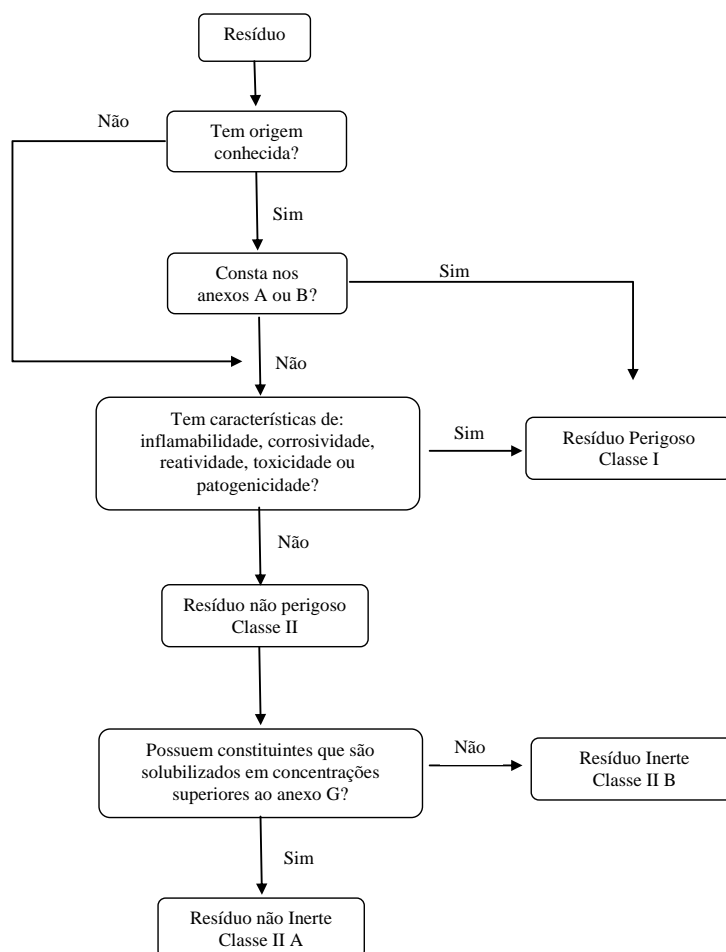


Figura 1. Organograma para caracterização e classificação de resíduos. Fonte: Adaptado de NBR 10004 – ABNT (2004).

2.4 Valores Orientadores dos Níveis de Contaminação

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, CETESB, define os valores orientadores para solo e água subterrânea em três categorias: Valor de Referência de Qualidade (VRQ), Valor de Prevenção (VP) e Valor de Intervenção (VI). Esses valores indicam as concentrações de substâncias químicas, orientando sobre as condições de

qualidade do solo. Por isso, são utilizados como instrumento de prevenção, controle e gerenciamento de áreas contaminadas.

Valor de Referência de Qualidade (VRQ)- É a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea, que define um solo como limpo ou a qualidade natural da água subterrânea, e é determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos e amostras de águas subterrâneas de diversos aquíferos do Estado de São Paulo. Deve ser utilizado como referência nas ações de prevenção da poluição do solo e das águas subterrâneas e de controle de áreas contaminadas.

Valor de Prevenção (VP)- É a concentração de determinada substância, acima da qual podem ocorrer alterações prejudiciais à qualidade do solo e da água subterrânea. Este valor indica a qualidade de um solo capaz de sustentar as suas funções primárias, protegendo-se os receptores ecológicos e a qualidade das águas subterrâneas. Foi determinado para o solo com base em ensaios com receptores ecológicos. O valor de prevenção deve ser utilizado para disciplinar a introdução de substâncias no solo e, quando ultrapassado, a continuidade da atividade será submetida à nova avaliação, devendo os responsáveis legais pela introdução das cargas poluentes procederem ao monitoramento dos impactos decorrentes.

Valor de Intervenção (VI)- É a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, o que é considerado um cenário de exposição genérico. Para o solo, foi calculado utilizando-se procedimento de avaliação de risco à saúde humana para cenários de exposição Agrícola-Área de Proteção Máxima – APM_{ax}, Residencial e Industrial.

De acordo com CETESB (2005), a área será classificada como contaminada sob investigação quando houver constatação da presença de contaminantes no solo ou na água subterrânea em concentrações acima dos Valores de Intervenção, indicando a necessidade de ações para resguardar os receptores de risco, devendo seguir os procedimentos de gerenciamento de áreas contaminadas.

Recentemente, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2009) estabeleceu os valores orientadores, divididos em três categorias:

- Valor de referência de qualidade (VRQ): é a concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo, sendo determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos;
- Valor de prevenção (VP): é a concentração de determinada substância no solo, acima da qual podem ocorrer alterações da qualidade do solo quanto as suas funções principais;
- Valor de investigação (VI): é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado.

Foram adotados os valores de prevenção e intervenção apresentados pela CETESB (2005), modificando o termo intervenção por investigação, e os valores de referência de qualidade, nesse caso, terão que ser apresentados por estado, devido à diversidade no material de origem e a grande variedade dos solos brasileiros.

Na **Tabela 1**, são apresentados os valores orientadores de algumas substâncias, em função da referência de qualidade (CETESB, 2005), prevenção e investigação (CONAMA, 2009) para os solos.

Tabela 1. Valores orientadores para os solos (mg kg^{-1}).

Substância	Referência de Qualidade ¹	Prevenção ^{1,2}	Intervenção ¹ ou investigação ²		
			Agrícola*	Residencial	Industrial
Antimônio	<0,5	2	5	10	25
Arsênio,	3,5	15	35	55	150
Bário	75	150	300	500	750
Cádmio	<0,5	1,3	3	8	20
Chumbo	17	72	180	300	900
Cobalto	13	25	35	65	90
Cobre	35	60	200	400	600
Cromo	40	75	150	300	400
Mercúrio	0,05	0,5	12	36	70
Molibdênio	<4	30	50	100	120
Níquel	13	30	70	100	130
Prata	0,25	2	25	50	100
Selênio	0,25	5	-	-	-
Vanádio	275	-	-	-	-
Zinco	60	300	450	1000	2000

¹: CETESB (2005); ²: CONAMA (2009); *Área de proteção máxima.

2.5 Efeitos Nocivos do Sódio no Solo

O processo de salinização ocorre, de maneira geral, em solos situados em região de baixa precipitação pluviométrica e que possuam lençol freático próximo da superfície (CODEVASF, 2010). Em muitas áreas de produção, o uso de água de baixa qualidade para irrigação e a aplicação de quantidades excessivas de fertilizantes são as principais razões para o problema do aumento da salinidade do solo. Em se tratando de regiões áridas e semiáridas irrigadas, constitui um sério problema, limitando a produção agrícola e reduzindo a produtividade das culturas a níveis antieconômicos (GHEYI et al., 2010). Em parte do Nordeste brasileiro, a maioria dos perímetros de irrigação apresenta reflexos de degradação, que vão desde a diminuição nos rendimentos das culturas até o abandono das áreas exploradas (MOTA & OLIVEIRA, 1999; BARROS et al., 2004; RIBEIRO et al., 2010).

Para a classificação dos solos afetados por sais, algumas propriedades químicas do solo são empregadas: pH, condutividade elétrica do extrato de saturação (CE a 25°C), relação de adsorção de Na do extrato de saturação (RAS) e percentagem de sódio trocável (PST) (RIBEIRO et al., 2003; RICHARDS, 1954).

Com base nestes critérios, podem-se classificar os solos como salinos, quando apresentam elevadas concentrações de sais na solução do solo; sódicos, quando apresentam o Na trocável em concentrações suficientes para restringir o crescimento de plantas cultivadas e para promover a dispersão e a migração de colóides ao longo do perfil, obstruindo poros e dificultando a movimentação de ar e água no solo, e salino-sódicos, quando apresentam os dois fatores citados (NOVAIS et al., 2007).

Para a maioria das culturas, a quantidade de sais existentes é prejudicial ao desenvolvimento das plantas quando a condutividade elétrica do extrato de saturação é igual ou superior a 2 dS m^{-1} (HOLANDA et al., 2010).

No solo, os efeitos negativos da salinização são desestruturação, aumento da densidade aparente, diminuição da retenção de água no solo, redução da infiltração de água pelo excesso de íons sódicos (RHOADES et al., 2000), já que a presença de elevadas quantidades de Na pode promover a dispersão das partículas do solo que, sob processos de umedecimento e secagem, chegam a formar crostas impermeáveis na superfície, além do decréscimo na porosidade e, conseqüentemente, na aeração do solo. Há também uma diminuição da fertilidade física e química, que tem elevada variabilidade vertical e horizontal. Para avaliar essa variabilidade espacial, o uso da geoestatística pode ser bastante proveitoso, mapeando o acúmulo de sais nos solos (NOVAIS et al., 2007). A implicação prática da salinidade sobre o solo é a perda da fertilidade e a susceptibilidade à erosão, além da contaminação do lençol freático e das reservas hídricas subterrâneas. Nas plantas, estes efeitos implicam na perda de produtividade e de qualidade, ou perda total da produção. (GHEYI et al., 2010).

A salinidade e a sodicidade também interferem na composição orgânica dos solos, em que o Na em solução diminui o estado de agregação entre partículas minerais e orgânicas, além dos efeitos químicos e físicos dos sais sobre os compostos orgânicos. Indiretamente, o pH geralmente mais elevado também influi nestas alterações. Naidu et al. (1995) citam que o aumento da sodicidade chega a mobilizar acima de 40% da matéria orgânica dos solos, seja como colóides orgânicos, seja como complexos organominerais.

Segundo Gupta & Abrol (1990), o pH elevado do solo tem sido indicado como fator de grande contribuição para a perda de amônia por volatilização. Por este motivo, tem sido destacada a maior necessidade de fertilizante nitrogenado em cultivos sobre solos salinizados. Além disso, a elevação do pH pode levar à redução da disponibilidade de alguns micronutrientes como Fe, Cu, Zn, Mn e B (TAN, 1993).

O manejo adequado do sistema solo-água-plantas é de fundamental importância para evitar o desencadeamento dos processos de degradação promovidos pela salinização e sodificação dos solos. A utilização de espécies e variedades adaptadas, irrigadas com águas de salinidade controlada em termos de teores e tipos de sais, o manejo da irrigação juntamente com a drenagem, mantendo um balanço adequado de sais no solo, devem ser monitorados para não permitir a expansão de áreas salinas (FREIRE & FREIRE, 2007).

2.6 Efeitos Nocivos do Sódio Sobre as Culturas

Um solo com grande quantidade de sais pode prejudicar o desenvolvimento de plantas. Diversos estudos evidenciam o efeito negativo dos íons que contribuem para a salinidade do solo (principalmente Na^+ e Cl^-) sobre processos fisiológicos importantes para o crescimento das plantas (YAHYA, 1998; BETHKE E DREW, 1992). A elevação da concentração desses íons no solo tem efeito no potencial osmótico, que é elevado, causando estresse hídrico nas plantas, que têm dificuldade de absorção de água (seca fisiológica) e desbalanceamento geral entre os nutrientes. Segundo Ayers e Westcot (1999), o rendimento das culturas cai significativamente quando o teor de sais na solução do solo prejudica a absorção de água e nutrientes pelas culturas, resultando em perdas no crescimento, desenvolvimento e produção.

O nível de tolerância das plantas pode estar relacionado à concentração do sal em solução, ao tempo de exposição, e também ao estágio de desenvolvimento das plantas (AYERS E WESTCOT, 1991). Dias et al. (2003) consideram a germinação e o desenvolvimento inicial, as fases mais sensíveis aos efeitos da salinidade. Apesar da existência de variabilidade genética para tolerância à salinidade (SHANNONE GRIEVE, 1998), os mecanismos bioquímicos e fisiológicos que contribuem para essa tolerância ainda são pouco conhecidos (MANSOUR et al., 2003).

Rengel (1992) e Lacerda (2000) relatam que cálcio e potássio, dentre outros nutrientes, tiveram menor absorção por plantas devido à salinidade, o que refletiu indiretamente em um menor crescimento das plantas. A menor absorção de K pode ser atribuída à maior

competição entre o sódio e o potássio pelos sítios de absorção ou a um maior efluxo de K das raízes (MARSCHNER, 1995). A redução na concentração de K, sob estresse salino, é um complicador adicional para o crescimento das plantas visto que, em algumas situações, esse elemento é o principal nutriente a contribuir para o decréscimo do potencial osmótico, uma estratégia necessária à absorção de água nessas circunstâncias (JESCHKE et al., 1986; MARSCHNER, 1995). Em relação ao cálcio, a redução na sua absorção pode levar à perda da integridade da membrana plasmática, com conseqüente perda da capacidade de absorção de alguns íons, principalmente o K^+ (RENGEL, 1992; CACHORRO et al., 1994). Quando as plantas são tolerantes tendem a apresentar maiores taxas de transferência de K^+ e apenas leve redução na transferência de Ca^+ para a parte aérea, visando manter uma relação positiva entre esses nutrientes e os íons Na^+ e Cl^- (NIU et al., 1995).

A recuperação de solos afetados por sais tem como objetivo principal a redução da concentração dos sais solúveis e do sódio trocável no perfil do solo, a um nível não prejudicial ao desenvolvimento das culturas.

2.7 Condições Oxirredutoras

O alagamento dos solos leva a uma alteração do equilíbrio dos elementos e dos compostos do solo, resultando em importantes alterações químicas, físicas biológicas e mineralógicas, sendo, possivelmente, o decréscimo do potencial redox a alteração mais significativa (LIMA et al., 2005). Nessa condição a respiração dos microrganismos aeróbios diminui a concentração de O_2 na superfície do solo e na lâmina de água (SHU-ZHENG, 1985), até que esse consumo leva a uma sucessão de microrganismos no solo, com favorecimento dos anaeróbios facultativos e obrigatórios.

A respiração anaeróbia é uma reação biológica redox (oxidação e redução) produtora de energia, na qual um composto inorgânico, diferente do O_2 , é usado como receptor de elétrons. Nesse processo, a oxidação da matéria orgânica ocorre à custa da redução de compostos inorgânicos oxidados (SOUSA, 2001; SILVA et al., 2008). Desta forma, os microrganismos anaeróbios utilizam nitrato, óxidos mangânicos, óxidos férricos, sulfato e CO_2 como receptores de elétrons no processo de respiração, reduzindo-os a nitrogênio molecular, compostos manganosos e compostos ferrosos, sulfeto e metano, respectivamente, alterando completamente a concentração dos elementos no solo, conferindo características de redução (MEURER, 2010).

À medida que os compostos oxidados vão sendo reduzidos, o potencial redox (Eh) diminui e, em solos ácidos, o pH aumenta, pois as reações redox ocorrem com consumo de hidrogênio (PONNAMPERUMA, 1972).

A disponibilidade, mobilidade e a possível toxidez de alguns elementos presentes no solo podem aumentar em condições redutoras. A baritina (sulfato de bário), presente nos fluidos de perfuração de poços de petróleo por possuir elevada densidade e baixa solubilidade, é considerada adequada para o aumento da densidade dos fluidos de perfuração para controlar a pressão hidrostática (VÉRAS, 2001). Entretanto, diante de alagamento e da sucessão de microrganismos, ocorre a redução de sulfato a sulfeto e a liberação de bário, que é um elemento potencialmente tóxico para as plantas, na solução do solo (PHILLIPS et al., 2001).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no campus da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), no município de Seropédica – RJ, a aproximadamente 60 km da cidade do Rio de Janeiro, RJ. A casa de vegetação é climatizada, com manutenção da temperatura em torno de 31°C. O trabalho foi realizado em duas etapas, divididas em caracterização do resíduo coletado (I) e ensaios em vasos cultivados com plantas de arroz (II).

No estudo foram utilizados resíduos coletados na unidade exploradora da Petrobras SMC-772-8.908-914, localizada no estado de Alagoas, no município de São Miguel dos Campos e coletados durante a perfuração do poço 7-SMC-50D-AL.

3.1 Perfuração do Poço de Petróleo e Obtenção do Cascalho

A **Figura 2** representa um esquema simplificado de como funciona o sistema de recuperação de fluido de perfuração utilizado na unidade exploradora.

Seguindo a numeração da figura, o fluido contido nos tanques (1) passa pelas bombas, e em seguida é bombeado para a coluna de perfuração (2 e 3). Após passar por orifícios contidos na broca (4), ele retorna à superfície misturado com o cascalho gerado pela perfuração do poço. Essa mistura do fluido com as partículas geradas durante a perfuração passa por um conjunto de peneiras (5) onde é feita a primeira recuperação do fluido. O fluido recuperado segue para os tanques (6), enquanto o cascalho que ainda apresenta alto teor de fluido passa para os equipamentos de recuperação (7). O primeiro equipamento utilizado na recuperação do fluido é o secador (8). O secador retira a maior parte do fluido impregnado no cascalho, gerando um resíduo com textura mais grosseira e com baixo teor de fluido, denominado Resíduo S.

O sistema de recuperação de fluido possui ainda uma centrífuga que exerce dupla função. Ora ela trata o fluido recuperado pelo secador, ora trata o fluido do sistema. O que define o momento em que cada fluido será tratado pela centrífuga de dupla função é a necessidade de redução da densidade do fluido do sistema, ou seja, quando não está funcionando para baixar a densidade do fluido, ela faz o tratamento do fluido recuperado pelo secador. O fluido recuperado no Secador é transferido para um tanque de armazenamento (9) e depois vai para a centrífuga de dupla função (10), onde é gerado o resíduo C (11), e o fluido recuperado retorna ao sistema (12). Quando há a necessidade de diminuir a densidade do fluido do sistema, é acionada a centrífuga de dupla função (13), gerando, nesse caso, o resíduo C2 (14) e o fluido tratado volta ao sistema (12). O “Mud Cleaner” funciona constantemente, retirando partículas de granulometria próxima a areia e silte do fluido. O fluido sai dos tanques (15) passa pelo “Mud Cleaner”, que gera o resíduo denominado Resíduo M (16) e o fluido retorna ao sistema (17).

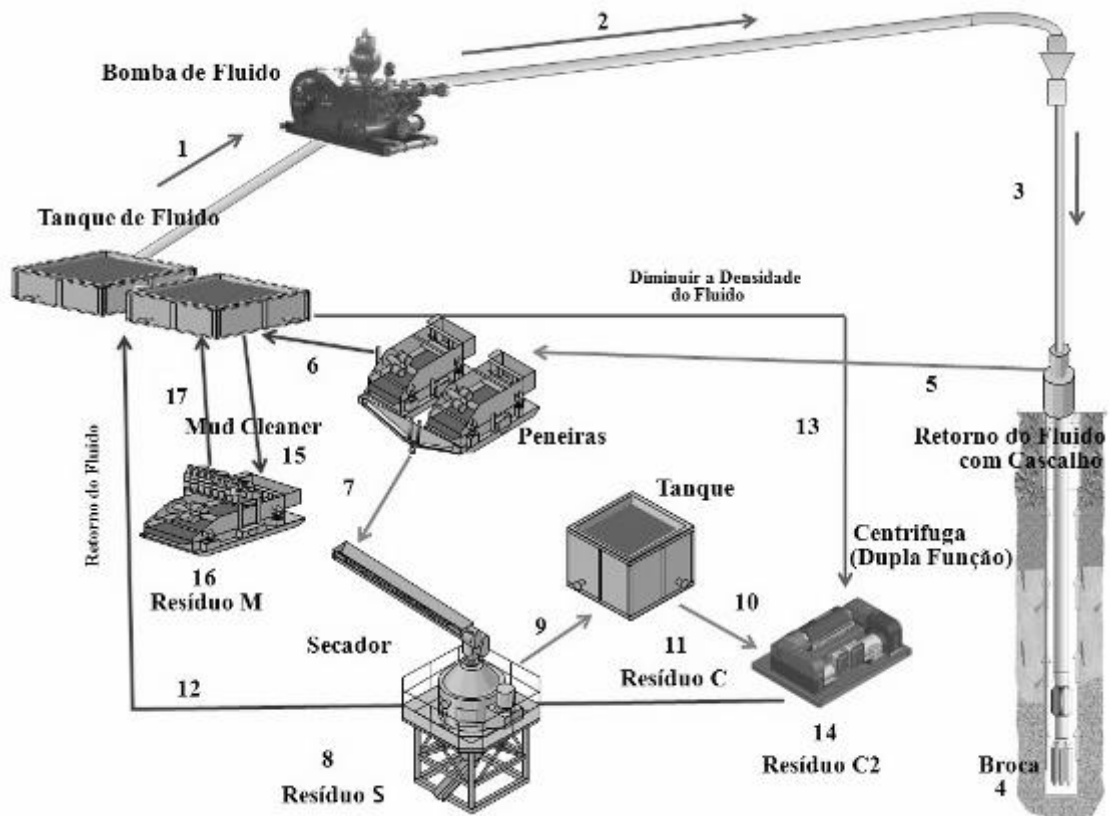


Figura 2. Sistema de circulação e recuperação do fluido durante a perfuração do poço 7-SMC-50D-AL (Alagoas) e a geração dos diferentes resíduos e respectivos equipamentos. (Fonte: 5RCPP).

A **Figura 3** mostra o conjunto de equipamentos usado para recuperação de fluido utilizado na unidade exploradora. Os equipamentos são: um secador vertical (Vortex); “Mud Cleaner” e uma centrífuga com dupla função – limpeza do fluido do secador de cascalho (para melhor entendimento desse estudo, esta será identificada como centrífuga 1) e baixar sólidos de baixa gravidade do sistema (identificada neste trabalho como centrífuga 2).

Portanto, consideram-se quatro equipamentos, gerando resíduos com características distintas. O secador gera resíduo com baixo teor de umidade e partículas maiores, tendo em sua constituição maior influência dos fragmentos de rochas gerados durante a perfuração. A centrífuga I fica ligada diretamente ao secador, tratando o fluido recuperado pelo mesmo, gerando resíduo com maior teor de umidade e partículas menores do que as geradas no secador. A centrífuga II gera um resíduo com teor de umidade alto, sendo praticamente formado por componentes do fluido de perfuração, principalmente, baritina e solução saturada de NaCl.

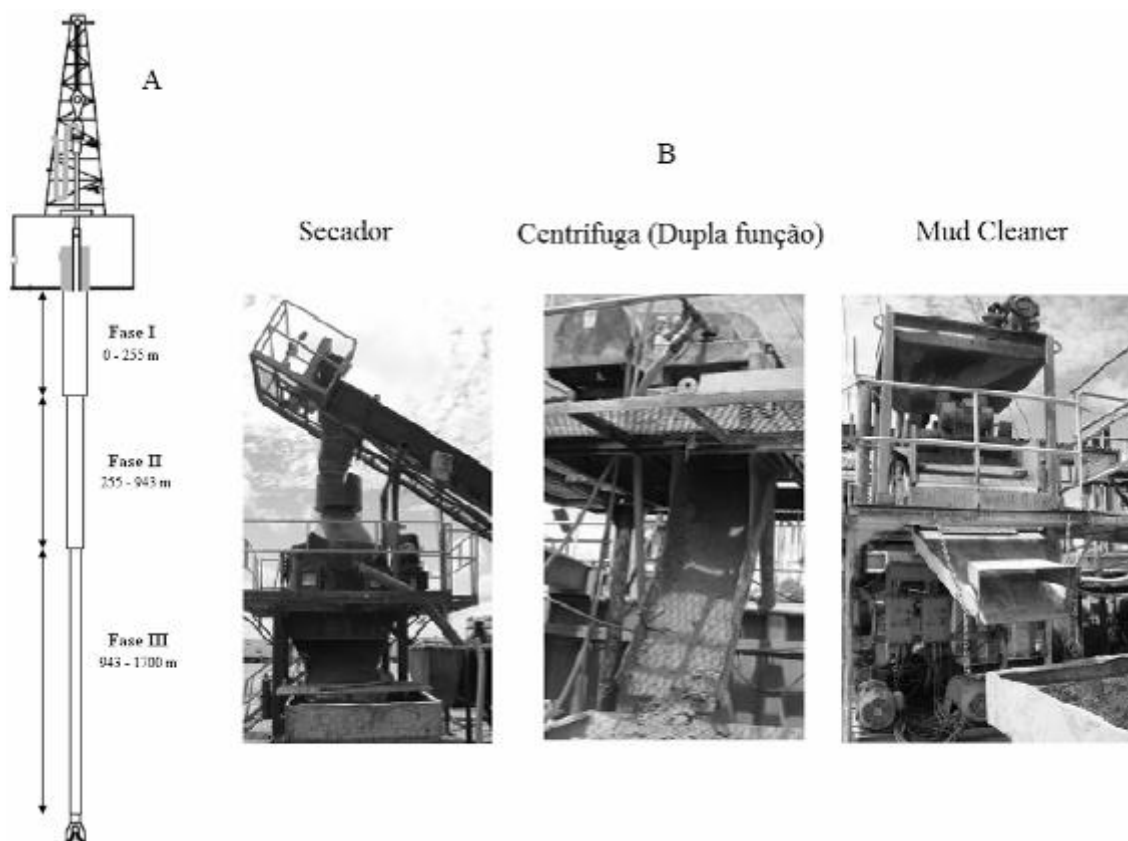


Figura 3.A) Fases da perfuração; B) Sistema de secagem do cascalho e recuperação do fluido de perfuração. Poço 7-MSC-50D-AL. (Fotos: Freitas, 2010).

3.2 Coleta dos Resíduos e do Solo do Entorno

O poço de petróleo 7-SMC 50-D AL apresentou uma profundidade final igual a 1.700 metros. Os resíduos foram coletados por profundidade e por equipamento de tratamento do fluido de perfuração. A coleta se deu a cada 72 metros de profundidade, resultando em um número total de 25 amostras simples para o secador, 10 para o “Mud Cleaner”, 21 para a centrífuga 1 e 11 para a centrífuga 2. Em seguida, foram geradas amostras compostas, agrupadas por fase de perfuração e por equipamentos, com base em informações referentes à formação geológica, tipo e densidade do fluido, além da presença de camadas com óleo. Foram geradas 6 amostras compostas para o secador vertical (Vortex), 3 para o “Mud Cleaner”, 3 para a centrífuga 1 e 3 para a centrífuga 2.

A perfuração do poço foi feita em três fases. Entre elas houve variação de profundidade, de volume de cascalho gerado por equipamento, de formação geológica e do fluido utilizado durante a perfuração. A primeira fase foi executada com a utilização do fluido convencional. A segunda fase foi perfurada com o fluido convencional com filtrado controlado e, na última fase, o fluido utilizado foi o de base orgânica. O fluido convencional é de base aquosa, salino (NaCl). O uso do fluido convencional com filtrado controlado é para evitar a invasão excessiva de fluido na formação geológica. O fluido sintético, ou N-parafina, é de base orgânica.

A coleta de amostras da centrífuga de dupla função foi feita em função do tempo de funcionamento do equipamento em cada fase e também das diferentes densidades do fluido, já que ela é acionada para tratar o fluido acumulado pelo secador e quando há necessidade de baixar o peso do fluido do sistema e não tem relação direta com a profundidade,

A coleta de amostras do secador e do “Mud Cleaner” pode ser associada à profundidade do poço, levando em consideração as informações relacionadas à formação geológica e ao fluido, além de camadas com presença de óleo.

Também foram coletadas amostras de solo do entorno do poço de perfuração, referente à camada superficial da classe de solo representativa da região. Foram coletadas amostras até a profundidade de aproximadamente 20 cm, e elas foram encaminhadas para realização de análises físicas e químicas em laboratório.

3.2.1 Geração das amostras compostas

A primeira amostra composta do secador (1S) e do “Mud Cleaner” (1M), foi gerada pelas amostras simples da primeira fase, ou seja, com as amostras de 1 a 4. Como não houve diferença na formação geológica e a densidade do fluido manteve-se, praticamente, constante essa separação foi devida ao tipo de fluido utilizado, que foi o convencional.

A segunda amostra composta do Secador (2S) e do “Mud Cleaner” (2M) foi gerada com as amostras simples de número 5 a 8. As amostras simples de 9 a 14 geraram a terceira amostra composta do secador (3S) e do “Mud Cleaner” (3M). Apesar de pertencerem a mesma fase (II) e utilizarem o mesmo tipo de fluido, com densidades próximas, essa divisão das amostras foi feita devido à mudança da formação geológica, que vai de Coqueiro Seco (amostras simples de 5 a 8) a Penedo (amostras simples de 9 a 14).

Na terceira fase da perfuração o equipamento “Mud Cleaner” não funcionou, havendo apenas coleta de amostras simples do secador. Dessa forma, a quarta amostra composta do secador (4S) foi gerada com as amostras simples de 15 a 19. A quinta amostra composta (5S) foi gerada com as amostras simples 20 e 21, enquanto que a última amostra composta (6S) foi gerada com as amostras simples de 22 a 25. A terceira fase da perfuração ocorreu na formação geológica Barra de Itiúba, com o uso de fluido N-Parafina com densidade constante durante todo o procedimento, não havendo variação para essas três características. A separação em três amostras compostas foi devido à presença de camada com óleo nos pontos de coleta das amostras simples de número 20 e 22.

As amostras compostas das centrífugas foram geradas a partir das informações das fases e, principalmente, do tipo de fluido usado em cada uma delas. Dessa forma, para a centrífuga 1 foram geradas 3 amostras compostas, sendo a primeira (1C) formada pela amostra simples 1 correspondente ao uso de fluido convencional e à fase I. A segunda amostra composta (2C) foi formada pelas amostras simples de 2 a 9, correspondentes ao uso de fluido convencional com filtrado controlado e à fase II. A terceira amostra composta (3C) foi formada pelas amostras simples de 9 a 21, correspondente ao fluido N-Parafina e à fase III.

As amostras compostas da centrífuga 2 também foram geradas com base na composição do fluido. A primeira composta da centrífuga 2 (1C2) foi gerada com as amostras simples de 1 a 4. A segunda composta (2C2) foi gerada com as amostras simples de 5 a 10, e a terceira composta foi formada com a amostra simples 11.

As informações referentes à coleta das amostras simples e à geração das amostras compostas de acordo com os equipamentos utilizados no poço 7-SMC-50D-AL são apresentadas em anexo (Anexos I, II e III).

3.2.2 Seleção dos resíduos

Nesse ensaio foram utilizados apenas dois resíduos, e dentre as opções foram escolhidos um resíduo gerado pelo secador e o outro gerado pela centrífuga 2, com o objetivo de demonstrar a importância da segregação dos resíduos antes da sua disposição em diques, já que a unidade exploradoramistura todos os resíduos, independente de sua origem, após a recuperação do fluido. O resíduo do secador tem menor influência do fluido e por isso ele tem menos contaminantes, além de apresentar características da formação geológica. Já os resíduos das centrífugas têm maior influência do fluido e, portanto, mais contaminantes. Dessa forma, após a definição dos equipamentos a serem estudados foram selecionadas duas amostras: a quarta amostra composta do secador (4S), formada pelas amostras simples de 15 a 19; e a segunda amostra composta da centrífuga 2 (2C₂), formada pelas amostras simples de 5 a 10. Elas foram selecionadas com base nos dados obtidos com a caracterização, pois apresentavam altos teores de bário.

As amostras compostas dos resíduos foram secas ao ar, peneiradas e homogeneizadas com o auxílio de betoneira, ficando prontas para uso e análise.

3.3 Caracterização do Cascalho e do Solo

3.3.1 Caracterização dos resíduos de perfuração

De acordo com a Norma Técnica ABNT/NBR 10004 (2004) estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), foi feita a caracterização e classificação dos resíduos tendo como suporte as prescrições NBR 10005:2004 – Procedimento para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos, e a NBR 10006:2004 – procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos.

Quanto aos resultados do ensaio de lixiviação, mostrados na **Tabela 2**, todos os valores se mostraram adequados aos limites estabelecidos para a caracterização quanto à toxicidade. Dessa forma, os resíduos oriundos do poço 7-SMC-50D-AL foram classificados pela norma ABNT/NBR 10004:2004 como Resíduos Classe II: Não Perigosos.

O ensaio de solubilização mostrou que os teores de arsênio, alumínio, chumbo, cloreto, ferro, manganês, e fenóis totais ultrapassaram seus respectivos Valores Máximos Permitidos (**Tabela 3**). Assim, os resultados mostram que, de acordo com a NBR 10004:2004, os resíduos gerados no Poço 7-SMC-50-D AL, se enquadram à classe de resíduo sólido **NÃO PERIGOSO NÃO INERTE (CLASSE IIA)**.

Também foi feita a determinação dos teores pseudototais dos seguintes metais (ISO 11466, 1995): alumínio, antimônio, arsênio, bário, boro, cádmio, cálcio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, ferro, manganês, mercúrio, molibdênio, níquel, nitrato, potássio, prata, selênio, vanádio, zinco e sódio (**Tabela 4**). Essas análises foram realizadas pela pelo laboratório da empresa *Analytical Solutions*.

Tabela 2. Ensaio de Lixiviação - NBR 10005, nas amostras compostas dos resíduos de perfuração provenientes do secador e da centrífuga 2 em (mg L⁻¹).

Lixiviado	VMP	Secador	Centrífuga 2
Inorgânico			
Arsênio	1,0	N.D.	N.D.
Bário	70,0	1,051	1,839
Cádmio	0,5	N.D.	N.D.
Chumbo	1,0	N.D.	N.D.
Cromo total	5,0	N.D.	N.D.
Fluoreto	150,0	N.D.	N.D.
Mercúrio	0,1	N.D.	N.D.
Prata	5,0	0,011	N.D.
Selênio	1,0	0,014	N.D.
Pesticidas			
Aldrin	0,003	N.D.	N.D.
Dieldrin	0,003	N.D.	N.D.
Clordano (isômeros)	0,02	N.D.	N.D.
DDT	0,2	N.D.	N.D.
DDD	0,2	N.D.	N.D.
DDE	0,2	N.D.	N.D.
2,4-D	3,0	N.D.	N.D.
Endrin	0,06	N.D.	N.D.
Heptacloro	0,003	N.D.	N.D.
Heptacloro epóxido	0,003	N.D.	N.D.
Lindano	0,2	N.D.	N.D.
Metoxicloro	2,0	N.D.	N.D.
Pentaclorofenol	0,9	N.D.	N.D.
Toxafeno	0,5	N.D.	N.D.
2,4,5-T	0,2	N.D.	N.D.
2,4,5-TP	1,0	N.D.	N.D.
Outros Orgânicos			
Benzeno	0,5	N.D.	N.D.
Benzo(a)pireno	0,1	N.D.	N.D.
Cloreto de vinila	0,5	N.D.	N.D.
Clorobenzeno	100,0	N.D.	N.D.
Clorofórmio	6,0	0,019	0,007
Cresol total	200,0	N.D.	N.D.
o-cresol	200,0	N.D.	N.D.
m-cresol	200,0	N.D.	N.D.
p-cresol	200,0	N.D.	N.D.
1,4-diclorobenzeno	7,5	N.D.	N.D.
1,2-dicloroetano	1,0	N.D.	N.D.
1,1-dicloroetileno	3,0	N.D.	N.D.
Hexaclorobutadieno	0,5	N.D.	N.D.
Hexacloroetano	3,0	N.D.	N.D.
Metiletilcetona	200,0	N.D.	N.D.
Piridina	5,0	N.D.	N.D.
Tetracloroeto de carbono	0,2	N.D.	N.D.
Tetracloroetileno	4,0	N.D.	N.D.
Tricloroetileno	7,0	N.D.	N.D.
2,4,5-triclorofenol	400,0	N.D.	N.D.
2,4,6-triclorofenol	20,0	N.D.	N.D.

N.D. = Não Detectado; VMP = Valor Máximo Permitido.

Tabela 3. Ensaio de Solubilização - NBR 10006, nas amostras compostas dos resíduos de perfuração provenientes do secador e da centrífuga 2 em (mg L⁻¹).

Solubilizado	VMP	Secador	Centrífuga 2
Inorgânicos			
Arsênio	0,010	0,009	0,062
Alumínio	0,20	0,078	7,182
Bário	0,7	0,319	0,539
Cádmio	0,005	N.D.	N.D.
Chumbo	0,01	0,01	N.D.
Cianeto	0,07	0,021	N.D.
Cloreto	250,0	1503,78	18,75
Cobre	2,0	0,019	0,033
Cromo total	0,05	N.D.	0,014
Ferro	0,3	0,051	15,554
Fluoreto	1,5	0,162	0,531
Manganês	0,1	N.D.	0,272
Mercúrio	0,001	N.D.	N.D.
Nitrato (expr. em N)	10,0	N.D.	N.D.
Prata	0,05	N.D.	N.D.
Selênio	0,01	N.D.	N.D.
Sódio	200,0	58,326	69,587
Sulfato (expr. em SO ₄)	250,0	126,26	73,54
Surfactantes	0,5	0,434	N.D.
Zinco	5,0	N.D.	0,163
Orgânicos			
Aldrin	0,00003	N.D.	N.D.
Dieldrin	0,00003	N.D.	N.D.
Clordano (isômeros)	0,0002	N.D.	N.D.
DDT	0,002	N.D.	N.D.
DDD	--	N.D.	N.D.
DDE	--	N.D.	N.D.
2,4-D	0,03	N.D.	N.D.
Endrin	0,0006	N.D.	N.D.
Heptacloro	0,00003	N.D.	N.D.
Heptacloro epóxido	0,00003	N.D.	N.D.
Lindano	0,002	N.D.	N.D.
Fenóis totais	0,01	N.D.	0,05
Metoxicloro	0,02	N.D.	N.D.
Toxafeno	0,005	N.D.	N.D.
2,4,5-T	0,002	N.D.	N.D.
2,4,5-TP	0,030	N.D.	N.D.
Hexaclorobenzeno	0,001	N.D.	N.D.

N.D. = Não detectado; VMP = Valor Máximo Permitido.

Tabela 4. Teores pseudototais nas amostras compostas dos resíduos de perfuração.

	Secador	Centrífuga 2
	mg kg ⁻¹	
Alumínio	7874,5	5384,1
Antimônio	0,0	0,0
Arsênio	16,7	3,6
Bário	80.900,0	98.700,0
Boro	3,5	3,0
Cádmio	0,0	0,0
Cálcio	15.550,0	12.480,0
Chumbo	8,0	6,9
Cobalto	6,4	4,2
Cobre	24,5	44,9
Cromo	15,8	10,7
Ferro	20.285,5	22.440,8
Manganês	429,4	634,3
Mercurio	0,5	0,0
Molibdênio	0,0	0,8
Níquel	12,3	7,7
Potássio	5.840,0	4.620,0
Prata	0,0	0,0
Selênio	0,0	0,0
Vanádio	14,2	13,7
Zinco	65,8	116,6
Nitrato	0,0	0,0
Sódio	4.167,5	1.597,8

De acordo com os teores pseudototais os metais alumínio, ferro e manganês estão em altas concentrações, principalmente no resíduo do secador, confirmando o que foi mencionado anteriormente, de que os resíduos gerados por esse equipamento apresentam maior influência das características da formação geológica, já que esses metais são componentes dos minerais primários, constituintes da rocha. Além desses metais, outros que também estão em maior concentração no resíduo do secador são: arsênio, boro, chumbo, cobalto, cromo, mercúrio, níquel, vanádio e sódio. No resíduo da centrífuga os metais com teores mais elevados são bário, cobre, molibdênio e zinco. A maior concentração de bário no resíduo da centrífuga confirma o que foi dito sobre esse resíduo apresentar maior influência do fluido de perfuração, em comparação com o secador. O bário é constituinte da baritina, utilizada no fluido de perfuração como adensante.

3.3.2 Caracterização do solo coletado no entorno do poço de petróleo

Nas amostras de solo coletadas no entorno do poço de petróleo foram realizadas análises para determinar os teores trocáveis de nutrientes, Al, Na, pH, Valor T, de acordo com EMBRAPA (1997). Os dados estão expostos na **Tabela 5**.

Tabela 5. Atributos químicos do solo do entorno da área estudada.

Profund.	Na	Ca	Mg	K	H+Al	Al	S	T	V	M	pH _{água}	P
(cm)	-----cmol _c dm ⁻³ -----							---- % ----			1:2,5	mg kg ⁻¹
0 – 20	0,2	1,1	0,7	0,1	2,0	0,2	2,1	4,1	51,2	9	5,2	19,4

A **Tabela 6** apresenta as concentrações pseudototais nas amostras de solo coletadas no entorno da área estudada.

Tabela 6. Concentrações pseudototais nas amostras de solo do entorno da área estudada.

Elementos (mg kg ⁻¹)					
Bário	Ferro	Manganês	Cálcio	Sódio	Potássio
25,0	4949,5	21,2	8020,5	75,3	22,0

Os resultados da análise de atributos físicos realizada nas amostras do solo estão apresentados na **Tabela 7**. O solo apresentou textura franco-argiloarenosa, ou média (simplificada), de acordo com o guia para grupamento de classes de textura do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), e foi classificado como Argissolo.

Tabela 7. Atributos físicos do solo

Prof	AG	AF	AT	Silte	Argila	Sil/Arg	G.F
Cm	-----g kg ⁻¹ -----						%
0-20	550	160	710	50	240	0,21	28

Prof=profundidade; AG=areia grossa; AF=areia fina; AT=areia total; Sil/Arg=relação silte/argila; G.F= Grau de Flocculação.

3.4 Lavagem dos Resíduos

Guedes (2011), como parte das suas atividades de doutorado, fez um ensaio com o objetivo de avaliar o potencial de extração de sódio, potássio, bário e outros elementos, em diferentes proporções substrato/solução nas amostras compostas dos resíduos de perfuração de poços de petróleo.

Em função dos resultados obtidos por Guedes (2011), foi realizado um pré-tratamento nos resíduos, i.e., uma lavagem para redução da concentração de sódio. Para a utilização de dois resíduos, um do secador e outro da centrífuga 2, cada um deles foi utilizado lavado e não lavado, permitindo uma comparação entre essas duas condições.

Para a lavagem foram separadas as amostras dos resíduos para cada dose, nas quantidades correspondentes ao ensaio dos vasos com esse tratamento. As amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos com capacidade de cinco litros, e em seguida foi adicionado um volume de água deionizada na proporção 1:5. Os recipientes foram dispostos em uma mesa agitadora de solos, devidamente vedados pra evitar vazamentos e perda de material. A agitação durou trinta minutos, com uma rotação de 120 rpm. Em seguida o material ficou em repouso para decantação por 24 horas (**Figura 4**). O sobrenadante foi coletado e armazenado em garrafas plásticas para posterior análise e avaliação da quantidade extraída de sódio e dos demais elementos. Posteriormente, o resíduo foi seco ao ar, destorroado e peneirado, e foi feita a pesagem das quantidades correspondentes a cada dose, para cada unidade experimental.



Figura 4. Resíduos em repouso após a lavagem.

Após análise e tratamento, a água da lavagem dos resíduos poderia ser reutilizada dentro do processo de perfuração de poços de petróleo, como solução salina, componente dos fluidos de perfuração necessário para dar maior sustentação à parede do poço.

3.5 Aplicação dos Resíduos no Solo

Foram avaliadas três doses de resíduo calculadas em função da quantidade de bário. A quantidade de resíduo a ser aplicado no solo foi determinada com base nos valores orientadores propostos pela resolução 420 do CONAMA (2009) para o elemento bário, mais especificamente o valor de investigação, acima do qual há riscos potenciais para o ambiente. Foram definidos os seguintes valores:

Testemunha - Sem aplicação de resíduo, contendo apenas o teor natural de bário do solo coletado;

Dose 1: 300mg kg^{-1} – Corresponde ao Valor de Investigação;

Dose 2: 600 mg kg^{-1} – Corresponde a duas vezes o Valor de Investigação;

Dose 3: 900 mg kg^{-1} – Corresponde a três vezes o Valor de Investigação.

Cada resíduo foi aplicado ao solo nessas doses. O cálculo para determinar a quantidade de resíduo que seria adicionada ao solo, para atingir os valores propostos acima, foi realizado depois da quantificação do teor de bário contido no resíduo, através da abertura com água régia (ISO 11466, 1995).

Como são resíduos diferentes, com maior ou menor influência do fluido em sua composição, eles também apresentam teores diferentes de bário, o que reflete na quantidade de resíduo a ser aplicada ao solo para atingir as doses estabelecidas. A **Tabela 8** mostra as quantidades aplicadas de cada resíduo, para cada dose adotada no experimento, em megagrama por hectare, e os teores de bário, sódio, ferro, potássio, manganês e cálcio correspondentes.

Tabela 8.Quantidades dos resíduos aplicados no solo (Mg ha^{-1}) e dos elementos analisados (mg kg^{-1}) nas diferentes doses dos resíduos.

Secador							
	Mg ha^{-1}	Bário	Sódio	Ferro	Potássio	Manganês	Cálcio
Test	-	25,0	75,3	4949,5	22,0	21,15	8020,5
Test+D1	9,88	325,0	90,8	5000,6	133,0	22,06	8069,1
Test+D2	19,78	625,0	106,2	5051,7	244,0	22,96	8117,8
Test+D3	29,67	925,0	121,7	5102,8	355,0	23,87	8165,5
Centrífuga							
	Mg ha^{-1}	Bário	Sódio	Ferro	Potássio	Manganês	Cálcio
Test	-	25,0	75,3	4949,5	22,0	21,15	8020,5
Test+D1	8,11	325,0	80,2	4978,0	78,0	21,82	8172,2
Test+D2	16,21	625,0	85,0	5006,8	134,0	22,49	8323,5
Test+D3	24,31	925,0	89,9	5035,4	190,0	23,16	8475,5

Testemunha= sem aplicação de resíduo; Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

A quantidade correspondente a cada unidade experimental foi adicionada ao solo e essa mistura foi agitada manualmente dentro de um saco plástico até a homogeneização. Em seguida esse material foi depositado em um vaso plástico e disposto em bancadas.

3.6 Teor de Umidade

O solo foi mantido em duas condições de umidade: oxidação e redução. Foi calculada a capacidade de campo do solo, e uma parte das unidades experimentais foi mantida a 70% deste valor, caracterizando a condição de oxidação. As outras unidades experimentais foram mantidas em condições de saturação, com a presença de uma lâmina superficial, caracterizando a condição redutora. Para alcançar os teores de umidade foi utilizada água deionizada. Todas as unidades experimentais tiveram a drenagem impedida e também foram cobertas com papel alumínio para diminuir as perdas por evaporação.

3.7 Ensaio com Plantas

Este ensaio teve como objetivo avaliar a absorção de bário e outros metais provenientes do cascalho de perfuração de poços de petróleo pelas plantas de arroz (*Oryza sativa*), além do comportamento diante de alto teor de sais. Diante disso, foi avaliada a eficiência da lavagem dos resíduos na redução do seu teor de sódio. O arroz foi escolhido para o desenvolvimento deste ensaio por se tratar de uma cultura adaptável às duas condições de umidade em teste, oxidação e saturação.

O ensaio com plantas foi composto por 1 tipo de solo, 2 resíduos (um do Secador e um da Centrífuga) em 2 condições de tratamento (lavado e não lavado), 2 umidades, 1 espécie, 3 tratamentos e 3 repetições, totalizando 72 unidades experimentais mais 6 testemunhas (3 testemunhas em condição de oxidação e 3 testemunhas em condição de redução). O delineamento experimental utilizado para cada classe de resíduo foi o inteiramente casualizado ($4 \times 2 \times 2$).

O solo utilizado no ensaio foi previamente preparado, sendo seco, destorroado, peneirado em tamis de malha de 4,0 mm e homogeneizado. Cada unidade experimental recebeu o volume de aproximadamente 4 dm^3 de solo, misturado aos resíduos de perfuração de poço de petróleo. A mistura de cada unidade experimental foi agitada manualmente dentro de sacos plásticos por alguns segundos até a homogeneização e em seguida foi acomodada dentro dos vasos. A cada vaso foi adicionado o volume de água correspondente aos teores de umidade de 70% da capacidade de campo e saturação. No início do ensaio os vasos

permaneceram cobertos por papel alumínio para evitar perdas por evaporação e para manter o teor de umidade desejado enquanto eram feitas as leituras para o monitoramento do potencial redox e do pH (**Figura 5**). Na primeira semana foram realizadas duas leituras e a partir da segunda semana as leituras passaram a ser semanais. Dessa forma, o solo permaneceu incubado até que os valores de potencial redox estivessem entre -150 e -200 mV nas unidades em condição de redução. Após atingir essa faixa de valores, aguardou-se 30 dias até que as reações de redução no solo se estabilizassem. As unidades mantidas a 70% da capacidade de campo permaneceram incubadas pelo mesmo período que as unidades saturadas.



Figura 5. Adição de água, medição de potencial redox e vasos dispostos em bancadas.

Em seguida, foi conduzido o cultivo de arroz (*Oryza sativa*), Cultivar Bico Ganga, através de mudas germinadas em vasos, em fitotron, método utilizado pelo Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas da UFRRJ (**Figura 6**). O plantio foi realizado 20 dias após a germinação. Cada vaso recebeu 4 mudas, selecionadas entre as mais homogêneas quanto ao tamanho e vigor (**Figura 7**). Depois de duas semanas foi feito o desbaste, deixando apenas duas plantas em cada vaso. Os teores de umidade foram monitorados diariamente, mantendo-se o estabelecido para o ensaio.

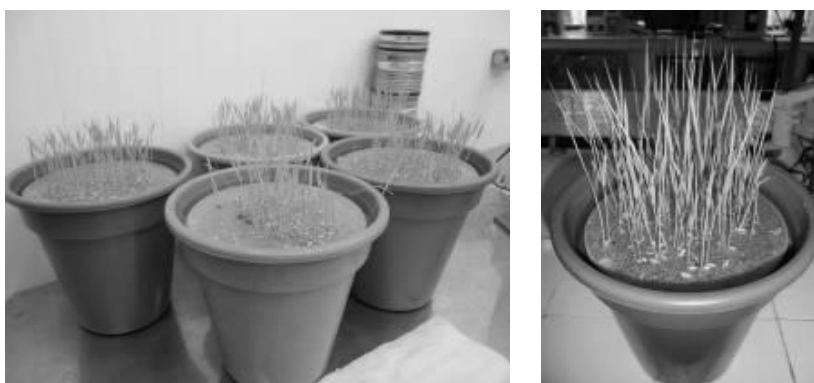


Figura 6. Sementes germinadas em fitotron e mudas prontas para o plantio, com 20 dias.

Após análise química (**Tabela 5**), verificou-se que o solo não precisava de calagem. Para o atendimento das necessidades nutricionais da cultura de arroz foi utilizada uma solução de N e Papós o transplântio das mudas.



Figura 7.Plantio de quatro mudas e vaso pronto disposto em bancada.

As plantas foram coletadas em um período próximo de completarem seu ciclo, aos 140 dias (**Figura 8**). Após a coleta, as plantas foram separadas em raiz, folhas e grãos, e esse material foi seco em estufa de circulação forçada de ar, moído e digerido de acordo com Tedesco et. al. (1995)e, posteriormente, analisado.

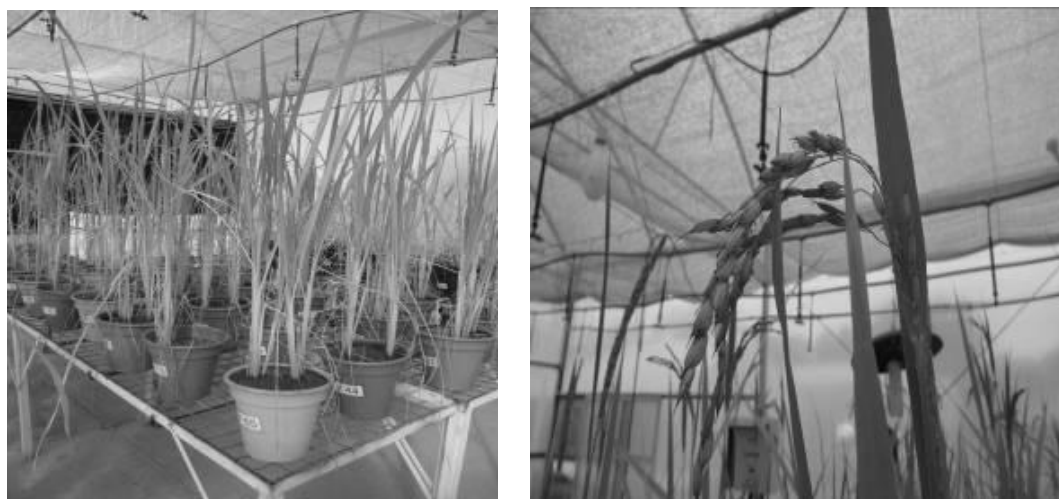


Figura 8.Plantas em desenvolvimento na casa de vegetação. Detalhe do enchimento dos grãos.

3.8 Análises Laboratoriais

3.8.1 Disponibilidade dos elementos

Foi considerada como fração de bário, ferro e manganês disponível para as plantas a fração ácido solúvel (F1) do método BCR (Community Bureau of Reference), como utilizado por Sahuquillo et al. (1999) e Magalhães (2011). Como solução extratora foi utilizado o ácido acético 0,11 mol L⁻¹. Para a realização do procedimento foram adicionados 50 mL de ácido acético sobre 1g de solo em tubo de centrifuga. As amostras foram colocadas em agitador de mesa horizontal por 20 horas sob temperatura ambiente. Após a agitação, as amostras foram centrifugadas por 15 minutos a 3000 RPM, a fase líquida foi retirada. O extrato obtido foi analisado por Espectrometria de Absorção Atômica com chama, marca VARIAN, modelo SpectrAA 55B.

A determinação de sódio, potássio e cálcio trocáveis, e pH nas amostras de solo foi realizada segundo método preconizado pela EMBRAPA (1997).

Os valores da condutividade elétrica foram obtidos de forma direta, com a utilização de condutivímetro marca Hanna. O eletrodo foi colocado diretamente no solo, a uma profundidade aproximada de 8 cm, e os valores da leitura foram obtidos após a estabilização.

3.8.2 Teores pseudototais

A determinação de teores pseudototais nas amostras de solo antes do plantio foi feita de acordo com a ISO 11466 (1995). Consiste em pesar 1 g de amostra de solo em tubo de ensaio tipo Pyrex, e adicionar 10 cm³ de água régia (ácido nítrico e ácido clorídrico, na proporção de 1:3). Os tubos são mantidos à temperatura ambiente durante 16 horas e posteriormente são colocados em bloco digestor seguindo uma marcha de tempo e temperatura, sob condições de refluxo. A suspensão obtida é então diluída a 50 cm³ com 0,5 mol L⁻¹ de ácido clorídrico, filtrada e armazenada.

3.8.3 Ensaio com plantas

O desenvolvimento das plantas foi avaliado quanto à produção de matéria seca. A partir de digestão nitroperclórica, na proporção de 6:1, de acordo com o método de Tedesco et al., (1995), foram determinadas as concentrações dos elementos potássio, cálcio, manganês, sódio, ferro, e bário.

3.8.4 Validação e análise dos dados

Os teores de bário, cálcio, ferro e manganês nos extratos de solo e planta foram quantificados por Espectrometria de Absorção Atômica, marca VARIAN, com LD (mg kg⁻¹) de 0,021 para bário; LD (mg kg⁻¹) 1,55 para ferro; LD (mg kg⁻¹) 0,14 para manganês, e LD (mg kg⁻¹) 14,25 para cálcio. Os teores de sódio e potássio nos extratos de solo e plantas foram quantificados em aparelho Fotômetro de Chama Digimed modelo DM-62, com LD (mg kg⁻¹) de 3,3 para sódio, e LD (mg kg⁻¹) 0,8 para potássio. O limite de detecção (LD) do método foi calculado pela média dos valores dos brancos mais três vezes o desvio-padrão do branco de todas as análises (3 repetições). Para validação da determinação do teor pseudototal de bário, cálcio, ferro, manganês, sódio e potássio no solo e nas plantas, utilizaram-se os seguintes materiais certificados de referência: NIST SRM 2709a - San Joaquin Soil que apresenta concentração de bário de 979±28 mg kg⁻¹ - 99 % de recuperação; de sódio de 12,2 ± 0,3g kg⁻¹ - 99 % de recuperação; de manganês de 529±18 mg kg⁻¹ - 98% de recuperação; de ferro de 33,6±0,07 g kg⁻¹ - 98% de recuperação; de potássio de 21,1 g kg⁻¹ - 98% de recuperação; de cálcio de 19,1 g kg⁻¹ - 99% de recuperação. Nas plantas, utilizou-se o material certificado de referência NIST SRM 1573a Tomato Leaves, com concentração de bário de 63±0,7 mg kg⁻¹ - 96% de recuperação; de ferro de 368±7 mg kg⁻¹ - 97% de recuperação; de manganês de 246±8 mg kg⁻¹ - 96% de recuperação; de sódio de 136±4mg kg⁻¹ - 71% de recuperação; de potássio de 27,0±0,05g kg⁻¹ - 92% de recuperação; cálcio de 50,5±0,09g kg⁻¹ - 99% de recuperação.

3.9 Análise Estatística

Os dados foram avaliados por análise de variância com aplicação do teste F ($\rho < 0,05$), sendo os valores médios comparados pelo teste de Tukey ($\rho < 0,05$). As análises foram realizadas utilizando os programas estatísticos Sisvar e SAS[®] versão 9.2 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Potencial Redox (Eh) e pH nos Vasos

Quanto à umidade, as unidades mantidas a 70% da capacidade de campo apresentaram valores entre 300 e 400 mV no final do monitoramento, considerados ideais diante de condições de oxidação de acordo com Tian-Yen (1985), pois nessa faixa de potencial redox ocorre uma baixa atividade de elétrons, e o solo apresenta predomínio de O₂ e materiais na forma oxidada. Observando a **Figura 9** do resíduo da centrífuga, percebe-se que essas unidades apresentaram padrões semelhantes ao longo das semanas, alcançando os valores mencionados a partir da nona semana.

A lavagem do resíduo não influenciou os resultados para as condições de oxidação e de redução.

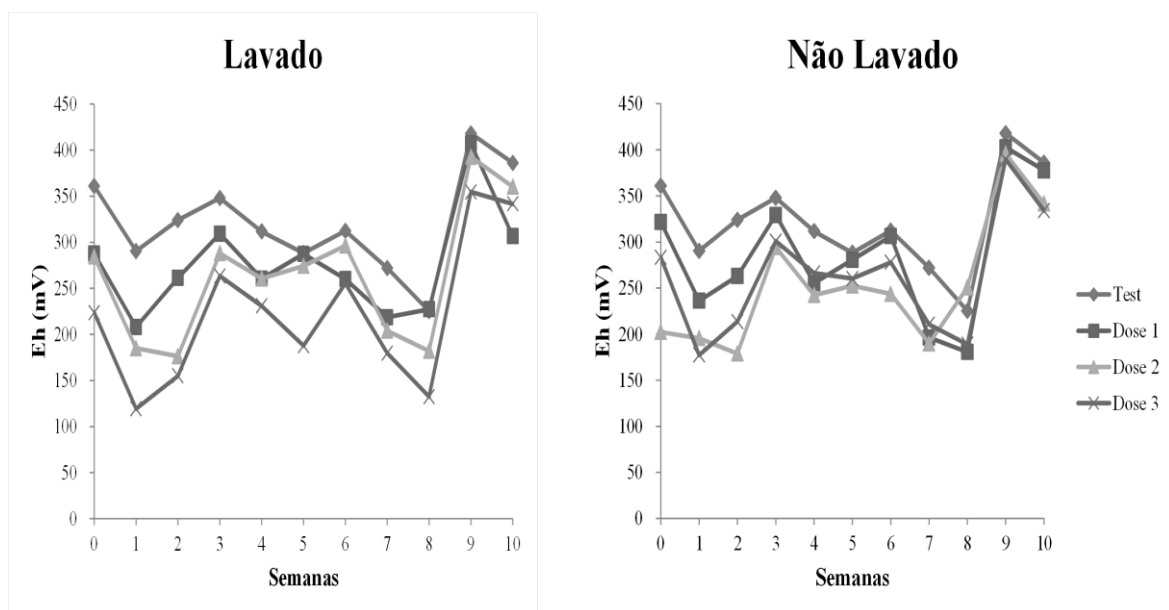


Figura 9. Valores de potencial redox (Eh) do solo dos vasos em condição de oxidação após incorporação do resíduo da centrífuga, em duas condições de lavagem do resíduo (Lavado e Não Lavado) em função do tempo.

As unidades experimentais do tratamento em condição de redução (**Figura 10**) alcançaram valores de Eh entre -150 e -200 mV, assim como observado por Magalhães (2011) e Machado (2012). Os vasos que receberam o resíduo da centrífuga apresentaram resultados muito próximos aos das testemunhas, o que permite inferir que a aplicação do resíduo não influenciou as reações de redução no solo, acelerando-as ou tornando-as mais lentas.

Em condição redutora, resultante de alagamento ou inundação, a respiração dos microrganismos aeróbios diminui progressivamente a concentração de O₂ na superfície do solo e na lâmina de água (SHU-ZHENG, 1985), até que esse consumo leva a uma sucessão de microrganismos no solo, com favorecimento dos anaeróbios facultativos e obrigatórios. Nesse processo, a oxidação da matéria orgânica ocorre à custa da redução de compostos inorgânicos oxidados (SOUSA, 2001; SILVA et al., 2008), que assumem a função de aceptores de elétrons à medida que o potencial redox do solo diminui.

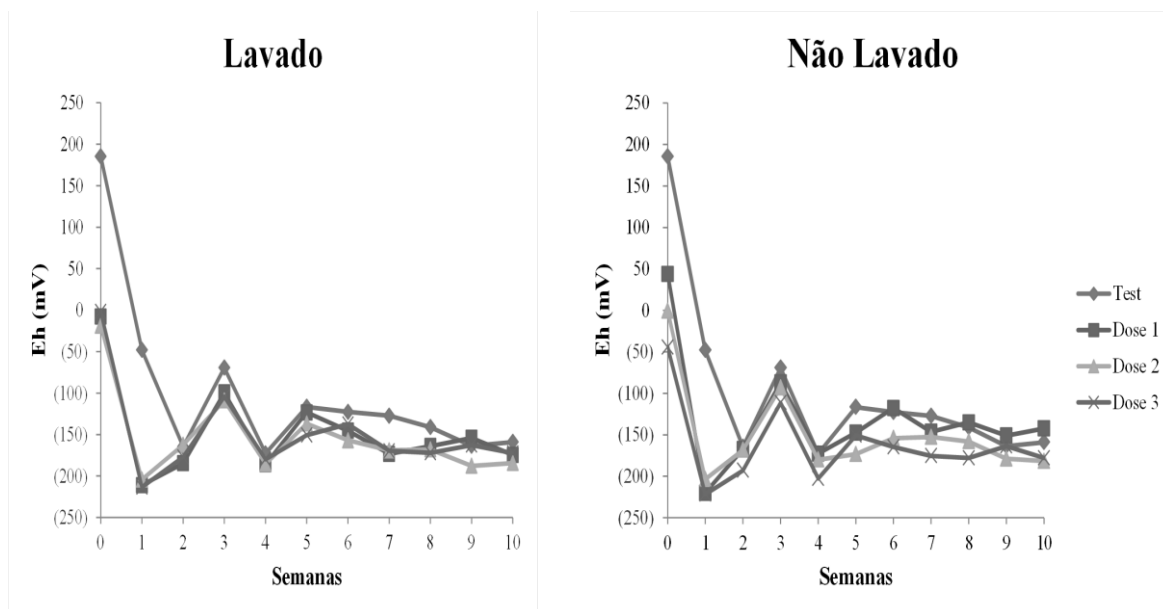


Figura 10. Valores de potencial redox (Eh) do solo dos vasos em condição de redução após incorporação do resíduo da centrífuga, em duas condições de lavagem do resíduo (Lavado e Não Lavado) em função do tempo.

O resíduo do secador apresentou resultados similares aos do resíduo da centrífuga. A **Figura 11** mostra que as unidades atingiram valores de Eh entre 300 e 400 mV na condição oxidada.

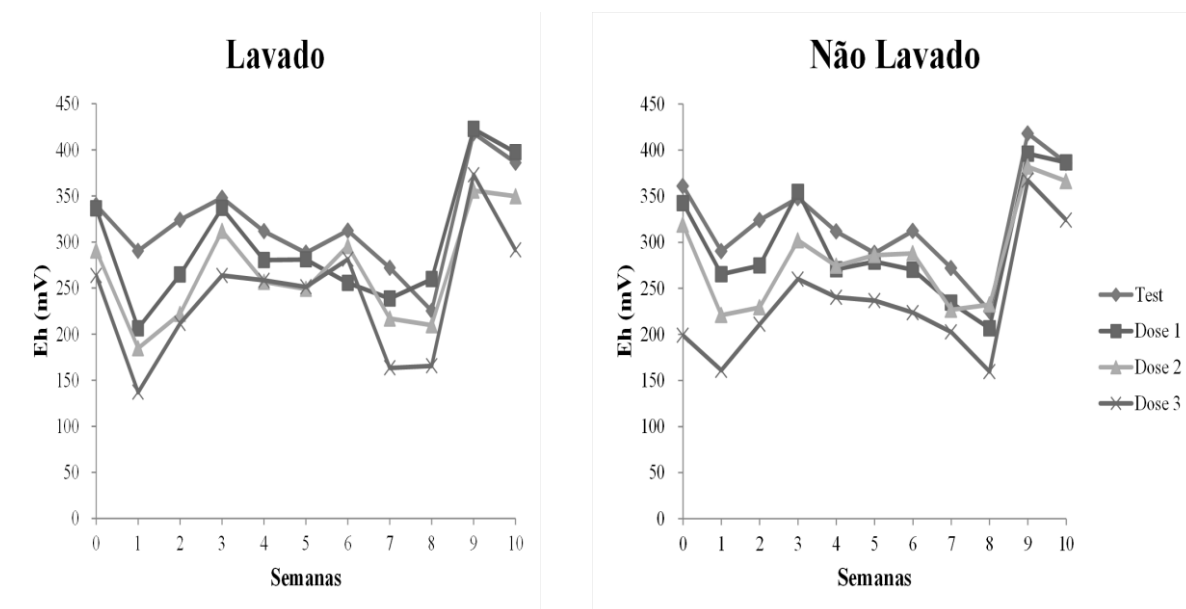


Figura 11. Valores de potencial redox (Eh) do solo dos vasos em condição de oxidação após incorporação do resíduo do secador, em duas condições de lavagem do resíduo (Lavado e Não Lavado) em função do tempo.

Sob saturação os valores também ficaram entre -150 e -200 mV no final do monitoramento (**Figura 12**). Valores de Eh muito baixos, negativos, favorecem o desenvolvimento de bactérias redutoras de sulfato (BRS), levando, conseqüentemente, ao aumento da solubilidade do bário (POSTGATE, 1984).

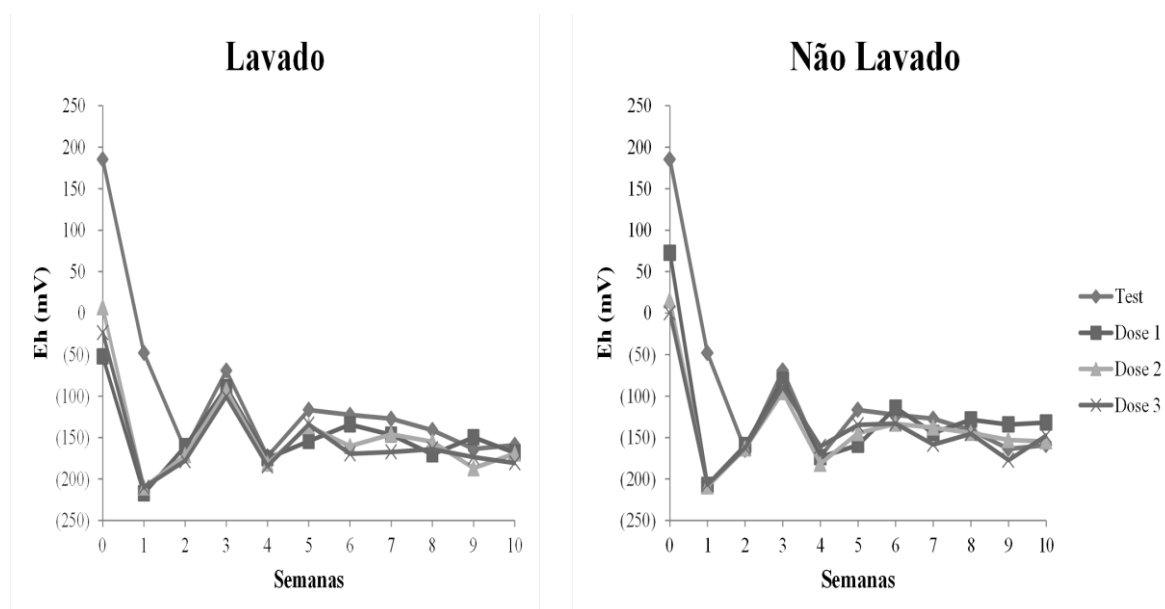


Figura 12. Valores de potencial redox (Eh) do solo dos vasos em condição de redução após incorporação do resíduo do secador, em duas condições de lavagem do resíduo (Lavado e Não Lavado) em função do tempo.

Analisando a **Tabela 9**, com os valores de pH para o resíduo do secador e da centrífuga antes do plantio, nota-se o efeito da umidade do solo nos dois resíduos, com valores significativamente superiores em solo reduzido, nas três doses, para o resíduo lavado e não lavado. Em geral, a lavagem do resíduo não influenciou a variação de pH.

Tabela 9. Valores de pH em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, nas diferentes doses, umidades e condições de lavagem.

Secador							
	Test	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	4,97B	5,66 Ba	5,27 Ba	5,50 Ba	5,33 Ba	5,52 Bb	6,04 Ba
Reduzido	6,11 ^a	6,47 Aa	6,37 Aa	6,55 Aa	6,33 Aa	6,59 Aa	6,55 Aa
CV	3,0	4,9		4,1		2,0	
Centrífuga							
	Test	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	4,97B	5,43 Ba	5,87 Ba	5,71 Ba	5,70 Ba	5,97 Ba	5,69 Bb
Reduzido	6,11 ^a	6,44 Aa	6,44 Aa	6,56 Aa	6,57 Aa	6,64 Aa	6,64 Aa
CV	3,03	4,8		2,7		1,4	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test = Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

Quanto às doses (**Tabela 10**) para o resíduo do secador, em solo oxidado e resíduo lavado, não houve diferença significativa entre a testemunha e as doses, e entre as doses. Para o resíduo não lavado, a maior dose foi significativamente superior à testemunha e às doses 1 e 2. Em solo reduzido, com o resíduo lavado, as três doses foram significativamente superiores

à testemunha, mas sem diferirem entre si. Para o resíduo não lavado, a dose 3 foi significativamente superior à testemunha e às demais doses, seguida da dose 2. A dose 1 não diferiu das doses 2 e 3. As três doses diferiram significativamente da testemunha.

Para o resíduo da centrífuga, em oxidação, para o resíduo lavado, as três doses promoveram aumento de pH, mas as doses 1 e 2 não diferiram da testemunha e da dose 3. Para o resíduo não lavado não houve diferença entre as doses e elas foram superiores à testemunha. Em solo reduzido, para o resíduo lavado e não lavado, as doses 1 e 3 foram significativamente superiores à testemunha. A dose 2 não diferiu das demais doses.

O aumento de pH com a aplicação dos resíduos indica a possibilidade de formação de compostos insolúveis ou de baixa solubilidade, que, diminuem a disponibilidade de alguns elementos para as plantas. Esse aumento no pH é característico de solos sob condições de alagamento, devido ao consumo de prótons e como resultado espera-se mudança no pH (PONNAMPERUMA, 1972; SOUSA et al., 2002).

Tabela 10. Efeito da aplicação dos resíduos do secador e da centrífuga no pH do solo, nas diferentes doses.

Secador				
	Oxidado		Reduzido	
	Lavado	Não lavado	Lavado	Não lavado
Test	4,97 A	4,97 B	6,11 B	6,11 C
Dose 1	5,66 A	5,27 B	6,47 A	6,37 AB
Dose 2	5,50 A	5,33 B	6,55 A	6,33 B
Dose 3	5,52 A	6,04 A	6,59 A	6,55 A
CV	7,1	3,4	1,0	1,2
Centrífuga				
	Oxidado		Reduzido	
	Lavado	Não lavado	Lavado	Não lavado
Test	4,97 B	4,97 B	6,11 C	6,11 C
Dose 1	5,43 AB	5,87 A	6,44 B	6,44 B
Dose 2	5,71 AB	5,70 A	6,56 AB	6,57 AB
Dose 3	5,97 A	5,69 A	6,64 A	6,64 A
CV	5,5	3,9	1,1	1,0

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. Test = Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

4.2 Eficiência da Lavagem dos Resíduos

A **Tabela 11** mostra a eficiência (%) da lavagem para o resíduo do secador e da centrífuga, para os elementos bário, sódio, ferro, potássio, manganês e cálcio. Os valores iniciais indicam a massa (em mg) de cada elemento presente em 500 g de resíduo, que foi a quantidade usada no procedimento, e o removido, que corresponde à massa extraída em 2,5 litros de água deionizada.

De maneira geral, a lavagem foi mais eficiente para o resíduo do secador, com maiores remoções em água. O elemento mais extraído foi o sódio, mais solúvel em água (72% no secador e 51% na centrífuga). O sódio é um elemento potencialmente causador de salinidade, mas é necessário durante o processo de perfuração de poço de petróleo. Normalmente é

utilizada uma solução salina saturada, de cloreto de sódio, com objetivo de dar maior sustentação à parede do poço através da sua ação dispersante nas argilas.

A segunda maior eficiência foi para o cálcio, com 6,1% no secador e 6,8% na centrífuga. Este elemento está presente no fluido de perfuração na forma de óxido de cálcio, como alcalinizante para o controle de pH.

O potássio presente na composição dos resíduos teve baixa extração (1,2% no secador e 0,9% na centrífuga), demonstrando que a forma presente desse metal nos resíduos apresentava uma solubilidade em água pequena. Esses resultados indicam que se trata, predominantemente, do potássio estrutural, presente em minerais primários da rocha que foi triturada, e de difícil extração.

O ferro e o manganês tiveram uma remoção muito pequena com a lavagem em água, e, possivelmente, também são provenientes de minerais da rocha moída.

O bário contido nos resíduos provém da baritina (sulfato de bário), componente do fluido de perfuração de muito baixa solubilidade em água, utilizado como adensante, para controlar a pressão dentro do poço durante a perfuração. A sua extração em água foi baixa para os dois resíduos (0,002%).

Tabela 11. Eficiência de extração de metais dos resíduos do secador e da centrífuga.

Secador			
	Massa inicial	Massa removida	Eficiência de extração (%)
Potássio	2920,0	33,3	1,15
Sódio	2083,5	1500,0	72,0
Cálcio	7775,0	472,0	6,1
Bário	40450,0	0,8	0,002
Ferro	10142,8	0,053	0,0005
Manganês	214,7	0,0	0,0001
Centrífuga			
	Massa inicial	Massa removida	Eficiência de extração (%)
Potássio	2310,0	20,2	0,87
Sódio	795,0	408,3	51,4
Cálcio	6240,0	426,0	6,8
Bário	49350,0	0,8	0,002
Ferro	11220,4	0,048	0,0004
Manganês	317,2	0,0	0,0001

Massa inicial: Quantidade em mg presente em 500g de resíduo; Massa removida: quantidade extraída em 2,5 litros de água.

4.3 Produção de Matéria Seca

Após coleta e processamento das plantas de arroz foram obtidos os dados de produção de matéria seca e de concentração de metais nas partes vegetativas.

A produção de massa seca pelas plantas de arroz desenvolvidas em solo que recebeu o resíduo do secador está apresentada na **Tabela 12**. Na menor dose a lavagem do resíduo não influenciou a produção de matéria seca, não havendo diferença significativa entre lavado e não lavado para parte aérea, raiz, grãos e total produzido. O incremento de produção se deu apenas na parte aérea, onde houve maior produção em condições de oxidação, com o resíduo não lavado.

Tabela 12. Produção de massa seca (g) pelas plantas de arroz nas diferentes condições de umidade, lavagem e doses de aplicação do resíduo do secador.

Testemunha								
	Parte Aérea		Raiz		Grãos		Total Planta	
Oxidado	12,2 A		8,9 B		3,4 B		24,5B	
Reduzido	12,1 A		20,1 A		5,5 A		37,7 A	
CV	4,6		14,9		12,2		6,0	
Dose 1								
	PA		Raiz		Grãos		Total Planta	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	13,5Aa	13,9Aa	8,6Aa	8,2Aa	4,4Aa	5,0Aa	26,5Aa	27,1Aa
Reduzido	11,5Aa	10,2Ba	8,3Aa	7,8Aa	4,7Aa	5,1Aa	24,5Aa	23,2Aa
CV	11,9		20,8		20,4		8,7	
Dose 2								
	PA		Raiz		Grãos		Total Planta	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	13,9Aa	13,7Aa	7,6Ba	7,4Aa	5,0Aa	5,1Aa	26,5Aa	26,2Aa
Reduzido	10,7Ba	10,3Ba	9,6Aa	6,2Ab	5,0Aa	5,3Aa	25,3Aa	21,8Ba
CV	10,9		10,2		9,4		8,0	
Dose 3								
	PA		Raiz		Grãos		Total Planta	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	11,1Ab	13,0Aa	6,7Ba	6,4Aa	4,5Aa	4,3Aa	22,3Ba	23,6Aa
Reduzido	11,4Aa	9,1Bb	13,3Aa	8,1Ab	4,5Aa	4,5Aa	29,1Aa	21,6Ab
CV	8,4		30,0		14,7		11,1	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

Na dose 2 houve efeito da lavagem do resíduo apenas nas raízes, com maior produção de matéria seca com o resíduo lavado, em solo na condição reduzida. Houve diferença significativa para a condição de umidade em parte aérea, raiz, grãos e total produzido. Na parte aérea houve maior produção em oxidação, com o resíduo lavado e não lavado, o que determinou uma maior produção de matéria seca em condições de oxidação, com o resíduo não lavado. Contudo, nas raízes, com o resíduo lavado houve incremento significativo na condição de redução. Para os grãos, as diferentes condições de lavagem e umidade não influenciaram a produção de matéria seca.

Na maior dose a condição de redução apresentou diferença significativa para lavagem, com maior produção de matéria seca em todos os parâmetros quando foi usado o resíduo lavado. Em condição de oxidação houve diferença significativa para a lavagem na produção de parte aérea, com maior produção com o resíduo não lavado. Comparando as condições de umidade, na raiz e no total produzido houve diferença significativa, com aumento da produção em condições de redução, com o resíduo lavado. Na parte aérea houve diferença significativa com maior produção em oxidação, com o resíduo não lavado. Para grãos não houve efeito da lavagem ou da umidade.

Ao analisar o efeito das doses de aplicação do resíduo do secador na produção de matéria seca (**Tabela 13**), verifica-se que com o uso do resíduo lavado na condição de oxidação houve diferença significativa no total produzido pela planta, com maior produção de matéria seca nas doses 1 e 2 e menor produção na maior dose, sendo que, estatisticamente, a dose 3 não diferiu da testemunha. Para parte aérea, raiz e grãos não houve diferença significativa. Entretanto, no solo em condições redutoras para o total produzido houve uma redução significativa de massa seca com a aplicação do resíduo, independente da dose utilizada, chegando a produzir 35% menos (dose 1), quando comparada à testemunha. Não houve diferença significativa para parte aérea e grãos. Nas raízes, houve redução da produção com as doses 1 e 2, e a dose 3 não diferiu estatisticamente da testemunha e das demais doses.

Analisando o resíduo não lavado, na condição de oxidação houve diferença significativa entre as doses apenas para os grãos, com maior produção na dose 2. As doses 1 e 2 não diferiram estatisticamente da testemunha e da dose 3.

Em condição redutora, a produção de matéria seca na parte aérea reduziu em 25% na dose 3 com o uso do resíduo não lavado. As doses 1 e 2 não diferiram da testemunha e da dose 3. Não houve efeito de dose na produção pelos grãos.

De uma maneira geral, para raiz e total produzido, na condição de redução, a aplicação do resíduo desfavoreceu o crescimento das plantas de arroz com uma menor produção de matéria seca quando comparada à testemunha. Na raiz a redução chegou a 69% (dose 2), e no total produzido a redução foi de 43% na maior dose.

Tabela 13. Efeito da aplicação do resíduo do secador na produção de matéria seca em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.

Lavado								
	Oxidado				Reduzido			
	P.A	Raiz	Grãos	Total	P.A	Raiz	Grãos	Total
Test	12,2 A	8,9 A	3,4 A	24,5 AB	12,1 A	20,1 A	5,5 A	37,7 A
Dose 1	13,5 A	8,6 A	4,4 A	26,5 A	11,5 A	8,3 B	4,7 A	24,5 B
Dose 2	13,9 A	7,6 A	5,0 A	26,5 A	10,7 A	9,6 B	5,0 A	25,3 B
Dose 3	11,1 A	6,7 A	4,5 A	22,3 B	11,4 A	13,3 AB	4,5 A	29,1 B
CV	9,8	15,6	15,2	5,1	5,1	21,5	18,3	9,0
Não Lavado								
	Oxidado				Reduzido			
	P.A	Raiz	Grãos	Total	P.A	Raiz	Grãos	Total
Test	12,2 A	8,9 A	3,4 B	24,5 A	12,1 A	20,1 A	5,5 A	37,7 A
Dose 1	13,9 A	8,2 A	5,0 AB	27,1 A	10,2 AB	7,8 B	5,1 A	23,2 B
Dose 2	13,7 A	7,4 A	5,1 A	26,2 A	10,3 AB	6,2 B	5,3 A	21,8 B
Dose 3	13,0 A	6,4 A	4,3 AB	23,6 A	9,1 B	8,1 B	4,5 A	21,6 B
CV	11,7	15,2	14,1	8,9	8,8	19,8	10,2	9,4

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

A **Tabela 14** apresenta o efeito das diferentes condições de umidade e de lavagem do resíduo da centrífuga na produção de matéria seca pelas plantas de arroz. A lavagem do resíduo não influenciou na produção de massa seca, de uma maneira geral. Com a aplicação do resíduo, a condição de oxidação favoreceu a produção de matéria seca da parte aérea, nas três doses. Para a raiz e total produzido não houve efeito da umidade nas doses 1 e 2. Na

maior dose houve diferença significativa com o uso do resíduo não lavado, com maior produção em solo reduzido.

Tabela 14. Produção de massa seca (g) pelas plantas de arroz nas diferentes condições de umidade, lavagem e doses de aplicação do resíduo da centrífuga.

Testemunha								
	Parte Aérea		Raiz		Grãos		Total Planta	
Oxidado	12,2 A		8,9 B		3,4 B		24,5 B	
Reduzido	12,1 A		20,1 A		5,5 A		37,7 A	
CV	4,6		14,9		12,2		6,0	
Dose 1								
	PA		Raiz		Grãos		Total Planta	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	14,6Aa	14,3Aa	8,9Aa	8,6Aa	5,1Aa	4,7Aa	28,6Aa	27,6Aa
Reduzido	12,9Aa	11,4Ba	10,0Aa	12,9Aa	5,0Aa	5,4Aa	27,9Aa	29,6Aa
CV	8,6		23,7		14,3		8,8	
Dose 2								
	PA		Raiz		Grãos		Total Planta	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	14,4Aa	14,1Aa	8,4Aa	7,5Aa	4,6Aa	3,6Ba	27,3Aa	25,3Aa
Reduzido	11,7Ba	11,1Ba	14,6Aa	10,8Aa	5,4Aa	5,2Aa	31,6Aa	27,0Aa
CV	7,9		44,9		13,6		19,79	
Dose 3								
	PA		Raiz		Grãos		Total Planta	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	12,8Aa	12,3Aa	7,2Aa	6,7Ba	4,0Aa	3,3Aa	24,0Aa	22,2Ba
Reduzido	11,3Ba	10,5Ba	10,3Aa	13,2Aa	5,1Aa	4,6Aa	26,7Aa	28,4Aa
CV	6,0		27,5		25,8		10,4	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

Observa-se na **Tabela 15** que para parte aérea houve efeito da aplicação do resíduo da centrífuga apenas em condição de oxidação, com o resíduo lavado. As doses 1 e 2 promoveram aumento de produção de matéria seca. A maior dose não diferiu da testemunha. Para raiz, na condição de oxidação não houve efeito de doses, independente da lavagem. Entretanto, em solo reduzido, com resíduo lavado houve produção significativamente inferior na dose 1. As doses 2 e 3 não diferiram da testemunha e da menor dose. Para o resíduo não lavado foi observada redução na produção de matéria seca. As três doses foram significativamente inferiores à testemunha. A dose 2 apresentou o menor valor, com redução de 46 % em relação à testemunha. As doses 1 e 3 não diferiram entre si. A produção de matéria seca pelos grãos não apresentou efeito da aplicação do resíduo nas duas condições de umidade e de lavagem. Assim como no resíduo do secador, a condição de redução diminuiu o total produzido de matéria seca pelas plantas. Para o resíduo lavado não houve diferença significativa, apesar de haver uma produção até 29% menor com o uso das doses. Para o

resíduo não lavado, as doses foram significativamente inferiores à testemunha, e diferiram entre si, chegando a uma redução de 28% na dose 2.

Para os tratamentos com ambos os resíduos, de uma maneira geral, houve uma redução de produção de matéria seca em solo em condições reduzidas. A condição de redução favoreceu, possivelmente, o aumento da solubilidade e disponibilidade de elementos como o bário e o ferro. Diante de alagamento e da sucessão de microrganismos, ocorre a redução de compostos no solo, como o sulfato que é reduzido a sulfeto, e a consequente liberação de bário, que é um elemento potencialmente tóxico para as plantas, na solução do solo (PHILLIPS et al., 2001). Nessa condição, esses elementos podem ter interferido no crescimento das plantas de arroz, conforme será discutido mais a frente.

Tabela 15. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na produção de matéria seca em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.

Lavado								
	Oxidado				Reduzido			
	P.A	Raiz	Grãos	Total	P.A	Raiz	Grãos	Total
Test	12,2 B	8,9 A	3,4 A	24,5 BC	12,1 A	20,1 A	5,5 A	37,7 A
Dose 1	14,6 A	8,9 A	5,1 A	28,6 A	12,9 A	10,0 B	5,0 A	27,9 A
Dose 2	14,4 A	8,4 A	4,6 A	27,3 AB	11,7 A	14,6 AB	5,4 A	31,6 A
Dose 3	12,8 B	7,2 A	4,0 A	24,0 C	11,3 A	10,3 AB	5,1 A	26,7 A
CV	4,5	15,2	17,0	4,5	6,2	22,2	14,2	11,7

Não Lavado								
	Oxidado				Reduzido			
	P.A	Raiz	Grãos	Total	P.A	Raiz	Grãos	Total
Test	12,2 A	8,9 A	3,4 A	24,5 AB	12,1 A	20,1 A	5,5 A	37,7 A
Dose 1	14,3 A	8,6 A	4,7 A	27,6 A	11,4 A	12,9 B	5,4 A	29,6 B
Dose 2	14,1 A	7,5 A	3,6 A	25,3 AB	11,1 A	10,8 C	5,2 A	27,0 C
Dose 3	12,3 A	6,7 A	3,3 A	22,2 B	10,5 A	13,2 B	4,6 A	28,4 B
CV	7,9	15,9	28,7	7,5	5,9	10,9	8,6	4,0

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

4.4 Concentração dos Elementos na Planta

4.4.1 Potássio

Avaliando a disponibilidade de potássio no solo após a incubação (**Tabela 16**), não se observou efeito da lavagem do resíduo ou da umidade, para os resíduos do secador e da centrífuga.

A **Figura 13** apresenta os efeitos da aplicação do resíduo do secador, nas três doses utilizadas, na disponibilidade de potássio no solo. Em condição de oxidação, não houve diferença significativa entre a testemunha e as três doses para o resíduo lavado e não lavado. O mesmo ocorreu para o resíduo lavado, em solo reduzido. Para o não lavado a maior dose foi significativamente superior à testemunha. As doses 1 e 2 não diferiram da testemunha e da dose 3.

Tabela 16. Disponibilidade de potássio (mg kg^{-1}) em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, antes do plantio de arroz, nas diferentes doses, umidades e condições de lavagem.

Secador							
	Test	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	53,8A	57,7 Aa	92,0 Aa	53,8 Aa	59,7 Aa	59,7 Aa	66,7 Aa
Reduzido	55,8A	57,3 Aa	57,3 Aa	56,6 Aa	65,9 Aa	61,2 Aa	67,9 Aa
CV	8,6	9,8		9,7		8,7	

Centrífuga							
	Test	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	53,8A	59,3 Aa	44,9 Aa	56,2 Aa	56,6 Aa	51,5 Aa	53,8 Aa
Reduzido	55,8A	53,8 Aa	55,8 Aa	56,2 Aa	54,2 Aa	55,8 Aa	48,8 Aa
CV	8,6	16,4		12,5		9,6	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

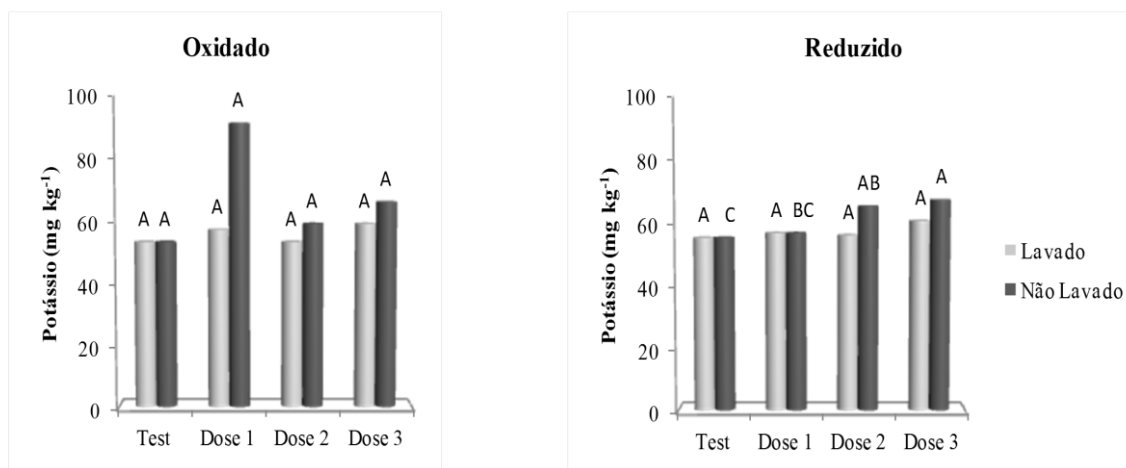


Figura 13. Efeito da aplicação do resíduo do secador na disponibilidade de potássio (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.

Para o resíduo da centrífuga não houve efeito de dose nas duas condições de umidade e de lavagem (**Figura 14**).

O pequeno incremento de K disponível em função da aplicação de ambos os resíduos foi causado, provavelmente, pela baixa extração decorrente de uma pequena solubilidade em água do potássio presente nos dois resíduos (**Tabela 11**). Conforme já discutido, o potássio, de ambos os resíduos, é aquele presente em minerais primários da rocha moída constituinte dos resíduos de perfuração. Segundo NOVAIS et al., (2007), a fração química do potássio que se encontra na forma estrutural não aparece nos resultados de análises de fertilidade dos solos, uma vez que os métodos de extração usados para esse objetivo não quantificam essa forma em razão de sua baixa disponibilidade num curto ou médio período de tempo.

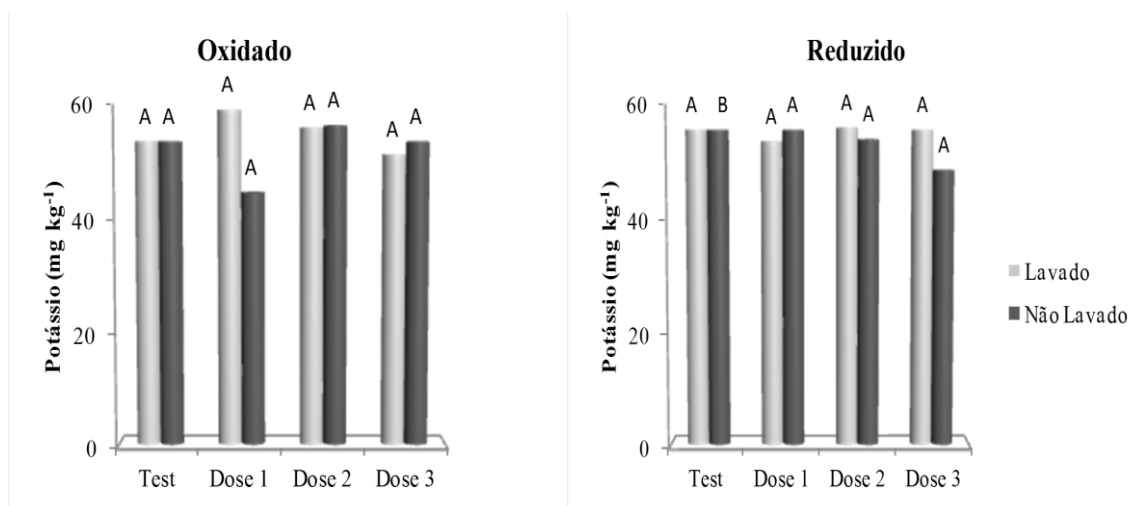


Figura 14. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na disponibilidade de potássio (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.

A **Tabela 17** apresenta a concentração de potássio nas plantas de arroz diante das diferentes condições de lavagem e de umidade para o resíduo do secador.

De maneira geral, houve pouco efeito de umidade e de lavagem na absorção de potássio pelas plantas de arroz. Houve efeito mais pronunciado da umidade apenas na maior dose, com teor significativamente superior em solo oxidado, na parte aérea com o resíduo lavado, e na raiz com o resíduo não lavado. Quanto à lavagem, os maiores efeitos foram observados em solo oxidado, com maior concentração no uso do resíduo não lavado, na parte aérea e na raiz na dose 3.

Esses resultados são reforçados na **Tabela 18**, que destaca o efeito da maior dose na concentração de potássio. Em condições de oxidação, com o resíduo lavado, há um aumento significativo na parte aérea com a aplicação da dose 3. Não houve efeito de dose na raiz e nos grãos. Com o resíduo não lavado a dose 3 incrementou significativamente a concentração de potássio na raiz e na parte aérea. Na raiz, a dose 3 foi significativamente superior à testemunha e a dose 1 foi inferior. Na parte aérea as doses 1 e 2 não diferiram estatisticamente da testemunha e da dose 3. Não houve efeito nos grãos.

Em solo reduzido, o uso do resíduo lavado na menor dose foi suficiente para aumentar a concentração de potássio na raiz e na parte aérea. Nos grãos não houve diferença significativa para a aplicação do resíduo, seja lavado ou não lavado. Para parte aérea, com resíduo não lavado a dose 3 também promoveu aumento significativo da concentração de potássio, como em solo oxidado.

Tabela 17. Concentração de potássio (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo do secador.

Testemunha						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
Oxidado	1053,1 A		140,6 A		514,2 A	
Reduzido	952,3 A		72,9 B		552,9 A	
CV	9,6		11,4		11,4	
Dose 1						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	1123,1 Aa	1127,3 Aa	136,3 Aa	85,4 Ab	509,6 Aa	471,3 Aa
Reduzido	1146,8 Aa	1123,1 Aa	125,0 Aa	105,4 Aa	459,9 Aa	552,9 Aa
CV	9,6		14,7		17,8	
Dose 2						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	1213,1 Ab	1524,8 Aa	106,7 Aa	144,6 Aa	465,8 Ba	497,5 Aa
Reduzido	1199,3 Aa	1422,3 Aa	139,6 Aa	101,7 Aa	562,9 Aa	548,33 Aa
CV	9,3		24,7		8,1	
Dose 3						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	1651,4 Aa	1681,4 Aa	99,6 Ab	190,4 Aa	466,7 Aa	510,8 Aa
Reduzido	1238,1 Ba	1474,8 Aa	118,8 Aa	82,92 Ba	542,9 Aa	537,5 Aa
CV	13,9		25,2		10,5	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

Tabela 18. Efeito da aplicação do resíduo do secador na concentração de potássio em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.

Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	140,6 A	1053,1 B	514,2 A	72,9 B	952,2 B	552,9 A
Dose 1	136,2 A	1123,1 B	509,6 A	125,0 A	1146,8 AB	459,9 A
Dose 2	106,7 A	1213,1 B	465,8 A	139,6 A	1199,3 A	562,9 A
Dose 3	99,6 A	1651,4 A	466,7 A	118,7 A	1238,1 A	542,9 A
CV	3,5	1,5	2,1	0,8	1,2	2,3

Não Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	140,6 AB	1053,1 C	514,2 A	72,9 A	952,2 C	552,9 A
Dose 1	85,4 B	1127,3 BC	471,2 A	105,4 A	1123,1 BC	552,9 A
Dose 2	144,6 AB	1524,8 AB	497,5 A	101,7 A	1422,2 AB	548,3 A
Dose 3	190,4 A	1681,4 A	510,8 A	82,9 A	1474,7 A	537,5 A
CV	4,0	1,9	2,9	7,4	1,4	1,2

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

O efeito da aplicação do resíduo da centrífuga (**Tabela 19**) foi observado nas raízes e nos grãos. No geral, não houve efeito na parte aérea. Na raiz, com o resíduo lavado e não lavado, em solo oxidado, a maior dose foi significativamente superior à dose 1. A testemunha e a dose 2 não diferiram das demais doses. Não houve efeito nos grãos, para o resíduo lavado. Para o resíduo não lavado, a maior dose foi significativamente superior às demais doses. Em solo reduzido não houve efeito nas raízes. Nos grãos houve efeito apenas com o uso do resíduo não lavado, onde a maior dose não diferiu da testemunha, mas viabilizou a maior absorção de potássio.

Tabela 19. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na concentração de potássio em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.

Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	140,6 AB	1053,1 A	514,2 A	72,9 A	952,3 A	552,9 A
Dose 1	124,4 B	1090,6 A	518,8 A	128,3 A	1129,8 A	502,1 A
Dose 2	152,9 AB	1103,1 A	447,5 A	133,7 A	1252,3 A	602,1 A
Dose 3	243,3 A	1293,1 A	443,3 A	129,6 A	1346,4 A	604,2 A
CV	4,3	1,9	1,3	5,6	2,7	2,8
Não Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	140,6 AB	1053,1 A	514,2 AB	72,9 A	952,3 A	552,9 A
Dose 1	104,2 B	1311,8 A	384,2 B	122,9 A	1139,8 A	390,4 B
Dose 2	138,7 AB	1280,6 A	365,0 B	101,2 A	1313,1 A	507,1 AB
Dose 3	237,9 A	1431,8 A	571,2 A	91,2 A	1258,9 A	529,6 A
CV	5,4	1,7	2,2	6,3	2,2	1,8

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

De um modo geral, os resultados demonstram que houve um pequeno efeito da lavagem na absorção de potássio pelas plantas de arroz (**Tabela 20**). Quanto à umidade, houve efeito nos grãos, com teor significativamente maior em solo reduzido, para o resíduo lavado nas doses 2 e 3, e para o não lavado na dose 2. Houve também nas raízes, na dose 3, com maior concentração em solo oxidado, com o resíduo não lavado.

Tabela 20. Concentração de potássio (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo da centrífuga.

Testemunha						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	1053,1 A		140,6 A		514,2 A	
Reduzido	952,3 A		72,9 B		552,9 A	
CV	9,6		11,4		11,4	
Dose 1						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	1090,6 Aa	1311,8 Aa	124,4 Aa	104,2 Aa	518,8 Aa	384,2 Aa
Reduzido	1129,8 Aa	1139,8 Aa	128,3 Aa	122,9 Aa	502,1 Aa	390,4 Aa
CV	12,6		19,6		16,2	
Dose 2						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	1103,1 Aa	1280,6 Aa	152,9 Aa	138,8 Aa	447,5 Ba	365,0 Ba
Reduzido	1252,3 Aa	1313,1 Aa	133,8 Aa	101,3 Aa	602,1 Aa	507,1 Aa
CV	11,6		34,2		13,4	
Dose 3						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	1293,1 Aa	1431,8 Aa	243,3 Aa	237,9 Aa	443,3 Bb	571,3 Aa
Reduzido	1346,4 Aa	1258,9 Aa	129,6 Aa	91,3 Ba	604,2 Aa	529,6 Aa
CV	21,1		37,6		12,3	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

Embora o potássio esteja presente em grande quantidade nos dois resíduos, houve uma baixa remoção do elemento com a lavagem, indicando que a sua solubilidade em água é reduzida. O resíduo do secador teve eficiência de apenas 1,2%, e o da centrífuga foi de 0,9% (**Tabela 11**). Essa remoção não foi suficiente para promover efeito na disponibilidade de potássio no solo (**Tabela 16**). Entretanto, pode ter sido o suficiente para aumentar a sua absorção na maior dose, principalmente na parte aérea, com o uso do resíduo do secador, que solubilizou uma quantidade um pouco maior de potássio, em comparação com o resíduo da centrífuga. Não houve efeito na parte aérea com o uso do resíduo da centrífuga, reforçando a baixa solubilidade do potássio contido no resíduo.

Provavelmente, o potássio presente nos resíduos encontra-se associado aos minerais primários na forma de potássio estrutural. O potássio estrutural somente será liberado para a solução do solo quando esses minerais são intemperizados (NOVAIS et al., 2007). Como o resíduo de perfuração de poço de petróleo é uma combinação de fluido de perfuração e rocha moída, o potássio pouco solúvel é proveniente dessa rocha, coletada em grande profundidade.

Nessa situação, distante da superfície, o intemperismo é praticamente nulo. Dessa forma, a lavagem do resíduo e a umidade do solo expressaram pouco efeito para este elemento.

4.4.2 Cálcio

A disponibilidade de cálcio no solo com o uso dos resíduos do secador e da centrífuga está apresentada na **Tabela 21**. Para o resíduo do secador não houve efeito da umidade nas doses 1 e 2. Houve apenas na maior dose, com o resíduo lavado, com disponibilidade significativamente maior em solo reduzido. Não houve efeito da lavagem do resíduo na disponibilidade de cálcio no solo.

No resíduo da centrífuga também não houve efeito da umidade na disponibilidade de cálcio no solo. Houve efeito da lavagem desse resíduo em solo oxidado com, significativamente, mais cálcio disponível na maior dose com o resíduo não lavado.

Tabela 21. Disponibilidade de cálcio (mg kg^{-1}) em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, antes do plantio de arroz, nas diferentes doses, umidades e condições de lavagem.

Secador							
Test		Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	146,8A	253,2Aa	240,0Aa	333,2Aa	320,0Aa	333,2 Ba	346,8Aa
Reduzido	160,0A	293,2Aa	240,0Aa	346,8Aa	346,8Aa	413,2Aa	400,0Aa
CV	21,3	12,7		18,8		9,3	
Centrífuga							
Test		Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	146,8A	253,2Aa	200,0Ab	293,2Aa	320,0Aa	333,2Ab	440,0Aa
Reduzido	160,0A	253,2Aa	213,2Aa	360,0Aa	333,2Aa	413,2Aa	386,8Aa
CV	21,3	12,3		15,8		14,4	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

Quanto à aplicação do resíduo do secador (**Figura 15**), em solo oxidado, para o resíduo lavado as três doses foram significativamente superiores à testemunha, mas sem diferirem entre si. Para o resíduo não lavado, as três doses também foram superiores à testemunha, mas as doses 2 e 3 foram as que disponibilizaram mais cálcio. Em solo reduzido, com o resíduo lavado e não lavado, as três doses foram significativamente superiores à testemunha, com maior fornecimento de cálcio pela dose 3 (2,5 vezes superiores à testemunha).

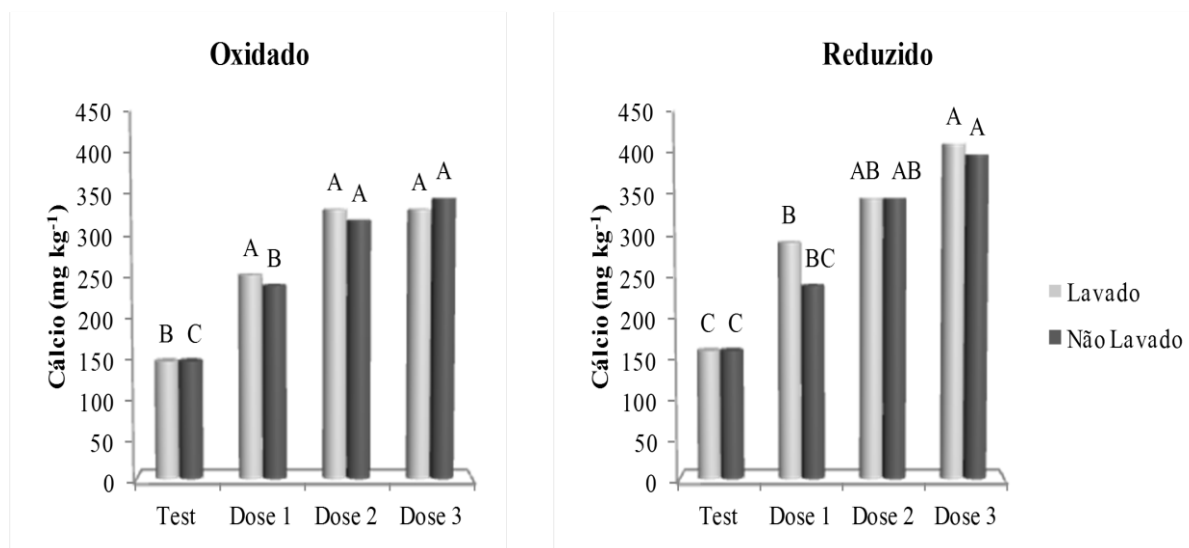


Figura 15. Efeito da aplicação do resíduo do secador na disponibilidade de cálcio (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.

Para o resíduo da centrífugaem solo oxidado (**Figura 16**), com o resíduo lavado, a menor dose não diferiu estatisticamente da testemunha e das demais doses. As doses 2 e 3 disponibilizaram significativamente mais cálcio do que a testemunha, atingindo concentrações 2,3 vezes maiores (dose 3). Para o resíduo não lavado a menor dose não diferiu da testemunha. As doses foram significativamente superiores à testemunha e diferiram entre si. A dose 3 é a que mais disponibilizou cálcio no solo, até 3,0 vezes mais que a testemunha. Em solo reduzido, com o resíduo lavado e não lavado, a maior dose foi a que mais disponibilizou cálcio em relação à testemunha (até 2,6 vezes mais).

A aplicação de ambos os resíduos favoreceu o incremento de cálcio disponível no solo. No geral, a menor dose não diferiu da testemunha. Entretanto, independente da condição de umidade e da lavagem do resíduo, a maior dose foi a que mais influenciou no aumento da disponibilidade desse elemento no solo.

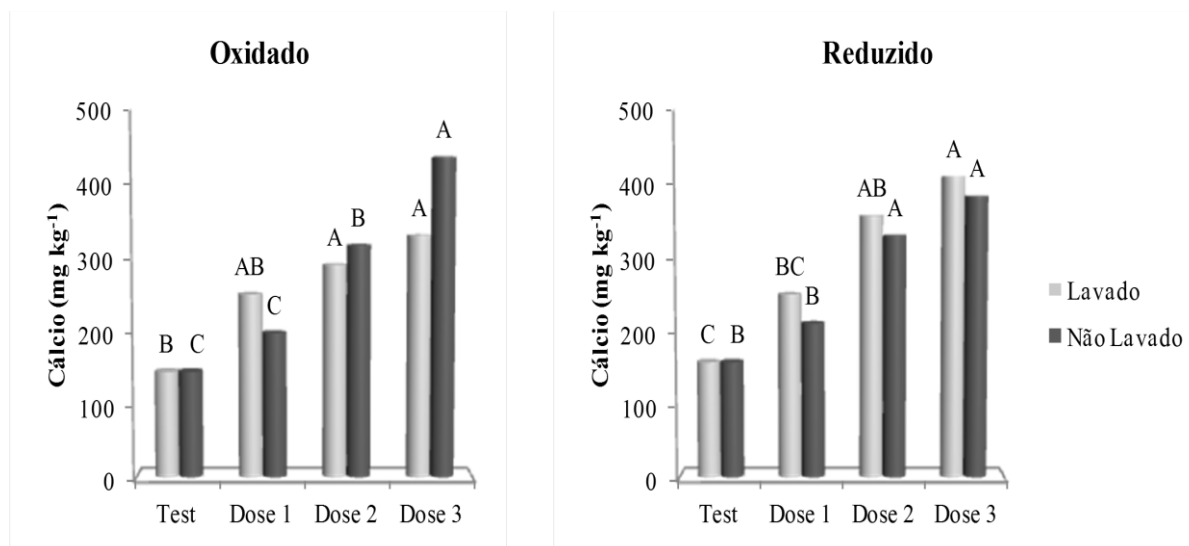


Figura 16. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na disponibilidade de cálcio (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.

A **Tabela 22** mostra o efeito da aplicação do resíduo do secador na absorção de cálcio pelas plantas de arroz.

Para a concentração na parte aérea e nos grãos não houve efeito de dose nas duas condições de lavagem do resíduo e de umidade do solo. Na raiz, com o resíduo lavado, o comportamento foi semelhante para os solos oxidado e reduzido. A testemunha foi significativamente inferior às três doses, mas não houve diferença significativa entre as três. A menor dose já foi o suficiente para aumentar a absorção de cálcio pelas raízes. Para o resíduo não lavado ocorreu situação similar ao lavado, mas com diferença entre as doses. No solo oxidado o resíduo aumentou a concentração de cálcio, mas a menor dose não diferiu estatisticamente da testemunha e da dose intermediária. Em solo reduzido as doses 1 e 2 não diferiram entre si, mas foram significativamente maiores que a testemunha. A maior dose foi significativamente superior à testemunha e às demais doses nas duas condições de umidade, com absorção 2,3 vezes maior que a testemunha em solo oxidado, e 4,0 vezes maior em solo reduzido.

Tabela 22. Efeito da aplicação do resíduo do secador na concentração de cálcio em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.

Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	997,3 B	4125,5 A	N.D	824,9 B	3241,8 A	N.D
Dose 1	1889,3 A	4465,3 A	N.D	1729,4 A	3781,4 A	N.D
Dose 2	1980,6 A	4819,4 A	N.D	2108,3 A	5239,2 A	N.D
Dose 3	2017,4 A	4314,2 A	N.D	1792,3 A	4049,4 A	N.D
CV	1,9	2,9	-	2,4	4,0	-
Não Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	997,3 C	4125,5 A	N.D	824,9 C	3241,8 A	N.D
Dose 1	1242,4 BC	4343,9 A	N.D	1761,1 B	3419,7 A	N.D
Dose 2	1570,4 B	5279,4 A	N.D	2040,1 B	2444,2 A	N.D
Dose 3	2296,6 A	4258,7 A	N.D	3080,8 A	4033,2 A	N.D
CV	2,0	2,3	-	1,9	3,4	-

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. N.D= Não detectado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

Observou-se pouco efeito de umidade (**Tabela 23**), e nesse caso sempre para o resíduo não lavado, e com maior ocorrência nas raízes, corroborando os dados da **Tabela 22**, que mostram que a aplicação do resíduo influenciou a concentração de cálcio apenas nas raízes. Dessa forma, nas doses 2 e 3 houve maior concentração de cálcio viabilizada pelo solo em condição de redução. Houve efeito da lavagem do resíduo na concentração de cálcio na raiz, nas doses 1 e 2, no solo oxidado, com concentração de cálcio significativamente maior com o uso do resíduo lavado. Na maior dose e com solo em condições redutoras, o resíduo não lavado foi significativamente maior que o lavado. Na parte aérea, apenas na dose intermediária, em solo reduzido houve concentração significativamente superior com o resíduo lavado.

As maiores concentrações de cálcio observadas com o uso do resíduo lavado podem ser reflexos da influência de outros elementos na absorção de cálcio, principalmente na raiz, onde ocorreram 75% dos casos de efeito da lavagem do resíduo. De acordo com Malavolta (1980), o teor de um elemento na planta pode ser influenciado pelo nível de outros elementos no meio de crescimento, podendo haver antagonismo ou sinergismo. De acordo com Blankenau (2007), em termos de absorção pelas plantas, o cálcio compete, de forma antagônica, com outros cátions como Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ e Fe^{2+} , ressaltando a necessidade de se manter o equilíbrio do cálcio com os outros cátions do solo para evitar o antagonismo e a competição. A lavagem do resíduo eliminou uma quantidade elevada de sódio, razoável de cálcio (6,1%), e pequena dos elementos bário, potássio, manganês e ferro (**Tabela 11**). Possivelmente, a menor competição entre os elementos pode ter favorecido à absorção de cálcio no tratamento com o resíduo lavado.

Tabela 23. Concentração de cálcio (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo do secador.

Testemunha						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
Oxidado	4125,5 A		997,3 A		N.D	
Reduzido	3241,8 A		824,9 A		N.D	
CV	22,4		14,5		-	
Dose 1						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	4465,3 Aa	4343,9 Aa	1889,3 Aa	1242,4 Ab	N.D	N.D
Reduzido	3781,4 Aa	3419,7 Aa	1729,4 Aa	1761,1 Aa	N.D	N.D
CV	25,6		17,4		-	
Dose 2						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	4819,4 Aa	5279,4 Aa	1980,6 Aa	1570,4 Bb	N.D	N.D
Reduzido	5239,2 Aa	2444,2 Bb	2108,3 Aa	2040,1 Aa	N.D	N.D
CV	19,5		11,1		-	
Dose 3						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	4314,2 Aa	4258,7 Aa	2017,4 Aa	2296,6 Ba	N.D	N.D
Reduzido	4049,4 Aa	4033,2 Aa	1792,3 Ab	3080,8 Aa	N.D	N.D
CV	31,4		13,4		-	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; N.D= Não detectado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

Para o resíduo da centrífuga (**Tabela 24**) houve efeito de dose apenas nas raízes. Com o uso do resíduo lavado, em solo reduzido, a aplicação do resíduo na menor dose foi o suficiente para aumentar significativamente a concentração de cálcio na raiz. O mesmo

ocorreu para o resíduo não lavado, em solo oxidado. Em solo reduzido, a dose intermediária foi significativamente superior à testemunha, com absorção de cálcio 2,3 vezes maior. As doses 1 e 3 não diferiram estatisticamente da testemunha e da dose 2. Assim, como no resíduo do secador, a translocação de cálcio para os grãos foi muito baixa e os teores não foram detectados.

Tabela 24. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na concentração de cálcio em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.

Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	997,3 A	4125,5 A	N.D	824,9 B	3241,8 A	N.D
Dose 1	1626,9 A	4222,4 A	N.D	1882,9 A	3610,7 A	N.D
Dose 2	1839,3 A	4098,9 A	N.D	2700,6 A	4080,4 A	N.D
Dose 3	2289,6 A	6509,9 A	N.D	1958,8 A	3488,2 A	N.D
CV	4,4	3,7	-	2,1	2,8	-
Não Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	997,3 B	4125,5 A	N.D	824,9 B	3241,8 A	N.D
Dose 1	1442,3 A	3951,4 A	N.D	1300,3 AB	3606,9 A	N.D
Dose 2	1602,8 A	3945,2 A	N.D	1908,4 A	3435,7 A	N.D
Dose 3	1869,6 A	2661,2 A	N.D	1660,6 AB	3123,9 A	N.D
CV	1,5	4,1	-	4,4	3,5	-

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. N.D= Não detectado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

A **Tabela 25** mostra que, praticamente, não houve efeito da umidade do solo e da lavagem do resíduo da centrífuga na absorção de cálcio pelas plantas.

Para os resíduos do secador e da centrífuga, os teores de cálcio na parte aérea estão abaixo dos valores de referência do elemento em análise foliar para plantas de arroz na maturidade, que, segundo alguns autores, varia de 6500 a 8500 mg kg⁻¹ (NOVAIS et al., 2007 e RIBEIRO et al., 1999). O cálcio é um nutriente de baixa mobilidade na planta, portanto, os sintomas de deficiência apareceriam, inicialmente, nas folhas mais novas, seguidas da morte das folhas terminais conforme a deficiência se acentuasse, causando severo atrofiamento das plantas (FAGERIA et al., 1995). Entretanto, as plantas não apresentaram sintomas visuais de deficiência de cálcio, possivelmente porque a carência é mais leve, caracterizando uma deficiência oculta.

O cálcio é um dos nutrientes mais exigidos pela cultura do arroz (FAGERIA et al., 1995). Grande parte deste nutriente está localizada nas folhas, sendo que as mais velhas apresentam os maiores conteúdos. Entretanto, o seu transporte é limitado, o que prejudica a redistribuição do elemento das folhas mais velhas para as mais jovens e para os grãos (BLANKENAU, 2007). Essa informação confirma os resultados deste ensaio, com altas concentrações na raiz.

Tabela 25. Concentração de cálcio (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo da centrífuga.

Testemunha						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
Oxidado	4125,5 A		997,3 A		N.D	
Reduzido	3241,8 A		824,9 A		N.D	
CV	22,4		14,5		-	
Dose 1						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	4222,4 Aa	3951,4 Aa	1626,9 Aa	1442,3 Aa	N.D	N.D
Reduzido	3610,7 Aa	3606,9 Aa	1882,9 Aa	1300,3 Aa	N.D	N.D
CV	24,28		31,9		-	
Dose 2						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	4098,9 Aa	3945,2 Aa	1839,3 Ba	1602,8 Aa	N.D	N.D
Reduzido	4080,4 Aa	3435,7Aa	2700,6 Aa	1908,4 Ab	N.D	N.D
CV	26,1		17,3		-	
Dose 3						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	6509,9Aa	2661,2 Ab	2289,6 Aa	1869,6 Aa	N.D	N.D
Reduzido	3488,2 Ba	3123,9 Aa	1958,8 Aa	1660,6 Aa	N.D	N.D
CV	29,6		15,9		-	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; N.D= Não detectado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

4.4.3 Manganês

A disponibilidade de manganês no solo, antes do plantio de arroz está apresentada na **Tabela 26**.

Para o resíduo do secador, nas doses 1 e 2 não houve diferença significativa entre as condições de umidade do solo e lavagem do resíduo. Na maior dose, em solo reduzido houve significativamente mais manganês disponível na presença do resíduo lavado, em comparação com o não lavado. Além disso, houve diferença significativa para umidade. Com o resíduo lavado o teor disponível em solo reduzido foi significativamente maior do que em condição de oxidação. Com o resíduo não lavado verificou-se padrão contrário, com maior concentração em solo oxidado.

O resíduo da centrífuga apresentou efeito da umidade nas doses 1 e 2. Para essas duas doses, havia mais manganês disponível em solo reduzido, sendo que a disponibilidade foi até 3 vezes maior do que em condições de oxidação (dose 2).

Tabela 26. Disponibilidade de manganês¹ (mg kg⁻¹) em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, antes do plantio de arroz, nas diferentes doses, umidades e condições de lavagem.

Secador							
	Test	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	48,6A	57,4Aa	60,1Aa	93,8 Aa	78,1 Aa	70,3 Ba	102,6Aa
Reduzido	79,9A	45,3Aa	84,5Aa	69,1 Aa	53,1 Aa	115,3Aa	46,2 Bb
CV	30,8	37,1		22,2		23,3	

Centrífuga							
	Test	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	48,6A	79,4Aa	33,1Bb	76,6 Aa	36,2 Ba	80,9 Aa	46,3 Aa
Reduzido	79,9A	99,7Aa	86,9Aa	114,3Aa	116,2Aa	121,9Aa	88,5 Aa
CV	30,8	26,2		25,0		28,0	

¹ Fração ácido solúvel (F1), pelo método BCR. Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

A **Figura 17** apresenta o efeito das doses dos resíduos na disponibilidade de manganês no solo que recebeu o resíduo do secador. Em condição de oxidação não houve efeito de dose para o resíduo lavado. Com o resíduo não lavado, a maior dose foi significativamente superior à testemunha, e as doses 2 e 3 não diferiram da testemunha e da dose 3. Em solo reduzido, para o resíduo lavado, a dose três aumentou, significativamente, a disponibilidade de manganês.

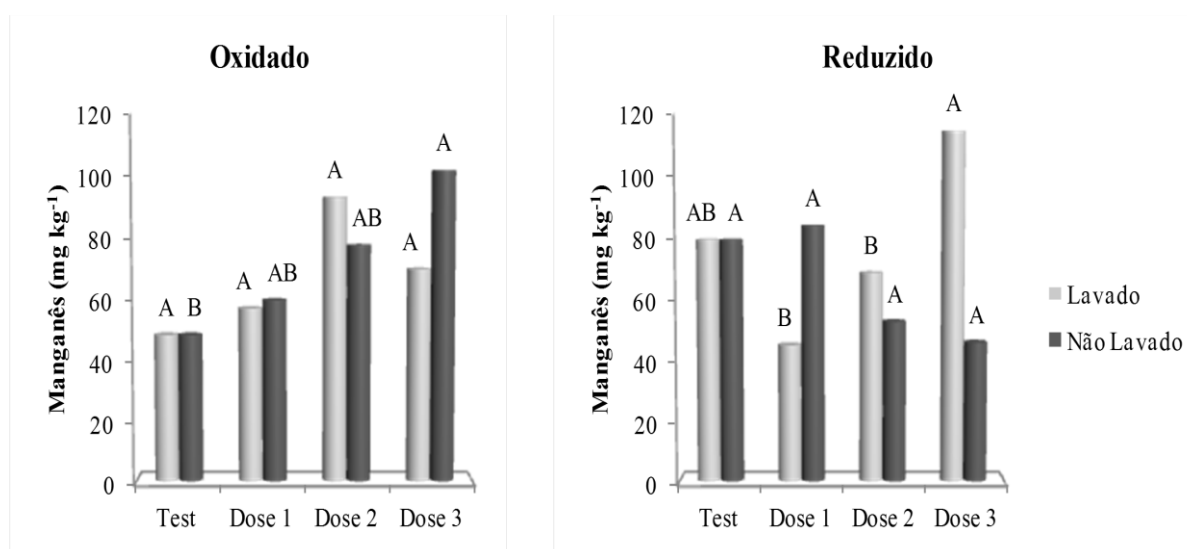


Figura 17. Efeito da aplicação do resíduo do secador na disponibilidade de manganês (mg kg⁻¹) no solo após a incubação, nas diferentes doses.

Para o resíduo da centrífuga (**Figura 18**) não houve efeito significativo de dose nas duas condições de umidade e de lavagem.

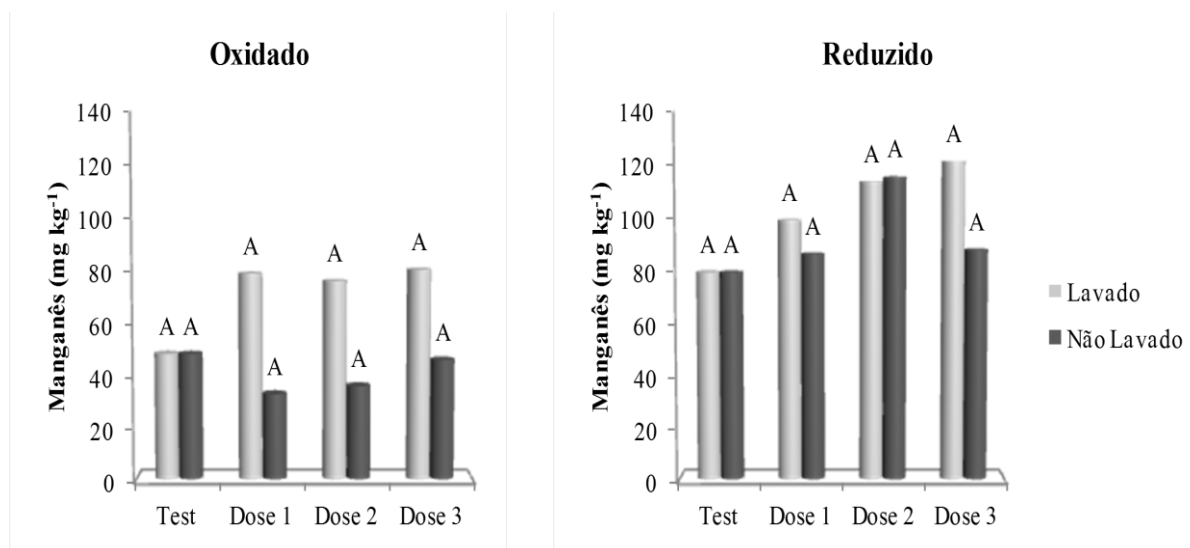


Figura 18. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na disponibilidade de manganês (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.

Ao analisar o efeito da aplicação do resíduo do secador nos teores de manganês na parte aérea (**Tabela 27**), percebe-se que não houve diferença significativa no solo em condições de oxidação, com ou sem lavagem. Entretanto, na condição de redução do solo, para o resíduo não lavado houve incremento significativo com o uso da maior dose. Em relação à testemunha houve incremento de 41% nos teores de manganês. Para o resíduo lavado não houve aumento significativo com a sua aplicação.

A aplicação do resíduo favoreceu o aumento da concentração de manganês, principalmente nas raízes. Em condição de oxidação, com o resíduo lavado, a dose 1 diminuiu a concentração de manganês, mas não diferiu da testemunha. A partir da dose 2 houve diferença estatística, com aumento de 3,4 vezes na dose 2 e 2,9 vezes na dose 3. Com o resíduo não lavado as doses 1 e 2 foram maiores, mas não diferiram significativamente da testemunha. A maior dose representou um incremento significativo, sendo 2,6 vezes maior que a testemunha. No solo reduzido o padrão foi o mesmo para resíduo lavado e não lavado. A simples aplicação do resíduo na menor dose já diferiu significativamente da testemunha, com valores maiores que o dobro, mas não houve diferença entre as três doses.

Tabela 27. Efeito da aplicação do resíduo do secador na concentração de manganês em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.

Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	53,2 B	16,2 A	8,4 A	76,3 B	7,2 A	3,9 A
Dose 1	46,2 B	21,2 A	8,6 A	172,4 A	5,7 A	5,4 A
Dose 2	180,6 A	18,3 A	10,5 A	193,3 A	7,1 A	5,0 A
Dose 3	153,3 A	25,2 A	12,0 A	178,9 A	6,6 A	4,2 A
CV	7,0	8,0	5,5	6,6	8,9	12,4
Não Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	53,2 B	16,2 A	8,4 A	76,3 B	7,2 AB	3,9 A
Dose 1	103,3 AB	17,6 A	13,3 A	164,3 A	5,2 B	4,3 A
Dose 2	107,1 AB	21,6 A	14,8 A	177,6 A	5,7 B	3,9 A
Dose 3	141,4 A	24,7 A	11,9 A	185,3 A	10,2 A	4,6 A
CV	7,7	6,2	8,0	6,1	6,7	6,9

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

Os efeitos da lavagem e da umidade nos teores de manganês na raiz, parte aérea e grãos das plantas de arroz com o uso do resíduo do secador estão apresentados na **Tabela 28**.

Naparte aérea, houve diferença significativa entre as condições de umidade e as concentrações mais elevadas de manganês foram observadas em solo oxidado, para todas as doses, com o resíduo lavado e não lavado. Para a raiz, a condição de redução favoreceu significativamente a concentração de manganês em relação à oxidação. O aumento dos teores ocorreu nas doses 1 e 2, e para o resíduo lavado e não lavado. Na dose 3 os valores também são maiores no solo reduzido, mas não houve diferença significativa. Para os grãos, a condição de oxidação favoreceu significativamente a absorção de manganês nos grãos na dose 1, com o resíduo não lavado. Para o resíduo lavado o aumento não foi significativo. Nas doses 2 e 3, essa condição de umidade permitiu uma maior absorção, nas duas condições de lavagem, apresentando valores significativamente superiores.

Quanto à lavagem do resíduo, em geral não foi observada diferença significativa entre resíduo lavado e não lavado. Exceto na menor dose, em solo oxidado, para raiz e grãos, com maiores concentrações para o resíduo não lavado.

Tabela 28.Concentração de manganês (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo do secador.

Testemunha						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
Oxidado	16,2 A		53,2 A		8,4 A	
Reduzido	7,2 B		76,3 A		3,9 B	
CV	17,3		57,1		8,5	
Dose 1						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	21,2 Aa	17,6 Aa	46,2 Bb	103,3 Ba	8,6 Ab	13,3 Aa
Reduzido	5,7 Ba	5,2 Ba	172,4 Aa	164,3 Aa	5,4 Aa	4,3 Ba
CV	33,9		11,5		26,4	
Dose 2						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	18,3 Aa	21,6 Aa	108,6 Ba	107,1 Ba	10,5 Aa	14,8 Aa
Reduzido	7,1 Ba	5,7 Ba	193,3 Aa	177,6 Aa	5,0Ba	3,9 Ba
CV	28,9		23,2		27,4	
Dose 3						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	25,2 Aa	24,7 Aa	153,3 Aa	141,4 Aa	12,0 Aa	11,9 Aa
Reduzido	6,6 Ba	10,2 Ba	178,9 Aa	185,3 Aa	4,1 Ba	4,6 Ba
CV	17,4		22,2		18,5	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

A **Tabela 29** apresenta o efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na concentração de manganês nas diferentes doses.

Usando o resíduo lavado não houve diferença significativa entre a testemunha e as doses aplicadas para parte aérea e grãos. Para as raízes, houve incremento com as doses nas duas condições de umidade. Em oxidação, as doses 1 e 2 não diferiram da testemunha, e na dose 3 a concentração de manganês foi 3,4 vezes maior do que a testemunha. Em solo reduzido as doses 1 e 2 foram significativamente superiores à testemunha, sendo que a dose 2 foi 4,3 vezes mais favorável à absorção de manganês. A maior dose não diferiu estatisticamente da testemunha.

Com o resíduo não lavado não houve efeito de dose para parte aérea, nas duas condições de umidade. Em oxidação, houve maior concentração de manganês na raiz com o uso do resíduo, sendo que as doses 1 e 2 não diferiram da testemunha e da dose 3, mas a maior dose foi significativamente superior à testemunha. Em condição de redução, as doses 1 e 2 são diferentes estatisticamente da testemunha, mas não diferem entre si. A dose 3 apresentou maior concentração de manganês, mas não difere da testemunha.

A concentração de manganês nos grãos apresentou efeito da aplicação do resíduo nas duas condições de umidade, principalmente pelo uso da dose 3, que foi significativamente superior à testemunha (2,5 vezes em solo oxidado e 1,8 vezes em solo reduzido).

Tabela 29. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na concentração de manganês em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.

Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	53,2 B	16,2 A	8,4 A	76,3 C	7,2 A	3,9 A
Dose 1	83,6 AB	24,9 A	9,7 A	159,6 AB	6,4 A	3,3 A
Dose 2	85,1 AB	17,7 A	12,7 A	325,3 A	7,7 A	5,9 A
Dose 3	180,4 A	26,2 A	13,9 A	144,1 BC	7,8 A	5,3 A
CV	8,8	9,3	9,0	5,6	7,2	13,4
Não Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	53,2 B	16,2 A	8,4 B	76,3 B	7,2 A	3,9 B
Dose 1	77,1 AB	18,6 A	10,0 B	207,6 A	5,4 A	4,5 AB
Dose 2	88,4 AB	16,4 A	14,4 AB	172,9 A	5,7 A	5,2 AB
Dose 3	138,3 A	16,4 A	20,8 A	133,9 AB	8,2 A	6,9 A
CV	8,7	9,1	8,3	6,0	12,8	9,8

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

Na **Tabela 30** verifica-se que de forma similar ao que ocorreu para o resíduo do secador, a concentração de manganês na parte aérea para a condição de oxidação foi significativamente superior em relação à condição de redução nas três doses. Entretanto, nas raízes, nas doses 1 e 2 houve diferença significativa entre redução e oxidação, nas duas condições de lavagem. A absorção foi maior no solo em condições de redução, justamente onde há maior concentração de manganês disponível. Nos grãos houve significativamente maior absorção de manganês em oxidação, nas três doses, para o resíduo lavado e não lavado.

Houve efeito da lavagem em solo reduzido, na raiz, na dose 1 com concentração significativamente maior no resíduo não lavado, e na dose 2, com maior concentração para o resíduo lavado. Em solo oxidado ocorreu efeito da lavagem na parte aérea, na dose 1, com maior teor de manganês para o resíduo lavado; também ocorreu nos grãos, na dose 3, com maior concentração para o resíduo não lavado.

Tabela 30. Concentração de manganês (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo da centrífuga.

Testemunha						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
Oxidado	16,2 A		53,2 A		8,4A	
Reduzido	7,2 B		76,3 A		3,9 B	
CV	17,3		57,1		8,5	
Dose 1						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	24,9Aa	18,6 Ab	83,6 Ba	77,1 Ba	9,7 Aa	10,0 Aa
Reduzido	6,4 Ba	5,4 Ba	159,6 Ab	207,6 Aa	3,3 Ba	4,5 Ba
CV	8,3		7,9		37,2	
Dose 2						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	17,7 Aa	16,4Aa	85,1 Ba	88,4 Ba	12,7Aa	14,4 Aa
Reduzido	7,7 Ba	5,7 Ba	325,3 Aa	172,9 Ab	5,9 Ba	5,2 Ba
CV	23,6		24,7		16,9	
Dose 3						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	26,2 Aa	16,4 Aa	180,4 Aa	138,3 Aa	13,9 Ab	20,8Aa
Reduzido	7,8 Ba	8,2 Aa	144,1 Aa	133,9 Aa	5,3 Ba	6,9 Ba
CV	49,98		25,8		30,3	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

A lavagem dos resíduos teve uma baixa eficiência para o manganês (0,0001%), e pouco influenciou na distribuição do elemento nas diferentes partes da planta. Essa informação permite inferir que o manganês contido no resíduo está associado, predominantemente, aos minerais presentes na rocha moída, de baixa solubilidade. Dessa forma, a incorporação dos resíduos não resultaria em aumento de disponibilidade. Entretanto, a dinâmica desse elemento no solo foi claramente influenciada pela umidade, refletindo em padrões semelhantes para os dois resíduos. Na condição de oxidação, ocorreu uma maior acumulação na parte aérea. Entretanto, na condição de redução houve aumento na disponibilidade de manganês no solo e acumulação nas raízes. Esse resultado é coerente com a dinâmica do manganês presente no solo e no resíduo. Esse aumento da solubilidade em solo reduzido ocorreu devido à redução de compostos presentes no solo pela ação de microrganismos em busca de novos aceptores de elétrons. Os óxidos de manganês (Mn^{+4}) são reduzidos, liberando o íon Mn^{+2} na solução, tornando-o mais disponível e absorvível pelas plantas de arroz.

Entretanto, houve uma menor concentração de manganês na parte aérea e nos grãos. Na condição de redução houve aumento de pH (**Tabela 9**), o que pode ter favorecido a

precipitação do manganês, prejudicando a sua absorção. Dessa forma, o manganês poderia ter precipitado na zona radicular, refletindo em uma menor translocação para parte aérea e grãos. Em seus estudos sobre os efeitos da adubação com manganês na cultura do arroz, Pereira et al., (2001), observaram que a mobilidade do manganês no solo é lenta, e seu aproveitamento pela planta depende da absorção pelas raízes, que, por sua vez, é governada pela disponibilidade do elemento na interface solo-raiz.

De acordo com Novais et al., (2007) e Ribeiro et al., (1999), o valor de referência para manganês na parte aérea da planta de arroz no final do seu ciclo é de 90 mg kg^{-1} . Os resultados da **Tabela 28** e da **Tabela 30** mostram que as plantas não atingiram esse teor, configurando deficiência nutricional. Entretanto, ao longo de todo o experimento, as plantas não apresentaram sintomas típicos dessa deficiência, podendo tratar-se de uma deficiência oculta, sem sintomas visíveis.

4.4.4 Sódio

Analisando a disponibilidade de sódio no solo após o período de incubação (**Tabela 31**), verifica-se que para o resíduo do secador, não houve efeito de umidade nas doses 1 e 2, mas na maior dose a concentração foi significativamente superior em solo oxidado, em comparação com o reduzido. A lavagem do resíduo influenciou significativamente a disponibilidade a partir da dose intermediária, com valores superiores para o resíduo não lavado, independente da umidade do solo.

Quanto ao resíduo da centrífuga, no geral, houve efeito da umidade, com disponibilidade significativamente maior em condição oxidada. Em relação à lavagem, houve efeito apenas nas doses 2 e 3 em solo oxidado, com significativamente mais sódio disponível com o uso do resíduo não lavado. Possivelmente, a condição de oxidação, por apresentar um menor teor de umidade, determinou uma maior aproximação do sódio às cargas negativas dos colóides do solo aumentando o teor de sódio trocável no solo.

Nos tratamentos com os dois resíduos a menor dose não expressou efeito da lavagem, pois a quantidade de resíduo aplicada foi, relativamente, pequena. Entretanto, a partir da dose 2, com o aumento da concentração de sódio, a lavagem começou a se expressar positivamente, diminuindo a disponibilidade desse elemento no solo. Esses resultados demonstram que com o tratamento do resíduo (lavagem) os efeitos prejudiciais do sódio no desenvolvimento das plantas podem ser reduzidos. O excesso de sódio promove a diminuição do potencial osmótico e o aumento do potencial hídrico, reduzindo a capacidade de absorção de água e nutrientes pelas plantas devido ao estresse hídrico (YAHYA, 1998; BETHKE E DREW, 1992).

Tabela 31.Disponibilidade de sódio (mg kg^{-1}) em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, antes do plantio de arroz, nas diferentes doses, umidades e condições de lavagem.

Secador							
	Test	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	33,6 A	42,3 Aa	54,3 Aa	42,8 Ab	66,0 Aa	41,4 Ab	83,3 Aa
Reduzido	29,0 A	31,3 Aa	43,2 Aa	32,0 Ab	57,7 Aa	32,4 Bb	73,4 Ba
CV	11,2	19,0		15,8		7,2	
Centrífuga							
	Test	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	33,6 A	36,6 Aa	33,6 Aa	32,4 Ab	43,0 Aa	30,4 Ab	40,9 Aa
Reduzido	29,0 A	24,6 Ba	22,3 Ba	27,4 Aa	28,1 Ba	26,7 Aa	23,7 Ba
CV	11,2	13,4		13,3		13,5	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

A **Figura 19** mostra que quando foi utilizado o resíduo do secador lavado, nas duas umidades, não houve diferença significativa entre a testemunha e as doses. Com o resíduo não lavado, em oxidação, a menor dose não diferiu da testemunha e da dose intermediária, e esta não diferiu da dose 3 que foi significativamente superior à testemunha e aumentou a disponibilidade do elemento em 2,5 vezes. Na condição de redução as três doses foram superiores à testemunha e diferiram entre si chegando a um aumento de 2,5 vezes na maior dose, assim como na condição de oxidação.

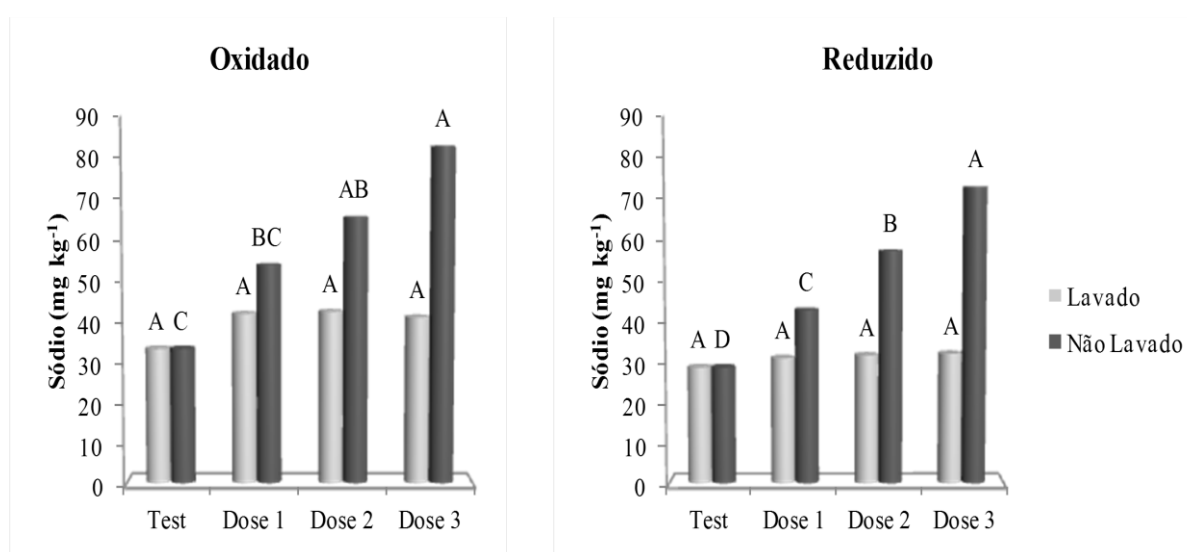


Figura 19.Efeito da aplicação do resíduo do secador na disponibilidade de sódio (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.

Para o resíduo da centrífuga não houve influenciadas doses de aplicação na disponibilidade de sódio no solo (**Figura 20**).

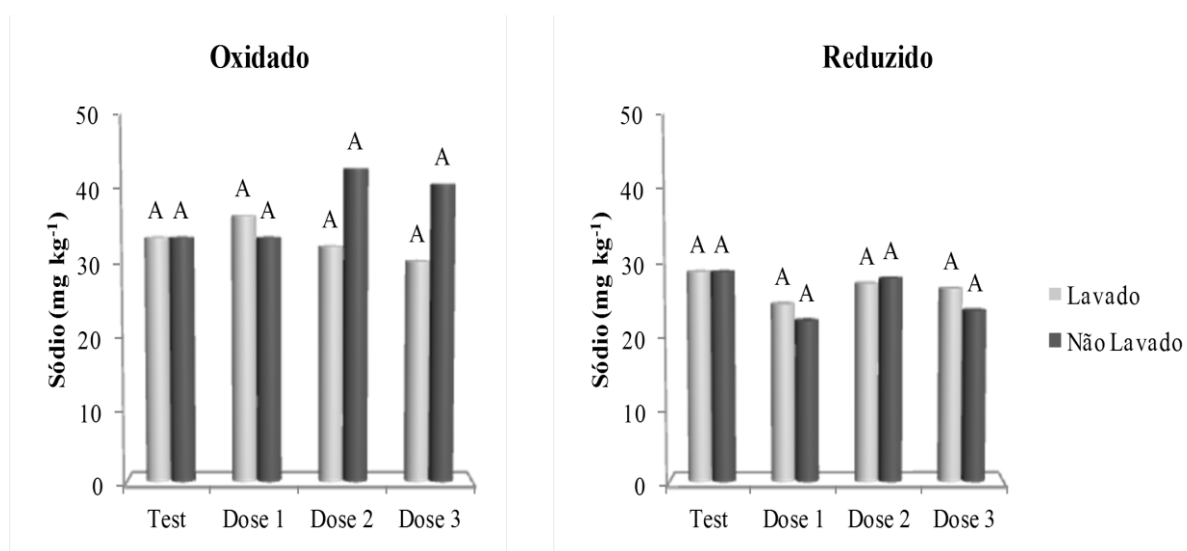


Figura 20. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na disponibilidade de sódio (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.

Os resultados do resíduo do secador apresentados na **Tabela 32** mostram que na parte aérea das plantas cultivadas em solo reduzido ocorreram maiores concentrações de sódio, mas sem efeito de dose, independente da lavagem desse resíduo. Entretanto, houve efeito em condição de oxidação. Com o uso do resíduo lavado a testemunha não diferiu das doses utilizadas, mas a menor dose apresentou uma redução de 36% na concentração de sódio na parte aérea em relação à testemunha. A dose intermediária aumentou 26%. A maior dose não diferiu da testemunha e das outras doses. Para o resíduo não lavado as doses representaram aumento da concentração de sódio, mas as doses 2 e 3 não diferiram da testemunha e da menor dose. A dose 1 foi significativamente superior à testemunha, aumentando a concentração em 2,5 vezes.

A concentração de sódio nas raízes, em condição de oxidação, não apresentou diferença significativa entre a testemunha e as doses para o resíduo lavado. No resíduo não lavado a testemunha não diferiu estatisticamente das doses. A menor dose causou uma redução de 32% em relação à testemunha, e a maior dose aumentou em 26% a concentração de sódio na raiz. Em solo reduzido, com resíduo lavado e não lavado, a menor dose já aumentou a concentração de sódio. As três doses não diferiram entre si.

Para os grãos das plantas cultivadas em solo reduzido e oxidado, e com o resíduo lavado e não lavado, não houve diferença significativa entre as doses e a testemunha. A aplicação do resíduo nessas condições não promoveu incremento na concentração de sódio nos grãos. Entretanto, em oxidação e com resíduo não lavado a testemunha não diferiu das doses. A menor dose reduziu em 20% a concentração de sódio nos grãos e a maior dose aumentou 18%, em relação à testemunha.

Tabela 32. Efeito da aplicação do resíduo do secador na concentração de sódio em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.

Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	255,6 A	119,7 AB	27,9 A	104,2 B	349,7 A	29,6 A
Dose 1	306,7 A	77,2 B	25,8 A	152,1 A	331,3 A	29,6 A
Dose 2	243,3 A	150,5 A	26,7 A	212,9 A	285,5 A	26,7 A
Dose 3	159,2 A	104,7 AB	25,4 A	146,2 AB	263,0 A	26,2 A
CV	5,3	4,4	2,2	2,9	3,7	5,2
Não Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	255,6 AB	119,7 B	27,9 AB	104,2 B	349,7 A	29,6 A
Dose 1	173,1 B	302,2 A	22,5 B	158,3 AB	400,5 A	35,8 A
Dose 2	230,4 AB	152,2 AB	29,6 AB	166,2 A	441,3 A	30,8 A
Dose 3	321,7 A	174,7 AB	32,9 A	189,4 A	339,7 A	25,8 A
CV	3,9	6,0	3,4	3,5	3,0	7,5

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente. Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

A **Tabela 33** apresenta as concentrações de sódio nas diferentes partes da planta de arroz com o uso do resíduo do secador. Na parte aérea houve efeito da umidade do solo nas três doses, com maiores concentrações de sódio em solo reduzido. Entretanto, houve diferença significativa apenas na menor dose com o resíduo lavado, na dose intermediária com resíduo não lavado, e na maior dose independente da lavagem do resíduo. Na raiz também houve efeito da umidade do solo, com concentração significativamente maior em solo oxidado na menor dose com o uso do resíduo lavado, e na maior dose com o uso do resíduo não lavado. O mesmo ocorreu nos grãos, apenas na maior dose e com o resíduo não lavado. Resultado similar foi encontrado por Magalhães (2011), que trabalhando com resíduos de perfuração de um poço localizado na Bahia, contendo altas concentrações de sódio, verificou que, para contornar essas condições adversas, as plantas desenvolveram alguns mecanismos como a retenção de sódio nas raízes.

Houve pouco efeito da lavagem do resíduo na concentração de sódio na planta. Em geral, ocorreu em solo oxidado e com concentração significativamente maior com o uso do resíduo não lavado. Esse resultado condiz com a disponibilidade de sódio no solo (**Tabela 31**), que mostra que há mais sódio disponível com o resíduo não lavado.

Tabela 33. Concentração de sódio (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo do secador.

Testemunha						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
Oxidado	119,7 B		255,6 A		27,9 A	
Reduzido	349,7 A		104,2 B		29,6 A	
CV	9,3		10,5		15,9	
Dose 1						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	77,2 Bb	302,2 Aa	306,7 Aa	173,1 Ab	25,8 Aa	22,5 Aa
Reduzido	331,3 Aa	400,5 Aa	152,1 Ba	158,3 Aa	29,6 Aa	35,8 Aa
CV	20,2		34,5		31,3	
Dose 2						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	150,5 Aa	152,2 Ba	243,3 Aa	230,4 Aa	26,7 Aa	29,6 Aa
Reduzido	285,5 Aa	441,3 Aa	212,9 Aa	166,3 Aa	26,7 Aa	30,8 Aa
CV	34,1		26,1		17,8	
Dose 3						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	104,7 Ba	174,7 Ba	159,2 Ab	321,7 Aa	25,4 Ab	32,9 Aa
Reduzido	263,0 Aa	339,7 Aa	146,3 Aa	189,4 Ba	26,3 Aa	25,8 Ba
CV	19,3		18,5		6,4	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

Em relação à absorção de sódio pelas plantas de arroz com o uso do resíduo da centrífuga, a **Tabela 34** mostra que em condição de oxidação não houve diferença significativa entre a testemunha e as doses, e entre as três doses, em parte aérea, raiz e grãos. Em solo reduzido também não houve efeito de dose nas raízes e nos grãos. Contudo, na parte aérea houve uma diminuição da absorção de sódio com a aplicação do resíduo. Com o resíduo lavado as doses 1 e 2 não diferiram da testemunha e da maior dose, que foi significativamente inferior à testemunha com uma absorção 36% menor. Para o resíduo não lavado a menor dose não diferiu da testemunha, promovendo uma absorção da mesma grandeza. A dose intermediária não diferiu das outras doses, e a dose 3 foi significativamente inferior à testemunha e à dose 1, com uma absorção de sódio 28% menor.

Tabela 34. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na concentração de sódio em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.

Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	255,6 A	119,7 A	27,9 A	104,2 A	349,7 A	29,6 A
Dose 1	169,2 A	133,0 A	29,2 A	115,8 A	271,3 AB	28,7 A
Dose 2	232,5 A	114,7 A	25,0 A	172,5 A	290,5 AB	30,0 A
Dose 3	306,7 A	109,7 A	32,1 A	169,2 A	224,7 B	37,9 A
CV	4,6	3,9	8,1	5,9	2,1	5,7
Não Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	255,6 A	119,7 A	27,9 A	104,2 A	349,7 A	29,5 A
Dose 1	233,3 A	167,2 A	22,9 A	167,1 A	367,2 A	20,8 A
Dose 2	248,7 A	127,2 A	20,8 A	135,0 A	292,2 AB	28,7 A
Dose 3	332,5 A	113,4 A	33,7 A	127,1 A	250,5 B	25,8 A
CV	3,9	4,6	5,4	5,6	1,7	6,2

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente. Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

Verificou-se efeito da umidade na concentração de sódio nas raízes, apenas na maior dose do resíduo da centrífuga (**Tabela 35**). A absorção de sódio pelas raízes foi, significativamente, superior em solo oxidado, para o resíduo lavado e não lavado, assim como no resíduo do secador. Possivelmente, causada pela maior disponibilidade observada na condição de oxidação (**Tabela 31**).

Entretanto, na parte aérea, nas três doses e independente da lavagem do resíduo, a concentração de sódio foi, significativamente, superior em solo reduzido, em comparação com o solo oxidado. Apesar de haver maior disponibilidade de sódio em solo oxidado antes do plantio (**Tabela 31**), esses resultados demonstram que a maior quantidade de água disponível nessa condição de redução favoreceu a solubilização do sódio contido no resíduo e a sua absorção. De maneira geral, a absorção na parte aérea e nas raízes não atingiu concentrações prejudiciais. Concentrações de sódio entre 200 e 3000 mg kg⁻¹ podem ocorrer naturalmente nos tecidos vegetais sem prejudicar o metabolismo da planta (RORISON, 1991; HENRY & GRIME, 1993).

De modo geral, a lavagem do resíduo teve pouca influência na absorção de sódio pelas plantas. Houve efeito apenas na menor dose. Na parte aérea, em condição de redução, houve maior concentração de sódio com o uso do resíduo não lavado.

O resíduo da centrífuga possui uma concentração de sódio 62% inferior ao resíduo do secador, disponibilizando, conseqüentemente, uma menor concentração de sódio. A sua lavagem teve 51% de eficiência, removendo menos sódio que o resíduo do secador. Portanto, o resíduo lavado ainda tinha uma concentração considerável de sódio, quase a metade, o que diminuiu a possibilidade de haver diferença entre lavado e não lavado.

A baixa resposta das plantas de arroz ao sódio de ambos os resíduos pode ter sido causada pela sua interação com outros elementos, principalmente, o potássio. Os dois elementos pertencem à família dos metais alcalinos, o que possibilita a interferência mútua, e a competição pelos sítios de absorção. Para o resíduo da centrífuga o potássio tende a

umentar na parte aérea com a aplicação do resíduo (**Tabela 19**), principalmente, na terceira dose. Em contrapartida, o sódio diminuiu.

Diversos autores relatam a interação entre sódio e potássio, mas com o efeito inverso (CRUZ et al., 2006). Em solos sob estresse salino, há uma redução da absorção de potássio devido ao aumento da competição entre sódio e potássio pelos sítios de absorção. Como consequência, o crescimento é prejudicado (MARSCHNER, 1995). Esse é um complicador adicional visto que, em algumas situações, o potássio é o principal nutriente a contribuir para o decréscimo do potencial osmótico, uma estratégia necessária à absorção de água nessas circunstâncias (JESCHKE et al., 1986; MARSCHNER, 1995).

Tabela 35. Concentração de sódio (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo da centrífuga.

Testemunha						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
Oxidado	119,7 B		255,6 A		27,92 A	
Reduzido	349,7 A		104,2 B		29,6 A	
CV	9,3		10,5		15,9	
Dose 1						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	133,0 Ba	167,2 Ba	169,2 Aa	233,3 Aa	29,2 Aa	22,92 Ab
Reduzido	271,3 Ab	367,2 Aa	115,8 Aa	167,1 Aa	28,7 Aa	20,8 Ab
CV	15,0		25,1		9,5	
Dose 2						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	114,7 Ba	127,2 Ba	232,5 Aa	248,8 Aa	25,0 Aa	20,8 Aa
Reduzido	290,5 Aa	292,2 Aa	172,5 Aa	135,0 Aa	30,0 Aa	28,8 Aa
CV	13,2		34,7		19,3	
Dose 3						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	109,7 Ba	113,4 Ba	306,7 Aa	332,5 Aa	32,1 Aa	33,8 Aa
Reduzido	224,7 Aa	250,5 Aa	169,2 Ba	127,1 Ba	37,9 Aa	25,8 Aa
CV	16,4		15,3		40,0	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

Magalhães (2011) e Machado (2012), trabalhando com arroz cultivado em solos contendo resíduos de perfuração de poço de petróleo da Bahia, relataram efeitos negativos da alta concentração de sódio, como a redução da produção de matéria seca e até a morte de plantas em alguns tratamentos. Diferente dos resíduos adotados neste estudo, nos seus trabalhos utilizaram resíduos com composições diferentes, com concentrações de sódio mais

elevadas e doses bem superiores, que resultaram em dinâmicas diferentes. Neste estudo, aparentemente, não houve prejuízo para a produção de matéria seca em função da concentração de sódio disponível.

A análise da condutividade elétrica do solo corrobora com esses resultados. A **Tabela 36** apresenta os dados de condutividade elétrica no solo com o uso dos resíduos do secador e da centrífuga. Para os dois resíduos a condutividade elétrica foi significativamente superior em solo reduzido, para todas as doses e condições de lavagem dos resíduos. De maneira geral, não houve efeito da lavagem do resíduo na condutividade elétrica do solo.

Tabela 36. Condutividade elétrica (dS m^{-1}) em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, nas diferentes doses, umidades e condições de lavagem.

Secador							
	Test	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	0,02B	0,04Ba	0,05Ba	0,06Ba	0,07Ba	0,08Ba	0,09Ba
Reduzido	0,11 A	0,14Aa	0,16Aa	0,15Ab	0,22Aa	0,16Ab	0,28Aa
CV	12,3	20,0		15,0		6,8	
Centrífuga							
	Test	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	0,02B	0,04Ba	0,04Ba	0,06Ba	0,07Ba	0,07Ba	0,06Ba
Reduzido	0,11 A	0,13Aa	0,15Aa	0,17Aa	0,18Aa	0,18Aa	0,19Aa
CV	12,3	13,2		18,3		10,7	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

Quanto ao efeito das doses de aplicação dos resíduos na condutividade elétrica (**Tabela 37**), de maneira geral, a menor dose não diferiu da testemunha. Entretanto, houve aumento significativo a partir da primeira dose, de maneira crescente até a maior dose. Mesmo com esse aumento, a condutividade elétrica alcançada não ultrapassou $0,28 \text{ dS m}^{-1}$ (resíduo do secador não lavado, em solo reduzido). Segundo Holanda et al., (2010) e Gay et al. (2010), valores de condutividade elétrica inferiores a $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ não são prejudiciais ao desenvolvimento das plantas.

Tabela 37. Efeito da aplicação dos resíduos do secador e da centrífuga na condutividade elétrica (dS m^{-1}) do solo nas diferentes doses.

Secador				
	Oxidado		Reduzido	
	Lavado	Não lavado	Lavado	Não lavado
Test	0,02 C	0,02 C	0,11 B	0,11 B
Dose 1	0,04 BC	0,05 BC	0,14 AB	0,16 B
Dose 2	0,06 B	0,07 AB	0,15 A	0,22 A
Dose 3	0,08 A	0,09 A	0,16 A	0,28 A
CV	19,1	24,8	7,9	11,4

Centrífuga				
	Oxidado		Reduzido	
	Lavado	Não lavado	Lavado	Não lavado
Test	0,02 B	0,02 B	0,11 B	0,11 B
Dose 1	0,04 AB	0,04 AB	0,13 B	0,15 AB
Dose 2	0,06 A	0,07 A	0,17 A	0,18 A
Dose 3	0,07 A	0,06 A	0,18 A	0,19 A
CV	29,4	26,3	5,9	13,2

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

4.4.5 Ferro

O efeito da umidade e da lavagem na disponibilidade de ferro no solo, após o período de incubação, está apresentado na **Tabela 38**.

Houve influência da umidade para os solos que receberam o resíduo do secador. Após o período de incubação observa-se uma disponibilidade, significativamente, maior para o solo em condições reduzidas, em comparação com o oxidado, para todas as doses e condições de lavagem. Esses resultados encontram-se dentro do esperado para essa situação de redução, onde foram observados baixos valores de potencial redox, o que favoreceria a redução do ferro e o aumento da sua solubilidade e disponibilidade (LIESACK et al., 2000). No resíduo da centrífuga também houve maior disponibilidade de ferro em solo reduzido, e mesmo nos casos onde não houve diferença significativa a disponibilidade foi maior nessas condições.

De modo geral, não houve efeito da lavagem dos resíduos na disponibilidade desse elemento no solo. A remoção de ferro pela lavagem nos dois resíduos foi pouco eficiente (**Tabela 11**). No resíduo do secador a lavagem em água removeu apenas 0,0005% e na centrífuga 0,0004%. Praticamente não havia ferro solúvel em água, e esse quadro foi refletido na absorção do elemento pela planta, principalmente na condição de redução.

Tabela 38. Disponibilidade de ferro¹ (mg kg⁻¹) em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, antes do plantio de arroz, nas diferentes doses, umidades e condições de lavagem.

Secador							
	Test	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	14,2B	7,0 Ba	5,3 Ba	25,9 Ba	25,4 Ba	32,5 Ba	21,6 Ba
Reduzido	57,1 A	54,6 Aa	67,4 Aa	54,7 Aa	63,9 Aa	49,9 Aa	55,8 Aa
CV	47,2	24,7		17,8		20,5	

Centrífuga							
	Test	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	14,2B	18,8 Ba	31,7 Aa	44,4 Aa	15,4 Bb	28,6 Aa	13,2 Ba
Reduzido	57,1 A	60,5 Aa	57,5 Aa	56,2 Aa	61,5 Aa	37,9 Aa	51,4 Aa
CV	47,2	45,4		22,4		33,3	

¹ Fração ácido solúvel (F1), pelo método BCR. Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

Analisando o resíduo do secador em condição de oxidação (**Figura 21**), com o resíduo lavado, a maior dose propiciou uma disponibilidade significativamente superior à testemunha (2,3 vezes maior). A dose 2 não diferiu estatisticamente da testemunha e da maior dose, e a dose 1 reduziu a disponibilidade de ferro no solo (50% menor que a testemunha). Com o resíduo não lavado, a dose 2 foi a que mais disponibilizou ferro em relação à testemunha (1,8 vezes mais). A maior dose não diferiu da dose 2 e da testemunha. A dose 1 foi a menor, assim como no resíduo lavado (2,7 vezes menor que a testemunha). Em solo reduzido não houve diferença significativa entre a testemunha e as doses e entre as três doses, seja com o resíduo lavado ou não lavado.

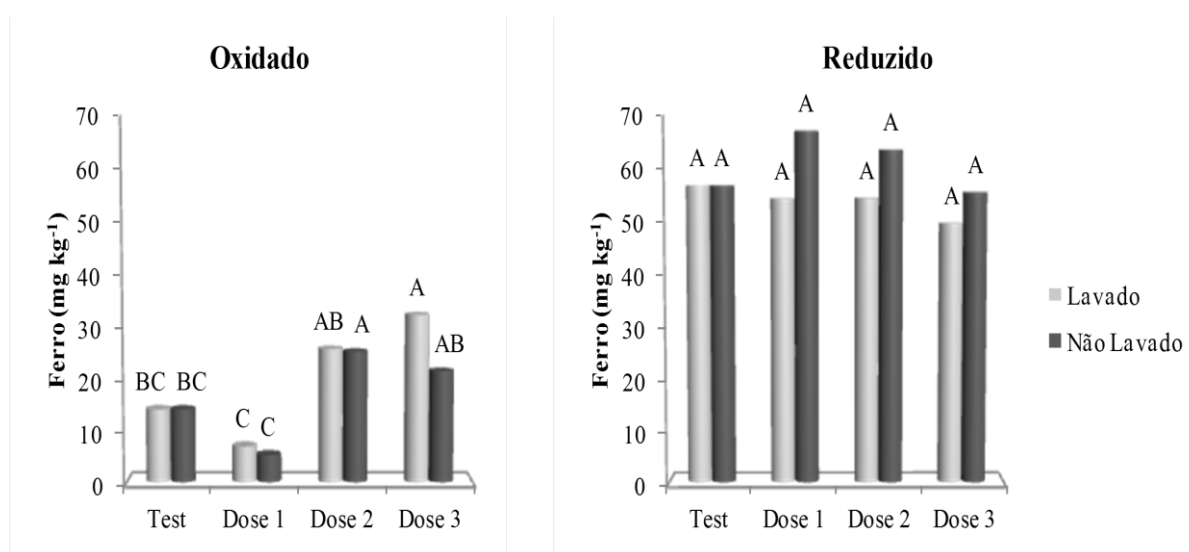


Figura 21. Efeito da aplicação do resíduo do secador na disponibilidade de ferro (mg kg⁻¹) no solo após a incubação, nas diferentes doses.

Para o resíduo da centrífuga (**Figura 22**), em solo reduzido o padrão foi similar ao resíduo do secador. Em solo oxidado, com o resíduo lavado, a menor dose não diferiu da testemunha. A dose 2 foi significativamente superior, disponibilizando três vezes mais ferro

no solo. A maior dose não diferiu da testemunha e das outras doses. Com o resíduo não lavado não houve diferença significativa entre a testemunha e as doses e entre as doses.

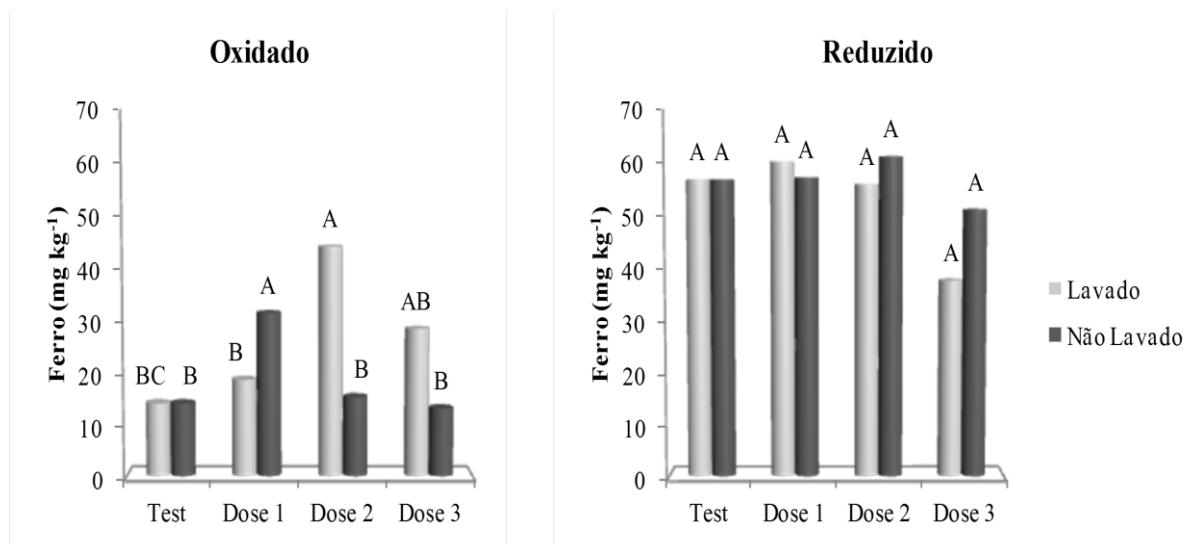


Figura 22. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na disponibilidade de ferro (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.

A **Tabela 39** demonstra o efeito das doses na absorção de ferro pelas plantas com a aplicação do resíduo do secador. Para a parte aérea não houve efeito de dose em oxidação, independente da lavagem do resíduo. Entretanto, em condição de redução e nas duas condições de lavagem do resíduo, a concentração de ferro na parte aérea da testemunha foi significativamente superior às três doses, mas não houve diferença significativa entre as mesmas. A redução chegou a 3,6 vezes com o resíduo lavado e 4,3 no não lavado.

Na raiz não houve diferença significativa entre a testemunha e as doses, e entre as três doses em solo sob redução, independente da lavagem do resíduo. O mesmo ocorreu em solo oxidado com o uso do resíduo não lavado. Para o resíduo lavado, em oxidação, a menor dose foi significativamente inferior à testemunha e diferiu das doses 2 e 3, que foram significativamente superiores à testemunha, com concentrações de ferro até duas vezes maiores.

Para grãos não houve diferença significativa entre a testemunha e as doses, e entre as doses, em solo oxidado, independente da lavagem. O mesmo ocorreu em solo reduzido com o resíduo lavado. Para o resíduo não lavado a menor dose não diferiu significativamente da testemunha e das doses 2 e 3, que foram significativamente inferiores à testemunha, chegando a reduzir em 38% a concentração de ferro (dose 3).

Tabela 39. Efeito da aplicação do resíduo do secador na concentração de ferro em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.

Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	5778,3 B	116,7 A	21,8 A	21075,8 A	446,1 A	17,3 A
Dose 1	3788,9 C	95,1 A	20,8 A	31413,1 A	171,0 B	12,3 A
Dose 2	10032,1 A	102,0 A	17,7 A	26335,1 A	132,4 B	13,9 A
Dose 3	12568,4 A	118,3 A	18,4 A	19580,0 A	123,7 B	19,1 A
CV	1,2	5,2	8,1	2,6	3,7	15,0
Não Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	5778,3 A	116,7 A	21,8 A	21075,8 A	446,1 A	17,3 A
Dose 1	3907,9 A	117,8 A	14,8 A	34251,0 A	166,8 B	12,3 AB
Dose 2	6053,1 A	114,3 A	20,0 A	29291,6 A	201,6 B	11,1 B
Dose 3	7150,1 A	120,2 A	20,3 A	28719,8 A	102,6 B	10,8 B
CV	3,0	3,8	7,8	2,4	4,8	6,0

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente. Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

No solo tratado com o resíduo do secador (**Tabela 40**), a concentração de ferro nas raízes, para as três doses, com o resíduo lavado e não lavado foi significativamente superior em solo em condições de redução, quando comparado com o solo oxidado assim como o observado por Lima (2011). O mesmo ocorreu na parte aérea, na menor dose. Nos grãos houve o efeito contrário, com a maior concentração de ferro em solo oxidado, na dose 1 para o resíduo lavado e na dose 2 para o resíduo não lavado. Nos outros casos não houve diferença significativa entre os teores de umidade no solo. No geral, não houve efeito da lavagem do resíduo.

Tabela 40. Concentração de ferro (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo do secador.

Testemunha						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
Oxidado	116,7 B		5778,3 B		21,8 A	
Reduzido	446,1 A		21075,8 A		17,3 A	
CV	12,7		49,9		25,1	
Dose 1						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	95,1 Bb	117,8 Ba	3788,9 Ba	3907,9 Ba	20,8 Aa	14,8 Aa
Reduzido	171,0 Aa	166,8 Aa	31413,1 Aa	34251,0 Aa	12,3 Ba	12,3 Aa
CV	7,7		12,45		29,2	
Dose 2						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	102,0 Aa	114,3 Aa	10032,1 Ba	6053,1 Ba	17,7 Aa	20,0 Aa
Reduzido	132,4 Aa	201,6 Aa	26335,1 Aa	29291,6 Aa	13,9 Aa	11,1 Ba
CV	35,8		18,3		23,9	
Dose 3						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	118,3 Aa	120,2 Aa	12568,4 Ba	7150,1 Bb	18,4 Aa	20,3 Aa
Reduzido	123,7 Aa	102,6 Aa	19580,0 Ab	28719,8 Aa	19,10 Aa	10,8 Aa
CV	27,4		16,7		44,9	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

Para o resíduo da centrífuga, a **Tabela 41** mostra que em solo oxidado, independente da lavagem, não houve efeito de dose para parte aérea, raiz e grãos, sem diferença significativa entre a testemunha e as doses, e entre as três doses. O mesmo ocorreu na raiz, em solo reduzido, com o resíduo lavado e não lavado.

Para parte aérea em solo reduzido, com resíduo lavado, a testemunha foi significativamente superior às três doses e não houve diferença significativa entre as três; com o resíduo não lavado a testemunha continuou sendo superior, mas houve diferença entre as doses. A menor dose reduziu a absorção de ferro quase pela metade em relação à testemunha, e a concentração na maior dose foi cerca de 3,8 vezes inferior à testemunha.

De uma maneira geral, a redução na concentração de ferro na parte aérea com a aplicação do resíduo em condição redutora, foi causada, possivelmente, por um impedimento na translocação de ferro para a parte aérea nas plantas desenvolvidas nessas condições. Esses resultados ressaltam o efeito da umidade, da condição de redução do solo na dinâmica do ferro.

Para os grãos, o resíduo lavado na menor dose promoveu significativamente a maior absorção em relação às demais doses. As doses 2 e 3 foram 2,4 e 2,8 vezes superiores à menor

dose. A testemunha não diferiu das três doses. Com o resíduo não lavado a testemunha foi significativamente superior às três doses. A dose 2 foi inferior à testemunha (2 vezes). As doses 1 e 3 não diferiram da testemunha e da dose 2.

Tabela 41. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na concentração de ferro em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.

Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	5778,3 A	116,7 A	21,8 A	21075,8 A	446,1 A	17,3 AB
Dose 1	3381,6 A	115,1 A	18,7 A	27026,6 A	198,2 B	27,7 A
Dose 2	5919,3 A	85,8 A	16,4 A	38501,6 A	170,3 B	11,7 B
Dose 3	8397,5 A	110,8 A	24,7 A	23081,5 A	149,2 B	10,0 B
CV	4,7	5,4	9,0	3,9	4,2	9,3
Não Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	5778,3 A	116,7 A	21,8 A	21075,8 A	446,1 A	17,3 A
Dose 1	7935,9 A	98,9 A	23,2 A	24382,5 A	228,9 B	12,1 AB
Dose 2	5931,1 A	91,0 A	29,9 A	27025,9 A	155,6 BC	8,8 B
Dose 3	6361,6 A	96,3 A	24,1 A	18984,8 A	118,2 C	16,0 AB
CV	4,6	4,8	12,4	3,4	4,2	8,6

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente. Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

Em relação à umidade (**Tabela 42**), na parte aérea, para o resíduo não lavado a concentração de ferro foi significativamente maior em solo reduzido, nas três doses. Para o resíduo lavado ocorreu o mesmo apenas na dose 2. Na raiz a concentração de ferro foi significativamente superior em solo reduzido, independente da lavagem do resíduo, nas doses 1 e 3. Na dose 2 ocorreu o mesmo apenas para o resíduo lavado. Nos grãos houve teores de ferro significativamente superiores no solo oxidado, na dose 2 com o resíduo não lavado, e na dose 3 com o resíduo lavado. Em geral, também não houve efeito da lavagem do resíduo.

Tabela 42. Concentração de ferro (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo da centrífuga.

Testemunha						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
Oxidado	116,7B		5778,3B		21,8 A	
Reduzido	446,1 A		21075,8A		17,3 A	
CV	12,7		49,9		25,1	
Dose 1						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	115,1Aa	98,9 Ba	3381,6 Ba	7936,0 Ba	18,7 Aa	23,2 Aa
Reduzido	198,2 Aa	228,9Aa	27026,6Aa	24382,5 Aa	27,7 Aa	12,1 Ab
CV	28,7		22,4		30,9	
Dose 2						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	85,8 Ba	91,0 Ba	5919,3 Ba	5931.1 Aa	16,4 Aa	29,9 Aa
Reduzido	170,3 Aa	155,6Aa	38501,6Aa	27026,0 Aa	11,7 Aa	8,8 Ba
CV	24,9		65,7		62,8	
Dose 3						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	110,8 Aa	96,3 Ba	8397,5 Ba	6361,6 Ba	24,7Aa	24,1 Aa
Reduzido	149,2 Aa	118,2Aa	23081,5 Aa	18984,8Aa	10,0 Ba	16,0 Aa
CV	21,9		36,9		24,9	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

Os resultados do efeito da dose de aplicação dos dois resíduos demonstram que em condição de redução as raízes tiveram uma concentração de ferro superior à da parte aérea. Ao observar os dados de parte aérea verifica-se a alta redução da concentração de ferro com o uso do resíduo, com e sem lavagem.

Como foi discutido anteriormente, essa diminuição indica que houve uma baixa translocação de ferro para parte aérea e grãos, que pode ser decorrente da interação de alguns fatores favorecidos pelas condições experimentais. Os dois resíduos têm alta concentração de ferro, mas a eficiência da lavagem foi muito baixa, devido à baixa solubilidade em água desse ferro presente na sua composição. Essa situação foi alterada durante a condução do experimento, onde no solo reduzido foram atingidos valores de potencial redox próximos a -200 mV. A anaerobiose favoreceu a sucessão de microrganismos, que reduzem compostos presentes no solo em busca de um novo aceptor final de elétrons, alterando o equilíbrio e solubilidade dos elementos. O ferro é reduzido e passa para a forma de Fe^{+2} , que tem maior solubilidade, causando uma grande acumulação desse elemento nas raízes em solo reduzido. Essa acumulação, possivelmente, ocorreu no espaço livre das raízes, podendo ter precipitado nessa região da raiz. Os resíduos de perfuração apresentam na sua composição alta quantidade

de baritina (sulfato de bário). Na faixa de potencial redox alcançada nesse ensaio (-200 mV) outras reações ocorrem no solo e os organismos reduzem outros compostos, como é o caso do sulfato de bário. O sulfato é reduzido a sulfeto, podendo esse ligante se combinar ao Fe^{+2} que estava solúvel. O composto formado (FeS) é altamente insolúvel e a planta não consegue absorver o elemento. Além disso, com a aplicação das doses dos dois resíduos, ocorreu o aumento do pH (**Tabela 10**), que irá também causar a precipitação do ferro na forma de carbonatos, também de baixa solubilidade e biodisponibilidade. Esses precipitados, possivelmente, se formaram no espaço livre das raízes, reduzindo a translocação de ferro para a parte aérea.

De acordo com Novais et al., (2007), o valor de referência para ferro em arroz, na parte aérea, é de 260 mg kg^{-1} . Somente as testemunhas se encaixam nesse valor. Para todas as doses houve uma baixa concentração de ferro na parte aérea, podendo caracterizar uma deficiência de ferro induzida pela aplicação dos resíduos e da condição redutora. Essa deficiência pode ter refletido na diminuição da produção de matéria seca em solo reduzido, observada na **Tabela 15** e na **Tabela 17**, configurando uma deficiência nutricional.

Outra possibilidade é a formação de capa férrica. As raízes de arroz possuem o tecido aerênquima, que em condição de redução transporta o oxigênio para as raízes reoxidando o ferro. Como consequência, ocorre a deposição de ferro, que precipita formando a capa férrica (ZHANG et al., 1999). Essa deposição ocorre normalmente em solo reduzido, mas também pode ocorrer em solo oxidado, dependendo da solubilidade do ferro. E, conseqüentemente, a translocação para a parte aérea é reduzida.

4.4.6 Bário

A **Tabela 43** mostra a disponibilidade do elemento bário no solo após o período de incubação.

Para o resíduo do secador, em relação à lavagem, o resíduo não lavado apresentou uma disponibilidade de bário superior ao do resíduo lavado, nas doses 2 e 3, para as duas condições de umidade do solo, e na dose 1 em solo oxidado. Em solo reduzido a disponibilidade foi maior com o uso do resíduo não lavado, mas não houve diferença significativa para o resíduo lavado. Para o resíduo da centrífuga houve o mesmo efeito, nas doses 2 e 3, em solo oxidado.

Embora a lavagem dos dois resíduos apresentasse uma baixa eficiência (0,002%), demonstrando a baixa solubilidade em água da baritina, a concentração de bário nesses resíduos é muito alta (**Tabela 10**). Possivelmente, na condição do resíduo não lavado, a maior quantidade solubilizada, em relação ao resíduo lavado, influenciou na maior disponibilidade observada, para as duas condições de umidade.

De uma maneira geral, houve efeito marcante da umidade na disponibilidade de bário em todas as doses, com valores, significativamente, maiores em solo reduzido, quando comparado com o solo oxidado.

Conforme verificado nas **Figuras 9, 10, 11 e 12**, o solo sob condição de saturação e presença de lâmina apresentou uma queda acentuada no potencial redox, estabilizando em valores próximos de -200 mV. Essa condição de anaerobiose provocou uma sucessão de microrganismos que reduzem os compostos presentes no solo em busca de um novo aceptor final de elétrons, na ausência do oxigênio, favorecendo a redução desses compostos do solo. Nesses valores de Eh, é esperada a redução do sulfato a sulfeto da baritina, que está presente no resíduo de perfuração de poços de petróleo, aumentando a solubilidade e disponibilidade do bário. Segundo Jones & Ingle Jr (2005), nesse valor de Eh já poderá ocorrer à redução do sulfato a sulfeto pelas bactérias (BRS) presentes no solo.

Em estudos realizados por Magalhães et al., (2012), Lima et al., (2012) e Magalhães et al., (2011) foi observado que baixos valores de Eh ($< -150 \text{ mV}$) favoreceram a

solubilização do sulfato de bário puro e baritina, acarretando no aumento do bário disponível e absorvido por plantas de arroz.

Tabela 43. Disponibilidade de bário¹ (mg kg⁻¹) em solo contendo os resíduos do secador e da centrífuga, antes do plantio de arroz, nas diferentes condições de umidade e de lavagem.

Secador							
	Test	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	9,0B	29,2Bb	48,2Ba	50,5 Bb	68,3Ba	60,0Bb	79,8Ba
Reduzido	13,2 ^a	65,7Aa	72,8Aa	72,3Ab	90,2Aa	89,0Ab	110,3Aa
CV	10,7	7,9		6,7		9,4	
Centrífuga							
	Test	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
		L	NL	L	NL	L	NL
Oxidado	9,0B	49,0 Ba	62,2 Aa	39,2 Bb	91,3 Aa	69,0 Bb	104,2 Aa
Reduzido	13,2A	75,7 Aa	76,0 Aa	90,2 Aa	65,8 Aa	96,3 Aa	34,3 Bb
CV	10,7	20,7		28,8		14,8	

¹ Fração ácido solúvel (F1), pelo método BCR. Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

A **Figura 23** mostra o efeito das doses na disponibilidade de bário no solo que recebeu o resíduo do secador. Para o resíduo lavado e não lavado, em solo oxidado, as três doses foram significativamente superiores à testemunha. A dose 1 aumentou 3,2 vezes a disponibilidade, e diferiu das doses 2 e 3, que foram superiores até 6,7 vezes (Dose 3), mas não diferiram entre si. No solo reduzido, com resíduo lavado a dose 1 foi estatisticamente superior à testemunha (5 vezes). A dose 2 não diferiu das doses 1 e 3, mas foi 5,5 vezes superior à testemunha. A dose 3 foi a que mais disponibilizou bário no solo, quase 7 vezes mais que a testemunha. O resíduo não lavado apresentou padrão similar em relação à testemunha, sendo que as doses 1, 2 e 3 diferiram entre si, aumentando 5,5, 6,8 e 8,4 vezes, respectivamente.

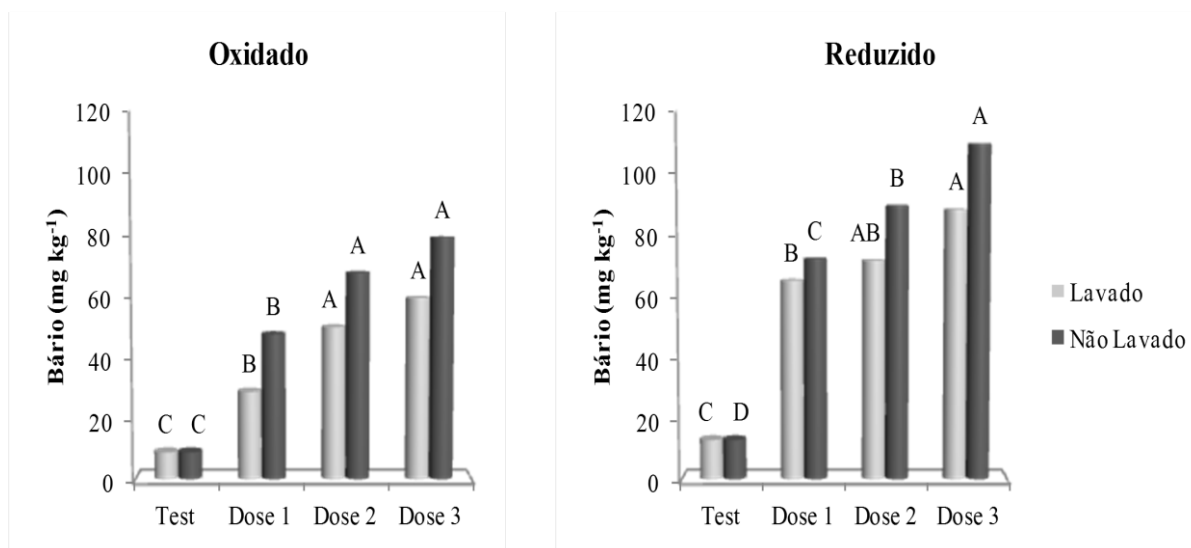


Figura 23. Efeito da aplicação do resíduo do secador na disponibilidade de báριο (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.

Resultados semelhantes foram encontrados para o solo tratado com o resíduo da centrífuga (**Figura 24**). O resíduo não lavado, em condições de oxidação, apresentou aumento a partir da dose 1, mas houve diferença estatística entre as doses 1, 2 e 3, com aumentos de 7, 10 e 11, 6 vezes, respectivamente. Na condição de redução, a dose 1 foi significativamente superior à testemunha. As doses 2 e 3 não diferiram estatisticamente da testemunha e da dose 1.

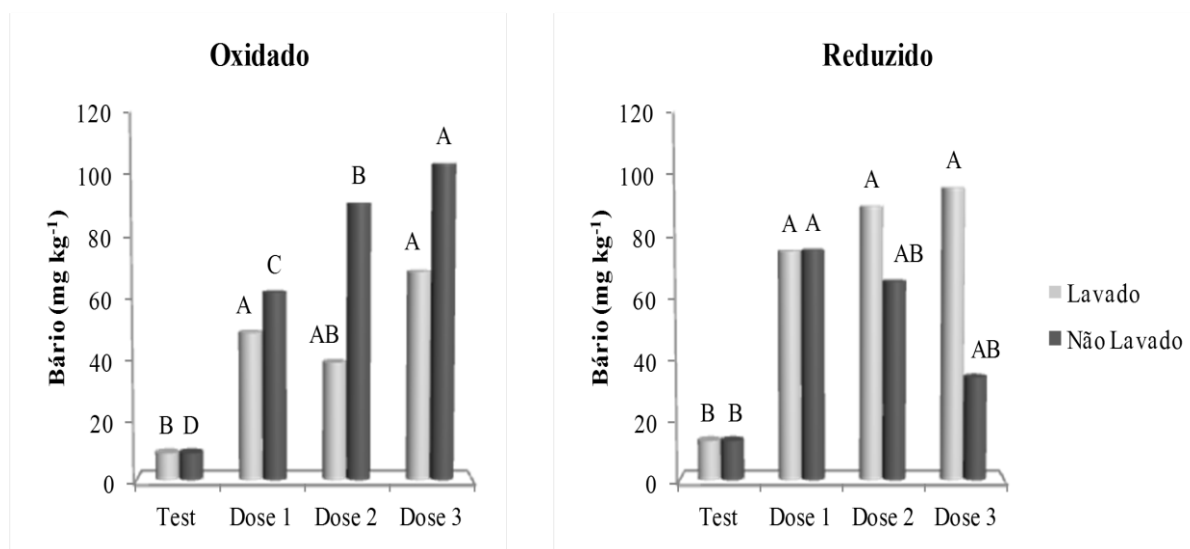


Figura 24. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na disponibilidade de báριο (mg kg^{-1}) no solo após a incubação, nas diferentes doses.

Em condições de oxidação não houve efeito de dose na concentração de báριο na raiz com o uso do resíduo lavado (**Tabela 44**). Entretanto, o resíduo não lavado, também em oxidação, promoveu o aumento da concentração de báριο nas raízes. As doses 2 e 3 foram significativamente superiores à testemunha. A dose 1 não diferiu estatisticamente da testemunha e das outras doses. Em solo reduzido, com o uso do resíduo lavado houve aumento da concentração, e as doses 2 e 3 diferiram significativamente da testemunha, com um aumento de 17 vezes na dose 3. Com o resíduo não lavado observa-se incremento a partir

da dose 1, que não diferiu da testemunha e da dose 2. A dose 2 diferiu da testemunha, mas não diferiu da dose 3, que foi a que mais influenciou no aumento da concentração de bário nas raízes em relação à testemunha, com um aumento de 23 vezes.

Na parte aérea, em condição de oxidação, o uso do resíduo a partir da dose 1 promoveu aumento significativamente superior à testemunha. Com o resíduo lavado as doses 1 e 2 foram significativamente superiores à testemunha, e a dose 3 não diferiu das menores doses e da testemunha. No resíduo não lavado, a dose 1 promoveu o maior aumento em relação à testemunha, e não diferiu da dose 2. A dose 3 também aumentou, mas não diferiu da testemunha. Em condição de redução, com ou sem lavagem, o uso da primeira dose já promoveu aumento da concentração de bário. Não houve diferença estatística entre as três doses.

Nos grãos, para o resíduo lavado, não houve efeito em oxidação, pois não houve detecção do elemento, possivelmente porque a translocação para os grãos foi baixa nessas condições. Em redução não houve diferença significativa entre as três doses, mas elas foram significativamente superiores à testemunha. Para o resíduo não lavado, em oxidação, a dose 1 não diferiu da testemunha, e as doses 2 e 3 foram superiores estatisticamente, mas sem diferirem entre si. No solo reduzido as três doses foram significativamente superiores à testemunha, com maior incremento na dose 1. As doses 2 e 3 foram inferiores à dose 1, mas não diferiram entre si.

Tabela 44. Efeito da aplicação do resíduo do secador na concentração de bário em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.

Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	24,0 A	55,9 B	N.D	17,9 B	60,8 B	0 B
Dose 1	44,6 A	83,6 A	N.D	149,3 AB	188,5 A	18,5 A
Dose 2	65,7 A	85,8 A	N.D	249,7 A	203,9 A	19,4 A
Dose 3	67,6 A	79,3 AB	N.D	305,3 A	179,3 A	13,9 A
CV	36,6	13,1	-	37,9	13,4	29,2
Não Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	24,0 B	55,9 C	0 B	17,9 C	60,8 B	0 C
Dose 1	41,3 AB	107,6 A	0,2 B	180,9 BC	168,8 A	15,3 A
Dose 2	59,1 A	104,9 AB	9,4 A	323,3 AB	159,7 A	9,8 B
Dose 3	69,3 A	79,0 BC	11,8 A	418,2 A	143,5 A	8,9 B
CV	26,5	11,9	58,8	33,3	8,8	16,8

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente. N.D= Não detectado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

A maior disponibilidade de bário em solo reduzido refletiu na maior concentração desse elemento nas diferentes partes das plantas de arroz. A **Tabela 45**, para o resíduo do secador, mostra que para raiz, grãos e parte aérea, no geral, a concentração de bário foi significativamente superior em solo reduzido, em comparação ao oxidado, assim como verificado nos trabalhos realizados por Magalhães et al., (2012), Lima et al., (2012) e Magalhães et al., (2011) com sulfato de bário puro e baritina. Esse comportamento ocorreu

nas três doses, com ou sem lavagem do resíduo, exceto nos grãos nas doses 2 e 3, com o uso do resíduo não lavado.

Tabela 45. Concentração de bário (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo do secador.

Testemunha						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
Oxidado	55,9 A		24,0 A		N.D	
Reduzido	60,8 A		17,9 A		N.D	
CV	9,3		27,2		-	
Dose 1						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	83,6Ba	107,6 Ba	44,6 Ba	41,3 Ba	N.D	0,2 Ba
Reduzido	188,5 Aa	168,8 Aa	149,3 Ab	180,9Aa	18,5 Aa	15,3Aa
CV	9,4		12,4		30,6	
Dose 2						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	85,8 Ba	104,9 Ba	65,7 Ba	59,1 Ba	N.D	9,4 Aa
Reduzido	203,9 Aa	159,7 Ab	249,7Aa	323,3 Aa	19,4 Aa	9,8 Ab
CV	14,1		33,8		39,8	
Dose 3						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	79,2 Ba	79,0 Ba	67,6 Ba	69,3 Ba	N.D	11,8 Aa
Reduzido	179,3 Aa	143,5 Ab	305,3Aa	418,2 Aa	13,9 Aa	8,9 Ab
CV	12,1		40,7		25,0	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúscula na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; N.D= Não detectado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

Para o resíduo da centrífuga em condições de oxidação (**Tabela 46**), não houve diferença significativa entre a testemunha e as doses utilizadas quanto à concentração de bário nas raízes. Entretanto, para o solo reduzido o uso do resíduo promoveu aumento expressivo na concentração de bário nessa parte das plantas de arroz. Com o resíduo lavado a dose 1 não diferiu, significativamente, da testemunha e das outras doses. As doses 2 e 3 influenciaram significativamente o aumento da concentração de bário na raiz em relação à testemunha, alcançando uma concentração de $441,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (dose 2), mas não diferiram entre si. Com o resíduo não lavado a dose 1 foi significativamente maior que a testemunha e inferior às doses 2 e 3. As doses 2 e 3 não diferiram entre si, mas foram superiores à testemunha e chegaram a $330,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (dose 2). Assim como no resíduo do secador, as maiores concentrações de bário nas plantas de arroz foram observadas nas raízes, em solo reduzido. O mesmo ocorreu nos estudos de Machado (2012), ao avaliar a absorção de bário também em arroz.

Na parte aérea houve efeito de dose para as duas condições de umidade e de lavagem, com aumento da concentração de bário com o uso do resíduo. Para o resíduo lavado a dose 1 já foi suficiente para aumentarsignificativamente a concentração em 1,6 vezes no solo oxidado,e 3,7 vezes no solo reduzido. Nos dois casos não houve diferença significativa entre as três doses. Com o uso do resíduo não lavado, em solo oxidado a dose 1 foi significativamente maior que a testemunha (1,8 vezes). As doses 2 e 3 não diferiram da testemunha e da dose 1. Em condição de redução a dose 1 foi significativamente superior à testemunha (3,3 vezes). A dose 3 foi superior à testemunha, mas foi inferior à dose 1. A dose 2 não diferiu estatisticamente das doses 1 e 3.

O resíduo também promoveu aumento da concentração de bário nos grãos. Para o resíduo lavado, em oxidação as doses 1 e 2 foram estatisticamente superiores à testemunha, e não houve diferença significativa entre elas. A dose 3 também promoveu aumento, mas não diferiu estatisticamente das doses 1 e 2 e da testemunha. Em solo reduzido a dose 2 apresentou o maior acréscimo, seguida da dose 1. A dose3 não diferiu significativamente das doses 1 e 2. Para o resíduo não lavado não houve diferença significativa entre as três doses utilizadas, nas duas condições de umidade, mas em solo reduzido o aumento da concentração de bário foi maior. Esses resultados ratificam que a maior disponibilidade de bário na condição de reduçãodeterminou a maior absorção pelas plantas, havendo maior translocação de bário para os grãos.

Tabela 46. Efeito da aplicação do resíduo da centrífuga na concentração de bário em raiz, parte aérea e grãos, nas diferentes doses.

Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	24,0 A	55,9 B	0 B	17,9 B	60,8 B	0 C
Dose 1	40,1 A	89,0 A	18,8 A	235,8 AB	225,1 A	15,0 B
Dose 2	50,9 A	110,5 A	19,8 A	441,7 A	208,0 A	24,4 A
Dose 3	59,2 A	98,9 A	12,3 AB	304,2 A	208,1 A	20,2 AB
CV	42,0	14,0	38,8	43,1	7,6	17,8
Não Lavado						
	Oxidado			Reduzido		
	Raiz	P.A	Grãos	Raiz	P.A	Grãos
Test	24,0 A	55,9 B	0 B	17,9 C	60,8 C	0 B
Dose 1	39,0 A	101,6 A	7,8 A	175,0 B	198,6 A	21,4 A
Dose 2	43,2 A	80,8 AB	6,6 A	330,7 A	190,7 AB	21,4 A
Dose 3	54,8 A	75,7 AB	9,2 A	308,5 A	159,2 B	21,6 A
CV	41,6	19,5	41,6	22,1	8,0	29,7

Médias seguidas de mesma letra (maiúsculas na coluna) não diferem significativamente. Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg⁻¹; Dose 2= 600 mg kg⁻¹; Dose 3= 900 mg kg⁻¹.

Na **Tabela 47**, observa-se o efeito da umidade e da lavagem na concentração de bário diante do uso do resíduo da centrífuga. Nas raízes e na parte aérea houve efeito da umidade, com uma concentração significativamente maior em solo reduzido, em comparação com o solo oxidado, para todas as doses, com o resíduo lavado e não lavado. Nos grãos ocorreu o mesmo efeito, mas apenas para o resíduo não lavado. Para o resíduo lavado, também houve

maior absorção em solo reduzido, mas não a ponto de haver diferença significativa entre oxidação e redução, nas três doses.

Esses resultados são coerentes com a dinâmica do bário presente no resíduo. Como foi observado no monitoramento do potencial redox desse ensaio, os valores atingidos viabilizam o aumento da solubilidade do bário, tornando-o mais acessível e prontamente absorvível pelas plantas.

Tabela 47. Concentração de bário (mg kg^{-1}) nas raízes, parte aérea e grãos das plantas de arroz, nas diferentes condições de lavagem, umidade e doses de aplicação do resíduo da centrífuga.

Testemunha						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
Oxidado	55,9 A		24,0 A		N.D	
Reduzido	60,8 A		17,9 A		N.D	
CV	9,3		27,2		-	
Dose 1						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	89,0 Ba	101,6 Ba	40,1 Ba	39,0 Ba	18,8 Aa	7,8 Bb
Reduzido	225,1 Aa	198,6 Ab	235,8 Aa	175,0 Ab	15,0 Ab	21,4Aa
CV	8,2		13,4		19,8	
Dose 2						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	110,5 Ba	80,8 Bb	50,9 Ba	43,2 Ba	19,8Aa	6,6 Bb
Reduzido	208,0 Aa	190,7Aa	441,7Aa	330,7Aa	24,4 Aa	21,4Aa
CV	10,7		49,9		22,2	
Dose 3						
	Parte Aérea		Raiz		Grãos	
	L	N.L	L	N.L	L	N.L
Oxidado	98,9 Ba	75,7 Ba	59,3 Ba	54,8 Ba	12,3 Aa	9,3 Ba
Reduzido	208,1 Aa	159,3 Ab	304,2Aa	308,5 Aa	20,3 Aa	21,6 Aa
CV	12,4		26,4		37,1	

Médias seguidas de mesma letra (minúsculas na linha e maiúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. L= Resíduo lavado; N.L= Resíduo não lavado; N.D= Não detectado; Test= Testemunha (sem aplicação de resíduo); Dose 1= 300 mg kg^{-1} ; Dose 2= 600 mg kg^{-1} ; Dose 3= 900 mg kg^{-1} .

A maior concentração de bário observada nas diferentes partes da planta na condição de resíduo lavado em relação ao resíduo não lavado, destacada pela análise estatística, pode ser decorrente de outros fatores que tenham influenciado na absorção desse elemento.

De todos os casos onde houve essa diferença entre o resíduo lavado e não lavado, para os dois resíduos, 60% ocorreram em solo reduzido, onde há maior disponibilidade do elemento. Esses dados de lavagem não mostraram tendência clara, ao contrário dos resultados de umidade, que evidenciaram o efeito da condição redutora, como já foi discutido anteriormente.

É possível que tenha ocorrido a influência de outros cátions na absorção do bário. O sódio, por exemplo, foi o elemento com maior eficiência de lavagem, para os dois resíduos. Com menor teor de sódio nas unidades experimentais que receberam o resíduo lavado pode ter ocorrido menor competição, permitindo uma maior absorção de bário. Situação semelhante pode ter ocorrido com o cálcio, que teve a segunda maior eficiência de lavagem. Em uma menor concentração desses dois elementos a absorção de bário poderia ser favorecida, explicando os casos em que as concentrações de bário foram superiores com o uso do resíduo lavado, em comparação com o não lavado.

O teste com as duas condições de umidade, fundamentado pelo monitoramento do potencial redox, mostra que há situações em que o bário, elemento tóxico, pode ser absorvido em maiores concentrações, e que pode haver prejuízo para as plantas.

Como foi observado na discussão sobre a produção de matéria seca pelas plantas de arroz, o total produzido sofreu uma redução, principalmente na maior dose, e em solo em condições de redução. Esse comportamento foi observado para os dois resíduos. É possível que o bário tenha tido papel relevante nessa redução de matéria seca. Pais & Jones Jr. (1998) observaram efeitos de toxicidade moderada para concentrações de bário acima de 200 mg kg^{-1} na parte aérea. O resíduo da centrífuga, que tem mais bário na sua composição apresentou concentrações de $225,1 \text{ mg kg}^{-1}$ na parte aérea, em solo reduzido. No resíduo do secador a concentração atingiu $203,9 \text{ mg kg}^{-1}$. Estudos indicam que o bário seja tóxico às plantas somente na ausência de quantidades suficientes de cálcio (ROBINSON E WHETSTONE, 1950, citado por CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT, 1999). Como foi observado anteriormente na discussão sobre cálcio, as concentrações do elemento na parte aérea estão abaixo do valor de referência estabelecido para a cultura do arroz. Dessa forma, foi possível uma maior absorção de bário, que expressou toxicidade nas plantas, ainda que moderada.

5. CONCLUSÕES

O monitoramento do Eh mostrou que foram atingidos os valores necessários (-150 a -200) para a redução de sulfato a sulfeto, com liberação do bário na solução do solo.

A aplicação dos resíduos de perfuração promoveu aumento de pH no solo, principalmente na condição de redução, o que influenciou a disponibilidade de alguns elementos.

Em condições redutoras houve deficiência de ferro e toxicidade moderada nas plantas causada pelo aumento da solubilidade do bário, resultando em uma diminuição na produção de matéria seca.

O tratamento de lavagem teve alta eficiência para o elemento sódio, baixa para cálcio, e foi pouco expressiva para potássio, bário, manganês e ferro.

O sódio presente nos resíduos, nas doses adotadas, não ocorre em concentrações prejudiciais às plantas.

O tratamento de lavagem não proporcionou diferenças relevantes entre o resíduo lavado e o não lavado. Portanto, a lavagem não influenciou o desenvolvimento das plantas de arroz nas condições adotadas neste experimento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 5º Relatório Técnico. Caracterização e disposição de cascalho de perfuração (RCPP). 2012.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-10004: Classificação de resíduos. Rio de Janeiro, 2004. 71p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005: Lixiviação de resíduos. Rio de Janeiro, 2004. 16p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006: Solubilidade de resíduos. Rio de Janeiro, 2004. 3p.
- ACCIOLY, A. M. A.; FURTINI NETO, A. E.; MUNIZ, J. A. Pó de forno elétrico de siderurgia como fonte de micronutrientes e de contaminantes para plantas de milho. *Pesq. agropec. bras.*. 2000, vol. 35, no. 7, pp. 1483-1491.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. A qualidade da água na agricultura. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 29).
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. A qualidade da água na agricultura. 2ª ed. Campina Grande: UFPB, 1999, 153p. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 29, revisado 1.
- BARROS, M. de F. C.; FONTES, M. P. F.; ALVAREZ, V. H.; RUIZ, H. A. Recuperação de solos afetados por sais pela aplicação de gesso de jazida e calcário no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.8, n.1, p.59-64, 2004.
- BETHKE, P.C.; DREW, M.C. Stomatal and non-stomatal components to inhibition of photosynthesis in leaves of *Capsicum annuum* during progressive exposure to NaCl salinity. *Plant Physiology*, Rockville, v.99, n.1, p.219–226, 1992.
- BETTIOL, W.; CAMARGO O. A. (Ed.). Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 311p.
- BETTIOL, W.; CAMARGO O. A. (Ed.). Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 347p.
- BLANKENAU, K. In: Simpósio sobre informações recentes para otimização da produção agrícola. IPNI. Informações Agronômicas, número 117. Piracicaba, SP. 2007.
- BURKE, C.J; VEIL, J.A. Synthetic drilling muds: Environmental gain deserves regulatory confirmation. In: SPE/EPA EXPLORATION & PRODUCTION ENVIRONMENTAL CONFERENCE. Huston. SPE29737, p.457-468. 1995.
- CACHORRO, P.; OTIZ, A.; CERDÁ, A. Implications of calcium nutrition on the response of *Phaseolus vulgaris* L. to salinity. *Plant and Soil*, Dordrecht, v.159, n.2, p.205-212, Jan. 1994.
- CAENN, R., DARLEY, H.C.H., GRAY, G.R. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. 6th ed. Elsevier: Oxford, 2011, 701 p.
- CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT. 1999. Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Barium (1999). In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.
- CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Relatório Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo:

- CETESB; 2006. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/Tabela_valores_2005.pdf>.
- CODEVASF. Salinização do Solo. 2010. Disponível em: http://www.codevasf.gov.br/programas_acoes/irrigacao/salinizacao-do-solo. Acesso em 15 de janeiro de 2013.
- CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA n. 420, de 28 de dezembro de 2009. Brasília, 2009. 16 p.
- CRUZ, L. J. PELACANI, C. R.; COELHO, CALDAS, R. C.; ALMEIDA, A. Q.; QUEIROZ, J. R. Influência da salinidade sobre o crescimento, absorção e distribuição de sódio, cloro e macronutrientes em plântulas de maracujazeiro-amarelo *Bragantia*, Campinas, v.65, n.2, p.275-284, 2006.
- DIAS, N. S.; GHEYI, H. R.; DUARTE, S. N. Prevenção, manejo e recuperação dos solos afetados por sais. Piracicaba: ESALQ/USP, 2003. 118p. Série Didática 13.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solos. 2ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 1997, 214p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 2006, 306p.
- FAGERIA, N.K.; FERREIRA, E.; PRABHU, A.S.; BARBOSA FILHO, M.P.; FILIPPI, M.C. Seja doutor do seu arroz. Piracicaba: POTAFOS, 1995. 20p. Arquivo do Agrônomo, 9.
- FREIRE, M. B. G. S. & FREIRE, F. J. Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. Fertilidade do Solo. SBCS. 1017p. Viçosa, MG. 2007.
- GARCIA, R. L. P.; VAQUEIRO, R. L. C. Viabilidade da aplicação das tecnologias landtreatment, dilution burial e roadspreading para disposição/remediação de cascalho de perfuração na UN-BA. Rio de Janeiro: Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello, 2001. Comunicação técnica CT BIO 88/2001.
- GAY, F., MARAVAL, I., ROQUES, S., GUNATA, Z., BOULANGER, R., AUDEBERT, A., MESTRES, C. Effect of salinity on yield and 2-acetyl-1-pyrroline content in the grains of three fragrant rice cultivars (*Oryza sativa* L.) in Camargue (France). *Field Crops Research*. 117, 154–160. 2010.
- GHEYI, Hans Raj. DIAS, Nildo da Silva. LACERDA, Claudivan Feitosa de. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. INCT Sal – Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade. Fortaleza, CE. 2010. 472 p. il.
- GUEDES, J. N. Comparação de estratégias utilizadas na remediação de resíduos de perfuração de poços de petróleo e solos por metais pesados (pesquisa em desenvolvimento). 2011.
- GUPTA, R. K. & ABROL, I. P. Salt affected soils: their reclamation and management for crop production. *Adv. Soil Sci.*, 11:224-288, 1990.
- HENRY, G. A. F. & GRIME, J. P. *Methods in Comparative in Plant Ecology*. A Laboratory Manual. Chapman & Hall, London, 1993.
- HOLANDA, J. S. de; AMORIM, J. R. A. de; FERREIRA NETO, M.; HOLANDA, A. C. Qualidade da água para irrigação. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. da S.; LACERDA, C. F. de Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCTSal/CNPq, p. 41-60, cap. 4, 2010.

ISO 11466 International Standard: Soil quality – Extraction of trace elements soluble in aqua regia, 03–01, 1995.

JESCHKE, W.D., ASLAM, Z., GREENWAY, H. Effects of NaCl on ion relations and carbohydrate status of roots and on osmotic regulation of roots and shoots of *Atriplex amnicola*. *Plant Cell and Environment*, Oxford, v.9, n.7, p.559–569, 1986.

JONES, B.D., INGLE JR, J.D. Evaluation of redox indicators for determining sulfate-reducing and dechlorinating conditions. *Water Research*. 39, 4343–4354. 2005.

LACERDA, C.F. Crescimento e acúmulo de solutos orgânicos e inorgânicos em dois genótipos de sorgo forrageiros submetidos a estresse salino. 2000. 163 f. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

LIESACK, W.; SCHNELL, S.; REVSBECH, N.P. Microbiology of flooded rice paddies. *FEMS Microbiology Reviews*, v. 24, p. 625- 645. 2000.

LIMA, Heitor R. P. Fundamentos de Perfuração. Apostila do curso de formação de engenheiros de petróleo da Petrobras, Centro de Desenvolvimento de Recursos Humanos Norte-Nordeste, Salvador: 2001, cap. I, II e 9, p. 1-14 e 159-166.

LIMA, E. S. A. Dinâmica do bário em solos que receberam baritina. 2011. 44f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

LIMA, E.N.; MELLO, J.W.V.; SCHAEFER,C.E.G.R.; KER, J.C. Dinâmica da mobilização de elementos em solos da Amazônia submetidos á inundação. *Acta Amazônica*, v. 35, p. 317 – 330. 2005.

LIMA, E.S.A., AMARAL SOBRINHO, N.M.B., MAGALHÃES, M.O.L., GUEDES, J.N., ZONTA, E. 2012. Absorção de bário por plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) e mobilidade em solo tratado com baritina sob diferentes condições de potencial redox. *Quim. Nova*. 35, 1746-1751.

LINS, F. A. F. & LUZ, A. B. Fluidos de perfuração. CETEM. Comunicação técnica, 2003. 26p.

LOVON CANCHUMANI, R. M. Aspectos sobre avaliação ambiental das atividades de exploração e produção (E&P) de petróleo marítimo na Bacia de Campos. 2008 in: Congresso Nacional de Excelência em Gestão.

MACHADO, H. M. Efeitos da aplicação de resíduos da perfuração e recuperação de fluídos de poço de petróleo no solo, no desenvolvimento de plantas de arroz e no comportamento de *Eisenia fetida*. 2012. 135f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

MAGALHÃES, M. O. L.. Dinâmica do bário em solos contaminados por resíduos oriundos da perfuração de poços de petróleo. 2011. 161f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

MAGALHÃES, M. O. L.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; ZONTA, E.; LIMA, L. S.; PAIVA, F. S. D. Mobilidade de Bário em Solo Tratado com Sulfato de Bário Sob Condição de Oxidação e Redução. *Química Nova*, v. 34, p. 1544-1549. 2011.

- MAGALHÃES, M.O.L., AMARAL SOBRINHO, N.M.B., ZONTA, E. CARVALHO, M.M., TÓLON-BECERRA, A. 2012. Effect of variations in the redox potential of Gleysol on barium mobility and absorption in rice plants. *Chemosphere*. 89, 121–127.
- MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1980. 251p
- MANSOUR, M.M.F.; SALAMA, K.H.A.; Al-MUTANA, M.M. Transport protein and salt tolerance in plants. *Plant Science*, Limerik, v.146, n.6, p.891-900, 2003.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2.ed. San Diego: Academic Press, 1995. 889p.
- MELTON, H.R.; SMITH, J.P.; MARTIN, C.R.; NEDWED, T.J.; MAIRS, H.L., RAUGHT, D.L. Offshore discharge of drilling fluids and cuttings - a scientific perspective on public policy. Rio oil and gas expo and conference. *Boletim do Instituto Brasileiro do Petróleo*; 2000. IBP 44900, p. 1–13.
- MEURER, E.J. Fundamentos de Química do Solo. 4 ed. 266p. Ed. Evangraf LTDA. Porto Alegre, 2010.
- MILLER, R.W.; PESARAN, P. Effects of drilling fluids on soil and plants: II Complete drilling fluid mixtures. *J. Environ. Quality*, 9: 552-556. 1980.
- MOTA, F. O. B.; OLIVEIRA, J. B. Mineralogia de solos com excesso de sódio no estado do Ceará. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, n. 4, p. 799-806, 1999.
- NAIDU, R.; SUMNER, M. E. & RENGASAMY, P., eds. Australian Sodic Soils – Distribution, properties and management. Melbourne, CSIRO, 1995. 351P.
- NIU, X.; BRESSAN, R.A.; HASEGAWA, P.M.; PARDO, J.M. Ion homeostasis in NaCl stress environment. *Plant Physiology*, Rockville, v.109, n.3, p.735-742, 1995.
- NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. Fertilidade do Solo. SBCS. 1017p. Viçosa, MG. 2007.
- ODU, C.T.I. & CHUKWURAH, C. Preliminary investigation into the effects of drilling mud additives chrome lignosulphonate (Spersene) and chrome-lignite (XP-20) on symbiotic nitrogen fixation. Department of Agronomy, 1983. pp. 255–257.
- PAIS, I. & JONES JR., J.B. The handbook of trace elements. Boca Raton: St. Lucie Press, 1998. 223p.
- PEREIRA, G. D.; BERTONI, J. C.; CARVALHO, J. G.; MORAIS, A. R. Doses e modos de adubação com manganês e seus efeitos na produção da cultura do arroz. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 25, núm. 3, 2001, pp. 625-633. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, Brasil.
- PHILLIPS, E.J.P; LANDA, E.R; KRAEMER, T; ZIELINSKI, R. Sulfate-reducing bacteria release barium and radium from naturally occurring radioactive material in oil-field barite. *Geomicrobiol. J.*, v. 18, p. 167-182. 2001.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.*, v. 24, p. 29-96. 1972.
- POSTGATE, J.R. The sulphate-reducing bacteria. 2 ed. 208p. 1984.
- POZEBON, D.; LIMA, E.C.; MAIA, S.M.; FACHEL, J.M.G. (2005) Heavy metals contribution of non-aqueous fluids used in offshore oil drilling. *Fuel* 84: 53-61.

- PRADO, R.M. & NATALE, W. Development and nutritional status of passion fruit cuttings in response to application of textile sludge. *Pesq. agropec. bras.* 2005, v. 40, n. 6, p. 621-626.
- RENGEL, Z. Role of calcium in salt toxicity. *Plant Cell and Environment*, Oxford, v.15, n.6, p.625-632, 1992.
- RHOADES, J. D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A. M. Uso de águas salinas para produção agrícola. Campina Grande: UFPB, 2000. 117 p. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 48.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T.; ALVAREZ, V. H. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.
- RIBEIRO, M. R.; FREIRE, F. J.; MONTENEGRO, A. A. A. Solos halomórficos no Brasil: ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ V., V. H. (eds) Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p.165-208, 2003.
- RIBEIRO, M. R. Origem e classificação dos solos afetados por sais. In: GHEYI, R.H.; DIAS, N.S.; LACERDA, C.F. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCT Sal, 2010. 472p.
- RICHARDS, L. A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington, US Department of Agriculture, 1954. 160 p. (USDA Agricultural Handbook, 60).
- RORISON, I. H. Ecophysiological aspects of nutrition. In: *Plant Growth: Interactions with nutrition and environment* (Eds J.R. Porter and D. W. Lawlor), SEB. Seminar Series 43, Cambridge University Press, pp. 157 – 176. 1991.
- SAHUQUILLO, A., LÓPEZ-SÁNCHEZ, J.F., RUBIO, R., RAURET, G., THOMAS, R. P., DAVIDSON, C. M., URE, A. Use of certified reference material for extractable trace metals to assess sources of uncertainty in the BCR three-stage sequential extraction procedure. *Analytica Chemical Acta.* 382, 317-327. 1999.
- SHANNON, M.C.; GRIEVE, C.M. Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae*, Amsterdam, v.78, n.1-4, p.5-38, 1998.
- SHU-ZHENG, P. Oxigen. In: TIAN-YEN, Y., *Physical chemistry of paddy soils*. Berlin: Springer-Verlag, 1985. p.47-68.
- SILVA, L. S.; SOUSA, R.O.; POCOJESKI, E. Dinâmica da matéria orgânica em ambientes alagados. In: SANTOS, Gabriel de A.; SILVA, Leandro S. da; CANELLAS, Luciano P.; CAMARGO, Flávio A. O. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2. ed. Porto Alegre: Ed. metrópole, 2008. p. 526 – 543.
- SOUSA, R.O. Oxirredução em solos alagados afetada por resíduos vegetais. 2001. 164f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2001.
- SOUZA, P.J.B, LIMA, V.L., Avaliação das técnicas de disposição de rejeitos da perfuração terrestre de poços de petróleo, Monografia de Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria, UFBA, 2002.
- TAN, K. H. Soil reactions. In: TAN, K. H., ed. *Principles of soil chemistry*. New York, Marcel Dekker, 1993. 362p.
- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C. A.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, nº 5).

THOMAS, J.E., Fundamentos da Engenharia do Petróleo, 1ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2001.

TIAN-YEN, Y. Soil and plants. In: TIAN-YEN, Y. Physical chemistry of paddy soils. Berlin, 1985, p. 197-214.

TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J.B.; ALÉM SOBRINHO, P.A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.; MELO, W.J.; MARQUES, M.O. Biossólidos na agricultura. São Paulo: SABESP, 2001. 468p.

VÉRAS, A. M. Barita. Balanço Mineral Brasileiro, 2001, 20p. Disponível em <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/barita.pdf>> acessado em Março de 2012.

YAHYA, A. Salinity effects on growth and on uptake and distribution of sodium and some essential mineral nutrients in sesame. Journal of Plant Nutrition, New York, v.21, n.7, p. 1439-1451, 1998.

ZHANG, X.; ZHANG, F.; MAO, D. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa* L.): Phosphorus uptake. Plant Soil, v.209, p.187-192, 1999.

ZONTA, E.; LIMA, E.; BALIEIRO, F.; CEDDIA, M.B.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; FREITAS, F.C.; VILLELA, A.L.O. Avaliação de sítios de disposição, no solo, de Resíduos da Exploração & Produção, Relatório Parcial. PETROBRAS-PDP/TEP nº 005, 2005.

7. ANEXOS

Anexo 1. Amostras coletadas nos equipamentos Secador e Mud Cleaner, no poço 7-SMC-50D-AL e formação das amostras compostas.

Id	Fase	Prof. (m)	Informações Geológicas	Informações do Fluido	Densidade (lb. gal ⁻¹)	Composta por Equipamento		Observações
			Formação	Tipo		Secador	Mud Cleaner	
1	I	0 – 72	Barreira/ Coqueiro Seco	Convencional	9,1			
2	I	72 – 144	Coqueiro Seco	Convencional	9,4			
3	I	144 – 216	Coqueiro Seco	Convencional	9,4	1S	1M	
4	I	216 – 255	Coqueiro Seco	Convencional	8,6			
5	II	255 – 327	Coqueiro Seco	Conv. c/Filtrado Controlado	9,2			
6	II	327 – 399	Coqueiro Seco	Conv. c/Filtrado Controlado	9,4			
7	II	399 – 471	Coqueiro Seco	Conv. c/Filtrado Controlado	9,4	2S	2M	Morro do Chaves (CaCO ₃)
8	II	471 – 543	Coqueiro Seco/Penedo	Conv. c/Filtrado Controlado	8,6			
9	II	543 – 615	Penedo	Conv. c/Filtrado Controlado	9,1			
10	II	615 – 687	Penedo	Conv. c/Filtrado Controlado	8,8			
11	II	687 – 759	Penedo	Conv. c/Filtrado Controlado	8,9			
12	II	759 – 831	Penedo	Conv. c/Filtrado Controlado	9,4	3S	3M	
13	II	831 – 903	Penedo	Conv. c/Filtrado Controlado	9,3			
14	II	903 – 943	Penedo	Conv. c/Filtrado Controlado	8,6			
15	III	943 – 1015	Penedo/Barra de Itiúba	N-Parafina	9,3			
16	III	1015 – 1087	Barra de Itiúba	N-Parafina	9,3			A partir dessa profundidade o equipamento Mud Cleaner não funcionou
17	III	1087 – 1159	Barra de Itiúba	N-Parafina	9,4	4S		
18	III	1159 – 1231	Barra de Itiúba	N-Parafina	9,4			
19	III	1231 – 1303	Barra de Itiúba	N-Parafina	9,5			
20	III	1303 – 1375	Barra de Itiúba	N-Parafina	9,5			Óleo Bit 7A (1340-1352)
21	III	1375 – 1447	Barra de Itiúba	N-Parafina	9,3	5S		Óleo Bit 8A (1380-1405)
22	III	1447 – 1519	Barra de Itiúba	N-Parafina	9,3			
23	III	1519 – 1591	Barra de Itiúba	N-Parafina	9,4			
24	III	1591 – 1663	Barra de Itiúba	N-Parafina	9,3	6S		
25	III	1663 – 1700	Barra de Itiúba	N-Parafina	9,3			

Cada amostra simples tem intervalo de 72 metros, correspondendo a aproximadamente 8 tubos de 9 m cada. Na geração de cada amostra simples foram coletados 8 sub-amostras, correspondendo a cada tubo.

Anexo 2. Amostras simples coletadas na centrífuga 1, que trata o fluido gerado pelo secador, no poço 7-SMC-50D-AL e formação das amostras compostas.

Id	Fase	Informações do Fluido		Composta por Equipamento Centrífuga	Observações
		Tipo	Densidade (lb. gal ⁻¹)		
1	I	Convencional	9,1-8,6	1C	Nessa fase foi gerado pouco resíduo por esse equipamento. Não foi utilizado baritina nessa fase.
2	II	Conv. c/Filtrado Controlado	9,4	2C	
3	II	Conv. c/Filtrado Controlado	9,4		
4	II	Conv. c/Filtrado Controlado	8,6		
5	II	Conv. c/Filtrado Controlado	9,2		
6	II	Conv. c/Filtrado Controlado	9,4		
7	II	Conv. c/Filtrado Controlado	9,4		
8	II	Conv. c/Filtrado Controlado	8,6		
9	III	N-Parafina	9,3		
10	III	N-Parafina	9,3		
11	III	N-Parafina	9,4		
12	III	N-Parafina	9,4		
13	III	N-Parafina	9,5		
14	III	N-Parafina	9,5		
15	III	N-Parafina	9,3		
16	III	N-Parafina	9,3		
17	III	N-Parafina	9,4		
18	III	N-Parafina	9,3		
19	III	N-Parafina	9,3		
20	III	N-Parafina	9,3		
21	III	N-Parafina	9,3		

As amostras simples foram formadas a partir da quantidade gerada pelo equipamento em cada fase.

Anexo 3. Amostras simples coletadas na centrífuga 2, que trata o fluido do sistema, no poço 7-SMC-50D-AL e formação das amostras compostas.

Id	Fase	Informações do Fluido		Composta por Equipamento		Observações
		Tipo	Densidade (lb gal ⁻¹)	Centrífuga 2		
1	I	Convencional	9,1			Nessa fase foi gerado pouco resíduo por esse equipamento Não foi utilizado baritina nessa fase
2	I	Convencional	9,4	1C2		
3	I	Convencional	9,4			
4	I	Convencional	8,6			
5	II	Conv. c/Filtrado Controlado	9,2			Nessa fase a densidade do fluido ficou constante, não havendo a necessidade de funcionamento da centrífuga 2
6	II	Conv. c/Filtrado Controlado	9,4			
7	II	Conv. c/Filtrado Controlado	9,4	2C2		
8	II	Conv. c/Filtrado Controlado	8,6			
9	II	Conv. c/Filtrado Controlado	9,3			
10	II	Conv. c/Filtrado Controlado	9,3			
11	III	N-Parafina	9,4	3C2		

As amostras simples foram formadas a partir da quantidade gerada pelo equipamento em cada fase.

