

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

**DISSERTAÇÃO**

**Efeito da Salinidade do Cascalho de Perfuração de  
Poços de Petróleo no Cultivo de Girassol**

**Rafael Antonio Presotto**

**2014**



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

**EFEITO DA SALINIDADE DO CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE  
POÇOS DE PETRÓLEO NO CULTIVO DE GIRASSOL**

**RAFAEL ANTONIO PRESOTTO**

*Sob a Orientação do Professor*  
**Everando Zonta**

*e Co-orientação do Professor*  
**Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho**

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

Seropédica, RJ  
Fevereiro de 2014

635.95

P934e

T

Presotto, Rafael Antonio, 1989-.

Efeito da salinidade do cascalho de perfuração de poços de petróleo no cultivo de girassol / Rafael Antonio Presoto. – 2014. 91 f.: il.

Orientador: Everaldo Zonta.

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

Bibliografia: f. .

1. Girassol – Cultivo - Teses. 2. Poços de petróleo – Fluidos de perfuração - Teses. 3. Salinidade - Teses. 4. Carbono – Teses. I. Zonta, Everaldo, 1970- 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

**RAFAEL ANTONIO PRESOTTO**

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

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 12/02/2014.

---

Everaldo Zonta. Dr. UFRRJ  
(Orientador)

---

Adriana Ururahy Soriano. Dra. PETROBRAS/CENPES

---

Glaucio da Cruz Genuncio. Dr. UFRRJ

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a toda minha família  
pela compreensão da minha ausência.

## **AGRADECIMENTO**

Primeiramente à Deus;

À Petrobras pelo apoio financeiro;

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ);

Ao curso de Pós Graduação em Agronomia Ciência do Solo (CPGA-CS);

À Fundação de Apoio à Pesquisa Científica da UFRRJ (FAPUR);

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES);

Ao meu Orientador Prof. Dr. Everaldo Zonta;

Aos colegas e amigos do laboratório, em especial os que ajudaram diretamente na construção desse trabalho (Guilherme Zolli Alves; Rafaela Félix da França e Júnior César Rodrigues da Silva).

À Flávia por todo o apoio durante essa jornada.

## **BIOGRAFIA**

Rafael Antônio Presotto, nascido na cidade de Seara-SC, filho dos agricultores Valdir Presotto e Dirce Salete Presotto. Em 2004 ingressou na Escola Agrotécnica Federal de Concórdia (EAFC) para em 2006 formar-se Técnico em Agropecuária. No ano seguinte ingressou na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, inicialmente no curso de Licenciatura em Ciências Agrícolas, mas em 2008 transferiu para Engenharia Agrônômica. Foi estagiário do Departamento de Solos durante os nove períodos da graduação, sob orientação do conterrâneo Prof. Dr. Everaldo Zonta, atuando como bolsista de iniciação científica do CNPq por três anos. Atuou diretamente em duas dissertações de mestrado e uma de doutorado, com projetos de pesquisa do Laboratório de Estudos da Interação Solo-Planta, voltados ao estudo da utilização de Resíduos da Indústria Energética na Agricultura. Colou grau como Engenheiro Agrônomo em 27 de Agosto de 2011, atuando como residente no Departamento de Solo da UFRRJ até março de 2012, quando ingressou no curso de Mestrado em Agronomia no programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo (CPGA-CS).

## RESUMO GERAL

PRESOTTO, Rafael Antonio. **Efeito da salinidade do fluido de perfuração de poços de petróleo no cultivo de girassol**. 2014. 91f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2014.

O cascalho de perfuração é um resíduo produzido durante a perfuração dos poços de petróleo, basicamente é composto do material geológico triturado, impregnado com o fluido de perfuração utilizado na operação. A disposição em solo do cascalho de perfuração tem sido discutida nas últimas décadas por apresentar limitações do ponto de vista químico, sendo recorrentes estudos que relatam problemas com metais pesados, salinidade e compostos derivados do petróleo nesse tipo de resíduo. Normalmente os componentes limitadores da utilização do cascalho de perfuração não são devidos ao material geológico, mas do fluido de perfuração utilizado. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo estudar os efeitos causados pela salinidade do cascalho de perfuração de poços de petróleo no desenvolvimento do girassol. Inicialmente os estudos tiveram como foco os efeitos provocados pela salinidade (induzida por NaCl), no cultivo do girassol em solução nutritiva e selecionar variedades mais apropriadas para os estudos subsequentes. Na segunda etapa, as variedades consideradas como mais tolerante e mais sensível à salinidade foram cultivadas em solo com doses de três tipos de fluido de perfuração, sendo avaliado o desenvolvimento da planta, concentração de nutrientes na planta e no solo após o cultivo. Na terceira etapa, utilizou-se no experimento doses de cascalho de perfuração associado a doses de torta de crambe (*Crambe abyssinica* H.), sendo testada como possível condicionadora orgânica. As avaliações foram análogas ao segundo experimento, mas adicionalmente com um ensaio de evolução de CO<sub>2</sub>, puderam-se estudar os efeitos do cascalho de perfuração na mineralização da torta de crambe. A salinidade em solução nutritiva prejudicou o desenvolvimento de todas as variedades de girassol, porém a variedade Neon e BRS 321 foram consideradas como a mais tolerante e a mais sensível à salinidade nas condições avaliadas, respectivamente. Os efeitos dos fluidos de perfuração foram diferenciados, sendo que a aplicação de 1,0 Mg ha<sup>-1</sup> do fluido catiônico promoveu maior acúmulo de matéria seca do girassol. Os fluidos não aquosos saturados com NaCl e KCl prejudicaram o desenvolvimento do girassol, quando foram aplicados em dose superiores a 2,0 Mg ha<sup>-1</sup>. A aplicação de até 5,0 Mg ha<sup>-1</sup> de cascalho de perfuração ao solo favoreceu o desenvolvimento do girassol, por melhorias nas condições nutricionais. No entanto, para doses superiores a 30 Mg ha<sup>-1</sup> o cascalho de perfuração prejudicou o acúmulo de biomassa. A aplicação do cascalho de perfuração não prejudicou a mineralização da torta de crambe, avaliada pela respiração basal do solo. O cultivo das plantas promoveu intensa degradação dos hidrocarbonetos totais de petróleo adicionados com o cascalho. Conclui-se que a disposição do cascalho de perfuração ao solo com parcimônia e critério não prejudica o desenvolvimento do girassol.

**Palavras-chave:** Salinidade. Fluido de perfuração. Cascalho de perfuração. Torta de crambe.

## GENERAL ABSTRACT

PRESOTTO, Rafael Antonio Presotto. **Effect of salinity of the fluid for oil drill cutting in sunflower cultivation**. 2014. 91p. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science) Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2014.

The drill cutting is a residue produced during the exploration of oil wells; basically it consists of crushed geological material, impregnated with the fluid used in the drilling operation. The disposal of the drill cuttings has been discussed in recent decades due to chemical limitations, and many studies report recurrent problems with heavy metals, salinity and petroleum compounds in this type of waste. Usually the limiting components for using the drill cuttings are not due to the geological material, but the drilling fluid used. Thus, this work aimed to study the effects caused by salinity of gravel from drilling of oil wells in the development of sunflower plants. Initial studies focused on the effects caused by salinity (NaCl-induced) in sunflower cultivated in nutrient solution, and to select the varieties more appropriate for subsequent studies. In the second phase, the varieties considered most tolerant and sensitive to salinity were grown in soil with doses of three types of drilling fluid. It was evaluated the plant growth, the nutrient concentrations in the plants and soil after cultivation. In the third phase, an experiment with dosages of drill cuttings was associated with dosages of pie from crambe (*Crambe abyssinica* H.) tested as a possible organic conditioner. The ratings were similar to the ones in second experiment, but with additional testing of evolution of CO<sub>2</sub>, to study the effects of drill cuttings in the mineralization of the crambe pie. The salinity in the nutrient solution hindered the development of all varieties of sunflower; however the Neon and BRS 321 varieties were considered as the most tolerant and most sensitive to the salinity conditions evaluated, respectively. The effects of the drilling fluids were differentiated, and the application of 1.0 Mg ha<sup>-1</sup> of the cationic fluid promoted highest dry matter accumulation in the sunflower plants. The non-aqueous fluids saturated with NaCl and KCl hampered the development of sunflower, when they were applied in excess of 2.0 Mg ha<sup>-1</sup>. The application of up to 5.0 Mg ha<sup>-1</sup> of drill cuttings to the soil favored the development of sunflower by improving the nutritional status. However, doses higher than 30 Mg ha<sup>-1</sup> of the drill cuttings damaged the biomass accumulation. The application of drill cuttings did not impair the mineralization of the crambe pie, assessed by the basal soil respiration. The cultivation of plants promoted rapid degradation of total petroleum hydrocarbons added with the gravel. The disposal of drill cuttings to the soil with parsimony and criterion does not preclude the development of sunflower.

**Key words:** Salinity. Drilling fluid. Drill cuttings. Crambe pie.

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Valores orientadores de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA) para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo. ....	7
<b>Tabela 2.</b> Quadro de análise de variância (ANOVA) do fatorial com delineamento inteiramente casualizado (DIC) com parcela subdividida (Salinidade como parcela e variedades como subparcela). ....	16
<b>Tabela 3.</b> Valores quadrado médio da análise de variância das variáveis fenológicas de variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade.....	17
<b>Tabela 4.</b> Parâmetros da regressão da MPAF, MPAS e %MSPA das variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade. ....	18
<b>Tabela 5.</b> Média da MRF, MRS e %MSR das variedades de girassol independentemente da salinidade em solução nutritiva.....	19
<b>Tabela 6.</b> Parâmetros da regressão da altura e diâmetro do caule das variedades de girassol cultivado em níveis de salinidade. ....	20
<b>Tabela 7.</b> Valores do quadrado médio da ANOVA do índice de clorofila Falker® ( <i>a</i> , <i>b</i> e total) das variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade.....	21
<b>Tabela 8.</b> Parâmetros da regressão do índice de clorofila Falker® ( <i>a</i> , <i>b</i> e total) das variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade.....	21
<b>Tabela 9.</b> Valores do quadrado médio da ANOVA com o respectivo nível de significâncias pelo teste F dos teores de macronutrientes e sódio das variedades de girassol sob níveis de salinidade. ....	22
<b>Tabela 10.</b> Parâmetros da regressão do teor de N total da raiz parte aérea das variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade ....	23
<b>Tabela 11.</b> Parâmetros da regressão do teor de P total da raiz e parte aérea das variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade. ....	24
<b>Tabela 12.</b> Parâmetros da regressão do teor de Ca <sup>2+</sup> total das raízes e parte aérea das variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade.....	24
<b>Tabela 13.</b> Parâmetros da regressão do teor de Mg <sup>2+</sup> total das raízes e parte aérea das variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade.....	25
<b>Tabela 14.</b> Parâmetros da regressão linear segmentada dos teores de K <sup>+</sup> e Na <sup>+</sup> das raízes das variedades de girassol em função dos níveis de salinidade em solução nutritiva.....	26
<b>Tabela 15.</b> Parâmetros da regressão dos teores de K <sup>+</sup> e Na <sup>+</sup> na parte aérea das variedades de girassol. ....	27
<b>Tabela 16.</b> Caracterização química da amostra de solo (Planossolo háplico) utilizado na montagem do experimento.....	34
<b>Tabela 17.</b> Caracterização química dos fluídos de perfuração de poços de petróleo utilizados no experimento, teores totais de N, P, K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Fe, Cu, Mn e Zn. ....	35
<b>Tabela 18.</b> Caracterização química dos fluídos de perfuração de poços de petróleo utilizados no experimento, teores de n-alcanos, HRP, UCM e HTP.....	35
<b>Tabela 19.</b> Valores quadrado médio da análise de variância das avaliações biométricas das variedades de girassol em função das doses dos fluidos de perfuração.....	37
<b>Tabela 20.</b> Parâmetros da regressão da massa do caule fresco (MCF), massa das folhas frescas (MFF) e massa da parte aérea fresca (MPAF) em função da dose de cada fluído e variedade. ....	38
<b>Tabela 21.</b> Parâmetros da regressão da biomassa seca (caule, folha e caule+folha) em função da dose de cada fluído e variedade. ....	39

<b>Tabela 22.</b> Comparação por contraste entre a massa da parte aérea seca (MPAS) do controle em relação a aplicação de 1 e 2 Mg ha <sup>-1</sup> dos respectivos fluido de perfuração. ....	41
<b>Tabela 23.</b> Valores quadrado médio da análise de variância da concentração de N, P e K <sup>+</sup> nas raízes, caule e folhas do girassol. ....	42
<b>Tabela 24.</b> Valores quadrado médio da análise de variância das concentrações de Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> e Na <sup>+</sup> nas raízes, caule e folhas do girassol. ....	46
<b>Tabela 25.</b> Valores quadrado médio da ANOVA das análises de rotina de fertilidade do solo após a aplicação das doses dos fluidos de perfuração e cultivo das variedades de girassol. ....	50
<b>Tabela 26.</b> Balanço de massa a entre a quantidade de HTP aplicado (calculado com base nos teores dos fluidos) e quantidade detectada no solo de cada parcela após 40 dias de cultivo do girassol. ....	56
<b>Tabela 27.</b> Caracterização química da torta de crambe e do cascalho de perfuração. ....	64
<b>Tabela 28.</b> Resumo da análise de variância da evolução de CO <sub>2</sub> acumulada até os 25 dias após a incorporação dos tratamentos. ....	66
<b>Tabela 29.</b> Valores do quadrado médio da análise de variância do diâmetro do caule (DC), altura das plantas, massa de parte aérea fresca (MPAF) e seca (MPAS), porcentagem de matéria seca na parte aérea (%MS) em função de doses de cascalho de perfuração e torta de crambe. ....	68
<b>Tabela 30.</b> Comparação por contraste entre a biomassa seca da PA do controle com às doses de cascalho de perfuração. ....	70
<b>Tabela 31.</b> Resumo da ANOVA com valores do quadrado médio das concentrações N, P, K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> e Na <sup>+</sup> na parte aérea do girassol após o cultivo em solo com doses de cascalho e torta de crambe. ....	71
<b>Tabela 32.</b> Valores quadrado médio da análise de variância das análises de fertilidade do solo após o cultivo do girassol. ....	77
<b>Tabela 33.</b> Teor de HTP do solo (mg kg <sup>-1</sup> ) e balanço de massa entre a quantidade de HTP aplicado (calculado com base no teor do cascalho) e quantidade detectada no solo de cada parcela após o cultivo do girassol em função das doses de cascalho de perfuração (sem a torta). ....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Fotos do experimento. (A) Mudanças sendo retiradas do substrato arenoso, sendo transplantadas para a solução nutritiva (B,C), permanecendo por 12 dias para adaptação (D), quando foram aplicados os tratamentos (E, F). .....	15
<b>Figura 2.</b> Fotos das parcelas principais com as 9 variedades de girassol (aleatorizadas) sob níveis de salinidade (controle, 25, 50, 75 e 100 mM de sódio) em solução nutritiva.....	20
<b>Figura 3.</b> Concentração de sódio ( $\text{Na}^+$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ) nas raízes do girassol em função da salinidade em solução nutritiva. Média das nove variedades. ....	26
<b>Figura 4.</b> Temperatura e umidade relativa média, máximas e mínimas da casa de vegetação durante o cultivo do girassol. ....	33
<b>Figura 5.</b> Vistas da montagem do experimento com os fluídos de perfuração (A) prontos para serem homogeneizados ao solo (B) para posterior acomodação nos vasos (C) onde as plantas foram cultivadas (D). ....	34
<b>Figura 6.</b> Altura (cm) de duas variedades de girassol em função das doses de fluido de perfuração (média dos fluídos). ....	41
<b>Figura 7.</b> Diâmetro do caule (mm) das variedades de girassol em função de doses dos tipos de fluido de perfuração. ....	42
<b>Figura 8.</b> Teor de N total na raiz, caule e folhas das duas variedades de girassol cultivadas em solo com doses de três fluídos de perfuração. A barra representa o erro padrão das médias. ....	43
<b>Figura 9.</b> Teor de P total na raiz, caule e folhas das duas variedades de girassol cultivadas em solo com doses de três fluídos de perfuração. A barra representa o erro padrão das médias. Linha contínua representa a média geral dos dados, enquanto que a linha pontilhada a média dos controles. ....	44
<b>Figura 10.</b> Teor de $\text{K}^+$ total na raiz, caule e folhas das duas variedades de girassol cultivadas em solo com doses de três fluídos de perfuração. A barra representa o erro padrão das médias. ....	45
<b>Figura 11.</b> Teor de $\text{Ca}^{2+}$ total na raiz, caule e folhas das duas variedades de girassol cultivadas em solo com doses de três fluídos de perfuração. A barra representa o erro padrão das médias. Linha contínua representa a média geral dos dados, enquanto que a linha pontilhada a média do controle. ....	47
<b>Figura 12.</b> Teor de $\text{Mg}^{2+}$ total na raiz, caule e folhas das duas variedades de girassol cultivadas em solo com doses de três fluídos de perfuração. A barra representa o erro padrão das médias. Linha contínua representa a média geral dos dados, enquanto que a linha pontilhada a média do controle. ....	48
<b>Figura 13.</b> Teor de $\text{Na}^+$ total na raiz das duas variedades de girassol em função das doses de três fluídos de perfuração. **: Equação significativa com $p < 0,01$ respectivamente. <sup>ns</sup> : Equação não significativa, sendo apresentada a média dos dados. ....	49
<b>Figura 14.</b> Teor de sódio trocável ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) do solo após o cultivo do girassol (cv. BRS 321 à esquerda e cv. Neon à direita) em função das doses dos fluídos de perfuração. *, **: Equação significativa com $p < 0,05$ e $0,01$ respectivamente. ....	50
<b>Figura 15.</b> Teor de potássio trocável ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) do solo após o cultivo do girassol em função das doses dos fluídos de perfuração. *, **: Equação significativa com $p < 0,05$ e $0,01$ respectivamente. ....	51
<b>Figura 16.</b> Teor de cálcio trocável ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) do solo após o cultivo do girassol (cv. BRS 321 à esquerda e cv. Neon à direita) em função das doses dos fluídos de perfuração. *, **: Equação significativa com $p < 0,05$ e $0,01$ respectivamente. ....	52

<b>Figura 17.</b> Teor de magnésio trocável ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) do solo após o cultivo do girassol (cv. BRS 321 à esquerda e cv. Neon à direita) em função das doses dos fluidos de perfuração. *, **: Equação significativa com $p < 0,05$ e $0,01$ respectivamente. ....	52
<b>Figura 18.</b> Teor de fósforo disponível ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) (Mehlich) do solo após o cultivo do girassol em função das variedades de girassol em cada fluido utilizado. V/F **: influência significativa (Teste F com $p < 0,01$ ) da variedade em cada nível de fluido. ....	53
<b>Figura 19.</b> Porcentagem de sódio trocável do solo (PST) após o cultivo do girassol (cv. BRS 321 à esquerda e cv. Neon à direita) em função das doses dos fluidos de perfuração. **: Equação significativa com $p < 0,01$ . ....	54
<b>Figura 20.</b> Valores do pH do solo após o cultivo do girassol (cv. BRS 321 à esquerda e cv. Neon à direita) em função das doses dos fluidos de perfuração. **: Equação significativa com $p < 0,01$ . ....	54
<b>Figura 21.</b> Concentração de HTP ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) das amostras de solo com doses de três fluidos de perfuração após o cultivo do girassol. ....	55
<b>Figura 22.</b> Temperatura e umidade relativa médias, máximas e mínimas da casa de vegetação durante o cultivo do girassol. ....	64
<b>Figura 23.</b> Evolução de $\text{CO}_2$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ de solo) acumulado 25 dias após a incorporação dos tratamentos. Barras seguidas de mesma letra minúscula para o cascalho e maiúscula para torta não diferem significativamente pelo teste de Tukey com $p < 0,01$ . ....	67
<b>Figura 24.</b> Evolução de $\text{CO}_2$ acumulada ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) em função do tempo com diferentes doses de cascalho de perfuração em cada dose de torta de crambe. ....	67
<b>Figura 25.</b> Diâmetro do caule (DC) e altura do girassol em função das doses de cascalho de perfuração e da torta de crambe. Modelo significativo com $\alpha < 0,01$ . ....	69
<b>Figura 26.</b> Massa de parte aérea fresca (MPAF) e seca (MPAS) do girassol em função das doses de cascalho de perfuração no diferentes níveis de torta de crambe. Coeficientes da equação de regressão significativos com $p < 0,01$ . ....	70
<b>Figura 27.</b> Teor de N total na parte aérea do girassol em função do cascalho de perfuração (C) e torta de crambe (T). Equação de regressão significativa com $p < 0,01$ . ....	71
<b>Figura 28.</b> Teor de P total na parte aérea do girassol em função do cascalho de perfuração (C) e torta de crambe (T). Equação de regressão significativa com $p < 0,01$ . ....	72
<b>Figura 29.</b> Teores de $\text{Na}^+$ e $\text{K}^+$ total ( $\text{g kg}^{-1}$ ) na parte aérea do girassol em função do cascalho de perfuração (C) e torta de crambe (T). Equação de regressão significativa com $p < 0,01$ . ...	73
<b>Figura 30.</b> Teores de $\text{Ca}^{2+}$ e $\text{Mg}^{2+}$ total ( $\text{g kg}^{-1}$ ) na parte aérea do girassol em função do cascalho de perfuração (C) e torta de crambe (T). Equação de regressão significativa com $p < 0,01$ . ....	74
<b>Figura 31.</b> Teores de Fe, Cu, Mn e Zn totais ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) na parte aérea do girassol em função do cascalho de perfuração (C) e torta de crambe (T). Equação de regressão significativa com $p < 0,01$ . ....	76
<b>Figura 32.</b> Teores de $\text{Na}^+$ e $\text{K}^+$ trocáveis ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) após o cultivo do girassol em função da aplicação de doses de cascalho de perfuração e torta de crambe. Coeficientes da equação de regressão significativos com $p < 0,05$ . ....	78
<b>Figura 33.</b> Teores de $\text{Ca}^{2+}$ e $\text{Mg}^{2+}$ trocáveis ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) do solo após o cultivo do girassol em função da aplicação de doses de cascalho de perfuração e torta de crambe. Coeficientes da equação de regressão significativos com $p < 0,05$ . ....	79
<b>Figura 34.</b> Teor de fósforo assimilável ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) após o cultivo do girassol em função da aplicação de doses de cascalho de perfuração e torta de crambe. Coeficientes da equação de regressão significativos pelo teste t com $p < 0,01$ . ....	79

- Figura 35.** Condutividade elétrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) do solo após o cultivo do girassol em função da aplicação de doses de cascalho de perfuração e torta de crambe. Coeficientes da equação de regressão significativos com  $p < 0,05$ . ..... 80
- Figura 36.** Porcentagem de sódio trocável (PST %) do solo após o cultivo do girassol em função da aplicação de doses de cascalho de perfuração e torta de crambe. Coeficientes da equação de regressão significativos com  $p < 0,05$ . ..... 81

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1	O Girassol .....	3
2.2	Salinidade.....	4
2.3	Fluido de Perfuração .....	5
2.4	Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (HTP).....	6
2.5	Cascalho de Perfuração.....	7
2.6	Crambe ( <i>Crambe abyssinica H.</i> ) e sua Torta.....	9
3	CAPÍTULO I ESTUDOS DA TOLERÂNCIA À SALINIDADE DE VARIEDADES DE GIRASSOL.....	10
3.1	RESUMO.....	11
3.2	ABSTRACT.....	12
3.3	INTRODUÇÃO .....	13
3.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	14
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
3.6	CONCLUSÕES .....	28
4	CAPÍTULO II CULTIVO DE GIRASSOL EM SOLO COM DIFERENTES NÍVEIS DE SALINIDADE DEVIDO À ADIÇÃO DE FLUÍDO DE PERFURAÇÃO .....	29
4.1	RESUMO.....	30
4.2	ABSTRACT.....	31
4.3	INTRODUÇÃO .....	32
4.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	33
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.5.1.	Efeitos no Crescimento do Girassol .....	37
4.5.2.	Efeitos na Concentração de Nutrientes no Girassol .....	42
4.5.3.	Efeitos no Solo Após o Cultivo .....	49
4.6	CONCLUSÕES .....	57
5	CAPÍTULO III EFEITO DA APLICAÇÃO DO CASCALHO DE PERFURAÇÃO COM DOSES DE TORTA DE CRAMBE NA EVOLUÇÃO DE CO <sub>2</sub> E NO CULTIVO DO GIRASSOL .....	58
5.1	RESUMO.....	59
5.2	ABSTRACT.....	60
5.3	INTRODUÇÃO .....	61
5.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	63
5.4.1.	Ensaio de Mineralização da Torta de Crambe com Doses de Cascalho de Perfuração..	63
5.4.2.	Cultivo de Girassol em Solo com Doses de Cascalho de Perfuração e Torta de Crambe..	64
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
5.5.1.	Ensaio de Mineralização da Torta de Crambe com Doses de Cascalho de Perfuração..	66
5.5.2.	Efeitos do Cascalho de Perfuração e da Torta de Crambe no Desenvolvimento do Girassol .....	68
5.5.3.	Teor de Nutrientes na Planta .....	71
5.5.4.	Efeitos no Solo após o Cultivo do Girassol.....	77
5.6	CONCLUSÕES .....	83
6	CONCLUSÕES GERAIS.....	84
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
8	ANEXOS .....	91

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O cascalho de perfuração é um resíduo produzido durante as fases de perfuração de poços de petróleo. Basicamente é composto de fragmentos de rocha triturada e de fluido de perfuração utilizado durante a prospecção. Os fluídos de perfuração são indispensáveis durante a prospecção, pois atuam na refrigeração da broca de perfuração, estabilização da parede do poço, compensação da pressão geológica, transporte da rocha triturada à superfície entre outras funções de interesse tecnológico. Para atender estas demandas, os fluídos de perfuração apresentam composição variada, visto a diversidade de situações e características geológicas a que são submetidos. Além disso, novas tecnologias de fluido de perfuração têm sido desenvolvidas nos últimos anos a fim de reduzir custos e minimizar impactos ambientais decorrentes da disposição do cascalho de perfuração.

As limitações da disposição do cascalho de perfuração em solo têm sido de caráter químico, principalmente em relação à concentração de metais pesados, sódio e compostos derivados do petróleo presentes nesse resíduo. As fontes desses componentes basicamente são do material geológico e do fluido de perfuração utilizado. As proporções entre essas fontes são particulares de cada combinação de formação geológica, fluido e do equipamento utilizado na separação do cascalho do fluido. Dependendo do equipamento utilizado na recuperação do fluido, o cascalho poderá apresentar mais características do material de origem, que normalmente resultam em maiores concentrações de alumínio, ferro e manganês; ou do fluido de perfuração, que resulta em maiores concentrações de bário, sódio e compostos derivados de petróleo.

Em relação aos metais presentes no cascalho de perfuração, que majoritariamente são derivados do material geológico (alumínio, ferro e manganês), poder-se-ia hipoteticamente considerá-los de menor impacto ambiental, pois no solo envolto do poço, estes metais provavelmente também se encontram em concentrações elevadas. Não é raro classificar um solo sem influência antrópica, como resíduo não inerte, por apresentar concentrações desses metais acima dos valores orientadores de qualidade.

A dinâmica do bário em solo contaminado por cascalho de perfuração já foi objeto de estudo de Magalhães (2011), onde sua revisão enfatiza bem a problemática desse metal pesado quando disponível na forma mais tóxica ( $Ba^{2+}$ ). No entanto, a especulação que envolveu a problemática do bário no cascalho de perfuração foi desmistificada com os resultados obtidos pelo autor, que concluiu que somente uma pequena fração do bário torna-se biodisponível mesmo sob condições redutoras, devido a baixa solubilidade do sulfato de bário. O autor apontou, ainda, que o sódio poderia ser o principal limitante da aplicação em solo do cascalho de perfuração.

O aporte de sódio ao solo pode promover diversos efeitos, desde a inibição do desenvolvimento de espécies não adaptadas, até dispersão da argila em condições severas. O estresse salino é dos principais limitantes de fertilidade do solo em regiões áridas, onde o balanço entre a precipitação e evapotranspiração favorecem o acúmulo de sais na superfície do solo. Entretanto estudos vêm sendo realizados nestas condições edafoclimáticas, buscando desenvolver tecnologias para atenuar os efeitos provocados pela salinidade do solo, entre elas a seleção de espécies e variedades mais tolerantes ao estresse salino tem permitido avanços relevantes. Além disso, alternativamente, alguns trabalhos apontam que a adição de adubos orgânicos pode atenuar os efeitos provocados pela salinidade.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os impactos ao desenvolvimento do girassol cultivado em solo contaminado com cascalho de perfuração de poços de petróleo, permitindo inferir dose de aplicação segura desse resíduo. Para tanto, os objetivos secundários são: classificar algumas variedades de girassol quanto a tolerância à salinidade; Avaliar o

desenvolvimento do girassol sob níveis de salinidade devido a aplicação de doses de fluido de perfuração e do cascalho de perfuração; Apontar dose crítica de aplicação desses resíduos sem que haja prejuízos ambientais e que permita o cultivo dessa oleaginosa.

Para tanto, este trabalho está dividido em três capítulos, no primeiro capítulo os estudos estão concentrados na classificação de variedades de girassol em relação à tolerância ao estresse salino. Foram avaliadas nove variedades comerciais de girassol, cultivadas em solução nutritiva com níveis crescentes de salinidade. As interpretações foram baseadas na análise do crescimento vegetativo após duas semanas de cultivo sob estresse salino. Também se determinou a concentração de macronutrientes (N, P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>), com o intuito de avaliar os efeitos causados pela salinidade.

Como há indícios de que a salinidade do cascalho de perfuração seja devida ao fluido de perfuração utilizado, no segundo capítulo, avaliou-se o desenvolvimento de duas variedades de girassol (selecionadas na primeira etapa), em solo com doses de três tipos de fluido de perfuração, obtendo-se níveis de salinidade diferenciados. As avaliações das plantas foram similar a da primeira etapa, porém neste ensaio também se avaliou o solo após o cultivo do girassol, com análises de nutrientes e concentração de hidrocarbonetos totais de petróleo.

No entanto, durante a perfuração dos poços o resíduo que efetivamente é produzido é o cascalho de perfuração, impregnado com o fluido de perfuração. Portanto, no terceiro capítulo, o estudo buscou avaliar os efeitos de doses de cascalho de perfuração no desenvolvimento do girassol. Com o intuito de atenuar possíveis efeitos provocados pelo cascalho de perfuração foi incorporada ao delineamento uma fonte de material orgânico, no caso a torta de crambe.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 O Girassol

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é considerado uma importante espécie devido a sua ampla adaptabilidade a diversas condições edafoclimáticas (Monotti, 2004), sendo apta a ser cultivada em grande parte do território brasileiro. É mais tolerante à seca que a maioria das espécies cultivadas, além da baixa incidência de pragas e doenças (Albuquerque et al., 2001).

A produção mundial de grãos de girassol, estimada pelo USDA na safra 2012/13 é de 37,6 milhões de toneladas, resultando na produção de 15,1 milhões de toneladas de farelo e 14,2 milhões de toneladas de óleo. A produção mundial de farelo de girassol deve crescer em torno de 12,8%, em comparação à safra anterior, destacando a Ucrânia com 24% da produção mundial, seguida pela União Européia com 22% (Conab, 2012).

No Brasil, a área estimada de cultivo do girassol na safra 2011/2012 foi aproximadamente 74,1 mil hectares, resultando na produção de 106,9 mil toneladas de grãos, com produtividade média de 1,44 Mg ha<sup>-1</sup>. Houve aumento em relação à safra anterior na área plantada em 11,6%, na produção em 28,6% e na produtividade média em 15,4%. O aumento na produção tem sido atribuído a bons preços no mercado, aliado ao preço mínimo que teve aumento de 19,2% em comparação ao preço mínimo anterior. O Brasil continua sendo um grande importador de óleo de girassol, segundo a SECEX/MDIC, a importação acumulada de janeiro a junho de 2012 foi de 18,8 mil toneladas, representando aumento de 9,2% em relação ao mesmo período do ano anterior (Conab, 2012).

Nos últimos anos a produção de girassol tem sido incentivada pelo Programa Nacional de Biocombustíveis do Governo Federal, que visa beneficiar agricultores do Nordeste pelo estímulo ao cultivo de oleaginosas. O girassol apresenta qualidades que o classifica como uma boa opção para fornecimento de matéria prima para o biodiesel, pois o grande interesse mundial que há por essa cultura está associado à excelente qualidade do óleo, rico em ácidos graxos poli-insaturados, principalmente o ácido linoleico (Mandarino, 1992). Além da qualidade, o teor de óleo nas sementes é alto, proporcionando assim maior rendimento na produção de óleo por hectare se comparado com o da cultura da soja, por exemplo (Lazzarotto et al., 2005).

Outro aspecto atrativo dessa cultura é que todas as suas partes podem ser aproveitadas, sendo normalmente utilizada para a produção de forragem alternativa, planta melífera, ornamental, produção de óleo para alimentação humana e biocombustíveis (Corrêa et al., 2008; Morgado et al., 2002; Neves et al., 2005; Nobre et al., 2010).

Em relação ao cultivo do girassol, diversos trabalhos mostram que o girassol é considerado como uma cultura sensível à acidez do solo, apresentando sintoma de toxidez ao Al<sup>3+</sup> em pH em CaCl<sub>2</sub> a 0,1 M menor que 5,2, situação presente na grande maioria dos solos brasileiros (Blamey et al., 1987; Wallace, 1990; Castiglioni, 1992). Para corrigir essa situação, além do adequado manejo com a realização da calagem, diversos trabalhos são realizados no Brasil, os quais objetivam ao desenvolvimento de métodos para seleção de genótipos tolerantes à acidez do solo. A utilização desses genótipos e o uso de práticas de correção do solo constituem, portanto, alternativas para redução dos riscos de cultivo do girassol nos solos intemperizados no Brasil (Amabile et al., 2003).

Além da sensibilidade a acidez causada pelo Al<sup>3+</sup>, a omissão de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> também afetam o desenvolvimento do girassol com a diminuição no número de folhas, na altura das plantas, no diâmetro do caule e na área foliar, diminuindo assim a sua produtividade (Prado e Leal, 2006). Portanto, a elevação da saturação por bases para o girassol deve ser na faixa de 35 a 50%, visando a garantir um bom desenvolvimento da cultura.

Em relação à nutrição mineral do girassol, diversos trabalhos mostram que é uma cultura que tem uma alta demanda por macronutrientes (Prado e Leal, 2006; Santos et al., 2010; Zobiolo et al., 2010). De acordo com Prado e Leal (2006), que avaliaram os efeitos da omissão de macronutrientes, a deficiência de N afeta o número de folhas, a altura das plantas, o diâmetro do caule e a área foliar, diminuindo significativamente a produção de matéria seca das folhas, do caule e raízes.

De acordo com Malavolta et al. (1997), o baixo teor de fósforo disponível no solo é uma das principais limitações ao desenvolvimento da cultura do girassol, tendo em vista que o mesmo atua na fotossíntese, na respiração, no armazenamento e na transferência de energia, na divisão celular, no crescimento das células e em vários outros processos da planta. Zobiolo et al., (2010) relatam que o P é o nutriente mais exportado pelo girassol, 62% seguido pelo N (40%); esse resultado mostra que sem o fornecimento adequado do P para a cultura, a produtividade pode ser drasticamente reduzida.

Em relação ao potássio ( $K^+$ ), o girassol tem uma alta exigência a esse nutriente, sendo sua maioria acumulado no caule e não nas folhas como o N e P (Zobiolo et al., 2010). Os autores relatam que o girassol chega a extrair  $346 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $K_2O$ , na fase R7, ou seja, de enchimento dos aquênios. No entanto, a redistribuição do  $K^+$  na planta de girassol tem como órgão fonte o caule e é alocado nos capítulos e não nos aquênios, mostrando ser uma cultura eficiente em ciclagem desse nutriente, uma vez que, de 90 a 95% da quantidade absorvida é passível de retornar ao solo com a decomposição dos restos culturais.

Em relação aos micronutrientes na cultura do girassol, o Boro (B) é o mais limitante ao seu cultivo, causando desde sintomas leves, até a perda total da produção pela queda dos capítulos (Leite et al., 2007). No entanto, Sfredo et al. (1983) relatam sobre a importância sobre a demanda de micronutrientes para o girassol e que o Zinco (Zn) deve ser o maior problema para o girassol em solos do Brasil central, devido à grande exigência pela planta e a deficiência deste elemento nestes solos.

## 2.2 Salinidade

A escassez de água em regiões agrícolas de várias partes do mundo vem forçando os agricultores a utilizarem água com concentração de sais relativamente alta para a irrigação das lavouras (Savvas et al., 2007). O uso de águas salobras para irrigação, assim como a utilização inadequada de fertilizantes minerais aumenta a salinidade do solo.

Pesquisas mostram que as culturas respondem diferentemente à salinidade, algumas apresentam produções satisfatórias sob altos níveis de salinidade, enquanto outras são sensíveis mesmo em baixas concentrações (Mittova et al., 2002; Caruso e Villari, 2004; Rubio et al., 2009; Al-Karaki et al., 2009). O girassol é uma cultura considerada moderadamente sensível a salinidade (Katerji et al., 2000). Entretanto, há evidências de que as variedades de girassol produzidas comercialmente diferem na tolerância à salinidade do solo, mostrando a importância da seleção de variedades adequadas para tais situações.

O sódio em baixas concentrações na solução do solo é considerado elemento benéfico para algumas espécies de plantas, porém quando a proporção de sódio em relação às outras bases trocáveis aumenta, pode ocorrer toxidez por salinidade. Para algumas espécies como a *Atriplex versicaria* o sódio é considerado um elemento importante, pois quando cultivada em solução contendo baixo teor de Na ( $< 0,1 \mu\text{M}$ ) apresentam sintomas de deficiência como clorose, necrose foliar e redução no crescimento mesmo em condições de altos níveis de  $K^+$  (Marschner, 1997).

As plantas cultivadas apresentam diferentes respostas à salinidade, variando desde sensíveis até tolerantes (Maas e Hoffmann, 1977). A tolerância ao estresse salino pode estar

em função do controle da absorção e da alocação do  $\text{Na}^+$  na planta, do reajustamento osmótico e de outros processos fisiológicos do vegetal (Cheeseman, 1988).

Além dos efeitos provocados aos vegetais, o excesso de sais de sódio pode afetar as propriedades físicas e químicas do solo, pois ele aumenta a espessura da dupla camada iônica difusa, proporcionando a expansão das argilas e, conseqüentemente, reduzindo a porosidade e a permeabilidade do mesmo. (Richards, 1954; Frenkel et al., 1978).

Em solos tropicais e em regiões com elevada precipitação anual, a concentração natural de sódio no solo é normalmente muito baixa, não havendo problemas para a maioria das culturas comerciais. Problemas com salinidade nessas regiões podem ser evidenciados por falhas no manejo de irrigação, onde a água utilizada contém teores de sódio acima dos padrões recomendados, havendo aporte de  $\text{Na}^+$  para tais solos (Souza, 1995).

### **2.3 Fluido de Perfuração**

Os fluídos de perfuração são sistemas multifásicos, que podem conter água, material orgânico, sais dissolvidos e sólidos em suspensão em diversas proporções. Os fluídos de perfuração são utilizados durante as atividades de perfuração de um poço, desempenhando diversas funções, destacando-se: compensação da pressão das formações; estabilização da parede do poço; resfriamento e lubrificação da broca e coluna de perfuração; selamento de poros e aberturas nas formações; suspensão do cascalho gerado durante a perfuração; entre outras (Aditc, 1997; Serra, 2003).

Os fluidos de perfuração são normalmente classificados de acordo com o componente principal que constitui a fase contínua. Estes componentes podem ser basicamente água, óleo ou gás, resultando nas respectivas denominações: fluído a base de água, fluído a base de óleo e gás seco e/ou espuma. Ainda é possível utilização de mistura de fluídos base água e óleo resultando em uma emulsão, que pode ser direta quando o óleo emulsionado na água ou inversa quando a água está emulsionada no óleo (Serra, 2003).

Para atender a tantas funções, o fluído de perfuração é cuidadosamente formulado de modo a possuir propriedades físico-químicas específicas nas diversas condições a que será submetida em subsuperfície (Serra, 2003). Além disso, durante a perfuração as diferenças existentes entre as formações geológicas em profundidade, exigem ajustes na composição do fluído de perfuração.

Durante a perfuração é comum a presença de camadas geológicas constituídas por minerais argilosos, que são, de modo geral, facilmente hidratáveis; como por exemplo, as esmectitas. As ligações inter cristalinas dessas argilas são relativamente fracas, permitindo a entrada de água ou de outras substâncias polares, resultando no aumento da distância interplanar ou basal. Este fenômeno é conhecido por expansão ou inchamento (Amorim, 2006), sendo necessária a utilização de fluidos inibidos. Em alguns casos há necessidade de optar por fluídos sintéticos, cuja fase contínua é formada por um produto orgânico de natureza oleosa (Thomas, 2001).

Nestas condições, para a utilização de fluído base água, é necessária a adição de inibidores de argila, que evitam a incorporação dos sólidos perfurados ao fluído, o inchamento e desmoronamento das paredes do poço (Vidal, 2007). Estes inibidores são compostos químicos capazes de reduzir eficientemente a hidratação e expansão das argilas (Serra, 2003). Os inibidores são normalmente de natureza inorgânica, como os cloretos de sódio ( $\text{NaCl}$ ) e de potássio ( $\text{KCl}$ ) que apresentam custo reduzido quando comparado a outros inibidores. Os cátions desses sais possuem diâmetro menor que o da água e tendem a ficar entre as camadas de argila, evitando a hidratação da mesma (Farias et al. 2006). Adicionalmente, podem ser utilizados inibidores catiônicos, normalmente amidas terciárias, que aumentam o poder de inibição dos fluídos, porém elevam os custos do fluído, sendo usados em associação com os outros sais (Vidal, 2007).

O fluido à base de óleo foi por muito tempo largamente utilizado em função da sua elevada eficiência como inibidor. Entretanto, um dos grandes problemas do fluido à base de óleo é o seu descarte no meio ambiente, pois seus compostos, ricos em diesel e óleos minerais, tendem a persistir por muitos anos nos meios marinhos. No passado, os cascalhos contaminados, resultantes da operação de perfuração, eram descartados diretamente no meio ambiente, onde, por sedimentação, formavam pilhas de materiais, ocasionando a morte de plantas e animais devido à baixa taxa de biodegradação aeróbica do óleo, resultando em depleção do oxigênio retirado da água ao longo de muitos anos (Duarte, 2004).

Em função dos riscos ambientais, a indústria de exploração de petróleo tem desenvolvido fluidos ambientalmente mais seguros, porém preservando as funcionalidades proporcionadas pelos fluidos à base de óleo e os de base de óleos sintéticos. Estas pesquisas visam o desenvolvimento de fluidos de perfuração base água (WBM, “*water base mud*”) onde componentes químicos são dissolvidos em água (Duarte, 2004).

## **2.4 Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (HTP)**

Entre os contaminantes orgânicos de petróleo e derivados destacam-se como principais classes responsáveis pela toxicidade, persistência no meio ambiente os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) e grupo de compostos BTEX (Benzeno, Tolueno, Etil-benzeno e os Xilenos). Muitos destes compostos possuem efeitos carcinogênicos e mutagênicos. Em vista destas características, a concentração destes compostos frequentemente é utilizada pelos órgãos de fiscalização ambiental (Vrom, 1994).

Os hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) representam um dos grupos mais comuns de poluentes orgânicos persistentes no ambiente. Eles têm sido estudados principalmente por serem tóxicos a muitos organismos e à saúde humana. As principais fontes de contaminação por HTP em solos e sedimentos incluem os diferentes setores da indústria do petróleo, tais como extração, refino e consumo (McNicoll e Baweja, 1995).

Os HTP correspondem ao somatório das frações dos hidrocarbonetos resolvidos de petróleo (HRP) e a mistura complexa não resolvida (UCM: *Unresolved complex mixture*). A fração UCM reúne os compostos que não são facilmente resolvidos por cromatografia gasosa, sendo considerada a fração mais biodegradada ou intemperizada dos hidrocarbonetos presentes no ambiente, enquanto a HRP uma fração mais recente e não degradada.

A remediação de HTP persistentes no solo é geralmente um processo lento e dispendioso, principalmente em relação à fração mais recalcitrante, como as frações de elevado peso molecular, contidas em borras oleosas que são excepcionalmente difíceis de remediar (McNicoll e Baweja, 1995; Huang et al., 2005). Os prejuízos funcionais dos solos contaminados por hidrocarbonetos são devidos ao arejamento insuficiente causada pela diminuição da porosidade, além do aumento da demanda de oxigênio causada por microorganismos decompositores de petróleo (De Jong, 1980).

A biodegradação de hidrocarbonetos ocorre naturalmente, entretanto, as taxas com que ocorrem podem ser substancialmente reforçadas através da manipulação de parâmetros ambientais, incluindo a adição de fertilizantes contendo fósforo e nitrogênio para alcançar ótimas razões carbono/nitrogênio, carbono/fósforo e condições ambientais adequadas de aeração, umidade e pH. Em sistemas fechados pode-se controlar ainda a emissão gases que são direcionados para unidade de biofiltração, que consiste da passagem do ar contaminado através de uma camada de solo, composto ou turfa que serve para controlar odores e componentes voláteis do petróleo.

A determinação da concentração de HTP é um parâmetro para avaliação do estado de contaminação ambiental, visto que vincula o sedimento com as concentrações das frações de

hidrocarbonetos saturados e aromáticos do petróleo ou outros derivados da atividade petrolífera (Queiroz e Celino, 2008).

No Brasil não existe uma legislação específica que trata sobre os valores orientadores para HTP (Cetesb, 2005). A legislação ambiental da Holanda (Lista Holandesa, 2009) prevê concentrações máximas permitidas de cada composto, inclusive de HTP, levando em consideração a modelagem de avaliação de risco. Com base nas características físico-químicas das matrizes estudadas, os valores das concentrações foram divididos em valor de referência e valor de intervenção. Os valores de referência e intervenção para HTP em solos, segundo a legislação holandesa, seriam 50 e 5000 mg kg<sup>-1</sup> de solo seco, respectivamente.

No Brasil, mais especificamente no Estado de São Paulo, a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) somente considera a concentração de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA), resultante da soma das concentrações de dez compostos considerados prioritários. A CETESB considera dois níveis de valores orientadores, o valor de prevenção e valor de intervenção que estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Valores orientadores de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA) para solo e água subterrânea no Estado de São Paulo.

Substância	Solo (mg kg <sup>-1</sup> de peso seco)					Água subterrânea (µg L <sup>-1</sup> )
	Referência de qualidade	Prevenção	Intervenção			
			Agrícola	Residencial	Industrial	
Antraceno	na	0,039	-	-	-	Intervenção
Benzo (a) antraceno	na	0,025	9	20	65	1,75
Benzo (k) fluoranteno	na	0,38	-	-	-	-
Benzo (g,h,i) perileno	na	0,57	-	-	-	-
Benzo (a) pireno	na	0,052	0,4	1,5	3,5	0,7
Criseno	na	8,1	-	-	-	-
Dibenzo (a,h) antraceno	na	0,08	0,15	0,6	1,3	0,18
Fenantreno	na	3,3	15	40	95	140
Indeno (1,2,3-c,d) pireno	na	0,031	2	25	130	0,17
Naftaleno	na	0,12	30	60	90	140
Σ =HPA	na	12,7	56,6	147,1	384,8	282,8

## 2.5 Cascalho de Perfuração

Durante a perfuração dos poços de petróleo o principal resíduo produzido é o cascalho de perfuração, que é constituído de partículas de rocha impregnadas com fluido de perfuração. Historicamente, a maior parte do cascalho de perfuração tem sido gerenciada através da disposição em aterros (poços em continente: on-shore) ou no mar (off-shore), no entanto sua reutilização em outras atividades pode ser vantajosa, desde que os teores de hidrocarbonetos, umidade, salinidade e argila estejam adequados à destinação pretendida. O uso como material de preenchimento em pavimentações de estradas, betume, asfalto ou em fábricas de cimentos estão entre as destinações mais frequentes do cascalho de perfuração (Ball et al., 2012).

Segundo Page et al. (2003) o destino final desse cascalho está condicionado ao teor de hidrocarbonetos total de petróleo, ao teor de umidade, à salinidade e à fração de argila existente. As principais limitações do reaproveitamento do cascalho de perfuração são decorrentes do fluido remanescente do processo de separação, desse modo, a destinação do cascalho é feita em função da composição do fluido utilizado e da eficiência de recuperação do fluido durante a separação do cascalho.

Atualmente as operações de perfuração dispõem de técnicas de separação do cascalho do fluido com boa recuperação, as centrífugas verticais, por exemplo, são capazes de deixar o

cascalho com menos de 8% de fluido (Pires et al., 2008). Isso repercute em redução de gastos com produção de fluido e minimiza impactos ambientais na disposição do cascalho.

Freitas (2013) e Magalhães (2011) ao avaliarem a composição química do cascalho de perfuração de dois poços de petróleo, em função das fases da perfuração e equipamentos utilizados na recuperação dos fluidos, constataram que, de acordo com a NBR 10.005:2004 (ABNT, 2004a) e a NBR 10.006:2004 (ABNT, 2004b), o cascalho de perfuração produzido nestes poços deve ser classificado como resíduo não perigoso não inerte (Classe IIA). Entre os elementos que classificam esse resíduo como não inerte no ensaio de solubilização os autores apontaram o arsênio, alumínio, bário, chumbo, cloreto, ferro, manganês, surfactantes e fenóis como críticos.

Entretanto, um estudo recente de Magalhães (2011) permitiu inferir que a composição e, portanto, a limitação química do reaproveitamento do cascalho de perfuração está associada ao equipamento utilizado na separação do fluido do cascalho de perfuração, durante o processo de recuperação do fluido. O cascalho produzido pelo secador tem maior influência do material geológico triturado (Al, B, Co, Cu, Cr, Fe, Mn e Ni que são elementos que fazem parte dos minerais primários que constituem as rochas, principalmente o alumínio, ferro e manganês). Enquanto que o cascalho gerado pela centrífuga tem maior associação com a composição do fluido de perfuração, isso se deve ao fato de que a filtragem da lama de perfuração é iniciada pelo secador e só depois pelas centrífugas.

A aplicação de resíduos de perfuração contaminados ao solo permite que a comunidade microbiana nativa do solo atue na lise dos constituintes dos resíduos, em um processo denominado de atenuação natural. Em solos agrícolas a aplicação controlada do resíduo permite que os microorganismos do solo façam a mineralização dos hidrocarbonetos, processo que pode ser acelerado com a adição de fertilizantes, compostos e esterco. Em relação aos metais, ocorre uma diluição e, conseqüentemente, uma potencial atenuação destes através da transformação e assimilação de diversos constituintes do cascalho.

A disposição controlada desses resíduos no solo pode ser uma alternativa com baixo custo, desde que não haja riscos de lixiviação e volatilização de contaminantes níveis perigosos (Ball et al., 2012). Após a aplicação dos resíduos, as concentrações de hidrocarbonetos no solo são monitoradas, sendo possível avaliar o progresso e determinar a necessidade de melhorar os processos de biodegradação. Praticamente, todos os constituintes de produtos petrolíferos são biodegradáveis, no entanto, quanto mais complexa a estrutura molecular do componente, mais difícil será o tratamento biológico. Esta afirmação significa que aplicações repetidas podem conduzir a acumulação de composto de elevado peso molecular (Callahan et al., 2002).

A utilização da compostagem tem sido estudada no tratamento de uma variedade de contaminantes derivados da indústria de petróleo e gás, com destaque para o tratamento de lamas de petróleo (McMillen et al., 1993), solo contaminado por hidrocarboneto de petróleo (Jorgensen et al., 2000), lamas oleosas (Ouyang et al., 2005) e solo contaminado com lama de perfuração (Rojas et al., 2007).

Outro estudo mostrou que compostagem de solo contaminado com lama de perfuração apresentou efeitos positivos quando adicionado carbono, ureia e fosfato de potássio para ajustar as condições de nutrientes para a atividade microbiana. Nesse estudo, a concentração de hidrocarboneto total de petróleo (HTP) do solo reduziu em 94% após 180 dias, enquanto que no tratamento sem aditivos a redução foi de 77%. Essa diferença é devida aos benefícios promovidos pelo ajuste das condições ideais para a atividade microbiana (Rojas et al., 2007).

A utilização da compostagem pode representar uma técnica prática e eficaz para gestão de resíduos da perfuração de poços. Entretanto, é importante se considerar a concentração de HTP do resíduo a ser tratado, de modo que seja possível reduzir essa

concentração a níveis aceitáveis para reutilização irrestrita do composto produzido (Ball et al., 2012).

## 2.6 Crambe (*Crambe abyssinica* H.) e sua Torta

O Crambe (*Crambe abyssinica* H.) é uma planta originária da região do Mar Mediterrâneo, espécie pertencente à família *Brassicaceae*, suas flores são amarelas ou brancas e produzem um grande número de sementes, com aproximadamente 38-40% de óleo. Foi introduzido nos Estados Unidos da América do Norte pela Estação Experimental de Agricultura de Connecticut em 1940 e, os estudos de avaliação como produto agrícola iniciaram no estado do Texas em 1958. Desde então, tem sido plantado em diversas áreas dos EUA (Onorevoli, 2012).

Houve um grande esforço das Instituições Norte Americanas, na década de 90, em busca de culturas alternativas não-alimentícias, voltada para produção de óleo, assim, desenvolveram-se pesquisas e parcerias com produtores, agroindústrias e cientistas para a introdução da cultura do crambe (Oliva, 2010). Neste mesmo período, no Brasil, foram introduzidos materiais vindos do México, os quais foram selecionados por pesquisadores da Fundação Mato Grosso do Sul, originando a primeira variedade de crambe (FMS Brilhante) no País, (Pintol, 2010, Falasca et al., 2010).

A cultura por ter ciclo curto, de 90 dias, é referenciada como ideal para plantios mais tardios, safrinha, utilizando-se para isso os mesmos maquinários da cultura da soja. Assim como destaca-se por apresentar tolerância à seca, baixa incidência de pragas e doenças, produtividade de grãos entre 1.000 e 1.500 kg ha<sup>-1</sup>. Atualmente existem cerca de 8 mil hectares com crambe entre os estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Mato Grosso e Paraná. Somente no MS existem aproximadamente 700 mil hectares potenciais para a produção desta cultura (Roscoe, 2012).

Durante prensagem mecânica de semente oleaginosa, é extraída grande parte do óleo para a produção de alimentos, do biodiesel ou lubrificante, como subproduto da prensagem é gerado uma grande quantidade de torta. A viabilidade econômica e ambiental da produção de biodiesel prevê o aproveitamento destas tortas, normalmente sendo constituída por grande fração proteica além de aminoácido e carboidrato (Soares et al., 2010).

Algumas tortas, como de girassol (*Helianthus annuus*) e de soja (*Glycine max*) podem ser destinadas a alimentação animal, no entanto, a torta de crambe, apesar de nutritiva, apresenta características não palatáveis, impossibilitado seu uso como alimento animal. Essa característica é devida a presença de glicosinolatos na ordem de 8 a 10% em massa de semente (Gastaldi et al., 1998). Por isso, dentre alternativas para o destino da torta de crambe, estudos estão sendo realizados visando seu uso como adubo.

### **3      CAPÍTULO I**

## **ESTUDOS DA TOLERÂNCIA À SALINIDADE DE VARIEDADES DE GIRASSOL**

### 3.1 RESUMO

A salinidade do solo é um dos grandes limitadores da produção agrícola em regiões áridas e semiáridas, pois naturalmente nestas condições o balanço entre a evapotranspiração e a precipitação pode favorecer o acúmulo de sais nos horizontes superficiais. A salinidade do solo afeta diretamente a produção da maior parte das culturas agrícolas de interesse comercial, além disso, em condições mais severas o excesso de sais no solo pode inclusive provocar a dispersão das argilas, comprometendo a estruturação do solo. Além dos solos naturalmente salinos, a utilização inadequada de alguns fertilizantes e de água imprópria para a irrigação tem provocado aumento das áreas com limitação por salinidade. O girassol é uma espécie de interesse econômico considerada moderadamente sensível à salinidade, porém estudos têm apontado que pode haver diferença entre as variedades disponíveis no mercado, nesse sentido a seleção de variedades mais tolerantes à salinidade poderia melhorar o desempenho do girassol nestas condições. Nesse sentido o objetivo desse experimento é avaliar e comparar o desenvolvimento inicial de nove variedades comerciais de girassol cultivadas em solução nutritiva com níveis de salinidade, visando elencar quanto à tolerância a salinidade. O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ. Utilizou-se um delineamento inteiramente casualizado, em parcela subdividida. Os níveis do primeiro fator foram cinco concentrações de sódio em solução nutritiva (controle, 25, 50, 75 e 100 mmol L<sup>-1</sup>) e o segundo fator foi composto por nove variedades de girassol (Aguará 04, Cf 101 Advana, Charrua, Embrapa 122, Neon, BRS 321, BRS 324, Hélio 253, Olisun). Plântulas foram cultivadas em sementeira com substrato arenoso e 10 dias após semeadura e transferidas para caixas plásticas de 36 L, contendo solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), modificada à 1/2 força iônica, com aeração constante (24 h). Depois de 12 dias de adaptação, a solução nutritiva foi substituída, sendo aplicados os tratamentos, com os seguintes níveis de salinidade: 0, 25, 50, 75, 100 mM de sódio na forma de NaCl. As plantas permaneceram nestas condições por 10 dias, quando foi mensurado o índice Falker<sup>®</sup> de clorofila *a*, *b* e total, biomassa de raiz e parte aérea, sendo determinados os teores de macronutrientes e sódio. A presença de Na<sup>+</sup> na solução nutritiva desfavorece a absorção de K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> pela planta, resultando em redução da concentração desses nutrientes, principalmente nas raízes onde ao mesmo tempo ocorre aumento do teor de Na<sup>+</sup>. O teor de N do girassol não é afetado pela salinidade em solução nutritiva, enquanto que o P na raiz pode aumentar em algumas variedades. Todas as variedades de girassol avaliadas foram influenciadas significativamente pela salinidade em solução nutritiva, no entanto a diferença entre as variedades permite concluir que a variedade BRS 321 é a sensível do grupo, enquanto que a variedade Neon é mais tolerante à salinidade.

**Palavras-chave:** Salino. *Helianthus annuus* L. Hidroponia.

### 3.2 ABSTRACT

Soil salinity is a major limiting agricultural production in arid and semiarid regions, because of course these conditions the balance between evaporation and precipitation may favor the accumulation of salts in the surface horizons. Soil salinity directly affects the production of most crops of commercial interest; in addition, under more severe conditions the excess salts in the soil can even cause the dispersion of the clays, compromising the soil structure. Besides the naturally saline soils, inadequate use of some fertilizers and water unsuitable for irrigation has caused increase in areas with limitation by salinity. The sunflower is a species of economic interest considered moderately sensitive to salinity, but studies have indicated that there may be differences between the varieties available in the market accordingly selection of varieties more tolerant to salinity could improve the performance of sunflower under these conditions . In this sense the objective of this study was to evaluate and compare the initial development of nine commercial sunflower varieties grown in nutrient solution with levels of salinity for lists them for their tolerance to salinity. The experiment was conducted in a greenhouse at the Department of Soil Science, Federal Rural University of Rio de Janeiro, RJ - Seropédica. We used a completely randomized design in a split plot. The levels of the first factor were five concentrations of sodium in the nutrient solution (control, 25, 50, 75 and 100 mmol L<sup>-1</sup>) and the second factor was composed of nine varieties of sunflower (Aguará 04, Cf 101 Advana, Charrua, Embrapa 122, Neon, BRS 321, BRS 324, Hélio 253, Olisun). Seedlings were grown in sandy soil with seed and 10 days after sowing and transferred to 36 L plastic boxes containing Hoagland e Arnon (1950 ), modified to half ionic strength, with constant aeration (24 h). After 12 days of adaptation, the solution was replaced, the treatments being applied with the following salinity levels: 0, 25, 50, 75 and 100 mM sodium as NaCl. The plants remained in these conditions for 10 days when measured up the Falker<sup>®</sup> chlorophyll index, a, b and total, biomass of roots and shoots, being given the macronutrient and sodium. The presence of Na<sup>+</sup> in the nutrient solution discourages uptake of K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> by the plant, thereby reducing the concentration of these nutrients, mainly in roots where while there is an increase of Na<sup>+</sup> content. The N content of the sunflower is not affected by salinity in nutrient solution, while P in the root may increase in some varieties. All sunflower varieties evaluated were significantly influenced by salinity in nutrient solution; however the difference between varieties can be concluded that BRS 321 variety is sensitive group, while Neon variety is more tolerant to salinity.

**Keywords:** Saline. *Helianthus annus* L. Hydroponics.

### 3.3 INTRODUÇÃO

A salinização dos solos é um fenômeno crescente em todo o mundo, principalmente em regiões áridas e semi-áridas, como consequência das condições climáticas e da atividade antrópica. Os efeitos negativos da salinidade estão diretamente relacionados ao crescimento e produtividade das plantas, que em casos extremos podem provocar perda total da cultura. Além dos aspectos relacionados aos vegetais, o excesso de sais no solo prejudica a própria estrutura do solo, provocando a dispersão de argilas e conseqüentemente diminuindo a permeabilidade do solo.

A salinidade do solo é um dos grandes limitadores de produção agrícola nas regiões com baixa precipitação anual, pois nestas condições o balanço entre as precipitações e a evapotranspiração favorece a ascensão capilar dos sais no perfil do solo, resultando em salinização dos horizontes superficiais. Uma analogia pode ser feita com limitações que ocorrem em solos intemperizados, onde a predominância de solos ácidos resulta em concentrações tóxicas de  $Al^{3+}$  no complexo sortivo, resultando em drásticas reduções de produtividade de espécies não adaptadas.

A utilização de técnicas agronômicas que permitam o cultivo de plantas não halófitas em solos com limitações por salinidade tem sido objeto de estudo de diversos grupos de pesquisa no Brasil e no mundo. Entre estas técnicas encontra-se a seleção de genótipos e/ou variedades mais tolerantes à salinidade.

Nesse sentido o objetivo desta etapa do trabalho é avaliar os efeitos provocados pela salinidade em solução nutritiva no desenvolvimento do girassol e selecionar entre nove variedades comerciais, a mais tolerante e a mais sensível.

Nesse sentido o objetivo desta etapa do trabalho é avaliar e comparar o desenvolvimento de nove variedades comerciais de girassol cultivadas em solução nutritiva, com níveis de salinidade, visando elencar as variedades quanto à tolerância à salinidade.

### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento desta fase (Fase I) foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, localizada nas coordenadas geográficas de 22° 45' 48,74" de latitude sul e 43° 41' 19,01" de longitude oeste. A casa de vegetação geminada é construída em aço galvanizado com pé direito de 3 metros, a cobertura com plástico difusor de luz com 0,15 mm de espessura e as laterais com tela anti-afídica.

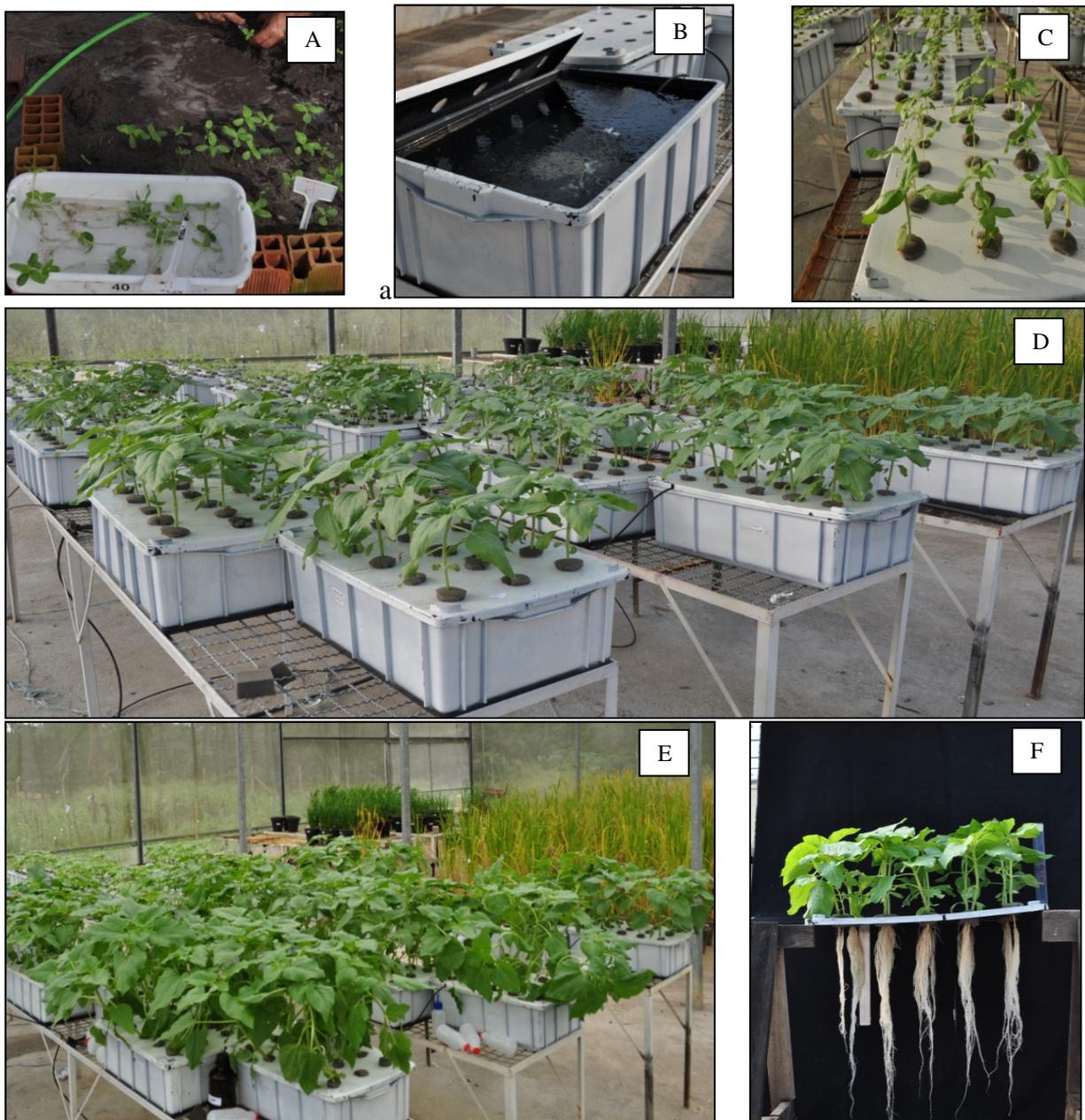
O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, em fatorial 5x9, com parcela subdividida e com três repetições. Os níveis do primeiro fator foram cinco concentrações de sódio em solução nutritiva (controle, 25, 50, 75 e 100 mmol L<sup>-1</sup>) obtidos pela diluição de NaCl, e o segundo fator composto por 9 variedades de girassol (Aguará 04, Cf 101 Advana, Charrua, Embrapa 122, Neon, BRS 321, BRS 324, Hélio 253, Olisun). A subparcela foi constituída de duas plantas de cada variedade, totalizando 18 plantas na parcela principal.

Plântulas de girassol foram cultivadas em sementeira com substrato arenoso e 10 dias após semeadura, transferidas para caixas plásticas de 36 L, contendo solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) modificada à 1/2 força iônica, com aeração constante (24 h). Depois de 12 dias de adaptação, a solução nutritiva foi substituída, sendo aplicados os tratamentos, com os seguintes níveis de salinidade: 0, 25, 50, 75, 100 mM de sódio na forma de NaCl. As plantas permaneceram nestas condições por 10 dias. Durante os 22 dias de condução do experimento em sistema hidropônico, monitorou-se diariamente o pH, condutividade elétrica (CE) e temperatura (°C) da solução nutritiva, sendo o pH corrigido para 6,0 sempre que necessário. Passados 10 dias da aplicação dos tratamentos, mensurou-se a altura das plantas, diâmetro do caule e o índice de clorofila Falker<sup>®</sup> (ICF) para a clorofila *a*, *b* e total utilizando um clorofilômetro eletrônico da marca Falker<sup>®</sup>. Após essas mensurações não destrutivas, as plantas foram coletadas e separadas em parte aéreas e sistema radicular, sendo pesadas (matéria fresca) e acondicionadas em sacos de papel para secagem em estufa de ventilação forçada à 65 °C. Após atingirem peso constante, foram novamente pesadas (matéria seca) e trituradas para determinação dos teores de macronutrientes e sódio.

Para a determinação dos macronutrientes e sódio no tecido vegetal, foram realizadas duas digestões ácidas a quente. A primeira, para determinação do nitrogênio total (N), utilizando 0,200 g de tecido vegetal, 1 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 2 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e 0,7g de mistura catalisadora, em tubos de borossilicato abertos sob temperatura máxima de 350 °C. Após digerida a amostra foi destilada conforme metodologia proposta por Tedesco (1995).

Paralelamente, outra digestão foi realizada para determinação dos demais nutrientes (P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) e do sódio (Na<sup>+</sup>). Para tanto, toma-se 0,250 g de tecido vegetal em tubo de teflon de 75 ml, adiciona-se 9 ml de HNO<sub>3</sub>, e após vedado, o tubo é submetido a aquecimento por micro-ondas. O digestor utilizado foi da marca MARS XPRESS<sup>®</sup>, programado de acordo com o método 3052A (USEPA, 1996) para potência de 1600 W, atingindo 180 °C em 5,5 minutos, permanecendo nesta temperatura por mais 9,5 minutos. Após digerida, a amostra foi diluída à 50 ml com água mili-Q<sup>®</sup>, sendo realizadas as leituras de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> por fotometria de emissão, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> por espectrofotometria de absorção atômica e o P por colorimetria do metavanadato (Malavolta et al., 1997).

Para controle de qualidade da abertura das amostras e das análises, foram analisadas adicionalmente, amostras de tecido vegetal (folha de tomate) com teores de metais certificados (National Institute of Standards and Technology - NIST). A recuperação de cada metal foi obtida pelo quociente entre os valores certificados com os encontrados nas análises.



**Figura 1.** Fotos do experimento. (A) Mudas sendo retiradas do substrato arenoso, sendo transplantadas para a solução nutritiva (B,C), permanecendo por 12 dias para adaptação (D), quando foram aplicados os tratamentos (E, F).

Foram feitas análises estatísticas para verificar a normalidade dos resíduos dos dados (teste Lilliefors) e para a homogeneidade das variâncias dos erros (Teste de Cochran e Bartlett). As variáveis que não atenderem à normalidade e homocedastia foram submetidas à transformação algébrica, para posterior análise de variância (Tabela 2). Quando significativos a 5% de probabilidade na análise de variância, os dados do fator quantitativo (salinidade) foram analisados por regressão linear simples e segmentada. As médias do fator qualitativo (variedades) foram comparadas pelo teste de Tukey à 5%. Todas as análises estatísticas foram realizadas no SAS<sup>®</sup> (*Statistical Analysis System*), sendo que os programas (*script's*) utilizados estão apresentados em anexo.

**Tabela 2.** Quadro de análise de variância (ANOVA) do fatorial com delineamento inteiramente casualizado (DIC) com parcela subdividida (Salinidade como parcela e variedades como subparcela).

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Salinidade (S)	4	SQ Salinidade	QM Salinidade	QM <sub>S</sub> /QM <sub>R(a)</sub>
Erro (a)	8	SQ Resíduo (a)	QM Resíduo (a)	-
Parcela	12	SQ Parcela	-	-
Variedades (V)	8	SQ Variedade	QM Variedade	QM <sub>V</sub> /QM <sub>R(b)</sub>
S*V	32	SQ Interação S*V	QM Interação S*V	QM <sub>V*S</sub> /QM <sub>R(b)</sub>
Erro (b)	82	SQ Resíduo (b)	QM Resíduo (b)	-
Total Geral	134	SQ Total	-	-

CV(a) = 100\*(SQ<sub>Resíduo (a)</sub>)<sup>1/2</sup>/média      CV(b) = 100\*(SQ<sub>resíduo(b)</sub>)<sup>1/2</sup>/média

Optou-se pelo arranjo experimental em parcela subdividida, tomando os níveis de salinidade como parcela principal e as variedades na subparcela, por permitir otimizar recursos e garantir padronização da solução nutritiva, pois as diferentes variedades foram cultivadas na mesma solução nutritiva. Estatisticamente, este arranjo permite isolar melhor cada fator, pois o resíduo é fragmentado, resultando em dois coeficientes de variação, um referente ao desvio padrão das parcelas e outro correspondente ao desvio padrão da subparcela.

O modelo matemático para o delineamento inteiramente casualizado com fatorial em parcela subdividida é representado pela seguinte equação:  $Y_{ij} = m + S_i + d_i + V_j + (S*V)_{ij} + e_{ij}$ . Onde:  $Y_{ij}$  é resposta da observação submetida aos níveis de salinidade e variedades;  $m$  representa a média geral;  $S_i$  é o efeito do fator salinidade;  $V_j$  o efeito do fator variedades;  $d_i$  representa o erro aleatório associado a parcela principal;  $(S*V)_{ij}$  equivale ao efeito da interação dos fatores salinidade e variedades;  $e_{ij}$  = erro aleatório total.

As regressões para o fator quantitativo foram ajustadas preferencialmente para regressões lineares simples (uni segmentar). Entretanto, os teores de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> na parte aérea das plantas de girassol apresentaram melhor ajuste utilizando-se regressão linear segmentada. Para tanto utilizou-se um procedimento no programa SAS (SAS Institute Inc., 2010) apresentado em anexo.

### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 é apresentado o resumo da análise de variância das variáveis fenológicas como altura das plantas, diâmetro do caule (DC), massa de raízes fresca (MRF) e seca (MRS), e massa de parte aérea fresca (MPAF) e seca (MPAS), além da porcentagem de matéria seca na raiz (%MSR) e parte aérea (%MSPA). O aumento da salinidade em solução nutritiva influenciou praticamente todas as variáveis fenológicas, com exceção para a MRF e MRS, que não foram influenciadas em nenhuma variedade. Para as demais variáveis fenológicas, a influência da salinidade foi diferenciada entre as variedades de girassol, como pode ser observado no desdobramento da salinidade dentro de cada variedade.

**Tabela 3.** Valores quadrado médio da análise de variância das variáveis fenológicas de variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade.

Fonte de variação	Altura <sup>ln</sup>	DC	MRF <sup>ln</sup>	MPAF <sup>ln</sup>	MRS <sup>ln</sup>	MPAS <sup>ln</sup>	%MSR	%MSPA
Salinidade(S)	0,23**	0,37**	0,25 <sup>ns</sup>	1,78**	0,18 <sup>ns</sup>	0,63**	1,20*	16,60**
Aguará 04	0,01 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	0,16*	0,05 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	1,41**	1,95**
BRS 321	0,02 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	0,19*	0,02 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,50 <sup>ns</sup>	1,07**
BRS 324	0,07**	0,05*	0,10 <sup>ns</sup>	0,18*	0,09 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,34 <sup>ns</sup>	2,64**
Cf 101 Advana	0,01 <sup>ns</sup>	0,06*	0,10 <sup>ns</sup>	0,21*	0,15 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,27 <sup>ns</sup>	0,98**
Charrua	0,02 <sup>ns</sup>	0,06*	0,06 <sup>ns</sup>	0,26**	0,08 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	0,34 <sup>ns</sup>	1,74**
Embrapa 122	0,05**	0,07**	0,02 <sup>ns</sup>	0,34**	0,09 <sup>ns</sup>	0,20*	0,68 <sup>ns</sup>	1,62**
Hélio 253	0,09**	0,10**	0,25 <sup>ns</sup>	0,45**	0,18 <sup>ns</sup>	0,22*	0,21 <sup>ns</sup>	3,52**
Neon	0,04**	0,04 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	0,20**	0,19 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	0,75 <sup>ns</sup>	2,57**
Olisun	0,05**	0,07**	0,07 <sup>ns</sup>	0,23**	0,04 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	1,50**	2,08**
Variedades(V)	0,23**	0,38**	1,41**	1,11**	1,02**	1,26**	8,90**	0,80**
Interação S*V	0,02 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,60*	0,37 <sup>ns</sup>
CV (a)	2,5	6,5	11	4,9	11	18	13	9,5
CV(b)	2,9	5,9	11	6,4	9,2	20	15	5,7

PA: Parte aérea da planta; <sup>ln</sup>: dados transformados em Ln (x); \*, \*\*, : Fator significativo pelo teste F com p<0,05 e 0,01, respectivamente; <sup>ns</sup>: não significativo.

As variedades Embrapa 122 e Hélio 253 foram consideradas as mais sensíveis, por terem sido prejudicadas na maior parte das variáveis fenológicas (altura, DC, MSPA e %MSPA). A variedade Olisun apresentou resultados similares, no entanto, diferenciou-se das anteriores por não ter sido influenciada na MPAS. Já as variedades Aguará 04, BRS 321 e Neon, apesar de terem redução da MPAF, podem ser consideradas menos sensíveis à salinidade em comparação às demais variedades.

Ainda em relação à Tabela 3, tomando as variedades como fonte de variação, é possível verificar que elas diferem entre si para todas as variáveis fenológicas avaliadas. A interação entre os fatores salinidade e variedades não foi significativa para a maior parte das variáveis fenológicas, assim é possível supor que as diferenças verificadas entre as variedades perpetua com a aplicação da salinidade.

Para melhorar o entendimento dos efeitos da salinidade no desenvolvimento das plantas de girassol na Tabela 4 são apresentadas as equações de regressão da MPAF, MPAS e

%MSPA em função dos níveis de salinidade em solução nutritiva. Avaliando os parâmetros das regressões é possível verificar a existência de diferenças entre os coeficientes lineares e angulares das equações corroborando a interpretação da análise de variância. Os coeficientes lineares permitem comparar as variedades na ausência da salinidade (ou seja  $x=0$ ), nesse sentido, a variedade BRS 321 apresenta maior crescimento em MPAF, seguida das variedades: Olisun, Cf 101 Advana, BRS 324, Embrapa 122, Aguará 04, Hélio 253, Neon e Charrua.

**Tabela 4.** Parâmetros da regressão da MPAF, MPAS e %MSPA das variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade.

Variedade	MPAF		MPAS		%MSPA	
	g planta <sup>-1</sup>					
SE	a ± 5,6	b ± 0,091	a ± 0,4	b ± 0,007	a ± 0,2	b ± 0,003
Aguará 04	$\hat{y} = 60,3 - 0,252x$ ** $r^2 = 0,83$		$\bar{y} = 3,6$		$\hat{y} = 6,7 + 0,020x$ ** $r^2 = 0,97$	
BRS 321	$\hat{y} = 99,6 - 0,438x$ ** $r^2 = 0,92$		$\hat{y} = 7,1 - 0,022x$ * $r^2 = 0,89$		$\hat{y} = 7,1 + 0,015x$ ** $r^2 = 0,95$	
BRS 324	$\hat{y} = 77,0 - 0,331x$ ** $r^2 = 0,89$		$\bar{y} = 4,3$		$\hat{y} = 6,2 + 0,020x$ ** $r^2 = 0,73$	
CF 101 Advana	$\hat{y} = 81,9 - 0,376x$ ** $r^2 = 0,90$		$\hat{y} = 5,7 - 0,019x$ * $r^2 = 0,74$		$\hat{y} = 7,0 + 0,014x$ ** $r^2 = 0,94$	
Charrua	$\hat{y} = 45,4 - 0,229x$ ** $r^2 = 0,89$		$\hat{y} = 2,9 - 0,011x$ * $r^2 = 0,70$		$\hat{y} = 6,3 + 0,018x$ ** $r^2 = 0,89$	
Embrapa 122	$\hat{y} = 72,0 - 0,400x$ ** $r^2 = 0,81$		$\hat{y} = 4,7 - 0,019x$ * $r^2 = 0,65$		$\hat{y} = 6,5 + 0,018x$ ** $r^2 = 0,94$	
Hélio 253	$\hat{y} = 59,0 - 0,327x$ ** $r^2 = 0,70$		$\hat{y} = 3,9 - 0,015x$ * $r^2 = 0,42$		$\hat{y} = 6,4 + 0,026x$ ** $r^2 = 0,87$	
Neon	$\hat{y} = 46,9 - 0,182x$ ** $r^2 = 0,61$		$\bar{y} = 2,7$		$\hat{y} = 6,1 + 0,022x$ ** $r^2 = 0,92$	
Olisun	$\hat{y} = 82,2 - 0,410x$ ** $r^2 = 0,85$		$\hat{y} = 5,4 - 0,018x$ * $r^2 = 0,63$		$\hat{y} = 6,4 + 0,021x$ ** $r^2 = 0,96$	

\*, \*\*: Equação significativa pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente.

A MPAS das variedades de girassol (Tabela 4) apresentou mesma tendência, no entanto, devido a diferença na %MSPA observada entre as variedades, houve algumas inversões na sequência apresentada. A variedade com maior acúmulo de MPAS na ausência da salinidade foi a BRS 321, seguida da CF 101 Advana, Aguará 04, Embrapa 122, Hélio 253, Olisun, Charrua, BRS 324 e Neon.

Apesar das diferenças observadas entre as variedades quanto ao crescimento na ausência da salinidade na solução nutritiva evidenciada pelos coeficientes lineares, para selecionarmos as variedades de girassol quanto à tolerância salina é necessário avaliar o coeficiente angular das equações de regressão. Este parâmetro informa a taxa de crescimento da planta em função da salinidade, portanto, este coeficiente diminui com o aumento da sensibilidade salina das variedades (quanto menor o coeficiente, maior a sensibilidade à salinidade).

Portanto, avaliando o coeficiente angular das equações de regressão da MPAF do girassol (Tabela 4) constata-se que todas as variedades estudadas apresentaram redução significativa com o aumento da concentração da salinidade na solução nutritiva. A diferença entre as variedades permite classificar a Neon como a mais tolerante à salinidade (maior coeficiente angular), seguida das variedades: Charrua, Aguará 04, Hélio 253, BRS 324, Cf 101 Advana, Embrapa 122, Olisun e BRS 321.

Para a MPAS do girassol, observou-se que as variedades Aguará 04, BRS 324 e Neon não foram influenciadas significativamente pela salinidade em solução nutritiva, visto que as equações de regressão não foram significativas para estas variedades (Tabela 4). Entre as variedades influenciadas pela salinidade quanto à massa de parte aérea seca, a Charrua foi a mais tolerante, seguida da Hélio 253, Olisun, Embrapa 122, Cf 101 Advana e BRS 321.

Apesar das variações nas sequências de tolerância para as variáveis MPAF e MPAS apresentadas acima, pode-se destacar que em ambas as avaliações a variedade Neon apresentou-se como a mais tolerante e as variedades Embrapa 122, Cf 101 Advana, Olisun e

BRS 321, sempre entre as 4 mais sensíveis. Tomando esta tendência como verdadeira, pode-se avaliar que a variedade mais tolerante (Neon) apresenta o menor valor de porcentagem de matéria seca de parte aérea na ausência da salinidade e uma das maiores taxas de aumento desse índice com a salinidade em solução nutritiva (Tabela 4). Isso significa dizer que esta variedade apresenta caracteristicamente, maior teor absoluto de água em sua composição (93,9%) e que este diminui com a salinidade da solução nutritiva (91,7% no maior nível de salinidade).

Da mesma forma, as variedades mais sensíveis (Embrapa 122, Cf 101 Advana, Olisun e BRS 321) apresentam maior %MSPA e apresentam menor alteração desse índice com a salinidade em solução nutritiva (coeficiente angular reduzido).

Conforme discutido anteriormente no quadro de análise de variância, a MRF e MRS do girassol não foram influenciadas significativamente pela salinidade em solução nutritiva. Entretanto, a comparação entre as variedades (independentemente da salinidade) evidencia que elas diferem entre si quanto a MRF, MRS e %MSR (Tabela 5). A variedade com maior acúmulo de MRF foi a Cf 101 Advana, seguida das variedades BRS 321 e Embrapa 122 que foram similares entre si. As variedades Aguará 04, BRS 324, Charrua, Neon e Olisun apresentaram menor acúmulo MRF, sendo similares entre si.

**Tabela 5.** Média da MRF, MRS e %MSR das variedades de girassol independentemente da salinidade em solução nutritiva.

Variedade	MRF		MRS		%MSR	
	-----g planta <sup>-1</sup> -----					
Aguará 04	24,6	c	0,92	b	3,86	c
BRS 321	30,8	b	1,45	a	4,81	b
BRS 324	21,0	c	1,01	b	4,85	b
CF 10 Advana	39,4	a	1,38	a	3,52	c
Charrua	19,2	c	0,72	c	3,75	c
Embrapa 122	29,1	b	0,95	b	3,35	c
Hélio 253	14,2	d	0,76	c	5,42	a
Neon	22,5	c	0,73	c	3,38	c
Olisun	22,0	c	1,00	b	4,75	b

Teste de média Scot Knot com  $p < 0,05$

As variedades de girassol avaliadas também diferiram entre si quanto à MRS (Tabela 5), apesar de não terem sido influenciadas significativamente pela salinidade em solução nutritiva. As variedades BRS 321 e Cf 101 Advana apresentaram maior acúmulo de MRS, seguidas da Aguará 04, BRS 324, Embrapa 122 e Olisun, que foram similares entre si. As variedades Charrua, Hélio 253 e Neon tiveram o menor acúmulo de MRS.

A %MSR (Tabela 5) também foi diferenciada entre as variedades, apesar de não ter sido influenciado pela salinidade. A variedade Hélio 253 diferiu das demais apresentando 5,4% de matéria seca, enquanto que a BRS 321, BRS 324 e Olisun foram similares entre si, com valores inferiores a esse. Já as variedades Churrúa, Hélio 253 e Neon tiveram os menores teores de massa seca nas raízes.

Outras informações relevantes do ponto de vista fenológico podem ser consideradas como a altura da planta e DC. Estes dados apresentam elevada correlação com o crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas. Avaliando o efeito da salinidade, independentemente das variedades, houve redução significativa da altura e DC; entre as doses extremas a redução foi de 18% da altura e de 25% do DC. A Figura 2 ilustra as plantas de girassol em função da salinidade em solução nutritiva, sendo que as variedades estão aleatorizadas na parcela principal.



**Figura 2.** Fotos das parcelas principais com as 9 variedades de girassol (aleatorizadas) sob níveis de salinidade (controle, 25, 50, 75 e 100 mM de sódio) em solução nutritiva.

Nesse sentido na Tabela 6 são apresentados os parâmetros das regressões dos dados de altura e DC das variedades de girassol em função da salinidade em solução nutritiva. De acordo com a regressão, somente a variedade Aguará 04 não teve sua altura influenciada pela salinidade, entretanto, considerando a análise de variância (Tabela 3) as variedades BRS 321, Cf 101 Advana e Charrua também não foram influenciadas significativamente nesta variável. As demais apresentaram redução significativa de altura, sendo que a Hélio 253 foi a variedade mais prejudicada, tendo sua altura reduzida em 31% no maior nível de salinidade (100 mM) quando comparada ao controle.

**Tabela 6.** Parâmetros da regressão da altura e diâmetro do caule das variedades de girassol cultivado em níveis de salinidade.

Variedade	Altura (cm)	DC(mm)
Aguará 04	$\hat{y} = 34,6$	$\hat{y} = 9,11$
BRS 321	$\hat{y} = 48,1 - 0,09x^{**} \quad r^2 = 0,92$	$\hat{y} = 13,2 - 0,025x^* \quad r^2 = 0,81$
BRS 324	$\hat{y} = 46,4 - 0,10x^{**} \quad r^2 = 0,45$	$\hat{y} = 12,2 - 0,033x^* \quad r^2 = 0,93$
CF 101 Advana	$\hat{y} = 34,6 - 0,05x^* \quad r^2 = 0,88$	$\hat{y} = 11,9 - 0,033x^* \quad r^2 = 0,90$
Charrua	$\hat{y} = 33,8 - 0,06x^* \quad r^2 = 0,75$	$\hat{y} = 7,89$
Embrapa 122	$\hat{y} = 41,7 - 0,08x^{**} \quad r^2 = 0,51$	$\hat{y} = 11,7 - 0,037x^{**} \quad r^2 = 0,79$
Hélio 253	$\hat{y} = 37,9 - 0,12x^{**} \quad r^2 = 0,79$	$\hat{y} = 9,6 - 0,028x^* \quad r^2 = 0,46$
Neon	$\hat{y} = 34,8 - 0,07x^{**} \quad r^2 = 0,51$	$\hat{y} = 7,76$
Olisun	$\hat{y} = 38,7 - 0,10x^{**} \quad r^2 = 0,92$	$\hat{y} = 13,1 - 0,035x^{**} \quad r^2 = 0,71$

\*, \*\*: Equação significativa pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente. Teste realizado com dados transformados em  $\ln(x)$ .

Em relação ao DC (Tabela 6), as variedades Aguará 04, Charruá e Neon não foram influenciadas pela salinidade apesar da análise de variância apontar que a BRS 321 também não tenha sofrido os efeitos da salinidade. Todas as demais tiveram redução significativa do DC, sendo que a Embrapa 122 foi a mais afetada, com redução de 31% na maior dose em comparação ao controle.

O DC, assim como a altura, são características importantes pois estão associadas à tolerância ao acamamento em culturas como o girassol. Alguns estudos de melhoramento visam aprimorar a razão entre a altura da planta e o diâmetro do caule, pois podem melhorar a estabilidade da planta ao vento. Desconsiderando a influência da salinidade, há diferença entre as variedades para esta variável, o que provavelmente é resultante dos programas de melhoramento que cada material genético foi submetido.

Na Tabela 7 é apresentado o resumo do quadro de análise da variância do índice de clorofila Falker (ICF) para as clorofilas *a*, *b* e total (ICF<sub>a</sub>, ICF<sub>b</sub>, ICF<sub>t</sub>) das folhas das

variedades de girassol sob níveis de salinidade em solução nutritiva. De acordo com o nível de significância do quadrado médio, contata-se a salinidade em solução nutritiva e as variedades de girassol influenciaram significativamente no ICFa, ICFb e ICFt. Houve interação significativa entre os fatores, exigindo a distinção das variedades individualmente. No desdobramento da análise de variância, avaliando o efeito da salinidade em cada variedade, contata-se que a Aguará 04, Cf 101 Advana não foram influenciadas pela salinidade para nenhum destes índices. As variedades Neon e Olisun não foram influenciadas somente para o ICFa.

**Tabela 7.** Valores do quadrado médio da ANOVA do índice de clorofila Falker® (a, b e total) das variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade.

Fonte de variação	ICFa	ICFb	ICFt
Salinidade (S)	6,59*	17,73**	45,9**
Salinidade/ Aguará 04	0,37 <sup>ns</sup>	1,45 <sup>ns</sup>	3,26 <sup>ns</sup>
Salinidade/ BRS 321	4,14**	7,51**	22,6**
Salinidade/ BRS 324	2,16**	3,52*	10,9*
Salinidade/ CF 101 Advana	0,54 <sup>ns</sup>	1,93 <sup>ns</sup>	4,50 <sup>ns</sup>
Salinidade/ Charrua	1,52*	5,47**	12,7**
Salinidade/ Embrapa 122	1,68*	5,43**	13,1**
Salinidade/ Hélio 253	3,66**	9,63**	24,6**
Salinidade/ Neon	1,14 <sup>ns</sup>	4,70**	10,4*
Salinidade/ Olisun	1,72 <sup>ns</sup>	3,19*	8,17*
Variedades (V)	2,93**	8,17**	8,05**
Interação S*V	1,22**	3,14**	3,16**
CV (a)	4,6	9,4	6,2
CV(b)	2,8	8,6	4,6

\*, \*\*: Fator significativo pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente; <sup>ns</sup>: não significativo.

As demais variedades foram afetadas significativamente pela salinidade, sendo que o melhor entendimento do efeito da salinidade no ICF pode ser obtido avaliando os parâmetros da regressão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8.** Parâmetros da regressão do índice de clorofila Falker® (a, b e total) das variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade.

Variedade	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
Aguará 04	$\bar{y} = 25,4$	$\bar{y} = 13,0$	$\bar{y} = 38,4$
BRS 321	$\hat{y} = 23,5 + 0,0216x$ ** $r^2 = 0,53$	$\hat{y} = 10,8 + 0,0275x$ ** $r^2 = 0,47$	$\hat{y} = 34,3 + 0,0492x$ ** $r^2 = 0,50$
BRS 324	$\bar{y} = 24,7$	$\bar{y} = 12,1$	$\bar{y} = 36,8$
Cf 101 Advana	$\bar{y} = 25,9$	$\bar{y} = 14,2$	$\bar{y} = 40,1$
Charrua	$\hat{y} = 24,6 + 0,0169x$ ** $r^2 = 0,88$	$\hat{y} = 11,9 + 0,0325x$ ** $r^2 = 0,90$	$\hat{y} = 36,6 + 0,0494x$ ** $r^2 = 0,90$
Embrapa 122	$\hat{y} = 24,5 + 0,0135x$ * $r^2 = 0,51$	$\hat{y} = 11,5 + 0,0273x$ ** $r^2 = 0,64$	$\hat{y} = 36,0 + 0,0407x$ ** $r^2 = 0,60$
Hélio 253	$\hat{y} = 24,4 + 0,0127x$ ** $r^2 = 0,21$	$\hat{y} = 12,5 + 0,0166x$ * $r^2 = 0,13$	$\hat{y} = 36,9 + 0,0294x$ * $r^2 = 0,16$
Neon	$\hat{y} = 25,2 + 0,1289x$ * $r^2 = 0,68$	$\hat{y} = 12,7 + 0,0269x$ ** $r^2 = 0,73$	$\hat{y} = 37,9 + 0,0398x$ ** $r^2 = 0,72$
Olisun	$\hat{y} = 24,7 + 0,0128x$ * $r^2 = 0,66$	$\hat{y} = 11,9 + 0,0219x$ ** $r^2 = 0,71$	$\hat{y} = 36,6 + 0,0348x$ ** $r^2 = 0,70$

\*, \*\*: Equação significativa pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente.  $\bar{y}$ : média dos dados.  $\hat{y}$ : estimativa do modelo.

As variedades que foram afetadas apresentaram ajustes de regressão linear com coeficientes angulares positivos, representados aumento no ICF com o aumento do nível de salinidade em solução nutritiva. Vale salientar que os coeficientes apresentam valores reduzidos o que significa dizer que o incremento em clorofila nas folhas das plantas é

pequeno, de 5 a 14% de aumento entre as plantas cultivadas com 100 mM de sódio em relação ao controle. A detecção de efeito significativo apesar de os coeficientes serem baixos é resultado do reduzido coeficiente de variação obtido nestas análises.

Na Tabela 9 é apresentado o resumo do quadro de análise da variância dos teores de macronutrientes e sódio da raiz e na parte aérea (PA) das variedades de girassol cultivadas sob níveis de salinidade em solução nutritiva. Com base nos valores do quadrado médio e respectivas significâncias é possível constatar que a salinidade influenciou significativamente nos teores de potássio ( $K^+$ ), cálcio ( $Ca^{2+}$ ), magnésio ( $Mg^{2+}$ ) e sódio ( $Na^+$ ) tanto na raiz quanto na parte aérea das plantas de girassol. Para o teor de N, constatou-se efeito significativo da salinidade somente na parte aérea, enquanto que para o P o efeito foi significativo somente no sistema radicular.

**Tabela 9.** Valores do quadrado médio da ANOVA com o respectivo nível de significâncias pelo teste F dos teores de macronutrientes e sódio das variedades de girassol sob níveis de salinidade.

Fonte de variação	Nitrogênio		Fósforo		Potássio		Cálcio		Magnésio		Sódio	
	Raiz	PA	Raiz <sup>ln</sup>	PA	Raiz <sup>ln</sup>	PA	Raiz	PA	Raiz <sup>ln</sup>	PA <sup>ln</sup>	Raiz	PA
Salinidade(S)	10,6 <sup>ns</sup>	52,9*	0,25**	2,52 <sup>ns</sup>	2,17**	885**	26,7**	78,2**	1,17**	0,36**	3104**	485**
Aguará 04	9,14 <sup>ns</sup>	23,1*	0,06*	0,82*	0,43**	92,6 <sup>ns</sup>	4,91**	21,3**	0,32**	0,09**	446**	45,9**
BRS 321	10,5 <sup>ns</sup>	12,5 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	0,62 <sup>ns</sup>	0,22**	42,7 <sup>ns</sup>	5,92**	4,46 <sup>ns</sup>	0,10**	0,01 <sup>ns</sup>	409**	22,3**
BRS 324	9,26 <sup>ns</sup>	5,24 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,15**	443**	3,08**	1,48 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	319**	57,4**
Cf 101 Advana	3,22 <sup>ns</sup>	19,9 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	1,34**	0,44**	176**	4,46**	11,1*	0,24**	0,06**	341**	35,5**
Charrua	5,21 <sup>ns</sup>	5,55 <sup>ns</sup>	0,09**	1,01*	0,34**	139*	2,90**	14,8*	0,31**	0,01 <sup>ns</sup>	352**	99,8**
Embrapa 122	10,3 <sup>ns</sup>	35,6**	0,07*	1,09*	0,19**	262**	6,71**	21,8**	0,16**	0,12**	431**	108**
Hélio 253	15,3 <sup>ns</sup>	16,3 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>ns</sup>	0,43**	499**	0,43 <sup>ns</sup>	23,3**	0,03 <sup>ns</sup>	0,13**	231**	98,5**
Neon	11,9 <sup>ns</sup>	11,1 <sup>ns</sup>	0,07*	1,41**	0,11**	76,0 <sup>ns</sup>	3,90**	21,1**	0,04 <sup>ns</sup>	0,16**	313**	70,1**
Olisun	2,25 <sup>ns</sup>	7,11 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,18**	87,8 <sup>ns</sup>	1,60*	1,67 <sup>ns</sup>	0,18**	0,01 <sup>ns</sup>	492**	37,4**
Variedades(V)	35,2**	34,5**	0,62**	5,78**	0,12**	1256**	2,63**	25,4**	0,12**	0,24**	66,4**	48,9**
Interação S*V	8,31 <sup>ns</sup>	10,5 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,54*	0,04**	117**	0,89 <sup>ns</sup>	5,37 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	0,03**	29,1*	11,4**
CV (a)	10,0	9,4	7,3	16	4,3	11	13	6,8	28	3,5	27	39
CV(b)	11,3	8,0	7,1	9,5	3,5	8,0	10	8,1	20	6,5	21	35
Recuperação Nist	92%		98%		97%		111%		115%		92%	

<sup>ln</sup>: dados transformados em Ln (x); \*, \*\*, : Fator significativo pelo teste F com p<0,05 e 0,01, respectivamente; <sup>ns</sup>: não significativo. Recuperação: Concentração do padrão Nist / concentração determinada.

As variedades diferiram significativamente entre si em relação ao teor de macronutrientes e  $Na^+$ , assim como houve interação significativa para alguns nutrientes. Para facilitar a interpretação, a análise de variância foi desdobrada de modo que o efeito da salinidade fosse testado separadamente em cada variedade. Abstraindo qualquer hierarquia de relevância entre os nutrientes, ou seja, atribuindo mesmo grau de importância entre eles, pode-se verificar que as variedades Olisun e BRS 321 foram menos influenciadas pela salinidade em solução nutritiva. Em análise mais detalhada, pode-se verificar que os teores de macronutrientes destas variedades só foram influenciados nas raízes, enquanto que a concentração na parte aérea não foi afetada. Esta informação pode indicar que estas variedades possuem mecanismos mais aprimorados de tolerância à salinidade.

Para detalhar os efeitos da salinidade em solução nutritiva no que se refere ao teor de macronutrientes é apresentado abaixo uma série de tabelas com os parâmetros das regressões de cada macronutriente na raiz e na parte aérea para todas as variedades de girassol avaliadas.

Em relação ao N (Tabela 10), conforme apresentado na análise de variância, os efeitos da salinidade foram discretos, sendo significativos apenas na parte aérea das variedades Embrapa 122 e Hélio 253. Para ambas houve redução do teor de N com o aumento da

salinidade em solução nutritiva. Em comparação ao controle, o maior nível da salinidade resultou em redução de 14 e 15% no teor de N para as variedades Embrapa 122 e Hélio 253, respectivamente. O efeito da salinidade para as demais variedades foi insignificante e a comparação entre as variedades através do teste de médias indica que a BRS 324 diferiu da Neon, Olisun Cf 101 Advana e Charrua que foram similares entre si. As demais variedades foram semelhantes pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. Nas raízes somente as variedades Aguará 04 e Cf 101 Advana diferiram da Olisun e BRS 324 que foram similares entre si.

**Tabela 10.** Parâmetros da regressão do teor de N total da raiz parte aérea das variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade

Variedade	Raíz		Parte aérea
	g kg <sup>-1</sup>		
Aguará 04	$\bar{y} = 23,58$		$\bar{y} = 37,56$
BRS 321	$\bar{y} = 24,27$		$\bar{y} = 36,96$
BRS 324	$\bar{y} = 27,56$		$\bar{y} = 35,35$
CF 101 Advana	$\bar{y} = 23,64$		$\bar{y} = 39,39$
Charrua	$\bar{y} = 24,59$		$\bar{y} = 39,43$
Embrapa 122	$\bar{y} = 26,08$		$\hat{y} = 39,9 - 0,0555x$ * $r^2 = 0,41$
Hélio 253	$\bar{y} = 24,15$		$\hat{y} = 39,1 - 0,0575x$ * $r^2 = 0,95$
Neon	$\bar{y} = 25,46$		$\bar{y} = 38,9$
Olisun	$\bar{y} = 27,43$		$\bar{y} = 39,36$

\*, \*\*: Equação significativa pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente.  $\bar{y}$ : média dos dados.  $\hat{y}$ : estimativa do modelo.

O teor médio de N observado na parte aérea do girassol foi 37,8 g kg<sup>-1</sup>, perfazendo um valor pouco acima do que Malavolta (1997) recomenda para a folha do terço superior do girassol no início do florescimento, onde o teor de N ideal seria na faixa entre 33 a 35 g kg<sup>-1</sup>. Mesmo nas variedades que sofreram redução do teor de N devido a salinidade (Embrapa 122 e Hélio 253) o efeito não foi suficiente para criar condição de deficiência de N na planta. Os teores de N relativamente elevados provavelmente são devidos à boa condição nutricional à que as plantas foram submetidas.

Para o P total (Tabela 11) a tendência da salinidade de influenciar apenas uma parte das variedades permanece em concordância à análise de variância. O teor de P nas raízes das variedades Aguará 04, BRS 324, Cf 101 Advana, Hélio 253 e Olisun não foram influenciados pela salinidade. Nas demais variedades a tendência foi de aumento linear com a salinidade. No maior nível de salinidade o incremento de P foi de 30; 44; 47 e 31% em relação ao controle para as variedades BRS 321, Churrua, Embrapa 122 e Neon, respectivamente.

Na parte aérea a influência da salinidade no teor de P só não foi observada para as variedades BRS 324, Hélio 253 e Olisun. Já as variedades Churrua e Embrapa 122, que apresentaram melhor ajuste para uma equação quadrática, tiveram tendência de redução no teor de P, enquanto que a Aguará 04 e BRS 321 aumentaram significativamente (Tabela 11). O teor médio de P na parte aérea do controle foi de 5,7 g kg<sup>-1</sup>, estando dentro da faixa recomenda para folhas de girassol (Malavolta, 1997) que é de 4 a 7 g kg<sup>-1</sup>. Mesmo na condição de maior nível de salinidade o teor de P na parte aérea ficou dentro da faixa estabelecida para todas as variedades avaliadas.

**Tabela 11.** Parâmetros da regressão do teor de P total da raiz e parte aérea das variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade.

Variedade	Raiz		Parte aérea	
	g kg <sup>-1</sup>			
Aguará 04	$\bar{y} = 7,32$		$\hat{y} = 4,82 + 0,0087x^*$	$r^2 = 0,43$
BRS 321	$\hat{y} = 8,96 + 0,0273x^{**}$	$r^2 = 0,63$	$\hat{y} = 5,95 + 0,0111x^{**}$	$r^2 = 0,94$
BRS 324	$\bar{y} = 11,55$		$\bar{y} = 6,28$	
CF 101 Advana	$\bar{y} = 8,28$		$\hat{y} = 5,14 + 0,0160x^{**}$	$r^2 = 0,90$
Charrua	$\hat{y} = 5,95 + 0,0264x^{**}$	$r^2 = 0,60$	$\hat{y} = 5,6 - 0,0359x^* + 0,0004x^{**}$	$r^2 = 0,83$
Embrapa 122	$\hat{y} = 5,56 + 0,0264x^*$	$r^2 = 0,95$	$\hat{y} = 4,8 - 0,0320x^* + 0,0004x^{**}$	$r^2 = 0,87$
Hélio 253	$\bar{y} = 9,23$		$\bar{y} = 6,36$	
Neon	$\hat{y} = 5,78 + 0,0179x^*$	$r^2 = 0,43$	$\hat{y} = 5,12 + 0,0088x^*$	$r^2 = 0,26$
Olisun	$\bar{y} = 10,22$		$\bar{y} = 6,33$	

\*, \*\*: Equação significativa pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente.  $\bar{Y}$ : média dos dados.  $\hat{Y}$ : estimativa do modelo.

O teor de  $Ca^{2+}$  nas raízes foi reduzido significativamente com o aumento da salinidade em praticamente todas as variedades de girassol avaliadas (excessão para a Hélio 253). A maior taxa de redução (menor coeficiente angular) foi observada na variedade Embrapa 122, seguida da BRS 321 com redução de 36% entre o controle e o maior nível de salinidade (Tabela 12). No entanto, na parte aérea a variedade BRS 321 não foi influenciada pela salinidade, assim como a BRS 324 e Olisun. As demais variedades apresentaram redução significativa com a salinidade, destaque para a Hélio 253 que apresentou menor coeficiente angular, resultando em redução de 26% do teor de  $Ca^{2+}$  no maior nível de salinidade em relação ao controle. O teor de  $Ca^{2+}$  observado na parte aérea do controle foi superior a  $28 \text{ g kg}^{-1}$ , estando acima do que Malavolta (1997) recomenda para folhas de girassol, sendo normal a faixa entre  $17$  a  $22 \text{ g kg}^{-1}$ . Mesmo para a variedade que sofreu maior redução no teor de  $Ca^{2+}$ , com a aplicação de  $100 \text{ mM}$  de  $Na^+$  (Hélio 253), o teor de  $Ca^{2+}$  na parte aérea permaneceu acima do recomendado,  $19 \text{ g kg}^{-1}$ .

**Tabela 12.** Parâmetros da regressão do teor de  $Ca^{2+}$  total das raízes e parte aérea das variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade.

Variedade	Raiz		Parte aérea	
	g kg <sup>-1</sup>			
Aguará 04	$\hat{y} = 9,25 - 0,0290x^*$	$r^2 = 0,80$	$\hat{y} = 29,89 - 0,2119x^{**} + 0,0018x^{***}$	$R^2 = 0,86$
BRS 321	$\hat{y} = 8,82 - 0,0325x^{**}$	$r^2 = 0,84$	$\bar{y} = 26,16$	
BRS 324	$\hat{y} = 9,15 - 0,0219x^{**}$	$r^2 = 0,73$	$\bar{y} = 26,49$	
CF 101 Advana	$\hat{y} = 9,08 - 0,0281x^{**}$	$r^2 = 0,83$	$\hat{y} = 28,01 - 0,0466x^{**}$	$R^2 = 0,91$
Charrua	$\hat{y} = 9,21 - 0,0247x^{**}$	$r^2 = 0,98$	$\hat{y} = 29,63 - 0,0423x^{**}$	$R^2 = 0,57$
Embrapa 122	$\hat{y} = 9,76 - 0,0350x^{**}$	$r^2 = 0,86$	$\hat{y} = 29,91 - 0,0556x^{**}$	$R^2 = 0,67$
Hélio 253	$\bar{y} = 7,75$		$\hat{y} = 26,49 - 0,0705x^{**}$	$R^2 = 0,99$
Neon	$\hat{y} = 9,84 - 0,0275x^{**}$	$r^2 = 0,91$	$\hat{y} = 28,6 - 0,0639x^{**}$	$R^2 = 0,90$
Olisun	$\hat{y} = 9,35 - 0,0149x^{**}$	$r^2 = 0,65$	$\bar{y} = 26,35$	

\*, \*\*: Equação significativa pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente.  $\bar{Y}$ : média dos dados.  $\hat{Y}$ : estimativa do modelo.

Em relação ao teor de  $Mg^{2+}$  nas raízes (Tabela 13), todas as variedades de girassol foram prejudicadas com a salinidade em solução nutritiva, resultando em redução da

concentração desse nutriente na planta. O efeito apresentou melhor ajuste à função quadrática para algumas variedades, entretanto com coeficientes angulares reduzidos, por isso a redução linear representa melhor os dados. Para a parte aérea, somente as variedades BRS 321, BRS 324, Charrua e Olisun não foram afetadas pela salinidade, as demais tiveram redução significativa da concentração de  $Mg^{2+}$ .

**Tabela 13.** Parâmetros da regressão do teor de  $Mg^{2+}$  total das raízes e parte aérea das variedades de girassol cultivadas em níveis de salinidade.

Variedade	Raiz		Parte aérea	
	g kg <sup>-1</sup>			
Aguará 04	$\hat{y} = 3,19 - 0,0461x^{**} + 0,0003x^{2**} \quad r^2 = 0,88$		$\hat{y} = 8,56 - 0,0952x^{**} + 0,0007x^{2**} \quad R^2 = 0,98$	
BRS 321	$\hat{y} = 2,59 - 0,0093x^{**} \quad r^2 = 0,80$		$\bar{y} = 4,69$	
BRS 324	$\hat{y} = 2,71 - 0,0073x^{**} \quad r^2 = 0,80$		$\bar{y} = 5,20$	
CF 101 Advana	$\hat{y} = 1,02 - 0,0171x^{**} + 0,0001x^{2**} \quad r^2 = 0,91$		$\hat{y} = 7,08 - 0,0202x^{**} \quad R^2 = 0,72$	
Charrua	$\hat{y} = 3,42 - 0,0486x^{**} + 0,0003x^{2**} \quad r^2 = 0,91$		$\hat{y} = 8,56 - 0,0952x^{**} + 0,0007x^{2**} \quad R^2 = 0,98$	
Embrapa 122	$\hat{y} = 3,09 - 0,0381x^{**} + 0,0003x^{2**} \quad r^2 = 0,94$		$\hat{y} = 2,07 - 0,0102x^{**} + 0,0001x^{2**} \quad R^2 = 0,82$	
Hélio 253	$\hat{y} = 2,51 - 0,0055x^{**} \quad r^2 = 0,90$		$\hat{y} = 6,01 - 0,0243x^{**} \quad R^2 = 0,97$	
Neon	$\hat{y} = 2,46 - 0,0064x^{**} \quad r^2 = 0,83$		$\hat{y} = 7,78 - 0,0348x^{**} \quad R^2 = 0,83$	
Olisun	$\hat{y} = 3,16 - 0,0146x^{**} \quad r^2 = 0,91$		$\bar{y} = 5,03$	

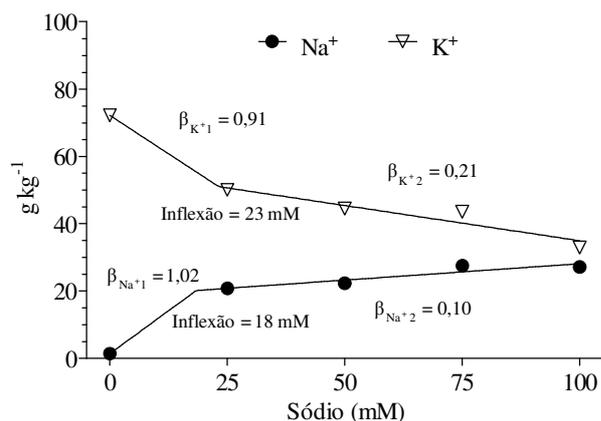
\*, \*\*: Equação significativa pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente.  $\bar{y}$ : média dos dados.  $\hat{y}$ : estimativa do modelo.

O teor de  $Mg^{2+}$  na parte aérea sofreu significativa redução com o aumento da salinidade, esse efeito está associado ao sódio presente na solução nutritiva que pode estar prejudicando a absorção do  $Mg^{2+}$ . Entretanto, mesmo no controle, onde não há sódio, os teores de  $Mg^{2+}$  também estão abaixo do que Malavolta (1997) recomenda para folhas de girassol que seria entre 9 a 11 g kg<sup>-1</sup>. Visto que na solução nutritiva não há limitação desse nutriente, a justificativa mais plausível para as baixas concentrações de  $Mg^{2+}$  podem estar associadas à interação existente com o  $K^+$ , pois Malavolta (1997) aponta que o excesso de  $K^+$  pode induzir a deficiência de  $Mg^{2+}$ .

A interação na absorção dos cátions monovalentes ( $Na^+$  e  $K^+$ ) em condição de estresse salino é evidenciada em diversos trabalhos na literatura. Isso se deve pelo fato de existir uma relativa semelhança esteroquímica entre eles e principalmente pelo fato de que espécies não adaptadas às condições salinas são pouco seletivas na absorção do  $K^+$ . Nesse sentido a Figura 3 apresenta a regressão linear segmentada dos teores de  $Na^+$  e  $K^+$  nas raízes do girassol (média das nove variedades) em função da salinidade em solução nutritiva.

A regressão linear segmentada é composta por segmentos de reta, neste caso dois, resultando em dois coeficientes angulares e um linear. Além destes parâmetros, a regressão linear segmentada apresenta o ponto de inflexão que é ajustado automaticamente com os coeficientes angulares. Neste caso, o ponto de inflexão representa a concentração salina onde ocorre relevante alteração das condições, resultando em mudança no padrão de resposta.

A salinidade em solução nutritiva provocou uma inversão nas concentrações de  $Na^+$  e  $K^+$  nas raízes com coeficientes angulares ( $\beta_1$  do  $Na^+$  e  $K^+$ ) complementares (similares em módulo) no primeiro segmento de reta. A partir do ponto de inflexão do  $Na^+$  e  $K^+$ , que ocorreram nas concentrações de 18 e 23 mM, os coeficientes angulares ( $\beta_2$ ) foram menores (em módulo). Ou seja, após o ponto de inflexão a inversão da concentração de  $Na^+$  pelo  $K^+$  é menos intensa.



**Figura 3.** Concentração de sódio ( $\text{Na}^+$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ) nas raízes do girassol em função da salinidade em solução nutritiva. Média das nove variedades.

Assumindo que a absorção de  $\text{Na}^+$  pela planta em substituição ao  $\text{K}^+$  seja prejudicial às plantas não halófitas, pode-se inferir que a variedade de girassol que apresentar maior  $\beta_1$  para a concentração de  $\text{K}^+$  ( $\beta_{1\text{K}^+}$ ) e menor  $\beta_1$  para a concentração de  $\text{Na}^+$  ( $\beta_{1\text{Na}^+}$ ), seja mais tolerante à salinidade. O ponto de inflexão também pode servir de parâmetro indicativo de tolerância, pois quanto maior a concentração salina em que ocorre a redução em módulo dos coeficientes, mais sensível à salinidade.

Com base nestas considerações são apresentados na Tabela 14 os parâmetros da regressão linear segmentada dos teores de  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  das raízes de girassol por variedade. Em relação ao  $\beta_{1\text{K}^+}$ , as taxas variam -1,62 na variedade BRS 321 a -0,49 na variedade Olisun. Entretanto, analisando o  $\beta_{1\text{Na}^+}$  destas variedades não se observa a complementariedade dos coeficientes, ou seja, o  $\text{Na}^+$  acumulado nas raízes não está substituindo o  $\text{K}^+$ . Essa mesma tendência é observada nas demais variedades de girassol.

Avaliando o  $\beta_{1\text{K}^+}$  a sequência das variedades partindo da mais tolerante para a mais sensível seria a Olisun, Neon, BRS 324, Embrapa 122, CF 102 Advana, Aguará 04, Hélio 253, Charrua e BRS 321. Agora avaliando  $\beta_{1\text{Na}^+}$  a sequência da mais tolerante para a mais sensível seria: Olisun, Aguará 04, CF 101 Advana, BRS 324, Neon, Embrapa 122, Charrua, BRS 321 e Hélio 253.

**Tabela 14.** Parâmetros da regressão linear segmentada dos teores de  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  das raízes das variedades de girassol em função dos níveis de salinidade em solução nutritiva.

Variedade	$\text{K}^+$				Dd	$\text{Na}^+$			
	$\beta_{1\text{K}^+}$	Inflexão	$\beta_{2\text{K}^+}$	$R^2$		$\beta_{1\text{Na}^+}$	Inflexão	$\beta_{2\text{Na}^+}$	$R^2$
Aguará 04	-1,34	18	-0,2656	0,99**	1,02	24	0,0286	0,90**	
BRS 321	-1,62	13	-0,2154	0,97**	0,67	26	0,1478	0,89**	
BRS 324	-0,69	34	-0,1318	0,99**	0,86	23	0,0735	0,99**	
CF 101 Advana	-1,12	24	-0,2595	0,99**	0,89	24	0,0576	0,99**	
Charrua	-1,40	19	-0,0466	0,97**	0,67	26	0,1344	0,99**	
Embrapa 122	-0,76	37	-0,0466	0,98**	0,78	27	0,1182	0,96**	
Hélio 253	-1,38	13	-0,2394	0,88**	0,60	37	0,0832	0,88**	
Neon	-0,68	18	-0,1199	0,90**	0,79	23	0,0907	0,80**	
Olisun	-0,49	44	-0,1956	0,99**	1,07	17	0,1823	0,99**	

\*\* : Modelos significativos pelo teste F com  $p < 0,01$ .

O teor de  $\text{K}^+$  na parte aérea das variedades de girassol só não foi influenciado nas variedades BRS 321 e Neon (Tabela 15). A variedade Charrua apresentou melhor ajuste com uma função quadrática apresentando máxima concentração de  $\text{K}^+$  com de 43 mM de sódio em

solução nutritiva, com posterior redução. As demais variedades apresentaram redução significativa e linear no teor de  $K^+$  com o aumento da salinidade.

O teor médio de  $K^+$  da parte aérea das variedades na ausência de salinidade foi de  $89,3 \text{ g kg}^{-1}$  representando um valor acima do que Malavolta (1997) recomenda para folhas de girassol, onde os teores de  $K^+$  variam de 20 a  $24 \text{ g kg}^{-1}$ . O mesmo acontece se considerarmos os critérios sugeridos por Raij (1996) que define o teor de  $K^+$  para o girassol entre 30 a  $45 \text{ g kg}^{-1}$ . O girassol apresenta essa característica de acumular  $K^+$  quando cultivado em boa disponibilidade desse nutriente, no entanto, a maior parte desse acúmulo ocorre no caule. Como neste estudo a análise foi realizada na parte aérea, sem separação do caule, a comparação direta com as faixas estabelecidas deve ser cautelosa. Mesmo assim, deve-se atentar que o excesso de  $K^+$  pode induzir deficiência de outros nutrientes como o  $Ca^{2+}$  e o  $Mg^{2+}$ .

**Tabela 15.** Parâmetros da regressão dos teores de  $K^+$  e  $Na^+$  na parte aérea das variedades de girassol.

Variedade	$K^+$		$Na^+$	
	$\text{g kg}^{-1}$			
Aguará 04	$\hat{y} = 79,7 - 0,462x^{**} + 0,004x^{2**}$	$R^2 = 0,90$	$\hat{y} = 0,5^{ns} + 0,244x^{**} - 0,002x^{2**}$	$R^2 = 0,92$
BRS 321	$\bar{y} = 87,34$		$\hat{y} = 0,3^{ns} + 0,068x^{**}$	$R^2 = 0,96$
BRS 324	$\hat{y} = 113,0 - 0,740x^{**} + 0,005x^{2**}$	$R^2 = 0,94$	$\hat{y} = 0,9^{ns} + 0,108x^{**}$	$R^2 = 0,95$
CF 101 Advana	$\hat{y} = 88,5 - 0,542x^{**} + 0,004x^{2**}$	$R^2 = 0,89$	$\hat{y} = 1,1^{ns} + 0,083x^{**}$	$R^2 = 0,90$
Charrua	$\hat{y} = 64,15 + 0,3629x^{**} - 0,0042x^{2**}$	$R^2 = 0,61$	$\hat{y} = 0,4^{ns} + 0,276x^{**} - 0,001x^{2**}$	$R^2 = 0,98$
Embrapa 122	$\hat{y} = 89,7 - 0,754x^{**} + 0,006x^{2**}$	$R^2 = 0,99$	$\hat{y} = 0,9^{ns} + 0,141x^{**}$	$R^2 = 0,86$
Hélio 253	$\hat{y} = 106,2 - 0,804x^{**} + 0,005x^{2**}$	$R^2 = 0,95$	$\hat{y} = 0,2^{ns} + 0,144x^{**}$	$R^2 = 0,99$
Neon	$\bar{y} = 74,1$		$\hat{y} = 0,9^{ns} + 0,118x^{**}$	$R^2 = 0,92$
Olisun	$\hat{y} = 94,0 - 0,119x^{**}$	$R^2 = 0,75$	$\hat{y} = 0,1^{ns} + 0,067x^{**}$	$R^2 = 0,56$

\*, \*\*: Equação significativa pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente.  $\bar{y}$ : média dos dados.  $\hat{y}$ : estimativa do modelo.

Em relação ao  $Na^+$  na parte aérea (Tabela 15) a salinidade promoveu aumento da concentração desse metal em todas as variedades avaliadas. A resposta foi linear para praticamente todas as variedades, sendo que as mais afetadas foram as variedades Hélio 253, Charrua e Embrapa 122 que tiveram a concentração de sódio aumentada de próximo à zero para  $15,0$ ;  $14,1$  e  $12,5 \text{ g kg}^{-1}$  na maior nível de salinidade, respectivamente. Enquanto que Aguará 04 alcançou  $6,95 \text{ g kg}^{-1}$  de sódio no maior nível de salinidade.

### 3.6 CONCLUSÕES

A salinidade em solução nutritiva prejudica o crescimento inicial de todas as variedades de girassol avaliadas, sendo que a diferença entre as variedades em relação à tolerância salina é discreta. Entretanto, com base na avaliação conjunta das variáveis é possível concluir que a variedade BRS 321 é mais sensível, e que a Neon é mais tolerante à salinidade em solução nutritiva.

A presença de  $\text{Na}^+$  na solução nutritiva desfavorece a absorção de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  pela planta, resultando em redução da concentração desses nutrientes, principalmente nas raízes onde ao mesmo tempo ocorre aumento do teor de  $\text{Na}^+$ . O teor de N do girassol não é afetado pela salinidade em solução nutritiva, enquanto que o P nas Raizpode aumentar em algumas variedades.

## **4      CAPÍTULO II**

### **CULTIVO DE GIRASSOL EM SOLO COM DIFERENTES NÍVEIS DE SALINIDADE DEVIDO À ADIÇÃO DE FLUÍDO DE PERFURAÇÃO**

## 4.1 RESUMO

Os fluidos de perfuração são indispensáveis na perfuração dos poços de petróleo, e apesar de serem reutilizados ciclicamente no processo, parte desses fluidos fica embebido no cascalho de perfuração. Considerando que parte das limitações de uso do cascalho de perfuração originam do fluido de perfuração, o objetivo desta etapa foi o de avaliar o desenvolvimento de duas variedades de girassol, selecionadas no capítulo anterior, cultivadas em solo (Planossolo háplico) com doses de três tipos de fluido de perfuração. O experimento consistiu de uma fatorial inteiramente casualizado com duas variedades de girassol (BRS 321 e Neon) e cinco doses (controle; 1; 2; 4 e 8 Mg ha<sup>-1</sup>) de três tipos de fluido de perfuração (Catiônico, não aquoso saturado com NaCl e não aquoso saturado com KCl). A parcela experimental foi composta por um pote com 8 dm<sup>-3</sup> de solo, sendo incorporada as respectivas doses dos fluidos, onde foram cultivadas duas plantas de girassol por 40 dias. Ao final procederam-se leituras de altura das plantas, diâmetro do caule e massa fresca e seca. No tecido vegetal foram determinados os teores de N, P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Fe, Cu, Mn e Zn; no solo foi realizado análise de rotina de fertilidade, adicionalmente determinou-se a concentração de hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP). Observaram-se efeitos significativos no crescimento das duas variedades de girassol cultivadas em solo com doses dos fluidos de perfuração, que também diferiram significativamente entre si. Com a aplicação do fluido catiônico, foi observado um ganho na massa de caule e folhas frescas, assim como no teor de K<sup>+</sup> nas partes das plantas. No entanto, as maiores doses dos fluido não aquosos promoveram um redução significativa do desenvolvimento do girassol, com redução da biomassa seca para as doses superiores a 2 Mg ha<sup>-1</sup>. O fluido não aquoso saturado com KCl promoveu ganhos significativos no teor de K<sup>+</sup> nas plantas enquanto que o fluido saturado com NaCl resultou em aumento no teor de Na<sup>+</sup> no tecido vegetal. O acúmulo dos demais nutrientes na planta não foram influenciados pelos fluidos. Os efeitos provocados no desenvolvimento do girassol estão associados ao aporte de elementos ao solo através dos fluidos de perfuração. O teor de K<sup>+</sup> trocável aumentou significativamente com a aplicação dos fluidos catiônico e não aquoso saturado com KCl. Enquanto que o teor Na<sup>+</sup> trocável aumento gradativamente com as doses do fluido saturado com NaCl, provocando aumento da porcentagem de sódio trocável, no entanto, abaixo dos níveis críticos de salinização. As demais bases trocáveis tiveram apenas alterações menos relevantes. Em virtude da composição dos fluidos não aquosos, uma considerável quantidade de HTP fora adionada ao solo, no entanto, a avaliação após o cultivo das plantas constatou que grande parte destes compostos foram degradados. Nos tratamentos onde foi aplicado até 1 Mg ha<sup>-1</sup> de fluido, a taxa de mineralização dos HTP foi maior que 95% em apenas 40 dias cultivo. O fluido catiônico não aporta HTP ao solo, além disso, promove ganhos de biomassa do girassol e melhorias na fertilidade do solo. A biomassa seca do girassol não é afetada significativamente com a aplicação de até 2 Mg ha<sup>-1</sup> dos fluidos não aquosos; em doses superiores ocorre redução gradativa do desenvolvimento.

**Palavras chave:** Resíduo.Salinidade. HTP .

## 4.2 ABSTRACT

Drilling fluids are essential in drilling oil wells, which despite being reused cyclically in the process of these fluids are embedded in drill cuttings. Whereas part of the limitations of using drill cuttings originating from the drilling fluid, the purpose of this step was to evaluate the development of two sunflower varieties, selected in the previous chapter, grown in soil with doses of three types of drilling fluid. The experiment consisted of a completely randomized factorial with two varieties of sunflower (BRS 321 and Neon ) and five doses (control, 1, 2; 4 and 8 Mg ha<sup>-1</sup>) of three types of drilling fluid (Cationic, non-aqueous saturated with NaCl and non-aqueous saturated with KCl). The experimental plot consisted of a pot with 8 dm<sup>-3</sup> of soil being incorporated into the respective doses of fluids, where two sunflower plants were grown for 40 days. At the end held by readings of chlorophyll content of leaves, plant height, stem diameter and fresh and dry biomass. In plant tissue were determined the content of N, P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Fe, Cu, Mn and Zn ; soil was conducted routine analysis of fertility additionally determined the concentration of total petroleum hydrocarbons (HTP). Significant in the development of two varieties of sunflower grown in soil with doses of drilling fluids, also significantly different effects were observed. With the application of cationic fluid gain was observed in the fresh biomass of stem and leaves, as well as in the content of K<sup>+</sup> in plant parts. However, higher doses of the non-aqueous fluid promoted a significant reduction in the development of sunflower with reduction of dry matter for the higher dose 1 to 2 Mg ha<sup>-1</sup>. The saturated KCl aqueous fluid not led to significant gains in content of K<sup>+</sup> in plants while the fluid saturated with NaCl resulted in an increase in Na<sup>+</sup> content in plant tissue. The other nutrients were little influenced by the fluid. The effects on the development of sunflower are associated with input elements to the ground through the drilling fluid. The content of exchangeable K<sup>+</sup> increased significantly with the application of cationic and non-aqueous fluids saturated with KCl. While the exchangeable Na<sup>+</sup> content increased gradually with the doses of the fluid saturated with NaCl, causing increased exchangeable sodium percentage, however, well below critical levels of salinization. The remaining exchangeable bases had only slight alterations. Because of the composition of the non-aqueous fluid, a considerable amount of HTP was applied to the soil; however, the assessment after cultivation of plants found that these compounds were largely degraded. In treatments where 1 mg was applied to one hectare of fluid, the rate of mineralization HTP was greater than 95 % in just 40 days cultivation. The cationic no fluid brings the soil HTP, in addition, promotes sunflower biomass gain and improvements in soil fertility. The dried biomass Sunflower is not significantly affected by the application of 1 to 2 Mg ha<sup>-1</sup> of non-aqueous fluids, at higher doses gradual reduction of development occurs.

**Key-words:** Residue. Salinity. HTP

### 4.3 INTRODUÇÃO

A composição dos fluídos de perfuração de poços de petróleo é variada, sendo formulados de acordo com as características geológicas onde será utilizado. No entanto pode-se classificá-los em relação ao seu componente principal, que pode ser basicamente água, óleo ou gás.

Os fluidos sintéticos possuem como base da fase contínua a n-parafina e a fase emulsionada normalmente utilizada é uma solução saturada com NaCl. A proporção entre a fase contínua e a fase emulsionada pode ser ajustada, sendo que nos fluídos utilizados neste estudo apresentam uma proporção de 60/40, recebendo a denominação BR-Mul 60/40. A emulsão inversa entre estes componentes representam a maior parte do volume do fluido, adicionalmente utiliza-se outros compostos com função adensante (baritina), emulsificante (mistura de ácido graxo), viscosificante (argila organofílica e modificador reológico) e alcalinizante (Óxido de cálcio).

O fluído de perfuração de poços petróleo quando aplicado ao solo pode prejudicar o desenvolvimento do girassol devido ao caráter sódico salino desse resíduo, sendo necessária a definição da dose crítica do resíduo que pode ser aplicada.

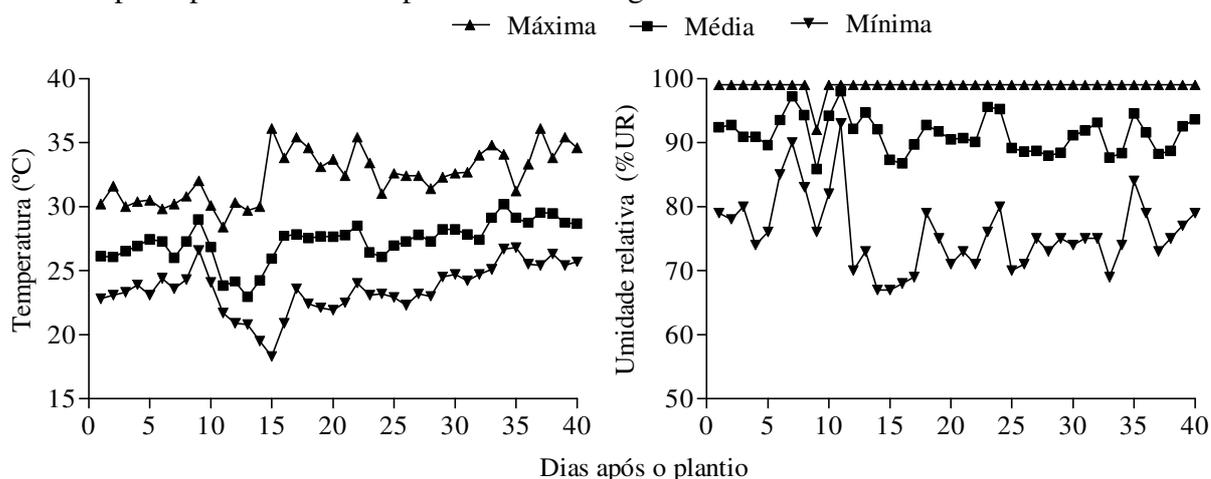
Uma das limitações da disposição em solo do cascalho de perfuração decorre do aporte de sódio promovido pelo resíduo ao solo. A fonte majoritária do  $\text{Na}^+$  presente no cascalho é o fluido de perfuração, pois o NaCl é utilizado na sua formulação com o objetivo de saturar a solução. Tecnicamente o NaCl pode ser substituído pelo KCl na formulação dos fluidos, devido à similaridade estereoquímica dos cátions destes sais. Essa alternativa poderia transformar o passivo ambiental com caráter salino em um subproduto rico em  $\text{K}^+$ , que mediante aprimoramentos, poderia ser utilizado como fonte desse nutriente às plantas. A principal desvantagem dessa substituição é de caráter financeiro, pois a utilização do KCl resultaria em aumento de custos na produção dos fluidos.

Movidos por essa expectativa, solicitou-se ao Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES) a formulação de dois fluidos de perfuração sintéticos, com base não aquosa, diferindo entre si somente no sal utilizado para saturar a solução (NaCl ou KCl). Visto a inviabilidade de se perfurar um poço com o fluido saturado com KCl, esse estudo preliminar procurou avaliar os efeitos da aplicação direta dos fluidos de perfuração ao solo. Adicionalmente avaliou-se também o fluido Catiônico.

Nesta etapa do trabalho o objetivo foi o de avaliar o desenvolvimento de duas variedades de girassol (BRS 321 e Neon) cultivada em solo com doses crescentes de três tipos de fluido de perfuração (Catiônico, Não aquoso saturado com NaCl ou KCl).

#### 4.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento também foi conduzido no Departamento de Solos da UFFRJ durante os meses de novembro e dezembro de 2012, entretanto em outra casa de vegetação com 3 metros de pé direito, totalmente coberta com plástico difusor de luz com 0,15 nm de espessura, inclusive nas laterais. A temperatura da casa de vegetação foi controlada por um sistema de resfriamento evaporativo, sendo acionado automaticamente quando superior a 30 °C. Monitorou-se a temperatura (°C) e a umidade relativa do ar (%UR) com uma estação meteorológica com coleta de dados a cada 30 minutos, instalada dentro da casa de vegetação, sendo os principais resultados apresentados na Figura 4.



**Figura 4.** Temperatura e umidade relativa média, máximas e mínimas da casa de vegetação durante o cultivo do girassol.

Utilizou-se um delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições em esquema fatorial 2 x 3 x 5. O primeiro fator foram as duas variedades de girassol que apresentaram respostas extremas em relação à salinidade no primeiro capítulo (BRS 321 e Neon). O segundo fator (qualitativo) foi constituído de três diferentes fluídos de perfuração de poços de petróleo, fluído catiônico, fluído não aquoso saturado com NaCl e fluído não aquoso saturado com KCl, que doravante denominados fluídos: Catiônico, NA NaCl e NA KCl, respectivamente. O terceiro fator (quantitativo) foram cinco doses dos respectivos fluídos (controle; 1; 2; 4 e 8 Mg ha<sup>-1</sup>, equivalente à 0; 4; 8; 16 e 32 g de fluídos por parcela). A parcela foi constituída de vasos com capacidade de 8 dm<sup>-3</sup> de substrato acrescido das respectivas doses de fluído, sendo cultivado duas plantas de girassol por parcela.

Os tratamentos (fluídos) foram misturados ao substrato em betoneira por 5 minutos, sendo posteriormente acondicionados em vasos plásticos (Figura 5). A mistura de solo e fluído foi irrigada com quantidade de água equivalente ao necessário para atingir 70% da capacidade de campo, permanecendo nestas condições por 30 dias. Após esse período, foram semeadas cinco sementes por vaso, sendo que somente as duas plântulas mais vigorosas foram cultivadas até os 40 dias após a germinação. Ao final desse período, coletou-se as plantas para realização das mesmas análises realizadas no experimento do Capítulo I, com exceção da massa de raízes frescas, devido a dificuldade de separar as raízes do solo em tempo hábil.



**Figura 5.** Vistas da montagem do experimento com os fluídos de perfuração (A) prontos para serem homogeneizados ao solo (B) para posterior acomodação nos vasos (C) onde as plantas foram cultivadas (D).

O solo foi retirado da camada superficial (0-20 cm) de um Planossolo Háplico (Embrapa, 2013) localizado no município de Seropédica-RJ. Onde após ter sido coletado foi seco à sombra e peneirado em malha de 4 mm. Para o cálculo da dose em  $\text{Mg ha}^{-1}$  foi considerado o volume de solo à profundidade de 0,2 m. Na Tabela 16 está apresentado o resumo da caracterização química e granulométrica (Embrapa, 1997) da amostra de solo utilizada para a montagem dos experimentos referentes ao capítulo II e III.

**Tabela 16.** Caracterização química da amostra de solo (Planossolo háplico) utilizado na montagem do experimento.

pH	Areia Silte Argila			C	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	H+Al	T	V	P
	$\text{g kg}^{-1}$											
5,95	596	132	272	19,7	0,2	0,5	18,5	16,5	61	97	37	4

pH em água; C:Carbono orgânico; V: Saturação por bases; P: Fósforo extraído por Mehlich 1.

A caracterização química dos fluído de perfuração incluindo os teores totais de P,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , Fe, Cu, Mn e Zn, estão apresentados na Tabela 17. Enquanto que na Tabela 18 encontram-se os teores de n-alcanos, hidrocarbonetos resolvidos do petróleo (HRP), mistura complexa não resolvida (UCM) e hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP).

**Tabela 17.** Caracterização química dos fluídos de perfuração de poços de petróleo utilizados no experimento, teores totais de N, P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe, Cu, Mn e Zn.

Fluido	N	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Fe	Cu	Mn	Zn
	g kg <sup>-1</sup>						mg kg <sup>-1</sup>			
Catiônico	1,11	0,04	43,2	1,0	0,2	3,75	2055	0,9	2,0	0,0
NA NaCl	1,60	0,36	0,08	9,0	0,3	26,4	3006	6,8	42,9	12,2
NA KCl	1,84	0,29	50,9	8,6	0,7	1,49	2569	1,7	3,2	0,5

**Tabela 18.** Caracterização química dos fluídos de perfuração de poços de petróleo utilizados no experimento, teores de n-alcanos, HRP, UCM e HTP.

Fluido	n-alcanos	HRP	UCM	HTP
	mg L <sup>-1</sup>			
Catiônico	nd	0,045	nd	0,045
NA NaCl	11677	23511	32322	55833
NA KCl	16646	44523	71221	115745

HRP: Hidrocarbonetos resolvidos do petróleo; UCM: Unresolved Complex mixture; HTP: Hidrocarbonetos totais de petróleo; nd: Não Detectado acima do Limite de Quantificação (1,0 µg L-1).

Após a coleta das plantas uma amostra de solo foi congelada para determinação da concentração de hidrocarboneto total de petróleo (HTP) conforme EPA 8015 D (Usepa, 2003) sob responsabilidade do Laboratório *Analytical Solutions*<sup>®</sup> Ltda. Outra amostra foi seca ao ar e peneirada em malha de 2 mm para determinação dos teores trocáveis Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>; P disponível e pH em água (Embrapa, 1997). A porcentagem de sódio trocável (PST) foi determinada pela razão do teor de sódio pelo total de bases trocáveis.

As análises estatísticas dos dados foram similares ao experimento referente ao Capítulo I, sendo avaliadas as interações entre os três fatores (dose, fluídos e variedades). O modelo matemático do fatorial inteiramente casualizado pode ser representado pela seguinte equação:  $Y_{ijk} = m + F_i + D_j + V_k + d_{ijk} + (F*D)_{ij} + (F*V)_{ik} + (D*V)_{jk} + (F*D*V)_{ijk} + e_{ijk}$ . Onde:  $Y_{ijk}$  é resposta da observação submetida às doses dos fluídos e variedades;  $m$  representa a média geral;  $F_i$  é o efeito do fator fluído;  $D_j$  o efeito do fator dose;  $(F*D)_{ij}$  representa o efeito da interação entre os fluídos e as doses;  $(F*V)_{ik}$  equivale ao efeito da interação entre os fluídos e variedades;  $(D*V)_{jk}$  é a interação entre dose e variedade;  $(F*D*V)_{ijk}$  representa a interação tripla entre os fatores; e finalmente  $e_{ij}$  o erro aleatório total.

#### 4.4.1. Balanço de Massa de HTP

Com base nos dados da análise de HTP dos fluídos e das amostras de solo após o cultivo do girassol pode-se calcular a fração do HTP que foi reduzida com a incubação e o cultivo das plantas. A equação 1 representa a quantidade de HTP aplicada em cada parcela experimental (pote com 8 L de terra) partindo da quantidade de fluído aplicada em cada parcela e a concentração de HTP de cada fluído. A equação 2, refere-se à quantidade de HTP detectada na amostra de terra coletada após a incubação e o cultivo do girassol; a massa de HTP foi obtida pelo produto da massa de solo da parcela pela diferença de concentração do HTP detectado na amostra pela concentração natural do solo. Sabendo-se a quantidade estimada de HTP aplicada ao solo e a quantidade remanescente após o cultivo, pode-se estimar a fração de HTP que foi degradada (Equação 3).

$$\text{HTP}_{\text{aplicado}} = \frac{[\text{HTP}_{\text{fluido}}] \cdot \text{Dose}_{\text{fluido}} \cdot 1000}{d_{\text{fluido}}} \quad \text{eq. : 1}$$

$$\text{HTP}_{\text{detectado}} = ([\text{HTP}_{\text{parcela}}] - [\text{HTP}_{\text{natural}}]) \cdot M_{\text{solo}} \quad \text{eq. : 2}$$

$$\% \text{ HTP}_{\text{decomposto}} = \frac{\text{HTP}_{\text{aplicado}} - \text{HTP}_{\text{detectado}}}{\text{HTP}_{\text{aplicado}}} \quad \text{eq. : 3}$$

Onde :

$\text{HTP}_{\text{aplicado}}$  : Quantidade de HTP aplicado na parcela ( $\text{mg pote}^{-1}$ );

$[\text{HTP}_{\text{fluido}}]$  : Concentração de HTP no fluido ( $\text{mg L}^{-1}$ );

$\text{Dose}_{\text{fluido}}$  : Dose de fluido aplicado ( $\text{g pote}^{-1}$ )  $\cdot \cdot$   $1 \text{ Mg ha}^{-1} = 4 \text{ g pote}^{-1}$ ;

$d_{\text{fluido}}$  : Densidade do fluido ( $\text{g mL}^{-1}$ );

$\text{HTP}_{\text{detectado}}$  : Quantidade de HTP encontrado na parcela depois do cultivo das plantas ( $\text{mg pote}^{-1}$ );

$[\text{HTP}_{\text{parcela}}]$  : Teor de HTP encontrado na parcela depois do cultivo das plantas ( $\text{mg kg}^{-1}$ );

$[\text{HTP}_{\text{natural}}]$  : Teor de HTP natural do solo ( $\text{mg kg}^{-1}$ );

$M_{\text{solo}}$  : Massa de solo na parcela ( $\text{kg pote}^{-1}$ );

$\% \text{ HTP}_{\text{decomposto}}$  : Porcentagem do HTP retirado;

## 4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa do trabalho os resultados estão divididos em três subitens, sendo que o primeiro refere-se às avaliações biométricas das plantas, a segunda às concentrações de nutrientes nas plantas e a terceira às análises do solo após o cultivo do girassol, conforme segue:

### 4.5.1. Efeitos no Crescimento do Girassol

Na Tabela 19 está apresentado o resumo da análise de variância da altura das plantas, diâmetro do caule (DC), massas de caule, folhas e parte aérea frescas (MCF, MFF, MPAF), e massas de caule, folhas e parte aérea secas (MCS, MFS, MPAS) das variedades de girassol cultivadas em solo com doses de fluido de perfuração. As três fontes de variação avaliadas (variedades, fluídos e doses) apresentaram efeito significativo na maior parte das avaliações realizadas. Tratando-se de um delineamento com três fatores, para a correta atribuição dos efeitos torna-se imprescindível avaliação das possíveis interações entre eles. Neste caso, a interação tripla entre os fatores não foi significativa ( $\alpha > 0,05$ ) permitindo avaliar as interações duplas separadamente.

**Tabela 19.** Valores quadrado médio da análise de variância das avaliações biométricas das variedades de girassol em função das doses dos fluídos de perfuração.

Fonte de variação	Altura	DC	MCF	MFF	MPAF	MCF	MFF	MPAF	%MSC	%MSF
Variedades (V)	10619**	9,4**	3288**	64*	2435**	225**	3,0**	280**	294**	111**
Fluído (F)	109 <sup>ns</sup>	16**	1679**	886**	4978**	48**	18**	124**	10 <sup>ns</sup>	1,7 <sup>ns</sup>
Dose (D)	282*	2,3**	286**	238**	980**	10**	7,2**	32**	13**	6,3**
V*F	99 <sup>ns</sup>	0,9 <sup>ns</sup>	1,5 <sup>ns</sup>	94**	115 <sup>ns</sup>	1,0 <sup>ns</sup>	0,9 <sup>ns</sup>	2,3 <sup>ns</sup>	4,1 <sup>ns</sup>	1,0 <sup>ns</sup>
V*D	23 <sup>ns</sup>	0,3 <sup>ns</sup>	36 <sup>ns</sup>	20 <sup>ns</sup>	101 <sup>ns</sup>	2,4 <sup>ns</sup>	0,5 <sup>ns</sup>	4,7 <sup>ns</sup>	2,5 <sup>ns</sup>	0,3 <sup>ns</sup>
F*D	114 <sup>ns</sup>	3,8**	426**	204**	1186**	9,0**	3,1**	22**	2,8 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>
D/F: Catiônico	-	2,3**	216**	50,3**	447**	4,0 <sup>ns</sup>	0,4 <sup>ns</sup>	5,6 <sup>ns</sup>	-	-
D/F: NA KCl	-	4,2**	415**	314**	1418**	14,0**	6,9**	39,4**	-	-
D/F: NA NaCl	-	3,4**	506**	282**	1488**	10**	3,2**	31,3**	-	-
V*F*D	76 <sup>ns</sup>	0,7 <sup>ns</sup>	44 <sup>ns</sup>	32*	108 <sup>ns</sup>	1,6 <sup>ns</sup>	0,6 <sup>ns</sup>	3,6 <sup>ns</sup>	5,2 <sup>ns</sup>	1,1 <sup>ns</sup>
CV	15	10	17	13	13	21	14	16	13	6,5

DC: Diâmetro do caule; MCF: Massa de caule fresco; MFF: Massa de folhas frescas; MPAF: Massa da parte aérea fresca; MCS: Massa de caule seco; MFS: Massa de folhas secas; MPAS: Massa da parte aérea seca; \*, \*\*: Fator significativo pelo teste F com  $\alpha < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente; ns: não significativo.

A interação das variedades de girassol (V) com as doses de sódio (V\*D) e com os tipos de fluídos (V\*F) não foi significativa ( $\alpha > 0,05$ ) para grande parte das avaliações. Entretanto, como as variedades diferiram significativamente entre si, mas não apresentaram interação significativa com as doses e os fluídos, as variedades apresentam resposta semelhante frente às doses dos fluídos de perfuração, portanto, devem ser estudadas separadamente.

A interação entre fluido e dose (F\*D) foi significativa ( $\alpha < 0,01$ ), ou seja, as doses aplicadas resultam em efeitos diferenciados de acordo com o tipo de fluido utilizado. O desdobramento dessa interação (F\*D), avaliando o efeito da dose dentro de cada tipo de fluido, permitiu estudar a resposta provocada pelo aumento da dose de cada fluido. Como o fator dose tem seis níveis quantitativos, torna-se adequado o desdobramento por análise de regressão, dentro de cada fluido e variedade, conforme está apresentado na Tabela 20, para a

massa de caule fresco (MCF), massa das folhas frescas (MFF) e massa da parte aérea fresca (MPAF).

**Tabela 20.** Parâmetros da regressão da massa do caule fresco (MCF), massa das folhas frescas (MFF) e massa da parte aérea fresca (MPAF) em função da dose de cada fluido e variedade.

Fluidos	MCF (g)	
	Neon	BRS 321
Catiônico	$\hat{y} = 42 + 1,72x$ $R^2 = 0,62$	$\hat{y} = 54,0 + 1,60x$ $R^2 = 0,70$
NA NaCl	$\hat{y} = 43 - 3,28x$ $R^2 = 0,87$	$\hat{y} = 52,2 - 2,37x$ $R^2 = 0,87$
NA KCl	$\hat{y} = 40 - 1,79x$ $R^2 = 0,53$	$\hat{y} = 55,9 - 2,81x$ $R^2 = 0,88$
	MFF (g)	
Catiônico	$\hat{y} = 33 + 1,1x$ $R^2 = 0,45$	$\hat{y} = 30 + 0,4x$ $R^2 = 0,29$
NA NaCl	$\hat{y} = 31 - 2,3x$ $R^2 = 0,87$	$\hat{y} = 30 - 1,7x$ $R^2 = 0,88$
NA KCl	$\hat{y} = 32 - 2,4x$ $R^2 = 0,83$	$\hat{y} = 30 - 1,8x$ $R^2 = 0,78$
	MPAF (g)	
Catiônico	$\hat{y} = 75 + 2,8x$ $R^2 = 0,57$	$\hat{y} = 84 + 2,0x$ $R^2 = 0,67$
NA NaCl	$\hat{y} = 74 - 5,6x$ $R^2 = 0,94$	$\hat{y} = 82 - 4,1x$ $R^2 = 0,89$
NA KCl	$\hat{y} = 72 - 4,2x$ $R^2 = 0,71$	$\hat{y} = 86 - 4,6x$ $R^2 = 0,86$

\*, \*\*: Equação significativa pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente.

A avaliação do coeficiente angular das equações de regressão permitiu estudar os efeitos da aplicação dos tipos de fluido de perfuração no desenvolvimento de cada variedade de girassol. Coeficientes angulares positivos e significativos representam um ganho da variável avaliada com o aumento da dose do fluido em questão, enquanto que coeficientes angulares negativos representam redução dessa variável com o aumento da dose. A proporção de ganho ou perda em termos percentuais (decimal) para cada aumento de  $1 \text{ Mg ha}^{-1}$  de fluido pode ser obtida pela razão entre o coeficiente angular pelo coeficiente linear. Multiplicando essa proporção por determinada dose de fluido, chega-se à porcentagem (decimal) de ganho ou perda provocada por essa dose de fluido em relação ao controle.

A MCF do girassol aumentou significativamente com o aumento da dose do fluido catiônico (Tabela 20). Em relação ao controle, a maior dose do fluido catiônico ( $8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) resultou em aumento de 33% na MCF para a variedade Neon e de 24% para a variedade BRS 321. Efeito semelhante foi observado para a MFF da variedade Neon, aumentando em 27% em relação ao controle, enquanto que na variedade BRS 321, o efeito não foi significativo ( $\alpha > 0,05$ ).

Enquanto que o fluido catiônico promoveu ganhos de massa fresca (caule e folhas), os fluidos não aquosos (NA) saturados com NaCl ou KCl prejudicaram o crescimento das duas variedades de girassol. Em relação ao controle, a maior dose de fluido NA NaCl resultou em redução de 61 e 36 % da MCF para a variedade Neon e BRS 321, respectivamente. A mesma tendência foi observada para MFF que reduziram em 59 e 45% de acordo com as variedades. Já as plantas cultivadas em solo com doses do fluido NA KCl, as reduções em relação ao controle foram de 36 e 40% para a MCF, 60 e 48% para a MFF nas variedades Neon e BRS 321, respectivamente. Os dois fluidos NA apresentam uma composição semelhante, diferindo apenas no componente utilizado para saturar a solução, sendo normalmente utilizado o NaCl. O fluido NA KCl foi produzido experimentalmente justamente para o desenvolvimento desse experimento, onde o NaCl foi substituído pelo KCl.

Como foi observado no resumo da análise de variância (Tabela 21) o teor de matéria seca (%MS) no caule e nas folhas do girassol não foi influenciado significativamente pelas doses dos fluidos. Portanto, a relação entre a biomassa fresca e seca é direta, não sendo influenciadas pelos tratamentos. Logo, os efeitos observados em cada uma dessas variáveis serão equivalentes. Na Tabela 21, são apresentadas as equações da regressão linear da massa de caule seca (MCS), massa de folhas secas (MFS) e massa da parte aérea seca (MPAS) de cada variedade em função da dose de cada fluido de perfuração.

Observando os coeficientes angulares das equações de regressão para a MCS, MFS e MPAS em função das doses do fluido catiônico, pode-se constatar que os efeitos não foram significativos ( $\alpha > 0,05$ ). Associado a este fato ainda é possível inferir que o baixo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) dessas regressões, indica reduzida associação entre a massa seca (de caule e folhas) com as doses do fluido catiônico (Tabela 21). Vale destacar que a massa também fora determinada antes da secagem (biomassa fresca), conforme apresentado acima, onde foi observado efeito significativo e positivo da adição do fluido catiônico ao solo.

**Tabela 21.** Parâmetros da regressão da biomassa seca (caule, folha e caule+folha) em função da dose de cada fluido e variedade.

Fluidos	Neon	BRS 321
	Caule (g)	
Catiônico	$\hat{y} = 5,4 + 0,23x^{ns} R^2 = 0,29$	$\hat{y} = 9,0 + 0,12x^{ns} R^2 = 0,48$
NA NaCl	$\hat{y} = 5,3 - 0,45x^{**} R^2 = 0,86$	$\hat{y} = 7,8 - 0,36x^{**} R^2 = 0,93$
NA KCl	$\hat{y} = 4,8 - 0,26x^{*} R^2 = 0,45$	$\hat{y} = 9,3 - 0,59x^{**} R^2 = 0,93$
	Folha (g)	
Catiônico	$\hat{y} = 4,5 + 0,09x^{ns} R^2 = 0,20$	$\hat{y} = 4,8 - 0,04x^{ns} R^2 = 0,22$
NA NaCl	$\hat{y} = 4,2 - 0,33x^{**} R^2 = 0,83$	$\hat{y} = 4,5 - 0,27x^{**} R^2 = 0,88$
NA KCl	$\hat{y} = 4,0 - 0,32x^{**} R^2 = 0,84$	$\hat{y} = 4,6 - 0,32x^{**} R^2 = 0,85$
	PA:caule+folha (g)	
Catiônico	$\hat{y} = 9,9 + 0,33x^{ns} R^2 = 0,27$	$\hat{y} = 13,8 + 0,08x^{ns} R^2 = 0,29$
NA NaCl	$\hat{y} = 9,5 - 0,78x^{**} R^2 = 0,90$	$\hat{y} = 12,3 - 0,63x^{**} R^2 = 0,91$
NA KCl	$\hat{y} = 8,8 - 0,58x^{**} R^2 = 0,65$	$\hat{y} = 13,9 - 0,91x^{**} R^2 = 0,95$

\*, \*\*: Equação significativa pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente.

Enquanto o fluido catiônico não promoveu efeito significativo na biomassa seca do girassol, os fluidos NA resultaram em diminuição significativa da biomassa seca com o aumento da dose aplicada. Com  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$  do fluido NA NaCl ocorreu um redução de aproximadamente 68 e 37% da biomassas seca do caule das variedades Neon e BRS 321, respectivamente. Em relação às folhas a redução foi de 63 e 48% de acordo com a variedade.

Com a aplicação da maior dose do fluido NA KCl a redução da biomassa seca do caule foi inferior ao outro fluido, resultando em diminuição de 43 e 51% para as variedades Neon e BRS 321, respectivamente. No entanto as perdas da biomassa de folhas secas observadas com a aplicação do fluido NA KCl foi semelhante ao outro fluido, 64 e 56%, de acordo com as variedades.

As equações de regressão da biomassa seca apresentadas acima para os fluido NA, são significativas e apresentam um bom coeficiente de determinação. Isso permite considerarmos que o efeito da adição dos fluidos de perfuração é linear, sendo regido por uma reta. Ao relacionarmos os efeitos provocados no crescimento do girassol pela adição de  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$  dos fluidos NA em relação ao controle encontram-se reduções relevantes do crescimento.

Entretanto essa dose é relativamente alta se considerarmos que o fluido de perfuração não é descartado diretamente ao solo, mas sim impregnado no cascalho de perfuração.

Com os avanços das tecnologias de recuperação dos fluidos da lama de perfuração, estima-se que a cascalho de perfuração ao ser descartado tenha menos de 10% de fluido. Nesse sentido somente elevadas doses de cascalho de perfuração promoveriam um aporte de 8 Mg ha<sup>-1</sup> de fluido no ambiente.

Com isso assumindo-se um aporte de 1 Mg ha<sup>-1</sup>, com a aplicação de 10 Mg ha<sup>-1</sup> de cascalho de perfuração, os efeitos provocados ao desenvolvimento do girassol são menos relevantes. Com base nas equações de regressão da MPAS, apresentadas acima, com a adição de 1 Mg ha<sup>-1</sup> de fluido NA NaCl ocorre um redução de 8,2 e 5,1 % em relação ao controle para as variedades de Neon e BRS 321, respectivamente. Já o fluido NA KCl compromete o crescimento da parte aérea (MPAS) em 6,6 e 6,5 % de acordo com a variedade. Esses efeitos provocados pela adição de 1 Mg ha<sup>-1</sup> do fluidos NA detectados pela análise de regressão são relativamente baixos.

Por esse motivo, uma análise estatística mais apurada, visando comparar o controle com as menores doses (1 e 2 Mg ha<sup>-1</sup>) pode revelar informações importantes. Na Tabela 22 está apresentado o resumo da comparação por contraste entre o tratamento controle com as menores doses dos fluidos para as duas variedades de girassol. O valor do contraste associado à significância permite inferir com menor incerteza se os efeitos provocados pela adição das menores doses de fluido são não significativos.

Nos testes de hipóteses da análise estatística, existem os erro tipo I e II, que respectivamente representam: a decisão de rejeitar a hipótese nula quando de fato ela é verdadeira; e a decisão de não rejeitar a hipótese nula quando de fato ela é falsa. A escolha do nível de significancia permite controlar o erro tipo I, sendo que quanto menor o nível de significância do teste (representado pela letra grega  $\alpha$ ), menor será a probabilidade de ocorrência desse erro. No entanto, para um tamanho fixo da amostra, não há como controlar simultaneamente ambos os erros, por isso convencionou-se que o erro tipo I seria mais sério.

De fato, na maior parte dos casos, é mais importante só rejeitarmos a hipótese nula quando realmente a hipótese alternativa diferir (por exemplo, um adubo só será melhor se apresentar um ganho mínimo de produtividade). Porém no caso deste estudo, o erro tipo II torna-se mais sério, pois busca-se avaliar se a adição dos tratamentos não é prejudicial (por exemplo, um herbicida seletivo só será adequado se não causar danos relevantes à cultura de interesse).

Apesar de o nível de significancia do erro tipo II não poder ser definido durante a análise estatística, alternativamente pode-se diminuir a probabilidade de sua ocorrência aumentando o nível de significância do  $\alpha$ . Portanto, neste caso, o rigor da análise aumenta com o valor de  $\alpha$  crítico, por isso, neste caso sempre que o  $\alpha$  for maior que 0,2 o efeito será considerado não significativo.

Definidos os critérios, ao analisarmos a Tabela 22 observa-se que a adição de 1 Mg ha<sup>-1</sup> do fluido catiônico ao solo, a MPAS do girassol da variedade Neon difere significativamente do controle, promovendo um ganho da biomassa, conforme apresentado acima. Nas mesmas condições, a variedade BRS 321 não diferiu significativamente de controle, apresentado  $\alpha > 0,5$ . Com a adição de 2 Mg ha<sup>-1</sup> do mesmo fluido, os efeitos também não foram significativos em relação ao controle para ambas as variedades.

**Tabela 22.** Comparação por contraste entre a massa da parte aérea seca (MPAS) do controle em relação a aplicação de 1 e 2 Mg ha<sup>-1</sup> dos respectivos fluido de perfuração.

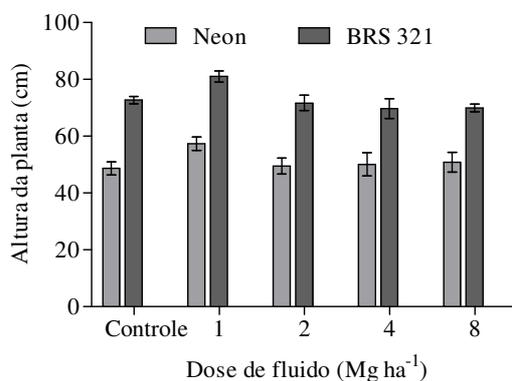
Fluidos	Neon		BRS 321	
	Contraste	Pr>F	Contraste	Pr>F
	-----Controle x 1 Mg ha <sup>-1</sup> -----			
Catiônico	9,87	0,18	0,03	0,91 <sup>ns</sup>
NA NaCl	2,99	0,26 <sup>ns</sup>	2,92	0,20 <sup>ns</sup>
NA KCl	2,06	0,36 <sup>ns</sup>	1,16	0,47 <sup>ns</sup>
	-----Controle x 2 Mg ha <sup>-1</sup> -----			
Catiônico	1,90	0,54 <sup>ns</sup>	1,11	0,52 <sup>ns</sup>
NA NaCl	7,06	0,09	0,18	0,73 <sup>ns</sup>
NA KCl	1,68	0,41 <sup>ns</sup>	5,04	0,15

Contraste: Valor do contraste; Pr>F: Probabilidade de  $\alpha$  pelo teste t.

Nas parcelas onde foi adicionado 1 Mg ha<sup>-1</sup> dos fluidos NA (KCl e NaCl), a MPAS do girassol não diferiu significativamente ( $\alpha > 0,2$ ) do controle. No entanto, com o aumento da dose dos fluidos para 2 Mg ha<sup>-1</sup> o efeito deixou de ser não significativo ( $\alpha < 0,2$ ) para a variedade Neon, com a aplicação do fluido NA NaCl, e para a variedade BRS 321 com a aplicação do fluido NA KCl.

Com base nestas comparações, a aplicação de 1 Mg ha<sup>-1</sup> qualquer um dos fluido avaliados não prejudica a MPAS das variedades de girassol utilizadas. Nesta dosagem o fluido catiônico promove ganhos na MPAS. Na comparação utilizando 2 Mg ha<sup>-1</sup> o fluido catiônico também pode ser utilizado sem prejuízo ao desenvolvimento do girassol. No entanto, os fluidos NA passam a exigir cuidados, sendo necessário ponderar de acordo com a variedade.

A altura das plantas foi significativamente diferente entre as variedades de girassol, sendo que a variedade BRS 321 apresentou uma altura média de 73 cm, enquanto que a variedade Neon, 51 cm. As duas foram influenciadas pelas doses dos fluidos de perfuração, que não diferiram significativamente entre si. Na Figura 6, demonstra-se a altura das plantas de cada variedade em função das doses dos fluidos de perfuração (média dos 3 fluidos). Ambas as variedades apresentaram ganho em altura com a aplicação de 1 Mg ha<sup>-1</sup> de fluido, porém nas doses superiores a altura não diferiu significativamente do controle.

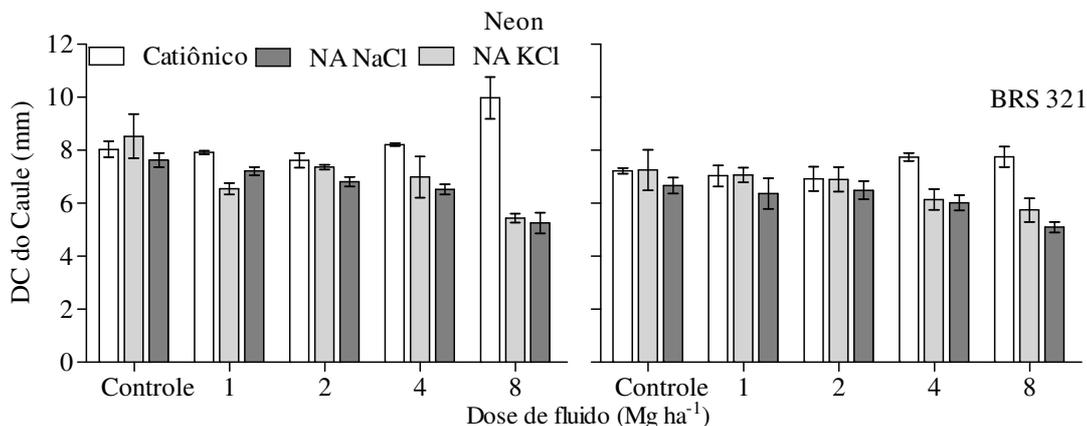


**Figura 6.** Altura (cm) de duas variedades de girassol em função das doses de fluido de perfuração (média dos fluidos).

O diâmetro do caule (DC) foi influenciado significativamente pelas doses dos fluidos de perfuração. No entanto, a interação significativa<sup>i</sup> entre os fluidos e doses, aponta para um

<sup>i</sup> Consultar resumo do quadro da ANOVA, Tabela 19, página 48.

efeito diferenciado das doses em cada fluido. Por conseguinte, na Figura 7 é apresentado o DC em cada variedade em função das doses de cada fluido, onde pode-se observar que com a aplicação de 4 e 8 Mg ha<sup>-1</sup> de fluido catiônico resulta no aumento do DC das variedades. Em compensação a aplicação de doses superiores a 4 Mg ha<sup>-1</sup> dos fluidos NA (NaCl e KCl) resultaram em redução significativa do DC, seguindo a mesma tendência observada anteriormente para a biomassa de caule e folhas.



**Figura 7.** Diâmetro do caule (mm) das variedades de girassol em função de doses dos tipos de fluido de perfuração.

#### 4.5.2. Efeitos na Concentração de Nutrientes no Girassol

Na tabela 25 está apresentado o resumo da análise de variância para os teores de N, P e K<sup>+</sup> presentes na raiz, caule e folhas do girassol em função das doses dos tipos de fluidos de perfuração utilizados. As variedades de girassol diferiram entre si em relação ao teores de N, P e K e apresentaram respostas diferenciadas com a aplicação dos tratamentos, por isso o desdobramento dos efeitos será realizado separadamente dentro de cada variedade. Os efeitos dos tratamentos não apresentaram uma tendência clara e evidente nos teores de nutrientes do tecido vegetal do girassol, por esse motivo os ajustes por análise de regressão linear não representam adequadamente os dados. Nesse sentido o desdobramento do efeito foi realizado por comparação de médias e o desvio padrão associado a cada variedade e tipo de fluido.

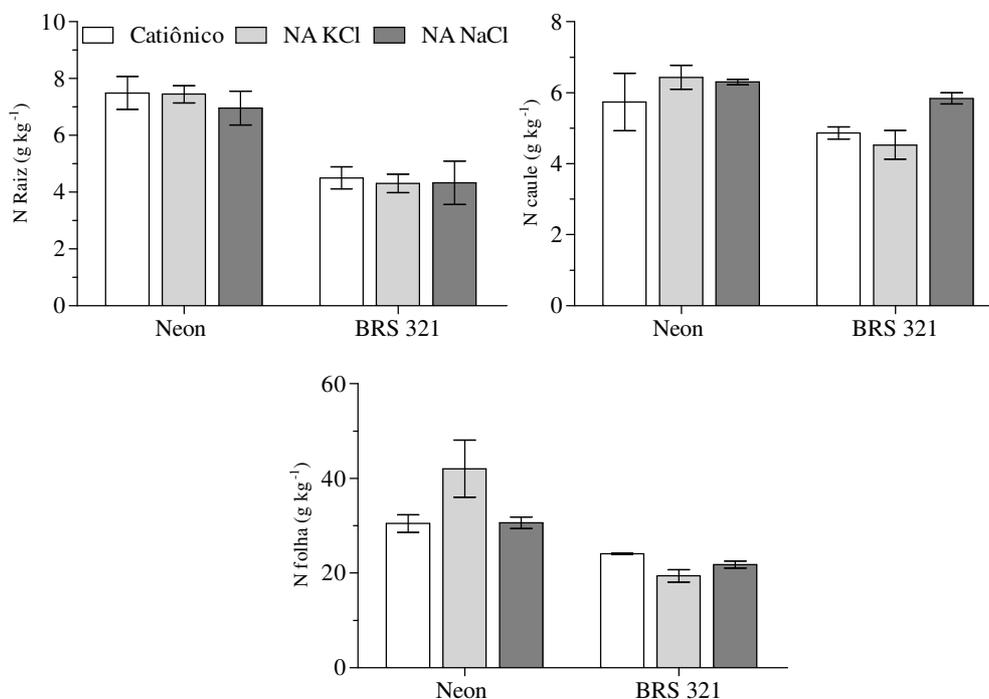
**Tabela 23.** Valores quadrado médio da análise de variância da concentração de N, P e K<sup>+</sup> nas raízes, caule e folhas do girassol.

Fonte de variação	N			P			K <sup>+</sup>		
	Raiz	Caule	Folha	Raiz	Caule	Folha	Raiz	Caule	Folha
Variedades (V)	121 <sup>**</sup>	25,6 <sup>**</sup>	3.320 <sup>**</sup>	5,58 <sup>**</sup>	0,72 <sup>**</sup>	4,05 <sup>**</sup>	138	2.271 <sup>**</sup>	4,0 <sup>ns</sup>
Fluído (F)	6,15 <sup>ns</sup>	9,70 <sup>ns</sup>	132 <sup>ns</sup>	2,93 <sup>**</sup>	3,77 <sup>**</sup>	2,26 <sup>**</sup>	129	849 <sup>**</sup>	2.127 <sup>**</sup>
Dose (D)	3,33 <sup>ns</sup>	2,13 <sup>ns</sup>	18,2 <sup>ns</sup>	0,20 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>**</sup>	0,59 <sup>**</sup>	177	1.279 <sup>**</sup>	3.151 <sup>**</sup>
V*F	3,76 <sup>ns</sup>	8,01 <sup>ns</sup>	49,4 <sup>**</sup>	0,47 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,26 <sup>ns</sup>	55,2	233 <sup>**</sup>	432 <sup>**</sup>
V*D	9,94 <sup>ns</sup>	9,16 <sup>ns</sup>	25,0 <sup>ns</sup>	1,30 <sup>*</sup>	0,26 <sup>*</sup>	0,47 <sup>**</sup>	5,64	97 <sup>*</sup>	66,0 <sup>**</sup>
F*D	7,73 <sup>ns</sup>	2,27 <sup>ns</sup>	56,9 <sup>ns</sup>	1,93 <sup>**</sup>	0,24 <sup>**</sup>	0,83 <sup>**</sup>	24,7	174 <sup>**</sup>	379 <sup>**</sup>
V*F*D	7,22 <sup>ns</sup>	1,46 <sup>ns</sup>	60,5 <sup>ns</sup>	0,32 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>*</sup>	0,30 <sup>*</sup>	6,08	26 <sup>ns</sup>	71,0 <sup>*</sup>
CV	30,0	26,3	27,2	31,9	17,2	9,5	38	36	11,9

<sup>\*\*</sup>, <sup>\*</sup>: Fator significativo pelo teste F com p<0,05 e 0,01, respectivamente; <sup>ns</sup>: não significativo.

As variedades de girassol diferiram significativamente entre si em relação ao teor de N total nas diferentes partes da planta, sendo que a variedade Neon sobressaiu-se da BRS 321 (Figura 8). Nas raízes e no caule o teor de N não foi influenciado significativamente pelas

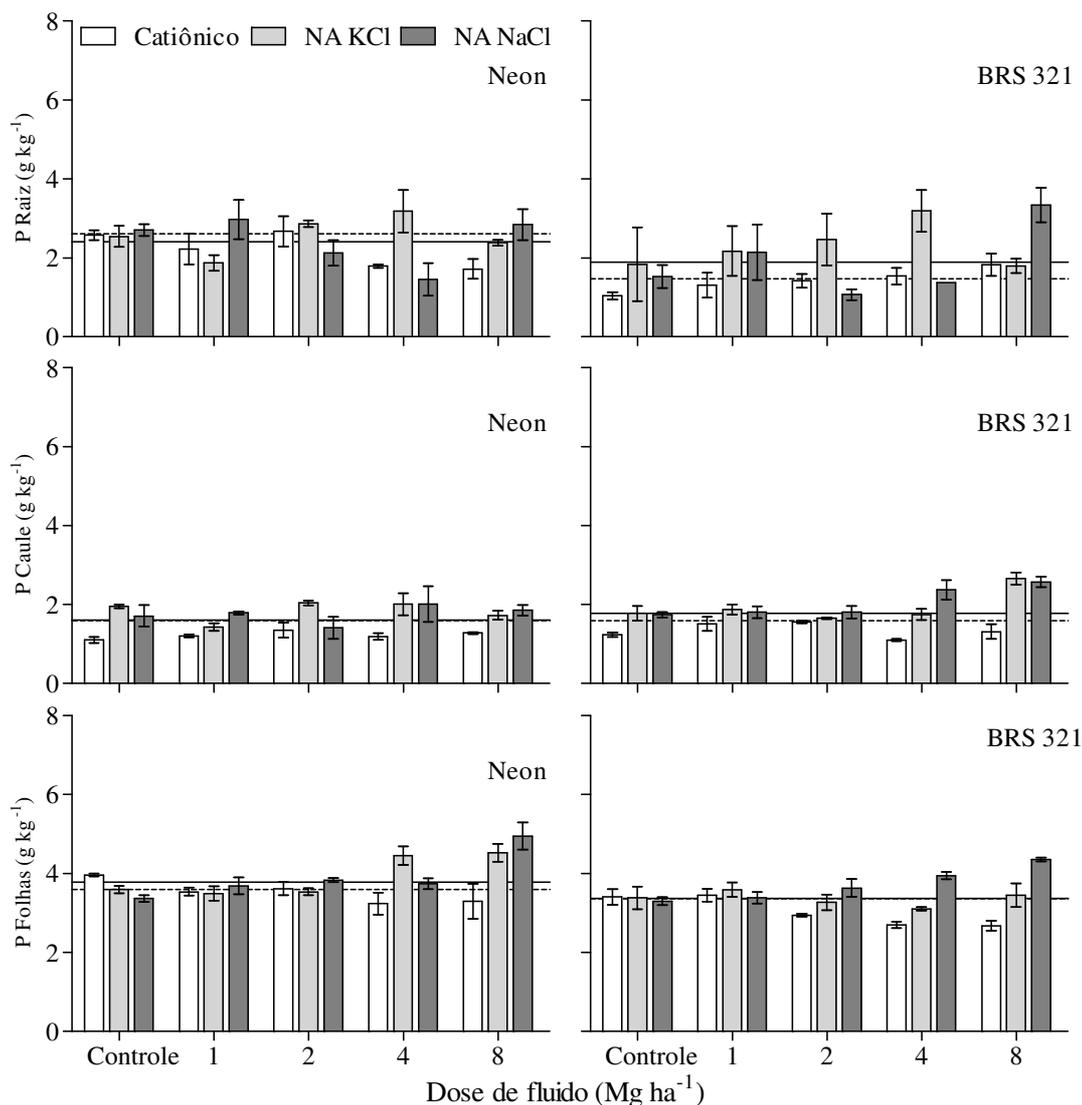
doses dos tipos de fluido de perfuração, já nas folhas da variedade Neon, o fluido NA KCl promoveu aumento significativo no teor de N. O teor médio de N verificado nas folhas da variedade Neon foi de 34,2 g kg<sup>-1</sup> enquanto que para a variedade BRS 321 foi de 21,8 g kg<sup>-1</sup>, estando próximos à faixa recomendada para folhas de girassol que é de 33 a 35 g kg<sup>-1</sup> (Malavolta, 1997).



**Figura 8.** Teor de N total na raiz, caule e folhas das duas variedades de girassol cultivadas em solo com doses de três fluidos de perfuração. A barra representa o erro padrão das médias.

A diferença no teor de N das duas variedades também foi observada no experimento do primeiro capítulo deste trabalho, onde as plantas foram cultivadas em solução nutritiva, sendo que a variedades Neon e BRS 321 apresentaram um teor de N de 38,9 e 36,9 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Assim como ocorreu no primeiro capítulo, onde a salinidade praticamente não afetou no teor de N do girassol, os fluidos de perfuração também não prejudicaram o suprimento desse nutriente às plantas. O aporte de N através dos fluidos é praticamente desprezível, pois apresentam em sua composição baixos teores desse nutriente, o fluido catiônico: 1,1 g kg<sup>-1</sup>; fluido NA NaCl: 1,6 g kg<sup>-1</sup> e o fluido NA KCl: 1,8 g kg<sup>-1</sup>.

Na 0 são apresentadas as médias do teor de P da raiz, caule e folhas em função das doses dos fluidos de perfuração avaliados. As raízes da variedade Neon no controle (linha pontilhada) apresentaram um teor médio de P de 2,6 g kg<sup>-1</sup>, sendo semelhante à média dos tratamentos (linha contínua) que foi de 2,4 g kg<sup>-1</sup>. O efeito dos tratamentos foi discreto, causando redução no teor de P em doses superiores a 4 Mg ha<sup>-1</sup> do fluido catiônico. Para a variedade BRS 321 o fluido NA KCl apresentou tendência à contribuir significativamente com o teor de P das raízes, os demais tratamento não apresentaram uma tendência evidente. A média geral e do controle foram de 1,9 e 1,5 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente.



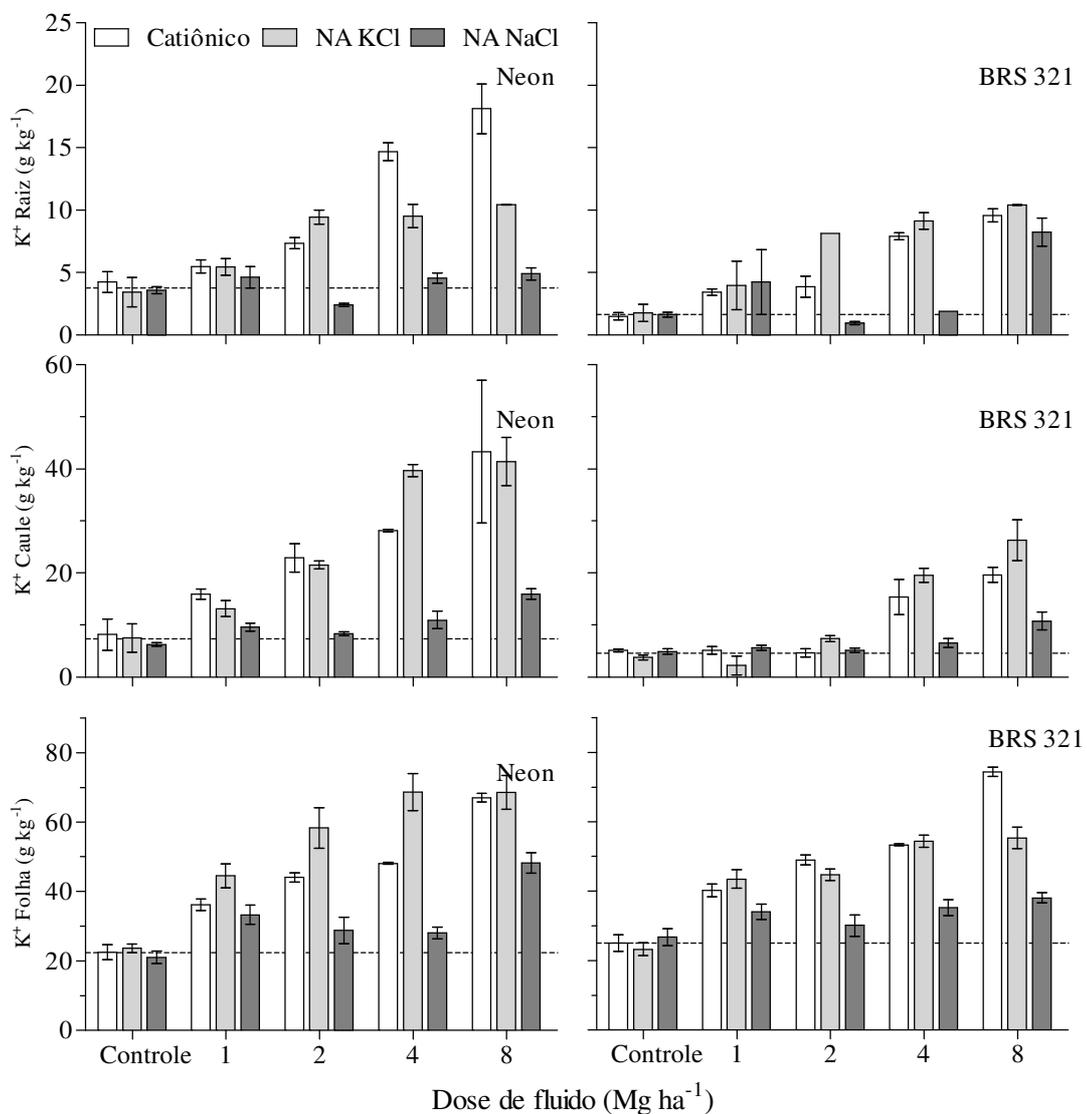
**Figura 9.** Teor de P total na raiz, caule e folhas das duas variedades de girassol cultivadas em solo com doses de três fluídos de perfuração. A barra representa o erro padrão das médias. Linha contínua representa a média geral dos dados, enquanto que a linha pontilhada a média dos controles.

Avaliando os teores de P no caule das variedades de girassol (0) contata-se que os fluídos de perfuração avaliados não interferem significativamente nesta variável. Para a variedade Neon, os teores médios dos tratamentos e do controle foram iguais, 1,6 g kg<sup>-1</sup>; para a variedade BRS 321 a média geral e do controle também foram próximas, 1,8 e 1,6 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Somente a aplicação da maior dose dos fluídos NA (NaCl e KCl) promoveram ganhos significativos no teor de P total no caule da variedade BRS 321.

Nas folhas do girassol o teor de P foi superior ao encontrado no caule e nas raízes, no entanto, o efeito dos tratamentos permanece discreto. Para a variedade Neon, a média geral e do controle foi de 3,8 e 3,6 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, sendo que somente a maior dose dos fluídos NA promoveram ganhos significativos dessa variável. Em relação à variedade BRS 321, o teor médio observado foi de 3,4 g kg<sup>-1</sup>, novamente a aplicação da maior dose do fluido NA NaCl promoveu ganho no teor de P.

O P é um elemento com alta mobilidade entre as partes da planta e o teor pode variar em relação à idade da planta e do estágio de desenvolvimento. Castro e Oliveira (2005), consideram um teor de foliar de P suficiente ou médio entre 2,9 a 4,5 g kg<sup>-1</sup>; portanto os teores observados para as folhas estão dentro dessa faixa. Já Malavolta (1997) considera a faixa de 4 a 7 g kg<sup>-1</sup> adequada para as folhas do girassol no início do florescimento.

Em relação ao teor de K<sup>+</sup> no girassol percebe-se que os tratamentos induziram um efeito significativo nas diferentes partes da planta (Figura 10). Nas raízes da variedade Neon o teor de K<sup>+</sup> no controle foi de 1,6 g kg<sup>-1</sup> enquanto que para a variedade BRS 321 foi de 3,8 g kg<sup>-1</sup>. Com o aumento das doses dos fluidos NA KCl e catiônico também ocorreu um gradativo acúmulo de K<sup>+</sup> nas raízes de ambas variedades de girassol. Já o fluido NA NaCl não apresentou efeito para esta variável.



**Figura 10.** Teor de K<sup>+</sup> total na raiz, caule e folhas das duas variedades de girassol cultivadas em solo com doses de três fluidos de perfuração. A barra representa o erro padrão das médias.

No caule, os teores de K<sup>+</sup> no controle foram de 7,3 e 4,6 g kg<sup>-1</sup> para as variedades Neon e BRS 321, respectivamente. Com o aumento das doses dos fluidos catiônico e

NA KCl, ocorreu gradativo acúmulo de  $K^+$  no caule do girassol; na variedade Neon, os teores passaram de  $40 \text{ g kg}^{-1}$  nas maiores doses dos fluidos. Já para a variedade BRS 321, as maiores doses dos mesmos fluidos resultaram em concentrações de  $K^+$  do caule em torno de  $20 \text{ g kg}^{-1}$ .

Nas folhas o teor de  $K^+$  para o controle foi bem superior ao observado nas raízes no caule, atingindo  $22,4$  e  $25 \text{ g kg}^{-1}$  para as variedades Neon e BRS 321, respectivamente. Porém com a aplicação dos fluidos catiônico e NA KCl ocorreu um gradativo aumento do teor de  $K^+$  nas folhas chegando a atingir teores acima de  $60 \text{ g kg}^{-1}$  nas maiores doses desses fluidos. Esse efeito está de acordo com a composição química desses fluidos que apresentam considerável teor de  $K^+$  total, sendo que o fluido NA KCl apresenta  $50,9 \text{ g kg}^{-1}$  de  $K^+$  e o fluido catiônico,  $43,2 \text{ g kg}^{-1}$ .

A cultura do girassol apresenta uma elevada demanda por  $K^+$ , sendo requerido em grandes quantidades para completar o ciclo. De acordo com Malavolta (1997) o teor de  $K^+$  recomendado em folhas de girassol do terço superior, na época do florescimento é entre  $20$  a  $24 \text{ g kg}^{-1}$ . Já Raij (1996) recomenda concentrações entre  $30$  a  $45 \text{ g kg}^{-1}$  para amostras de quinta e sexta folhas abaixo do cáculo.

Apesar de as análises desse estudo não terem adotado o padrão de amostragem sugerida pelos autores citados, a concentração de  $K^+$  observada nas folhas do girassol foram bem acima do recomendado para essa cultura. Isso evidentemente pode repercutir em desequilíbrio nutricional da planta, tanto que Malavolta (1997) aponta que excesso de  $K^+$  pode causar deficiência de  $Mg^{2+}$  nas plantas. Esse efeito realmente foi observado e será discutido na sequência. Contudo, os fluidos NA KCl e catiônico promoveram um aporte de  $K^+$  ao solo que repercutiram em elevação da concentração desse nutriente nas plantas.

O resumo da análise de variância para os teores de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $Na^+$  nas diferentes partes do girassol em função dos tratamentos está apresentado na Tabela 24. Os fatores avaliados influenciaram significativamente na concentração daqueles nutrientes, porém para o  $Na^+$ , que não é nutriente essencial, somente houve efeito significativo nas raízes, pois no caule e folhas a concentração de  $Na^+$  foi inferior ao limite de detecção do método.

**Tabela 24.** Valores quadrado médio da análise de variância das concentrações de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $Na^+$  nas raízes, caule e folhas do girassol.

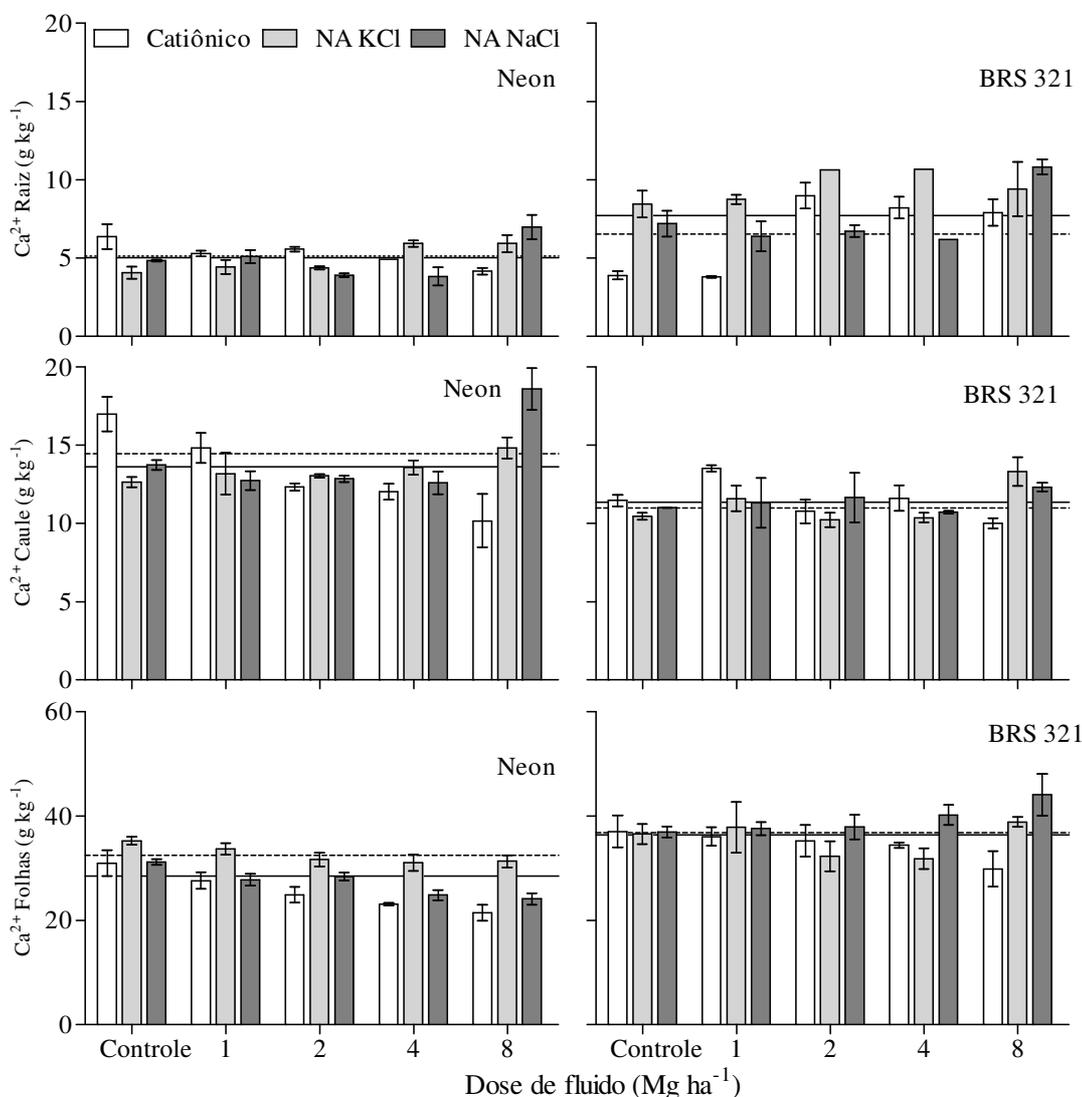
Fonte de variação	$Ca^{2+}$			$Mg^{2+}$			$Na^+$		
	Raiz	Caule	Folha	Raiz	Caule	Folha	Raiz	Caule	Folha
Variedades (V)	143**	114**	1.427**	1,95**	85,2**	0,00 <sup>ns</sup>	85,1**		
Fluído (F)	5,1**	1,71 <sup>ns</sup>	133**	0,24 <sup>ns</sup>	105**	251**	54,0**		
Dose (D)	9,0**	7,26**	42,3*	0,58*	88,6**	237**	4,0 <sup>ns</sup>		
V*F	13,7**	1,54 <sup>ns</sup>	163**	0,43 <sup>ns</sup>	2,30 <sup>ns</sup>	2,78 <sup>ns</sup>	3,97 <sup>ns</sup>	<LQ	<LQ
V*D	7,6**	2,98 <sup>ns</sup>	35,9*	0,45 <sup>ns</sup>	8,76**	10,4**	1,74 <sup>ns</sup>		
F*D	6,6**	16,3**	24,2 <sup>ns</sup>	0,72**	14,6**	24,5**	9,68*		
V*F*D	3,6**	5,70**	15,0 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	1,83*	3,95*	2,51 <sup>ns</sup>		
CV	15,4	11,1	10,9	27,3	12,6	9,3	35		

\*, \*\*: Fator significativo pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente; <sup>ns</sup>: não significativo. <LQ: Teor do nutriente menor que o limite de detecção do método.

Os teores de  $Ca^{2+}$  nas raízes da variedade Neon não foram influenciados significativamente pelas doses dos fluidos de perfuração (Figura 11), sendo que a concentração média observada para a variedade Neon foi de  $5 \text{ g kg}^{-1}$ . Para a variedade BRS 321, o teor de  $Ca^{2+}$  nas raízes o efeito foi semelhante resultando em ganhos com a aplicação dos fluidos de perfuração, o teor médio constatado foi de  $7 \text{ g kg}^{-1}$ .

A aplicação do fluido catiônico resultou em sutil redução no teor de  $Ca^{2+}$  no caule do girassol, enquanto que os demais fluidos não causaram efeito significativo. O teor médio de

Ca<sup>2+</sup> no caule das variedades Neon e BRS 321 foi de 14 e 11 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, valor acima do encontrado por Zobiole (2010), onde o teor médio Ca<sup>2+</sup> no caule do girassol aos 42 dias após emergência foi 8,6 g kg<sup>-1</sup>.



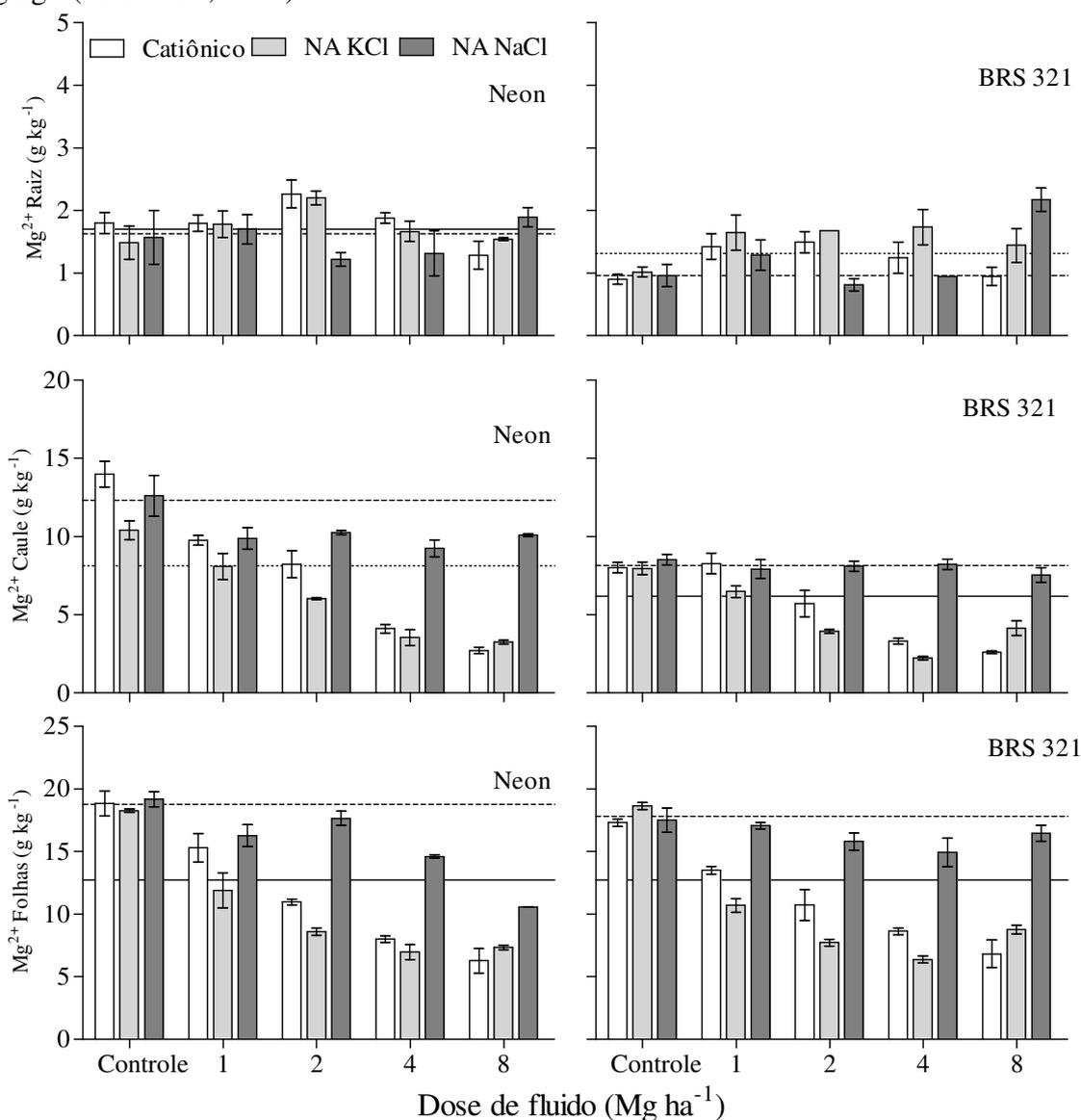
**Figura 11.** Teor de Ca<sup>2+</sup> total na raiz, caule e folhas das duas variedades de girassol cultivadas em solo com doses de três fluídos de perfuração. A barra representa o erro padrão das médias. Linha contínua representa a média geral dos dados, enquanto que a linha pontilhada a média do controle.

Avaliando o teor de Ca<sup>2+</sup> nas folhas da variedade Neon, contata-se que a aplicação dos fluidos catiônico e NA NaCl ao solo resultaram em redução significativa do teor de Ca<sup>2+</sup>. Enquanto que no controle da variedade Neon o teor de Ca<sup>2+</sup> das folhas foi de 32,5 g kg<sup>-1</sup>, a aplicação da maior dose dos fluidos catiônico e NA NaCl resultou na redução para 21,5 e 24,1 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Mesmo com a redução do teor de Ca<sup>2+</sup> das folhas da variedade Neon, os teores estão acima da faixa recomendada por Malavolta (1997) que é 17 a 22 g kg<sup>-1</sup>. Nas mesmas condições o fluido NA KCl não interferiu no teor de Ca<sup>2+</sup>.

Para as folhas da variedade BRS 321, o teor médio de Ca<sup>2+</sup> foi de 36,9 g kg<sup>-1</sup>, sendo pouco influenciado pelos tratamentos, com destaque somente para a maior dose do fluido

catiônico que resultou em redução no teor de  $\text{Ca}^{2+}$  para  $30 \text{ g kg}^{-1}$ . Fato que não traz implicações negativas ao cultivo do girassol.

Em relação ao teor de  $\text{Mg}^{2+}$  total nas raízes do girassol, o efeito provocado pela adição dos fluidos de perfuração não apresentou uma tendência evidente na variedade Neon. Já nas raízes da variedade BRS 321 os fluidos NA promoveram ganhos no teor de  $\text{Mg}^{2+}$ . No caule e nas folhas do girassol houve redução significativa e relevante do teor de  $\text{Mg}^{2+}$  com a aplicação dos fluidos catiônico e NA KCl. No controle o teor médio de  $\text{Mg}^{2+}$  das folhas foi de  $19 \text{ g kg}^{-1}$ , ocorrendo redução gradativa com a aplicação dos fluidos catiônico e NA KCl, com diminuição para 6 e  $8 \text{ g kg}^{-1}$ , com a aplicação de  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$  dos respectivos fluidos. Com a aplicação dos fluidos os teores de  $\text{Mg}^{2+}$  reduziram aquém da faixa ideal que seria de 9 a  $11 \text{ g kg}^{-1}$  (Malavolta, 1997).

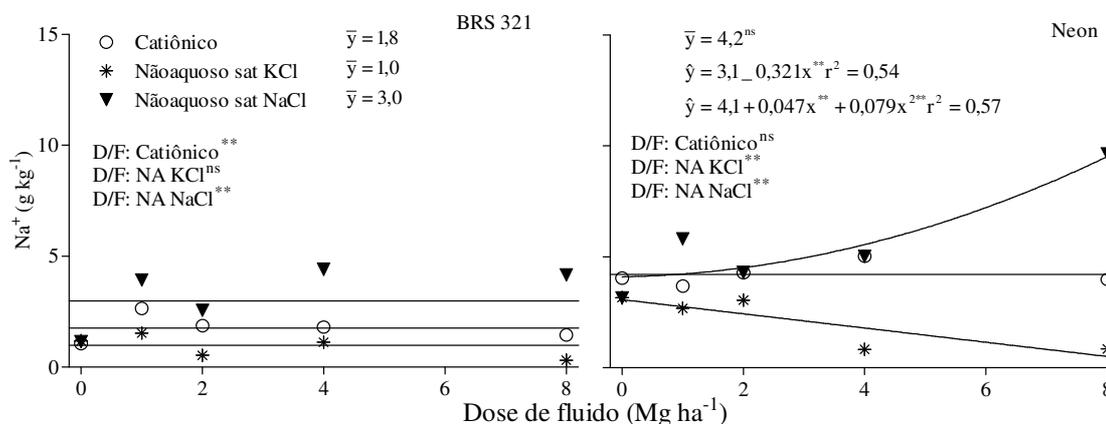


**Figura 12.** Teor de  $\text{Mg}^{2+}$  total na raiz, caule e folhas das duas variedades de girassol cultivadas em solo com doses de três fluidos de perfuração. A barra representa o erro padrão das médias. Linha contínua representa a média geral dos dados, enquanto que a linha pontilhada a média do controle.

A redução dos teores de  $\text{Mg}^{2+}$  na parte aérea do girassol não condiz com os ganhos nos teores de  $\text{Mg}^{2+}$  trocável do solo (Figura 17) provocada pela adição dos fluidos de perfuração,

variável que será abordada adiante. Ou seja, nas mesmas parcelas onde os fluidos promoveram ganhos no teor de  $Mg^{2+}$  trocável ocorreu redução desse nutriente na parte aérea das plantas. Esse efeito provavelmente está associado à deficiência induzida pelo excesso de  $K^+$  trocável constatado nestas parcelas (Figura 15). Para confirmar essa interação competitiva é possível avaliar a correlação de Pearson entre o teor de  $Mg^{2+}$  nas folhas das plantas com o teor de  $K^+$  trocável do solo ( $-0,55^{**}$ ) e com o teor de  $K^+$  nas folhas ( $-0,89^{**}$ ). Ambas as correlações de Pearson sugeridas foram significativas ao nível de significância de 1%, apresentando coeficientes negativos, confirmando o efeito competitivo  $K^+$  com o  $Mg^{2+}$ .

O teor de  $Na^+$  nas diferentes partes da variedade BRS 321 não foi influenciado significativamente pelas doses dos três tipos de fluido de perfuração. Nas raízes o teor médio de  $Na^+$  de  $2\text{ g kg}^{-1}$  (Figura 13), enquanto que na parte aérea o teor foi menor que o limite de detecção do método (Tabela 24). Em relação ao teor de  $Na^+$  no tecido vegetal da variedade Neon após o cultivo em solo com doses dos fluidos de perfuração, constatou-se que o aporte de  $Na^+$  ao solo promovido pelo fluido NA NaCl resultou em aumento da concentração de  $Na^+$  nas raízes. No controle o teor médio de  $Na^+$  foi de  $4\text{ g kg}^{-1}$ , aumentando para  $10\text{ g kg}^{-1}$  com a aplicação de  $8\text{ Mg ha}^{-1}$  do fluido NA NaCl. Já o fluido NA KCl promoveu redução significativa no teor de  $Na^+$  nas raízes da variedade Neon, chegando a próximo de  $1\text{ g kg}^{-1}$  com a aplicação de  $8\text{ Mg ha}^{-1}$ . Esse efeito provavelmente seja devido ao efeito competitivo dos íon monovalentes  $Na^+$  e  $K^+$ , pois com a aplicação do fluido NA KCl ocorreu relevante aporte de  $K^+$  ao solo, portanto, o balanço entre o  $Na^+$  e o  $K^+$  desfavoreceu a absorção do  $Na^+$ . Na parte aérea da mesma variedade o teor de  $Na^+$  foi abaixo do limite de detecção do método, portanto irrelevante para causar efeitos adversos na condição nutricional da planta.



**Figura 13.** Teor de  $Na^+$  total na raiz das duas variedades de girassol em função das doses de três fluidos de perfuração. <sup>\*\*</sup>: Equação significativa com  $p < 0,01$  respectivamente. <sup>ns</sup>: Equação não significativa, sendo apresentada a média dos dados.

#### 4.5.3. Efeitos no Solo Após o Cultivo

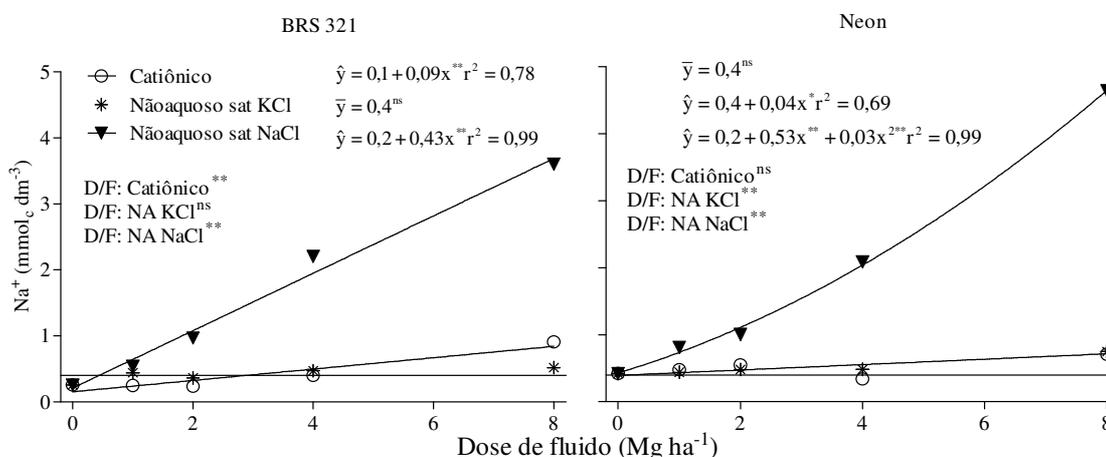
Além das avaliações realizadas nas plantas é imprescindível avaliarmos os efeitos causados pelos fluidos de perfuração no solo após o período de incubação e cultivo das plantas. Neste período os processos naturais de mineralização de compostos orgânicos através da atividade de microorganismos resultaram em modificações da composição do solo. Nesse sentido está apresentado na Tabela 25 o resumo da ANOVA das análises de rotina de fertilidade do solo ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ , P, pH e PST), de onde pode-se extrair informações importantes para os desdobramentos dos efeitos de cada fator.

**Tabela 25.** Valores quadrado médio da ANOVA das análises de rotina de fertilidade do solo após a aplicação das doses dos fluidos de perfuração e cultivo das variedades de girassol

Fonte de variação	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	P	pH	PST
Variedades (V)	0,56 <sup>**</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	15,63 <sup>**</sup>	6,19 <sup>**</sup>	1,22 <sup>**</sup>	247,6 <sup>**</sup>	0,72 <sup>**</sup>	8,07 <sup>**</sup>
Fluído (F)	14,25 <sup>**</sup>	1,26 <sup>*</sup>	6,58 <sup>**</sup>	2,75 <sup>*</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	17,3 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>**</sup>	213 <sup>**</sup>
Dose (D)	6,67 <sup>**</sup>	13,71 <sup>**</sup>	3,72 <sup>**</sup>	11,59 <sup>**</sup>	0,35 <sup>**</sup>	7,1 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>**</sup>	77,2 <sup>**</sup>
V*F	0,08 <sup>**</sup>	0,80 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>	4,17 <sup>**</sup>	0,49 <sup>**</sup>	149,1 <sup>**</sup>	0,10 <sup>**</sup>	0,34 <sup>ns</sup>
V*D	0,10 <sup>**</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	3,54 <sup>**</sup>	1,20 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	9,3 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>**</sup>	0,69 <sup>**</sup>
F*D	3,91 <sup>**</sup>	4,54 <sup>**</sup>	1,52 <sup>ns</sup>	1,52 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	9,7 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>**</sup>	48,6 <sup>**</sup>
V*F*D	0,15 <sup>**</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	3,02 <sup>**</sup>	1,74 <sup>*</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	24,6 <sup>**</sup>	0,05 <sup>**</sup>	0,90 <sup>**</sup>
CV	12,9	28,0	5,9	17,3	26,1	8,8	2,0	12,3

, \*\*: Fator significativo pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente; <sup>ns</sup>: não significativo.

Em análise conjunta das variáveis pode-se constatar que os efeitos foram significativos na maior parte das fontes de variação, incluindo interações entre os fatores, por esse motivo o desdobramento desse fatorial torna-se indispensável para a correta atribuição dos efeitos. Na Figura 14, por exemplo, é apresentado o teor de Na<sup>+</sup> trocável ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) do solo em função das doses de cada fluido de perfuração onde foi cultivada cada variedade de girassol. A aplicação do fluido não aquoso saturado com NaCl (NA NaCl) ao solo resultou em aumento significativo do teor de Na<sup>+</sup> do solo (em ambas variedades). Esse efeito é devido à utilização de NaCl na formulação desse fluido, resultando em elevada concentração de Na<sup>+</sup> no resíduo<sup>1</sup>.



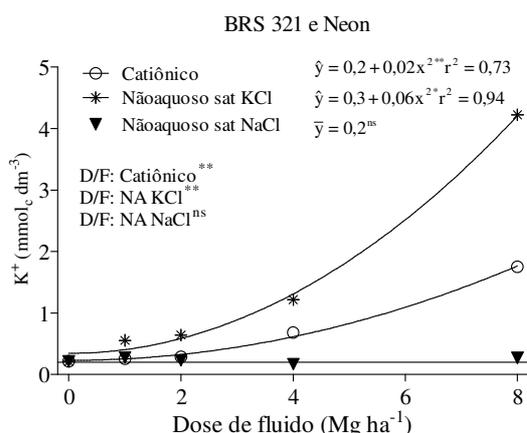
**Figura 14.** Teor de sódio trocável ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) do solo após o cultivo do girassol (cv. BRS 321 à esquerda e cv. Neon à direita) em função das doses dos fluidos de perfuração. \*, \*\*: Equação significativa com  $p < 0,05$  e  $0,01$  respectivamente.

A presença de sais nos solos pode afetar a produtividade da maior parte das plantas de interesse econômico, principalmente por conta da dificuldade que estas, quando submetidas a ambientes assim, possuem de absorver água. Isso ocorre devido ao potencial osmótico ou devido à toxicidade desses íons, quando a salinidade é dada principalmente por cloreto de sódio. O excesso de sódio nos solos, da mesma forma que o estresse osmótico, também afeta a população microbiana, fazendo com que a taxa de mineralização seja reduzida, diminuindo, assim, a liberação de nutrientes da matéria orgânica, como o enxofre e o nitrogênio (Santos e Muraoka, 1997).

<sup>1</sup> Ver composição química dos fluido na Tabela 17, página 46

Apesar do significativo incremento de  $\text{Na}^+$  trocável ao solo, o teor constatado com a aplicação da maior dose (8  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) do fluido NA NaCl foi abaixo de  $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , que na prática tem baixo potencial de salinização do solo e/ou de causar toxidez às plantas. Entretanto, deve-se atentar para a proporção entre o teor de  $\text{Na}^+$  trocável com as demais bases, pois de fato, a avaliação isolada desse elemento não é adequada. Essa abordagem será tratada adiante, mais especificamente na Figura 19.

Já na Figura 15 pode observar que a concentração de  $\text{K}^+$  trocável do solo após o cultivo é influenciada significativamente pelo aumento da dose dos fluidos catiônico e NA KCl aplicados. Enquanto que o fluido NA NaCl apresentou-se inerte nesta variável. O aumento do teor de  $\text{K}^+$  trocável de  $0,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (no controle) para 2 e  $4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  com a aplicação de  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$  dos fluidos catiônico e NA KCl, respectivamente, representa um aspecto favorável da aplicação desses resíduos. O  $\text{K}^+$ , assim como o  $\text{Na}^+$ , quando presente em elevada concentração no solo pode trazer prejuízos ao desenvolvimento de plantas não adaptadas, pois podem provocar efeitos de salinidade. Entretanto cabe ressaltar que tais efeitos só podem ser observados quando a concentração de  $\text{K}^+$  ultrapassar valores ao menos 10 vezes superior ao encontrado no solo com  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$  do fluido NA KCl. Portanto a aplicação de elevadas doses de fluido de perfuração não trariam prejuízos ambientais, e consequentemente, ao desenvolvimento do girassol. O aporte de  $\text{K}^+$  trocável ao solo promovido pela adição dos fluidos NA KCl e Catiônico corroboram com os dados da caracterização desses resíduos, que de acordo com Tabela 17, apresentam  $50,9$  e  $43,2 \text{ g kg}^{-1}$  de  $\text{K}^+$ , respectivamente.



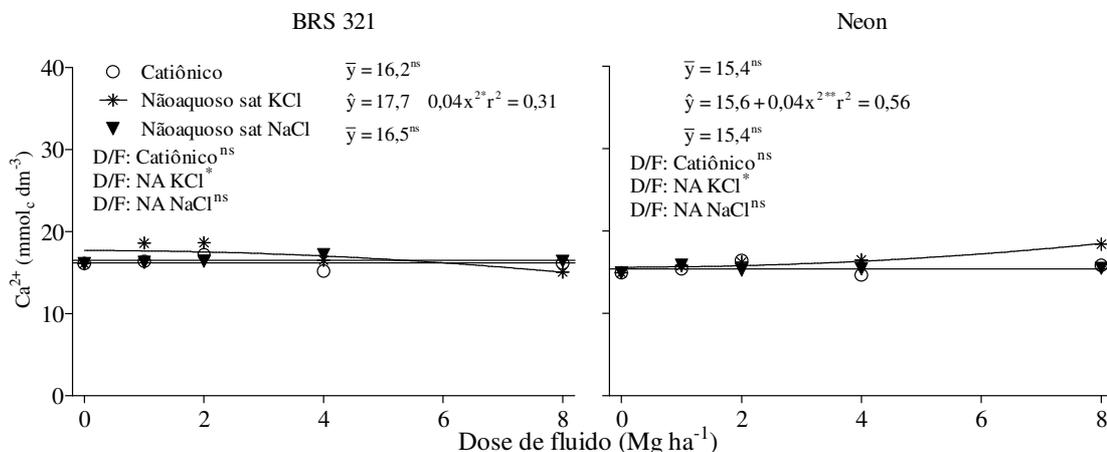
**Figura 15.** Teor de potássio trocável ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) do solo após o cultivo do girassol em função das doses dos fluidos de perfuração. \*, \*\*: Equação significativa com  $p < 0,05$  e  $0,01$  respectivamente.

Em relação ao  $\text{Ca}^{2+}$  trocável (Figura 16) o efeito da dose foi significativo somente com a aplicação ao solo do fluido NA KCl, para ambas as variedades. Os outros fluidos não resultaram em ganhos no teor de  $\text{Ca}^{2+}$  trocável do solo. Vale destacar que apesar de o fluido NA KCl ter causado efeito significativo do ponto de vista estatístico, o aumento da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  trocável no solo foi insignificante. A concentração média de  $\text{Ca}^{2+}$  de todas as parcelas foi de  $16 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  perfazendo um teor suficiente para o cultivo do girassol.

A contribuição dos fluidos no teor de  $\text{Ca}^{2+}$  trocável do solo após o cultivo do girassol tornou-se irrelevante, apesar de os fluidos NA NaCl e NA KCl apresentarem em sua composição<sup>i</sup>  $8,6$  e  $9,0 \text{ g kg}^{-1}$  de  $\text{Ca}^{2+}$ . Com isso pode-se levantar ao menos duas hipóteses plausíveis: ou o cálcio detectado na composição do fluido não encontra-se prontamente

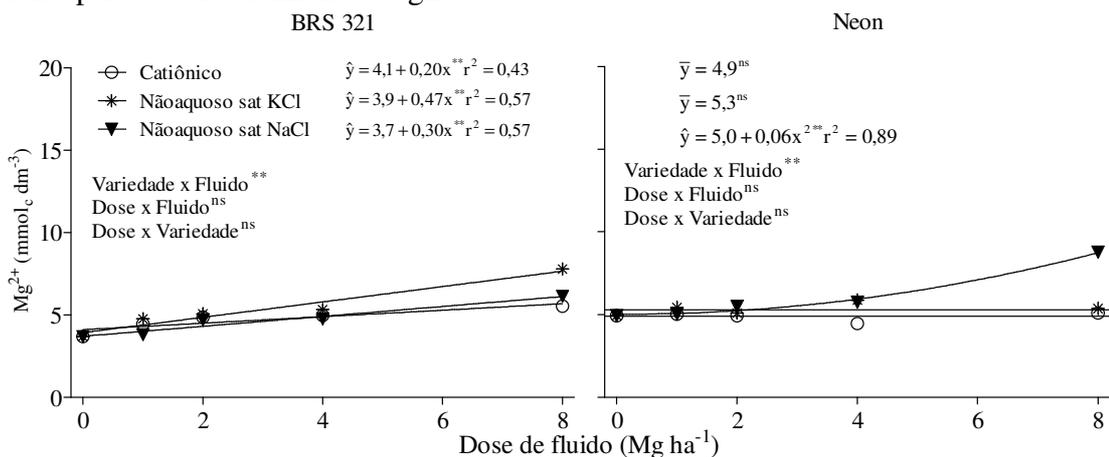
<sup>i</sup> Ver composição química dos fluido na Tabela 17, página 46

biodisponível ou simplesmente foi absorvido pelo girassol. O mais provável é que esteja relacionado com a biodisponibilidade do  $\text{Ca}^{2+}$ , porém mesmo que ocorresse total disponibilização as concentrações existentes nos resíduos não seriam suficientes para prejudicar o desenvolvimento das plantas.



**Figura 16.** Teor de cálcio trocável ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) do solo após o cultivo do girassol (cv. BRS 321 à esquerda e cv. Neon à direita) em função das doses dos fluidos de perfuração. \*, \*\*: Equação significativa com  $p < 0,05$  e  $0,01$  respectivamente.

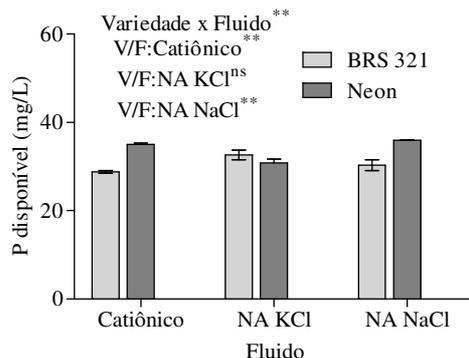
Para o teor de magnésio trocável ( $\text{Mg}^{2+}$ ) observa-se que a adição dos fluidos resultou em aumento significativo desse elemento no solo onde foram cultivadas as plantas da variedade BRS 321 (Figura 17). Em relação ao controle, que apresentou teor de médio de  $3,9 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ , a maior dose do fluido NA KCl elevou o teor de  $\text{Mg}^{2+}$  para  $7,7 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ; enquanto que a mesma dose do fluido NA NaCl e do fluido catiônico resultaram em teores de  $6,1$  e  $5,7 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ , respectivamente. No entanto, para as parcelas onde foi cultivada a variedade Neon, o teor de  $\text{Mg}^{2+}$  trocável do solo foi influenciado somente na maior dose de fluido NA KCl, o efeito dos outros fluidos não foi detectado. Somando os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis no controle contata-se um montante maior que  $20 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ , sendo suficiente para desenvolvimento do girassol.



**Figura 17.** Teor de magnésio trocável ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) do solo após o cultivo do girassol (cv. BRS 321 à esquerda e cv. Neon à direita) em função das doses dos fluidos de perfuração. \*, \*\*: Equação significativa com  $p < 0,05$  e  $0,01$  respectivamente.

Em relação ao teor de fósforo disponível (P), não foi observado efeito significativo derivado das doses e dos fluidos, entretanto a interação entre as variedades com fluidos foi

significativa ( $\alpha < 0,01$ ). A análise do efeito das variedades dentro de cada fluido, permite constatar que as variedades resultaram em diferentes teores de P nos solos que receberam os fluidos catiônico e NA NaCl. O desdobramento desse efeito pode ser observado na Figura 18, onde são apresentados os teores médios de P para cada fluido e variedade. O cultivo da variedade Neon nas parcelas onde foi usado os fluidos catiônico e NA NaCl resultou em maior teor de P quando comparada à variedade BRS 321. Isso pode estar associado a uma diferença na demanda de P entre as duas variedades. Os fluidos de perfuração não causaram efeito significativo no teor de P do solo, corroborando com o baixo teor de P total na composição<sup>i</sup> desses fluidos.



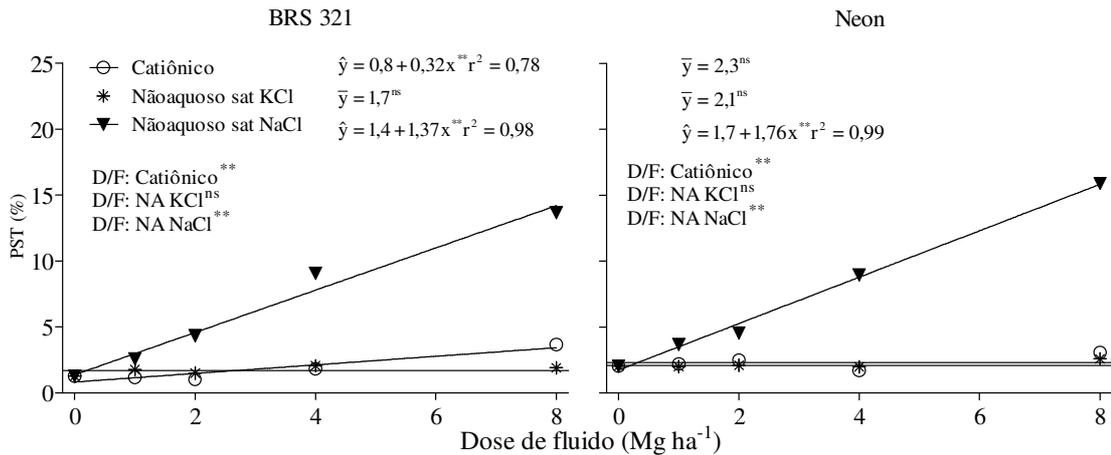
**Figura 18.** Teor de fósforo disponível ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) (Mehlich) do solo após o cultivo do girassol em função das variedades de girassol em cada fluido utilizado. V/F<sup>\*\*</sup>: influência significativa (Teste F com  $p < 0,01$ ) da variedade em cada nível de fluido.

A aplicação dos fluidos de perfuração promoveram relevantes contribuições nos teores de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  trocáveis, enquanto que para  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  os efeitos foram mais discretos. Apesar do incremento de  $\text{K}^+$  solo ser importante para a cultura do girassol, que apresenta elevada demanda por esse nutriente, deve-se atentar para o aporte de  $\text{Na}^+$  que pode causar efeitos de salinidade às plantas. Por isso a relação entre o teor de  $\text{Na}^+$  trocável com a soma das demais bases trocáveis torna-se mais adequada para apontar se a aplicação dos fluidos foi positiva para o complexo sortivo.

Na Figura 19 está apresentada a porcentagem de sódio trocável (PST) do solo que representa, em termos percentuais, justamente a relação apontada acima. Torna-se evidente que o fluido NA NaCl resulta em aumento significativo da PST do solo, proporcionalmente à dose aplicada. Na maior dose de fluido NA NaCl a PST atinge 12,3 e 15,8 % nas parcelas onde foi cultivada as variedades BRS 321 e Neon, respectivamente. A maior dose do fluido NA NaCl provocou uma elevação da PST para próximo do valor crítico normalmente adotado que é de 15%. Porém, se adotarmos um critério mais rígido, como por exemplo, uma PST crítica de 5%, ainda assim seria possível aplicar ao solo uma dose de  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  do fluido Na NaCl.

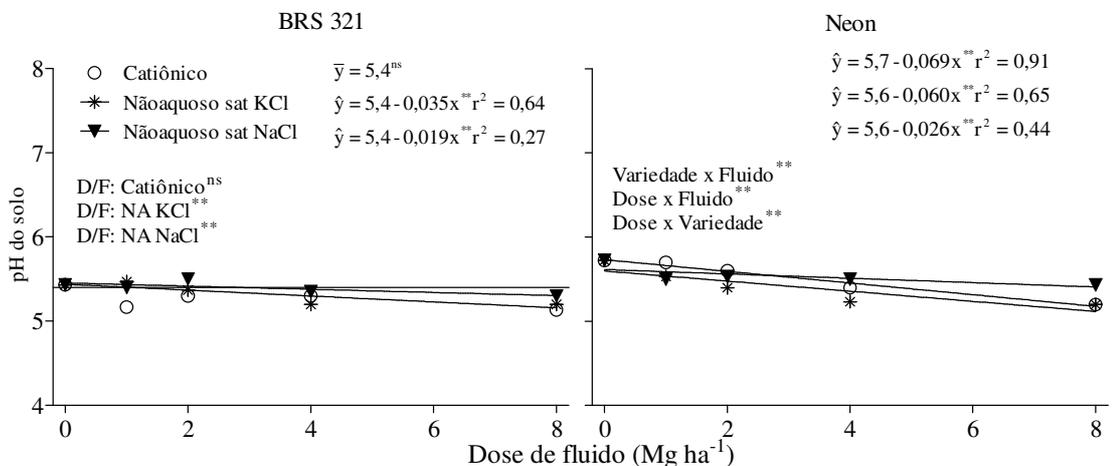
O fluido catiônico dá indícios de acréscimos da PST para as parcelas onde foi cultivada a variedade BRS 321, no entanto, como o fluido catiônico fornece simultaneamente o  $\text{K}^+$ , acaba compensando a sutil contribuição com  $\text{Na}^+$ . Na maior dose do fluido catiônico, o valor de PST não passa de 4%, estando bem abaixo dos 15% que qualificam os solos sódicos.

<sup>i</sup>Ver composição química dos fluido na Tabela 17, página 46



**Figura 19.** Porcentagem de sódio trocável do solo (PST) após o cultivo do girassol (cv. BRS 321 à esquerda e cv. Neon à direita) em função das doses dos fluidos de perfuração. \*\*: Equação significativa com  $p < 0,01$ .

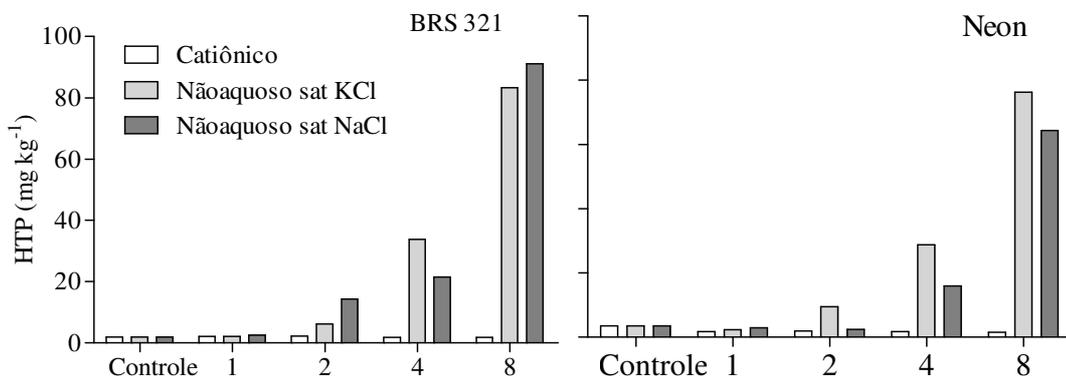
Na Figura 20 está apresentado o valores do pH solo após o cultivo do girassol em função das doses dos fluido de perfuração. De modo geral, a aplicação dos fluidos de perfuração provocaram uma sutil redução do pH do solo; partindo de um pH médio 5,5 no controle para 5,2 nas maiores doses dos fluidos avaliados. O efeito observado não traz implicações relevantes ao cultivo do girassol, mesmo sendo uma espécie sensível à toxidez por  $Al^{3+}$ . Portanto a aplicação dos fluidos de perfuração nas condições avaliadas não foi comprometedora.



**Figura 20.** Valores do pH do solo após o cultivo do girassol (cv. BRS 321 à esquerda e cv. Neon à direita) em função das doses dos fluidos de perfuração. \*\*: Equação significativa com  $p < 0,01$ .

Na Figura 21 está apresentada a concentração de hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) das amostras de solo após o cultivo do girassol em função das doses de cada fluido de perfuração. O fluido catiônico não promoveu aumento da concentração de HTP do solo, visto o baixo teor de HTP desse fluido. No entanto, a aplicação dos fluidos não aquosos (NA) promoveu significativo aumento da concentração de HTP no solo que naturalmente apresenta uma concentração de  $2 \text{ mg kg}^{-1}$ . Com a aplicação de  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$  do fluido NA KCl a concentração passou para  $83$  e  $76 \text{ mg kg}^{-1}$  no solo onde foi cultivado a variedade BRS 321 e Neon, respectivamente. Já com a aplicação da maior dose do fluido NA NaCl a concentração

de HTP do solo após o cultivo das plantas passou para 91 e 64 mg kg<sup>-1</sup> para as respectivas variedades.



**Figura 21.** Concentração de HTP (mg kg<sup>-1</sup>) das amostras de solo com doses de três fluidos de perfuração após o cultivo do girassol.

Os teores de HTP constatados no solo com a aplicação de 8 Mg ha<sup>-1</sup> dos fluidos não aquosos foram superiores ao valor de referência de qualidade estabelecidos pela Lista Holandesa (50 mg kg<sup>-1</sup>), porém bem abaixo do valor de alerta que seria de 505 mg kg<sup>-1</sup>. No entanto, se avaliarmos a aplicação de até 1 Mg ha<sup>-1</sup> dos fluidos NA, o teor médio de HTP de solo seria de 2,5 mg kg<sup>-1</sup>, bem abaixo dos 10 mg kg<sup>-1</sup> sugerido pela Lista Holandesa como valores de referência de qualidade.

Em relação ao teor de HTP presente nos fluidos (NA NaCl: 55.000 mg kg<sup>-1</sup>; Na KCl: 115.000 mg kg<sup>-1</sup>) a concentração observada no solo após o período de incubação e cultivo das plantas pode ser considerado insignificante. Evidentemente que ao dosar os resíduos inevitavelmente ocorre um efeito de diluição do mesmo, por isso a melhor forma de avaliarmos a dinâmica do HTP aplicado ao solo seria através do balanço de massa. Ou seja, considerar a quantidade de HTP aplicada ao solo através dos fluidos e avaliarmos a quantidade remanescente do HTP após o período de incubação e cultivo das plantas. Com essas informações é possível calcular a fração do HTP que foi degradada em cada parcela. Estas informações estão apresentadas na Tabela 26, em função da dose de cada fluido em que foram cultivadas as duas variedades de girassol.

**Tabela 26.** Balanço de massa a entre a quantidade de HTP aplicado (calculado com base nos teores dos fluidos) e quantidade detectada no solo de cada parcela após 40 dias de cultivo do girassol.

Fluido	Dose Mg ha <sup>-1</sup>	HTP <sub>Aplicado</sub> (Calculado) -----mg/parcela-----	HTP <sub>detectado</sub>		% HTP <sub>decomposto</sub>	
			BRS 321	Neon	BRS 321	Neon
			-----%-----			
NA KCl	1	186	1,0	2,3	99,5%	98,8%
	2	372	51,4	88,9	86,2%	76,1%
	4	744	380,9	319,7	48,8%	57,1%
	8	1489	973,7	889,4	34,6%	40,3%
NA NaCl	1	385,8	6,7	10,8	98,3%	97,2%
	2	771,6	147,0	5,3	80,9%	99,3%
	4	1543,3	234,6	167,0	84,8%	89,2%
	8	3086,5	1067,8	748,4	65,4%	75,8%
Catiônico	1	0,0002	<LQ*	<LQ	-	-
	2	0,0003	<LQ	<LQ	-	-
	4	0,0006	<LQ	<LQ	-	-
	8	0,0012	<LQ	<LQ	-	-

Cálculos de acordo com as equações apresentadas no item 4.4.1, na página 35. <LQ: Massa de HTP encontrada é menor ou igual ao solo natural (sem adição de fluido).

Ao avaliar a % HTP decomposto (Tabela 26), pode-se observar que a maior eficiência de mineralização dos HTP acontece com a aplicação das menores doses dos fluidos de perfuração. Quando a dosagem de fluido aumenta, a proporção dos HTP decompostos não acompanha o aumento da quantidade de HTP aplicado. Aplicando-se até 1 Mg ha<sup>-1</sup> de fluido NA KCl após 40 dias de cultivo de girassol da variedade BRS 321 mais de 99,5% do HTP é mineralizado, enquanto que no solo onde foi cultivada a variedade Neon a redução foi de 98,8%. Nas mesmas condições, a aplicação do fluido NA NaCl resultou em menor mineralização dos HTP, porém ainda significativa, 98,3 e 97,2% para as respectivas variedades.

Com o aumento da dose dos fluidos NA a proporção mineralizada diminui substancialmente. Utilizando 8 Mg ha<sup>-1</sup> do fluido NA KCl, aproximadamente 34,6% dos HTP adicionados são mineralizados nas parcelas onde foi cultivado a variedade BRS 321, enquanto que para a variedade Neon a redução foi de 40,3%. Tendência semelhante pode ser constatada na utilização da mesma dose do fluido NA NaCl, onde a redução foi de 65,4 e 75,8% para as respectivas variedades.

## 4.6 CONCLUSÕES

A biomassa seca do girassol não é afetada significativamente com a aplicação de até  $1 \text{ Mg ha}^{-1}$  dos fluidos não aquosos; em doses superiores ocorre redução gradativa do desenvolvimento. A aplicação de  $1 \text{ Mg ha}^{-1}$  do fluido catiônico promove ganhos significativos da biomassa do girassol, enquanto que as demais doses avaliadas não causam efeito significativo.

Os fluidos catiônico e NA KCl promovem ganhos nos teores de  $\text{K}^+$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis do solo, enquanto que o fluido NA NaCl provoca elevação do teor de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis. A avaliação da dosagem do fluido NA NaCl ao solo deve levar em consideração o aporte de  $\text{Na}^+$ . Nas condições avaliadas, a aplicação de até  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  do fluido NA NaCl não causa efeitos de salinidade.

Os fluido catiônico e NA KCl promovem elevações nos teores de  $\text{K}^+$  no tecido vegetal do girassol, resultando em redução no teor de  $\text{Mg}^{2+}$  na parte aérea. O fluido NA NaCl causa elevação no teor de  $\text{Na}^+$  somente nas raízes do girassol. Os fluidos de perfuração não influenciaram no teor de  $\text{Na}^+$  na parte aérea do girassol.

Os fluido não aquosos promovem relevante aporte de HTP ao solo, mas a maior parte desse compostos é mineralizada após o período de cultivo do girassol. Com a aplicação de até  $1 \text{ Mg ha}^{-1}$  as taxas de mineralização dos HTP foram superiores a 95%. Já o fluido catiônico não aporta HTP ao solo.

## **5      CAPÍTULO III**

### **EFEITO DA APLICAÇÃO DO CASCALHO DE PERFURAÇÃO COM DOSES DE TORTA DE CRAMBE NA EVOLUÇÃO DE CO<sub>2</sub> E NO CULTIVO DO GIRASSOL**

## 5.1 RESUMO

Nesta última etapa do trabalho, os estudos foram focados no cascalho de perfuração que efetivamente é o resíduo produzido durante a perfuração dos poços de petróleo. Adicionalmente foi inserido um adubo orgânico, visando atenuar possíveis impactos gerados no solo pelo cascalho de perfuração, a torta de crambe. O objetivo desta etapa foi avaliar os efeitos provocados no crescimento do girassol cultivado em solo com doses de cascalho de perfuração e torta de crambe. O experimento consistiu em um fatorial com seis doses de cascalho de perfuração e seis doses de torta de crambe, sob delineamento inteiramente casualizado. A parcela experimental consistiu de um pote com  $8 \text{ dm}^{-3}$  de solo com os respectivos tratamentos, onde foram cultivadas duas plantas de girassol por 45 dias. As avaliações realizadas nas plantas e no solo após o cultivo foram as mesmas do capítulo anterior, adicionalmente avaliou-se a taxa de mineralização através da evolução de  $\text{CO}_2$  do solo em parte das parcelas experimentais. A torta de crambe aumentou significativamente a evolução de  $\text{CO}_2$  do solo, proporcional à dose aplicada, enquanto que o cascalho de perfuração não contribuiu com carbono mineralizável e nem afetou a mineralização da torta de crambe. O acúmulo da biomassa do girassol aumentou com a aplicação de doses intermediárias de torta de crambe, para aplicações acima de  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$  ocorre redução da biomassa. A aplicação de doses de cascalho de perfuração maiores que  $30 \text{ Mg ha}^{-1}$  provocou uma redução da biomassa do girassol, esse efeito foi atenuado com a aplicação da torta de crambe. No tecido vegetal, o cascalho de perfuração promoveu ganhos nos teores de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , Fe e Cu; enquanto que a torta de crambe favoreceu o acúmulo de  $\text{K}^+$  e Fe, e redução nos teores de  $\text{Mg}^{2+}$ , Cu, Mn e Zn. O aumento no teor desses nutrientes na planta está associado às melhorias da fertilidade do solo, devido ao aporte de nutrientes através do cascalho de perfuração e da torta de crambe. A torta de crambe favoreceu o acúmulo de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis e P assimilável do solo após o cultivo, enquanto que a aplicação do cascalho de perfuração resultou em aumento significativo no teor de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis e P assimilável. A contribuição do cascalho de perfuração às bases trocáveis foi relevante, porém o considerável aporte de  $\text{Na}^+$  trocável limita a dose de cascalho, para não causar efeitos de salinização ao solo. Mais 90% da quantidade HTP aplicados através do cascalho de perfuração foram mineralizados durante os 45 dias de cultivo. O cascalho de perfuração não afeta a evolução de  $\text{CO}_2$  durante o processo de mineralização da torta de crambe; e promove melhorias na fertilidade do solo, salvo o aporte de  $\text{Na}^+$  trocável, que deverá ser usado como critério para dosagem desse resíduo. A maior parte dos HTP oriundos do cascalho de perfuração aplicados ao solo é decomposta em até os 45 dias de cultivo.

**Palavras chave:** Salinidade. Resíduo. HTP.

## 5.2 ABSTRACT

In this last stage of labor studies were focused for the drill cuttings that will effectively be the residue produced during the drilling of oil wells. Additionally an organic fertilizer, to mitigate possible impacts generated by the drill cuttings, crambe pie was inserted. The purpose of this step was to evaluate the effects of the development of sunflower grown in soil with doses of drill cuttings and crambe pie. The experiment was a factorial with six doses of drill cuttings and six doses of the crambe pie under completely randomized design. The experimental plot consisted of a pot with  $8 \text{ dm}^3$  soil with their treatments, where two sunflower plants were grown for 45 days. Performed in the plants and soil after cultivation reviews were the same as the previous chapter additionally evaluated the rate of mineralization by soil  $\text{CO}_2$  evolution in part of the experimental plots. The crambe pie significantly influenced the evolution of soil  $\text{CO}_2$  increased proportionally to the dose applied. Have the drill cuttings not contributed mineralizable carbon and neither affected the mineralization of the crambe pie. Biomass accumulation Sunflower was favored by the application of intermediate doses of the crambe pie, for applications above  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$  in the inversion effect occurs. The application of drill cuttings without the crambe pie caused a reduction of biomass Sunflower, this effect was neutralized by applying Crambe pie. In plant tissue, the drill cuttings brought gains in levels of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , Fe and Cu, while the crambe pie favored the accumulation of K + and Fe, and reduced levels of  $\text{Mg}^{2+}$ , Cu, Mn and Zn. These effects are associated with the chemical composition of drill cuttings and crambe pie, which consequently promoted improvement of soil fertility. The crambe pie favored the accumulation of  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  exchangeable and P assimilated soil after cultivation, while the application of drill cuttings resulted in a significant increase in the content of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  exchangeable and assimilable P. The contribution of the drill cuttings to the exchangeable bases was relevant, but the considerable contribution of exchangeable  $\text{Na}^+$  induces a limitation of dosage to cause no effects of soil salinization. Over 90 % of the amount applied HTP through the drill cuttings were mineralized during the 45 days of cultivation. The drill cuttings does not affect the evolution of  $\text{CO}_2$  during the process of mineralization Crambe pie, and promotes improvements in soil fertility, unless the supply of exchangeable  $\text{Na}^+$ , which should be used as a criterion for determination of such waste. Most HTP derived from the drill cuttings applied to the soil is decomposed within 45 days of cultivation.

**Key words:** Salinity. Residue. HTP.

### 5.3 INTRODUÇÃO

A utilização de resíduos industriais como fonte de nutrientes ou como corretivos de acidez do solo não é recente. Essa tendência de reutilização de resíduos e/ou subprodutos torna-se necessária ao passo que a demanda por recursos para estas finalidades tem sido cada vez maiores, enquanto que as reservas naturais são finitas. Em contrapartida, a destinação de resíduos por parte da indústria é onerosa, inclusive a reutilização desses resíduos em outros processos muitas vezes não é efetuada por ser economicamente inviável. Conseqüentemente, tem-se a indústria gastando exacerbadamente para dispor um resíduo que apresenta potencial de utilização em outros setores, como a agricultura. Evidentemente que a destinação de resíduos para a aplicação em solos agrícolas deve atender uma série de critérios, principalmente do ponto de vista de contaminantes.

Durante as atividades de perfuração dos poços de petróleo o principal resíduo produzido é o cascalho de perfuração. Trata-se basicamente do material geológico que fora perfurado, impregnado com o fluido de perfuração remanescente do processo de recuperação do fluido. Nas últimas décadas as tecnologias de separação do fluido de perfuração passaram por relevantes avanços, impulsionados por questões ambientais e principalmente para otimizar recursos financeiros. Pois, aumentando a eficiência de recuperação dos fluidos, o cascalho de perfuração torna-se menos agressivo ao ambiente e com a reutilização dos fluidos diminuem-se os custos da perfuração.

Teoricamente o volume de cascalho gerado durante a perfuração de um poço é o volume geométrico do cilindro perfurado (chamado volume nominal do poço). Porém, no cálculo do volume de cascalho produzido é aplicado um coeficiente de segurança de 20% devido a eventuais desabamentos das formações para dentro do poço, que são normais durante a perfuração. O volume médio gerado em perfurações terrestres é de 13 m<sup>3</sup> para cada 100 m de avanço da perfuração, dependendo do diâmetro do poço.

O cascalho de perfuração pode variar amplamente em sua composição química, a depender da constituição da formação geológica perfurada, profundidade, tipo de fluido de perfuração utilizado e das técnicas empregadas na recuperação dos fluidos. Porém, de modo geral, apresenta constituição basicamente mineral, com presença de compostos orgânicos derivados dos fluidos de perfuração e, dependendo da fase de perfuração, de compostos derivados do petróleo.

O Crambe é uma alternativa de cultura de inverno para a produção de biodiesel, resultando na produção de coprodutos como a torta de crambe que pode ser utilizada na alimentação de ruminantes como fonte proteica (Silva, 2013). Assim como outras tortas oleaginosas, a torta de crambe apresenta potencial de utilização como adubo, porém ainda são escassas pesquisas para esta finalidade. Nesse estudo a torta de crambe foi utilizada com o intuito de avaliar possível atenuação promovida pela adição desse material orgânico, frente à salinidade do cascalho de perfuração.

Atualmente no país não existem diretrizes específicas para a destinação do cascalho de perfuração, estando submetida à lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. O art. 9º dessa lei prevê que na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deva ser observada uma ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Associado a isso o parágrafo VII do art. 6º dessa mesma lei, que define os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos, reconhece o resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania.

Neste contexto o desenvolvimento de pesquisas que visem a criação de tecnologias capazes de permitir a reutilização do cascalho de perfuração vai ao encontro dos dispositivos legais. Atualmente pesquisas têm apontado algumas possíveis alternativas para a reutilização do cascalho de perfuração, as mais promissoras têm sido na construção civil, sendo utilizado como preenchimento na pavimentação de rodovias e na formulação de concreto. No entanto, acredita-se que uma destinação mais nobre desse resíduo seja possível.

Para atenuar os efeitos da aplicação do cascalho de perfuração ao solo torna-se importante a utilização de uma fonte de matéria orgânica visando estimular o crescimento das plantas e da atividade microbiana, favorecendo a degradação de compostos orgânicos do cascalho de perfuração. Com base neste princípio optou-se neste trabalho por se utilizar a torta de crambe, que apesar de sua utilização como adubo orgânico ser ainda pouco difundida, apresenta como características promissoras a baixa relação C/N e, portanto rápida mineralização.

O objetivo desse capítulo foi avaliar os efeitos provocados pela adição de doses de cascalho de perfuração ao solo em combinação com doses de torta de crambe como condicionadora orgânica. Para tanto, foi realizado inicialmente um estudo para verificar a taxa de mineralização da torta de crambe em associação com o cascalho de perfuração que foram adicionados ao solo em diferentes doses. Posteriormente plantas de girassol foram cultivadas no mesmo solo, sendo avaliado o desenvolvimento das plantas e a concentração de nutrientes no tecido vegetal e no solo após o cultivo.

## 5.4 MATERIAL E MÉTODOS

O cascalho de perfuração utilizado nesse estudo foi obtido da perfuração de um poço (Locação MGP-774-8635, Poço 7-MGP 98-D BA) no Campo Miranga (12° 20' 28,0185 S''; 38° 11' 38,4890'' W), na Bacia do Recôncavo, município de Pojuca-BA, cuja finalidade foi a produção de óleo. Para a perfuração desse poço utilizou-se o fluido base óleo, que também é conhecido como base orgânica ou simplesmente não aquoso, esse tipo de fluido é bastante utilizado pois confere maior estabilidade ao poço, evitando o desmoronamento. Durante a perfuração do poço de 2.865 m de profundidade, fora coletada uma amostra simples de cascalho a cada 72 metros de avanço da perfuração, resultando em 40 amostras simples. Como a locação dispunha de três equipamentos de separação do fluido de perfuração (secador, centrífuga 1 e centrífuga 2) nesse estudo utilizou-se uma amostra composta de todos os equipamentos e/ou profundidades.

### 5.4.1. Ensaio de Mineralização da Torta de Crambe com Doses de Cascalho de Perfuração

O ensaio de mineralização foi conduzido no Laboratório de Estudos das Relações Solo-Água-Planta (LSP) do departamento de Solos da UFRRJ em dezembro de 2012. A evolução de CO<sub>2</sub> foi quantificada por respirometria ou C mineralizável, sendo o método preconizado por Stotzky (1965) e adaptado por Mendonça e Matos (2005). O método baseia-se na captura do CO<sub>2</sub> liberado de uma amostra de solo, por uma solução de NaOH.

Utilizou-se um delineamento experimental inteiramente casualizado em esquema fatorial 3 x 3, com três repetições. O primeiro fator, com três doses de torta de crambe (controle; 16 e 32 Mg ha<sup>-1</sup>), e o segundo fator com três doses de cascalho de perfuração (controle; 30; e 60 Mg ha<sup>-1</sup>), totalizando 27 parcelas. Cada unidade experimental foi composta por um recipiente plástico de 0,5 dm<sup>3</sup> hermeticamente fechado, contendo 100 g de substrato (Tabela 16) acrescido dos respectivos tratamentos. A mistura foi umedecida à 70 % da capacidade de campo e as condições ambientais foram controladas para que ficasse em ambiente com baixa luminosidade e temperatura média de 25±5,0 °C.

O CO<sub>2</sub> emitido durante a mineralização foi capturado em 30 ml de NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> acondicionado em copo plástico posicionado dentro de cada unidade experimental. Durante o ensaio procederam-se avaliações às 18 h aos 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 14, 19 e 25 dias após a aplicação dos tratamentos. Em cada avaliação foi renovada a solução de NaOH. A avaliação consistiu na titulação de 10 ml (1/3) da solução de captura, em erlenmeyer contendo 10 ml de cloreto de estrôncio 0,05 mol L<sup>-1</sup>. Após a adição de três gotas do indicador fenolftaleína titulou-se com HCl 0,25 mol L<sup>-1</sup> até o ponto de viragem (rosa para incolor).

A emissão de C-CO<sub>2</sub> (mg) foi então estimada pela seguinte equação:  $C-CO_2 = (B - V) \times M \times 6 \times (V_1 / V_2)$  Onde B é o volume (ml) gasto na titulação da prova em branco, V é o volume (ml) de ácido gasto na titulação de cada amostra, M é concentração molar do ácido utilizado na titulação e V<sub>1</sub>/V<sub>2</sub> é a razão entre o volume de NaOH usado na captura do CO<sub>2</sub> em relação ao volume usado na titulação, no caso 1/3.

A Tabela 27 apresenta as concentrações de nutrientes (N, P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe, Cu, Mn e Zn) e da torta de crambe e do cascalho de perfuração, além do teor de HTP do cascalho de perfuração, utilizados nos ensaios deste capítulo.

**Tabela 27.** Caracterização química da torta de crambe e do cascalho de perfuração.

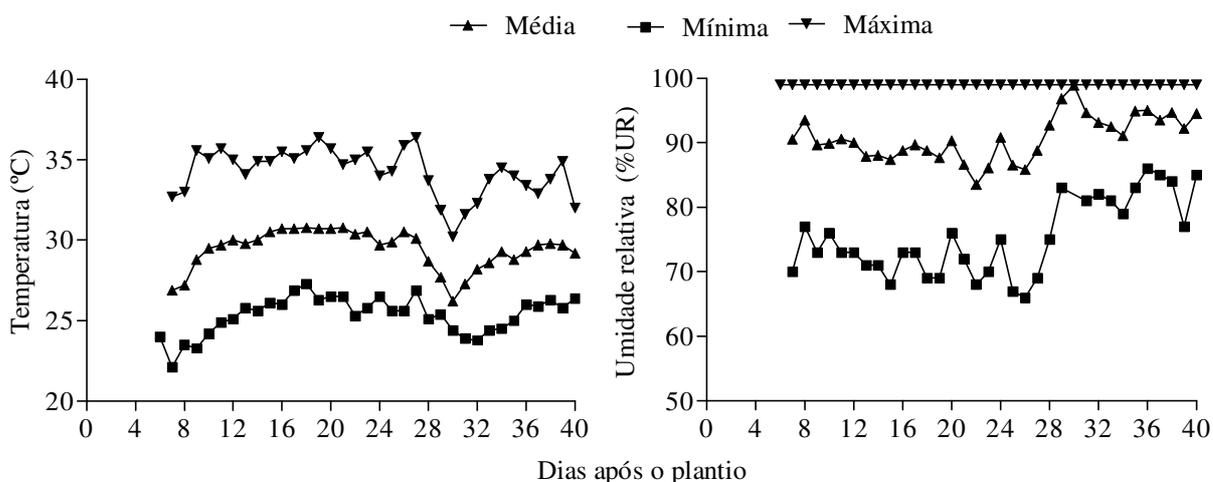
Material	pH	N	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>					
								g kg <sup>-1</sup>				
Torta de Crambe	5,12	38,9	3,12	8,7	8,6	3,1	0,0	140	5,4	22,1	44,5	-
Cascalho de perfuração	6,83	1,77	0,56	3,3	31,8	15,2	38,5	30.053	40,4	646	67,2	20.271

pH em água;

Os dados da emissão de CO<sub>2</sub> acumulada no decorrer dos 25 dias experimento foram submetidos aos testes de normalidade dos erros (Bartlett) e homogeneidade de variâncias (Cochran), com posterior análise de variância pelo teste F. Quando significativo com p<0,05 as médias de cada fator foram comparadas pelo teste de Tukey com p<0,05. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o programa SAS (SAS Institute Inc., 2010).

#### 5.4.2. Cultivo de Girassol em Solo com Doses de Cascalho de Perfuração e Torta de Crambe

O cultivo das plantas foi realizado na mesma casa de vegetação do experimento do capítulo II, localizada no Departamento de Solos da UFRRJ, durante os meses de dezembro de 2012 e março de 2013. A casa de vegetação é totalmente fechada e conta com sistema de controle de temperatura e umidade relativa do ar, os principais dados de temperatura e umidade relativa do ar estão apresentados na Figura 22.



**Figura 22.** Temperatura e umidade relativa médias, máximas e mínimas da casa de vegetação durante o cultivo do girassol.

Utilizou-se um delineamento experimental inteiramente casualizado em fatorial (6x6) com três repetições. O primeiro fator fora constituído de seis doses de cascalho de perfuração<sup>i</sup>. (controle, 5, 15, 30, 45 e 60 Mg ha<sup>-1</sup>) e segundo de seis doses de torta de crambe<sup>ii</sup> (controle, 2, 4, 8, 16 e 32 Mg ha<sup>-1</sup>). O produto do fatorial resultou em 36 tratamentos, que considerando as repetições, totalizaram 108 parcelas ou unidades experimentais.

Cada parcela foi constituída de um pote com 8 dm<sup>-3</sup> do mesmo solo utilizado no experimento do capítulo II (Planossolo háplico<sup>iii</sup>), acrescido dos respectivos tratamentos. A incorporação dos tratamentos ao solo foi realizada em betoneira por 5 minutos e posteriormente a mistura foi acomodada nos potes, onde adicionou-se água suficiente para

<sup>i</sup> Caracterização desse resíduo está apresentado na Tabela 27

<sup>ii</sup> Caracterização desse resíduo está apresentado na Tabela 27

<sup>iii</sup> Caracterização química da amostra de terra está disponível na Tabela 16, página 46.

atingir 70% da capacidade de campo. Passados 42 dias da incorporação dos tratamentos foram semeadas 10 sementes de girassol, após a germinação selecionou-se as duas plantas mais vigorosas de cada parcela que foram cultivadas durante 45 dias. Na data da coleta foi mensurado a altura das plantas e diâmetro do caule (DC), em seguida as plantas foram coletadas e separadas em raiz e parte aérea, para determinação de massa fresca (MRF, MPAF) e seca (MRS, MPAS), sendo realizadas as mesmas determinações do primeiro experimento. No solo, após a coleta, foram realizadas as mesmas análises do experimento referente ao capítulo II.

## 5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.5.1. Ensaio de Mineralização da Torta de Crambe com Doses de Cascalho de Perfuração

A Tabela 28 apresenta o resumo da análise de variância da evolução de CO<sub>2</sub> acumulada aos 25 dias após a incorporação dos tratamentos. Observa-se que a evolução de CO<sub>2</sub> foi influenciada significativamente pela aplicação da torta de crambe. Avaliando o desmembramento do efeito da torta em cada nível de cascalho de perfuração, também é possível verificar que a torta causou efeito significativo na emissão de CO<sub>2</sub> em todas as doses de cascalho de perfuração. Já o cascalho de perfuração utilizado não causou efeito significativo na respiração basal do solo, em todos os níveis de torta de crambe avaliados.

**Tabela 28.** Resumo da análise de variância da evolução de CO<sub>2</sub> acumulada até os 25 dias após a incorporação dos tratamentos.

Fonte de variação	QM
Torta (T)	86527 <sup>**</sup>
Torta/ Cascalho 0	29891 <sup>**</sup>
Torta/ Cascalho 30	31698 <sup>**</sup>
Torta/ Cascalho 60	25215 <sup>**</sup>
Cascalho (C)	222 <sup>ns</sup>
Cascalho/ Torta 0	427 <sup>ns</sup>
Cascalho/ Torta 16	55 <sup>ns</sup>
Cascalho/ Torta 32	16 <sup>ns</sup>
Interação*Cascalho	139 <sup>ns</sup>
CV%	8,9

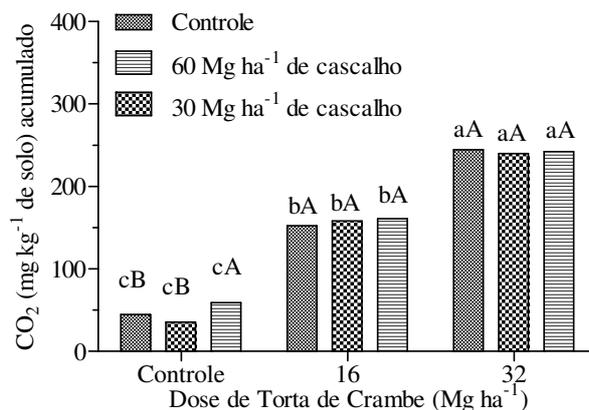
<sup>\*\*</sup>: Significativo pelo teste F com  $p < 0,01$ . <sup>ns</sup>: Não significativo. Torta/cascalho 0: Efeito da torta na ausência de cascalho. Cascalho/torta 0: Efeito do cascalho na ausência da torta.

O melhor entendimento dos efeitos dos tratamentos na evolução de CO<sub>2</sub> pode ser acompanhado pela Figura 23, onde é apresentada a média da emissão de CO<sub>2</sub> acumulada até os 25 dias, em função das doses de torta de crambe e cascalho de perfuração. A evolução de CO<sub>2</sub> aumenta proporcionalmente com as dose de torta de crambe, sendo esta a fonte majoritária do carbono respirado. Dentro de cada dose de torta crambe, o efeito do cascalho de perfuração não foi significativo.

Outros estudos também constaram aumento da emissão de CO<sub>2</sub> com a aplicação de resíduos orgânicos. Em um solo incubado com concentrado de vinhaça biodigerida, Xavier et al. (2011), constaram que a vinhaça *in natura* proporcionou maior respiração do solo quando comparada ao concentrado de vinhaça biodigerida.

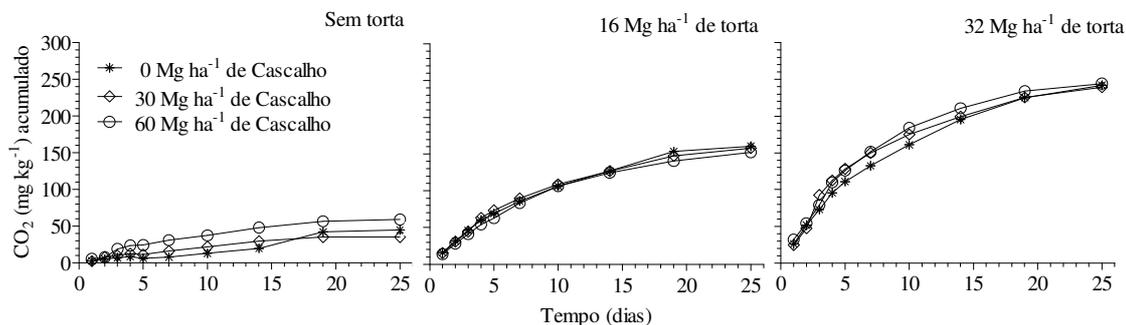
Já a influencia insignificante do cascalho de perfuração, que tem basicamente constituição mineral, não haveria de aumentar esse índice por não promover incremento significativo de carbono mineralizável em curto prazo. Entretanto, alguns fatores limitantes desse resíduo, principalmente em relação à salinidade, poderiam afetar negativamente a mineralização da torta de crambe, fato que não foi observado.

Em condições semelhantes, Freitas (2013) avaliou a mineralização da torta de mamona com diferentes doses de cascalho de perfuração, e da mesma forma, concluiu que respiração basal das duas classes de solo utilizadas não foi influenciada pelo cascalho de perfuração.



**Figura 23.** Evolução de CO<sub>2</sub> (mg kg<sup>-1</sup> de solo) acumulado 25 dias após a incorporação dos tratamentos. Barras seguidas de mesma letra minúscula para o cascalho e maiúscula para torta não diferem significativamente pelo teste de Tukey com p<0,01.

Outra informação importante em relação à mineralização é o tempo necessário para que ela ocorra, pois com isso é possível aprimorar as recomendações de adubação. Na Figura 24 está apresentada a evolução de CO<sub>2</sub> em função do tempo de incubação, nas diferentes doses de cascalho e torta de crambe. O cascalho de perfuração não causou efeito significativo na evolução de CO<sub>2</sub> durante a mineralização da torta de crambe.



**Figura 24.** Evolução de CO<sub>2</sub> acumulada (mg kg<sup>-1</sup>) em função do tempo com diferentes doses de cascalho de perfuração em cada dose de torta de crambe.

A acentuada elevação nos primeiros dias de incubação permite inferir que a torta de crambe possui rápida mineralização, estabilizando após 15 dias de incubação. Capuani et al. (2012) trabalhando com torta de mamona e algodão constaram que os resíduos influenciaram significativamente a atividade microbiana nos diferentes tipos de solo, apresentando-se como fontes para mineralização e fornecimento de nutrientes, tendo a torta de mamona proporcionado maior acúmulo de CO<sub>2</sub> liberado pelos microrganismos.

Segundo Poças et al. (2009), trabalhando com diferentes tipos de torta (mamona, algodão, girassol) em solos com texturas contrastantes, observaram que a mineralização de C-CO<sub>2</sub> média diária no solo com textura argilosa apresentou valor superior ao solo com textura arenosa. Severino et al. (2005) ao compararem resíduos agrícolas e esterco bovino, observaram que a torta de mamona apresentou uma mineralização mais intensa e consequentemente maior liberação de CO<sub>2</sub>.

### 5.5.2. Efeitos do Cascalho de Perfuração e da Torta de Crambe no Desenvolvimento do girassol

Em relação aos efeitos promovidos pelas doses de cascalho de perfuração e torta de crambe no crescimento e desenvolvimento do girassol pode-se observar através da Tabela 31, que ambos os fatores influenciaram significativamente ( $p < 0,01$ ) no diâmetro do caule (DC), altura das plantas e massa da parte aérea fresca (MPAF) e seca (MPAS).

**Tabela 29.** Valores do quadrado médio da análise de variância do diâmetro do caule (DC), altura das plantas, massa de parte aérea fresca (MPAF) e seca (MPAS), porcentagem de matéria seca na parte aérea (%MS) em função de doses de cascalho de perfuração e torta de crambe.

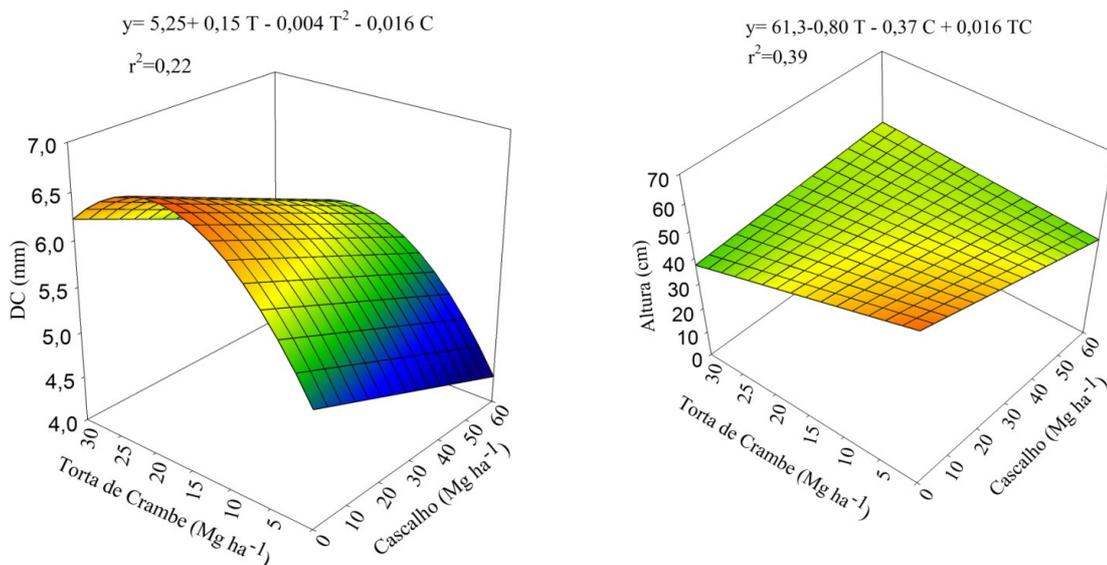
FV	DC	Altura	MPAF	MPAS	% MS
Cascalho (C)	2,86**	539,0**	298,4**	4,46**	0,00ns
Torta (T)	5,40**	462,8**	566,8**	6,32**	0,00ns
C*T	1,63*	157,9**	202,9**	2,79**	0,00**
CV%	16,5	16,9	34,1	33,84	10,6

\*, \*\*: Fator significativo pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente; ns: não significativo. DC: Diâmetro do caule; MPAF: Massa da parte aérea fresca; MPAS: Massa da parte aérea seca; %MS: Porcentagem de matéria seca.

A interação entre os dois fatores quantitativos também foi significativa para todas as variáveis. Nesta circunstância, a melhor forma de estudar os efeitos de cada fator é por análise de regressão linear múltipla, tomando o cascalho e a torta de crambe como variáveis independentes e cada avaliação (DC, altura, MPAF, MPAS) como variável dependente. Através dessa análise estatística é possível estudar os efeitos provocados por cada fator e como eles atuam sob interação.

Nas equações de regressão, coeficientes angulares positivos representam um ganho da variável com o aumento do fator, sendo o inverso verdadeiro. Quando o melhor ajuste da regressão linear múltipla contempla o termo quadrático, significa que o efeito da variável não é linear, aumentando a variável quando o coeficiente é positivo, e diminuindo, quando negativo. Por último, se a regressão apresentar o componente resultante do produto dos fatores (C\*T) o seu coeficiente representa a interação entres estes fatores. Outra informação relevante na interpretação da superfície de regressão se refere ao coeficiente de determinação ( $r^2$ ) que representa a fração da variância total que está sendo explicada pela modelo. Tendo amplitude unitária, ou seja, variando de 0 a 1, pode ser utilizado inadequadamente para eliminar modelos que apresentem  $r^2$  baixos. Nestes casos deve-se ressaltar na discussão que o modelo apresentado não contempla todos os fatores que interferem na variável, o que não desqualifica o modelo sugerido.

Na Figura 27 está apresentada a superfície de regressão do DC do girassol em função das doses de torta de crambe e do cascalho de perfuração. O DC médio foi de 5,5 mm, já no controle foi de 5,2 mm, diminuindo gradativamente com o aumento da dose de cascalho de perfuração. A aplicação da torta de crambe promove um ligeiro aumento do DC até a dose 24 Mg ha<sup>-1</sup> diminuindo gradativamente nas doses superiores. Apesar de a análise estatística apontar efeito significativo do cascalho e da torta de crambe no DC do girassol, observa-se que estes efeitos apresentam grandezas que podem ser consideradas irrelevantes ao desenvolvimento do girassol.



**Figura 25.** Diâmetro do caule (DC) e altura do girassol em função das doses de cascalho de perfuração e da torta de crambe. Modelo significativo com  $\alpha < 0,01$ .

Outros estudos com girassol também utilizaram esta variável apresentando respostas diferenciadas. Freitas et al., (2012) avaliaram o DC do girassol submetido a lâminas de irrigação com água de esgoto doméstico tratada e água de poço, os autores observaram um aumento significativo do DC quando utilizaram a água de esgoto em relação ao controle (água de poço). Os efeitos da disponibilidade hídrica só foram observados entre os tratamentos extremos, daquelas condições experimentais.

Analogamente, o trabalho de Silva (2005) também apontou que a disponibilidade hídrica do solo não influencia no DC do girassol. Entretanto cabe ressaltar que as variedades de girassol podem diferir em relação ao DC, conforme apontado no primeiro capítulo deste trabalho, portanto, podendo apresentar respostas diferenciadas aos tratamentos.

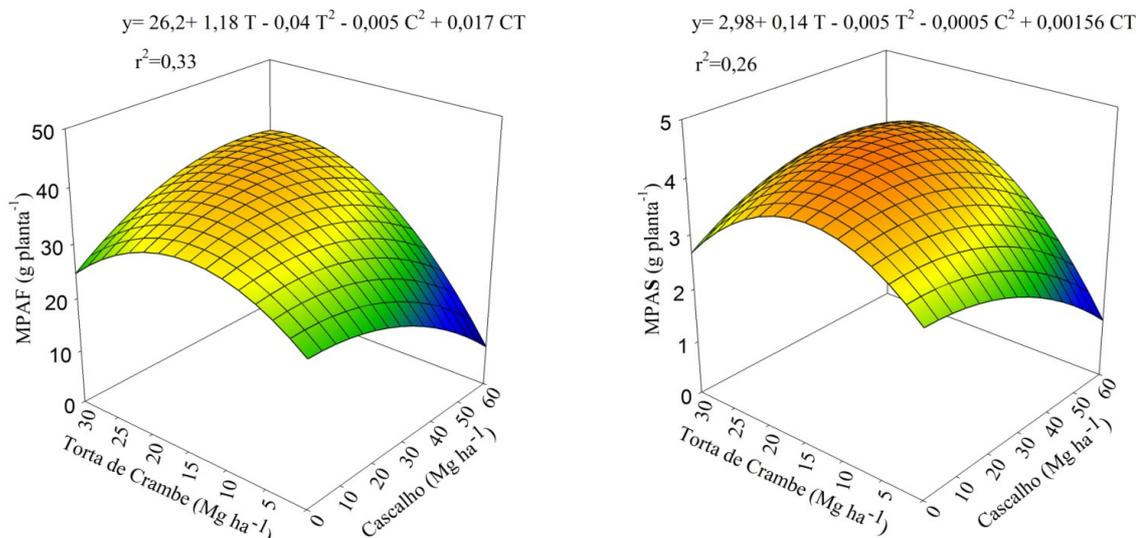
A altura das plantas em função das doses de cascalho de perfuração e torta de crambe também está apresentada na Figura 25. Os dois fatores avaliados resultaram em redução significativa da altura das plantas. Entretanto, comparando os coeficientes angulares do modelo de regressão, constata-se que a torta de crambe isoladamente provocou maior redução da altura das plantas em comparação à aplicação isolada do cascalho de perfuração. Apesar de ambos os fatores reduzirem a altura das plantas, convém destacar que a interação entre a torta e o cascalho de perfuração foi positiva, isso permite afirmar que a combinação dos tratamentos desfavoreceu a redução da altura das plantas.

Em relação ao controle, que apresentou altura média de 61,3 cm, a aplicação de 60 Mg ha<sup>-1</sup> de cascalho de perfuração resultou na redução de 36% da altura das plantas, enquanto que a maior dose de torta de crambe ocasionou uma redução de 41%. No entanto, com a aplicação das maiores doses de cada fator, a redução foi menor, 28%.

Dentre as avaliações de biométricas, é consenso de que a biomassa seja a mais representativa, pois integra a maior parte das outras avaliações; e de fato esta variável apresenta elevada correlação com a produtividade das culturas. Na Figura 26 estão apresentadas as superfícies de respostas da massa de parte aérea fresca (MPAF) e seca (MPAS) do girassol em função das doses de cascalho de perfuração e torta de crambe. As duas variáveis (MPAF e MPAS) apresentaram superfícies semelhantes salvo, logicamente, a amplitude dos valores.

O efeito da torta de crambe na MPAF e MPAS do girassol apresentou ajuste de regressão quadrático, de modo que a aplicação da torta até certo ponto favorece o acúmulo de biomassa, mas em doses superiores desfavorece. Avaliando o efeito isolado da torta de crambe, ou seja, anulando os coeficientes dos termos que incluem o fator cascalho, pode-se

constatar que a MPAF cresce com a torta de crambe até a dose de 14,7 Mg ha<sup>-1</sup>; o mesmo acontece para a MPAS, onde a melhor dose seria de 14 Mg ha<sup>-1</sup>.



**Figura 26.** Massa de parte aérea fresca (MPAF) e seca (MPAS) do girassol em função das doses de cascalho de perfuração no diferentes níveis de torta de crambe. Coeficientes da equação de regressão significativos com  $p < 0,01$ .

Avaliando o efeito do cascalho de perfuração isoladamente para a MPAF e MPAS do girassol constata-se que as menores doses de cascalho não causaram redução significativa do crescimento do girassol. Entretanto com a aplicação de doses mais elevadas de cascalho de perfuração passa-se a observar redução da biomassa do girassol. Nas maiores doses de cascalho de perfuração a redução da biomassa tornou-se relevante, porém nestas condições constatou-se que a torta de crambe atenuou parcialmente esse efeito, como pode ser observado na Figura 26.

A análise de regressão linear múltipla apresentada acima permite avaliar os efeitos considerando todos os dados, sendo possível avaliar a tendência geral desses dados. Mas uma comparação mais apurada do efeito das doses de cascalho de perfuração pode ser obtida através de contrastes ortogonais, comparando a média do tratamento controle com a média obtida em cada dose de cascalho. Com base no valor do contraste e na probabilidade do  $\alpha$  associado, é possível constatar que as doses de cascalho de perfuração inferiores a 30 Mg ha<sup>-1</sup> não causaram efeito significativo na MPAS do girassol (Tabela 35).

**Tabela 30.** Comparação por contraste entre a biomassa seca da PA do controle com às doses de cascalho de perfuração.

Comparação	Média	Contraste	Pr>F
Controle	3,45	-	-
Controle x 5 Mg ha <sup>-1</sup>	3,45	0,22	0,7249 <sup>ns</sup>
Controle x 15 Mg ha <sup>-1</sup>	3,13	0,91	0,4754 <sup>ns</sup>
Controle x 30 Mg ha <sup>-1</sup>	3,53	0,85	0,4909 <sup>ns</sup>
Controle x 45 Mg ha <sup>-1</sup>	2,68	6,64	0,0563 <sup>*</sup>
Controle x 60 Mg ha <sup>-1</sup>	2,47	8,55	0,0307 <sup>*</sup>

Contraste: Valor do contraste; Pr>F: Probabilidade de  $\alpha$  pelo teste t.

### 5.5.3. Teor de Nutrientes na Planta

As avaliações dos teores de macronutrientes e de alguns micronutrientes na parte área do girassol permitem constatar que tanto o cascalho de perfuração quanto a torta de crambe induzem efeitos significativos nos teores desses nutrientes na planta (Tabela 31). De acordo com a análise de variância, o cascalho de perfuração influenciou significativamente no teor de nutrientes do girassol, com exceção para o  $K^+$  que não foi afetado. Da mesma forma, a torta de crambe influenciou significativamente no teor de todos os nutrientes avaliados, somente o  $Na^+$ , que não considerado nutriente essencial, não foi afetado com a aplicação da torta. A influencia do cascalho e da torta no teor de nutrientes na planta estão associados à composição química destes, coforme está apresentado na Tabela 27.

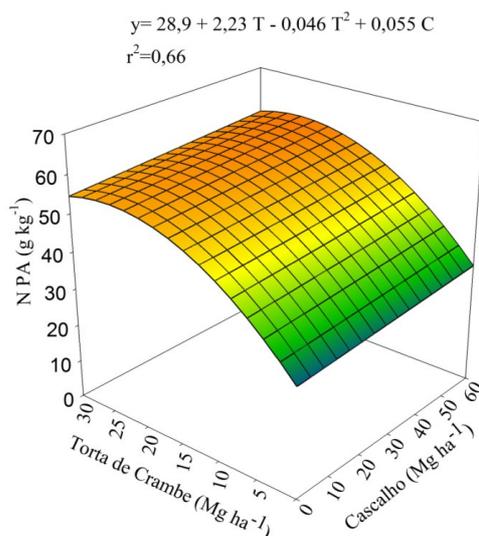
**Tabela 31.** Resumo da ANOVA com valores do quadrado médio das concentrações N, P,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  e  $Na^+$  na parte aérea do girassol após o cultivo em solo com doses de cascalho e torta de crambe.

FV	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu
Cascalho (C)	65 <sup>ns</sup>	2,60 <sup>**</sup>	60,1 <sup>ns</sup>	242 <sup>**</sup>	22,0 <sup>**</sup>	110 <sup>**</sup>	763 <sup>**</sup>	88.101 <sup>**</sup>	27.298 <sup>**</sup>	69,2 <sup>**</sup>
Torta (T)	1949 <sup>**</sup>	11,7 <sup>**</sup>	735 <sup>**</sup>	88,1 <sup>**</sup>	59,2 <sup>**</sup>	1,49 <sup>ns</sup>	5.339 <sup>**</sup>	54.671 <sup>**</sup>	96.909 <sup>**</sup>	88,6 <sup>**</sup>
C*T	76 <sup>**</sup>	0,32 <sup>ns</sup>	125 <sup>**</sup>	2,58 <sup>ns</sup>	6,90 <sup>**</sup>	8,22 <sup>**</sup>	1.021 <sup>**</sup>	7.611 <sup>**</sup>	36.178 <sup>**</sup>	14,7 <sup>**</sup>
CV%	12,4	12,3	13,3	8,8	19,2	31,9	30	17,7	26,9	17,8

<sup>\*\*</sup>, <sup>\*</sup>: Fator significativo pelo teste F com  $p < 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente; <sup>ns</sup>: não significativo.

Para o desdobramento dos efeitos dos fatores quantitativos do delineamento apresentado, a melhor maneira é ajustar à um modelo de regressão multipla, utilizando a torta de crambe e o cascalho de perfuração como variáveis independentes e cada nutriente como variável dependente.

Na Figura 27 está apresentado a superfície de regressão que representa o modelo para o teor de N na parte aérea do girassol em função das doses de cascalho de perfuração e de torta de crambe. O teor médio de N no controle, que equivale ao coeficiente linear do modelo, foi de  $28,9 \text{ g kg}^{-1}$ , sendo abaixo da faixa ideal para folhas de girassol, 33 a  $35 \text{ g kg}^{-1}$  (Malavolta, 1997).



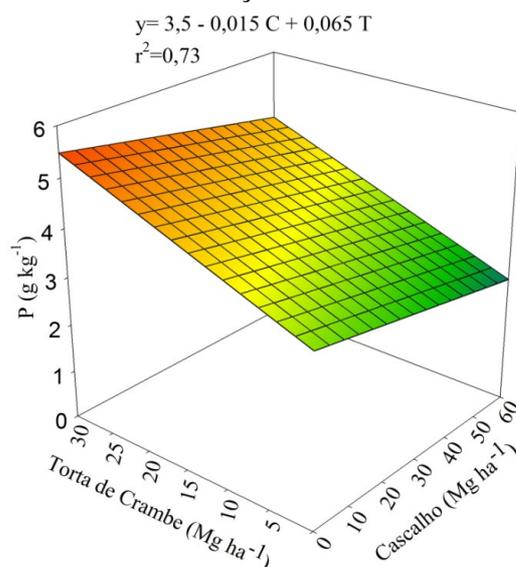
**Figura 27.** Teor de N total na parte aérea do girassol em função do cascalho de perfuração (C) e torta de crambe (T). Equação de regressão significativa com  $p < 0,01$ .

O efeito da torta de crame sob o teor de N do girassol foi significativo, respondendo à aplicação de acordo com uma função quadrática, com ganhos relevantes com a aplicação das menores doses de torta de crambe mas com tendência de estabilização para doses superiores a 20 Mg ha<sup>-1</sup>. Já o efeito do cascalho de perfuração, que também foi significativo, promoveu ganhos no teor de N em menor magnitude.

O adequado suprimento do girassol por N fora obtido com a aplicação de menos de 5 Mg ha<sup>-1</sup> de torta de crambe, o que torna esse produto uma boa fonte de N para as plantas, pois apresenta em sua composição um teor de N de 38,9 g kg<sup>-1</sup>. Já o cascalho de perfuração que devido à sua origem apresenta baixo teor de N, em torno de 1,8 g kg<sup>-1</sup>.

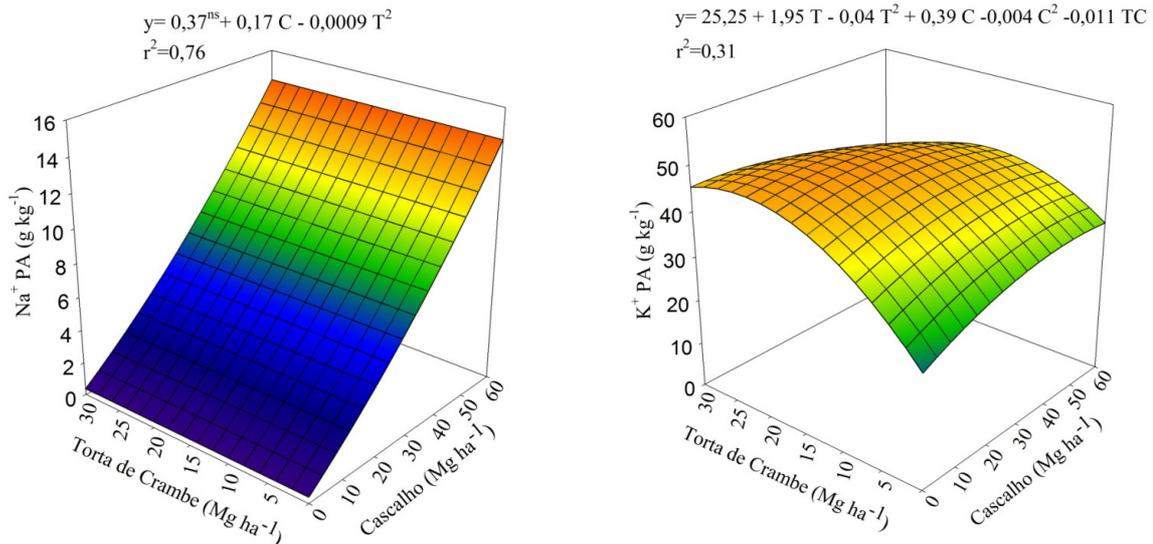
O teor de P total da parte aérea do girassol em função das doses de torta de crambe e do cascalho de perfuração está apresentado na Figura 28. De acordo com o modelo sugerido, o teor P aumenta gradativamente com a aplicação da torta de crambe enquanto que o cascalho de perfuração provoca redução desse nutriente na parte aérea.

No controle o teor médio de P foi de 3,5 g kg<sup>-1</sup>, subindo para 5,6 g kg<sup>-1</sup> no tratamento com a maior dose de torta de crambe e ausência cascalho de perfuração. Avaliando especificamente o efeito do cascalho, o teor de P observado com a aplicação de 60 Mg ha<sup>-1</sup> foi de 2,6 g kg<sup>-1</sup>. De acordo com Malavolta, (1997) o teor adequado de P nas folhas do girassol é de 4 a 7 g kg<sup>-1</sup>, portanto, o incremento de P provocado pela torta de crambe foi relevante para garantir o suprimento desse elemento para o girassol. Em contrapartida, aplicando somente o cascalho de perfuração poderia ocorrer limitação do desenvolvimento do girassol.



**Figura 28.** Teor de P total na parte aérea do girassol em função do cascalho de perfuração (C) e torta de crambe (T). Equação de regressão significativa com  $p < 0,01$ .

O teor de Na<sup>+</sup> na parte aérea do girassol aumentou significativamente com a aplicação das doses de cascalho de perfuração, enquanto que a torta de crambe não promoveu efeitos relevantes nesta variável (Figura 29). O ganho no teor de Na<sup>+</sup>, que no controle foram abaixo do limite de detecção do método, atingiram na maior dose de cascalho valores acima de 15 g kg<sup>-1</sup>. O acúmulo de Na<sup>+</sup> na parte aérea se deve ao relevante aporte desse elemento ao solo promovido pela aplicação do cascalho de perfuração, que possui em sua composição um teor de Na<sup>+</sup> de 38,5 g kg<sup>-1</sup>.

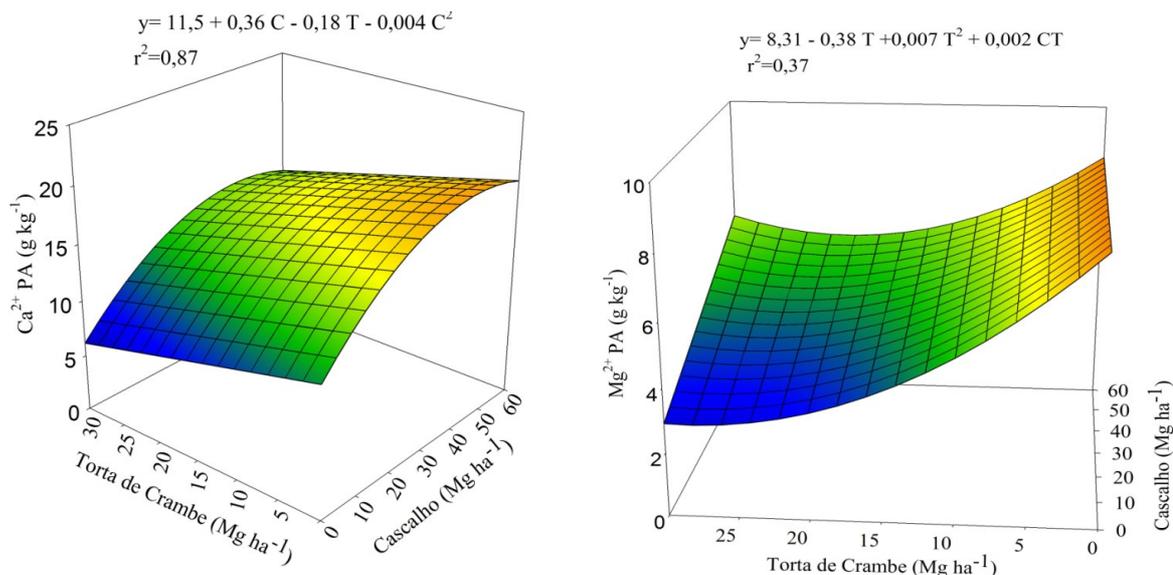


**Figura 29.** Teores de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  total ( $\text{g kg}^{-1}$ ) na parte aérea do girassol em função do cascalho de perfuração (C) e torta de crambe (T). Equação de regressão significativa com  $p < 0,01$ .

O modelo sugerido para o teor  $\text{K}^+$  na parte aérea do girassol em função dos tratamentos está apresentado na Figura 29, onde constata-se que tanto a torta de crambe quanto o cascalho de perfuração promoveram ganho significativo no teor de  $\text{K}^+$ . Esse efeito foi promovido pelo aporte de  $\text{K}^+$  através da torta e do cascalho, que contém um teor de  $\text{K}^+$  equivalente à 8,7 e 3,3  $\text{g kg}^{-1}$ , respectivamente. O teor de  $\text{K}^+$  verificado na parte aérea do controle foi de 25  $\text{g kg}^{-1}$ , estando dentro da faixa ideal para folhas de girassol, que é de 20 a 24  $\text{g kg}^{-1}$  (Malavolta, 1997). No entanto os efeitos promovidos por ambos os tratamentos permitiram elevar o teor  $\text{K}^+$  para dentro da faixa recomendada.

De acordo com Meurer (2006), o teor de  $\text{K}^+$  no estágio inicial de crescimento do girassol é mais elevado, decrescendo nos estágios mais avançados. É importante salientar que embora o teor de  $\text{K}^+$  na parte aérea seja elevado, ele se concentra principalmente nos pecíolos e folhas, o que significa que pouco dessa quantidade de  $\text{K}^+$  é exportada através dos aquênios na colheita, também relatado por Castro e Oliveira (2005).

Os teores totais de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  da parte aérea do girassol em função das doses de cascalho de perfuração e torta de crambe estão representados nas respectivas superfícies de regressão da Figura 30. De acordo com o modelo, o teor  $\text{Ca}^{2+}$  no controle foi 11,5  $\text{g kg}^{-1}$  diminuindo linearmente com as doses de torta de crambe, chegando a 5,7  $\text{g kg}^{-1}$  na maior dose de torta. Já o efeito do cascalho de perfuração foi positivo, resultando em aumento no teor de  $\text{Ca}^{2+}$  de acordo com uma função quadrática, houveram ganhos relevantes com a aplicação das primeiras doses, com subsequente estabilização, chegando a 18,7  $\text{g kg}^{-1}$  na maior dose de cascalho.



**Figura 30.** Teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  total ( $\text{g kg}^{-1}$ ) na parte aérea do girassol em função do cascalho de perfuração (C) e torta de crambe (T). Equação de regressão significativa com  $p < 0,01$ .

O efeito da torta de crambe no teor de  $\text{Ca}^{2+}$  na planta foi prejudicial em vistas ao suprimento desse nutriente, que de acordo com Malavolta (1997) a faixa ideal seria entre 17 a 22  $\text{g kg}^{-1}$ . A deficiência de  $\text{Ca}^{2+}$  em girassol pode provocar a redução no número de folhas, altura das plantas, diâmetro do caule e na área foliar, e conseqüentemente, na matéria seca de raiz, caule e folhas (Prado e Leal, 2006). A falta de  $\text{Ca}^{2+}$  é caracterizada pela redução do crescimento de tecidos meristemáticos, principalmente nas extremidades em crescimento e folhas jovens (Mengel e Kirkby, 1987). A redução no teor de  $\text{Ca}^{2+}$  na planta, provocada pela adição da torta de crambe, não condiz com o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  total presente nesse material, que é de 8,6  $\text{g kg}^{-1}$  (Tabela 17) que inclusive resultou em ganhos nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  trocável no solo após o cultivo (será abordado na Figura 33). Em contrapartida o considerável aporte de  $\text{K}^+$  promovido pela aplicação da torta de crambe, pode ter afetado a absorção de  $\text{Ca}^{2+}$  pela planta. Segundo Prado e Leal (2006) o  $\text{K}^+$  pode influenciar na absorção de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  pela planta, sendo que a interação entre esses nutrientes é devida à competição entre os elementos durante absorção pela planta.

A aplicação do cascalho de perfuração favoreceu o acúmulo de  $\text{Ca}^{2+}$  na parte aérea das plantas, suprimindo a limitação do teor de  $\text{Ca}^{2+}$  observada no controle que foi de 11,5  $\text{g kg}^{-1}$ . As plantas cultivadas no solo com a maior dose de cascalho de perfuração (60  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) passaram a apresentar um teor de  $\text{Ca}^{2+}$  de 19  $\text{g kg}^{-1}$ , melhorando a condição nutricional do girassol. Esse efeito deve-se ao aporte de  $\text{Ca}^{2+}$  promovido pelo cascalho de perfuração que apresenta em sua composição um teor de 31,8  $\text{g kg}^{-1}$  de  $\text{Ca}^{2+}$ , sendo o nutriente com maior concentração nesse resíduo (Figura 30).

O modelo que representa o teor de  $\text{Mg}^{2+}$  na parte do girassol (Figura 30) indica que o teor desse nutriente no controle foi 8,3  $\text{g kg}^{-1}$ , que reduziu significativamente com as doses de torta de crambe. O efeito observado em função da dose apresentou ajuste de regressão quadrático com redução acentuada com a aplicação das primeiras doses e posterior estabilização. Na maior dose de torta de crambe o teor de  $\text{Mg}^{2+}$  contatado na parte aérea do girassol sem a aplicação do cascalho, foi de aproximadamente 3,5  $\text{g kg}^{-1}$ . No entanto, a redução do teor de  $\text{Mg}^{2+}$  provocada pela torta de crambe foi amenizada pela aplicação do cascalho de perfuração, efeito representado no modelo pela interação entre os fatores (C\*T). Avaliando o efeito isolado do cascalho de perfuração, ou seja, nos tratamentos sem a adição da torta de crambe, o teor de  $\text{Mg}^{2+}$  na parte aérea do girassol não foi alterado significativamente.

A aplicação da torta de crambe prejudicou a absorção e acúmulo de  $Mg^{2+}$  na parte aérea do girassol, que em condição ideal deveria apresentar teores de  $Mg^{2+}$  entre 9 a 11  $g\ kg^{-1}$  (Malavolta, 1997). Apesar de o cascalho de perfuração apresentar um considerável teor de  $Mg^{2+}$  em sua composição, 15,2  $g\ kg^{-1}$ , não se ajustou linearmente ao modelo de regressão. Entretanto, contribuiu com o suprimento de  $Mg^{2+}$  na condição de deficiência provocada pela torta de crambe (Figura 30).

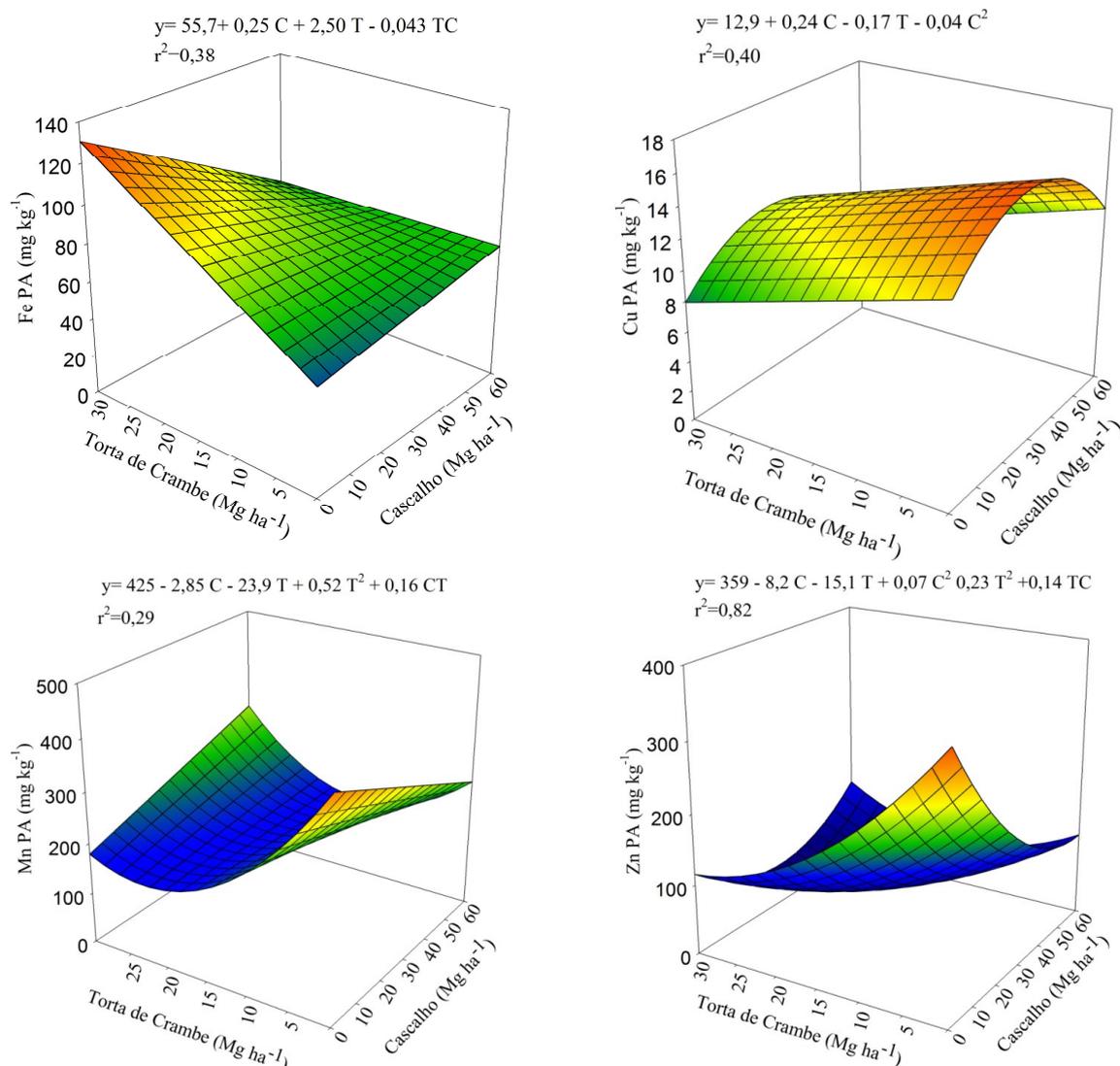
A redução do teor de  $Mg^{2+}$  na parte aérea do girassol devido à aplicação da torta de crambe pode estar associada ao desequilíbrio nutricional provocado pelo relevante aporte de  $K^+$  através da aplicação da torta de crambe. Segundo Meurer (2006) o efeito depressivo do  $K^+$  sobre o  $Mg^{2+}$  é um exemplo clássico de antagonismos entre íons. Da mesma forma como o teor de  $K^+$  na planta aumenta a taxa de absorção de nitrato, pode inibir as taxas de absorção do  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  pela planta (Marschner, 1995). A justificativa desse efeito é de que a presença em excesso do íon molovante  $K^+$  no apoplasto das células da região com absorção ativa pode desfavorecer a presença do  $Mg^{2+}$ , prejudicando sua absorção.

Os teores de Fe, Cu, Mn e Zn da parte aérea do girassol em função das doses de cascalho de perfuração e torta de crambe estão apresentados nas superfícies de regressão da Figura 31. De acordo com o modelo sugerido para o teor de Fe, tanto o cascalho de perfuração quanto a torta de crambe promoveram aumento no teor desse micronutriente. Entretanto, em relação ao incremento de Fe, a torta de crambe apresenta um papel bem maior que o cascalho de perfuração, o que não condiz com a constituição dos fatores.

O cascalho de perfuração apresenta uma teor de Fe total de 30.053  $mg\ kg^{-1}$ , enquanto que a torta de crambe apenas 140  $mg\ kg^{-1}$ . Esse fenômeno provavelmente está associado a forma como esse elemento está presente em cada um dos fatores. No cascalho de perfuração o Fe presente é majoritariamente derivado dos minerais do material geológico perfurado, enquanto que na torta de crambe, o Fe já foi absorvido e metabolizado pelo crambe e com a mineralização da torta torna-se prontamente absorvível.

O teor Fe encontrado na parte aérea do girassol no controle foi de 56  $mg\ kg^{-1}$ , estando abaixo da faixa ideal, que segundo Malavolta (1997) seria de 150 a 300  $mg\ kg^{-1}$ . Avaliando o efeito isolado do cascalho de perfuração, o teor de Fe constatado com a aplicação da maior dose de cascalho de perfuração (60  $Mg\ ha^{-1}$ ) foi de 70,7  $mg\ kg^{-1}$ , enquanto que com a aplicação da maior dose de torta de crambe, o teor de  $Mg^{2+}$  no girassol passou para 135  $mg\ kg^{-1}$ . A aplicação da torta de crambe favoreceu o acúmulo de Fe na planta, melhorando a condição nutricional do girassol.

O teor de Cu da parte aérea do girassol foi influenciado significativamente pelas doses de cascalho de perfuração e torta de crambe (Figura 31). O efeito isolado da torta de crambe foi negativo, reduzindo o teor de Cu de 13  $mg\ kg^{-1}$ , observado no controle, para 7  $mg\ kg^{-1}$  na maior dose de torta. Já o cascalho de perfuração promoveu ganhos no teor de Cu até a dose de 30  $Mg\ ha^{-1}$ , onde o teor chegou a 16  $mg\ kg^{-1}$ , decrescendo a partir desse ponto. O efeito negativo provocado pela torta de crambe está associado a baixa concentração desse micronutriente na torta, 5,4  $mg\ kg^{-1}$ . A torta de crambe promoveu maior crescimento do girassol, mas como o suprimento por Cu não acompanhou esse efeito, a redução desse micronutriente na planta pode ter sido por efeito de diluição. Já o efeito positivo do cascalho de perfuração corrobora com a teor de Cu desse resíduo, 40,4  $mg\ kg^{-1}$ . Mesmo no cenário mais favorável, observado com a aplicação da dose intermediária de cascalho de perfuração (30  $Mg\ ha^{-1}$ ), o teor de Cu na parte aérea do girassol foi inferior ao ideal, que seria entre 30 a 50  $mg\ kg^{-1}$  (Malavolta, 1997).



**Figura 31.** Teores de Fe, Cu, Mn e Zn totais ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) na parte aérea do girassol em função do cascalho de perfuração (C) e torta de crambe (T). Equação de regressão significativa com  $p < 0,01$ .

O modelo sugerido para explicar o efeito dos tratamentos no teor de Mn na parte aérea do girassol (Figura 31) apresentou um coeficiente de determinação relativamente baixo (0,29), por isso as inferências a partir desse modelo devem ser cautelosas. No entanto, o efeito observado indica redução no teor de Mn com o aumento das doses de torta de crambe, corroborando com o baixo teor desse elemento presente na torta,  $22 \text{ mg kg}^{-1}$ . O cascalho de perfuração apresenta um teor de  $646 \text{ mg kg}^{-1}$  de Mn em sua composição, porém mesmo assim o efeito sobre o teor de Mn na planta foi irrelevante. No controle o teor médio de Mn na planta foi de  $426 \text{ mg kg}^{-1}$ , estando dentro da faixa ideal que seria de  $300$  a  $600 \text{ mg kg}^{-1}$ , mas com aplicação de elevadas doses de torta de crambe o girassol atingiu teores de Mn inferiores ao sugerido.

O Mn tem propriedades químicas semelhantes à dos metais alcalinos ferrosos, como o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{Mg}^{2+}$ , por isso esses cátions, assim como o Fe e o Zn, podem inibir a absorção e transporte de Mn. Nas condições avaliadas a provável interação iônica que prejudicou a absorção do Mn, pode estar associada ao significativo acúmulo de Fe pela planta com a aplicação da torta de crambe.

As doses de cascalho de perfuração e torta de crambe causaram redução significativa do teor de Zn na parte aérea do girassol (Figura 31). No controle o teor médio de Zn foi de 359 mg kg<sup>-1</sup>, acima da faixa normal para esse micronutriente, 70 a 140 mg kg<sup>-1</sup> (Malavolta, 1997). Com as reduções provocadas pelos tratamentos, o teor de Zn na parte aérea do girassol se aproximou da faixa recomendada, portanto, foi favorável ao adequado balanço nutricional do girassol. A redução dos teores de Zn na parte aérea do girassol pode estar associada à menor disponibilidade desse nutriente em virtude do aumento do teor de P no solo. De acordo com a literatura, altos níveis de P no solo ou na solução nutritiva podem promover a deficiência induzida de Zn. Esse efeito se deve a várias causas, pois o P: insolubiliza o Zn na superfície das raízes diminuindo sua absorção; inibe não competitivamente a absorção; e, insolubiliza o Zn no xilema diminuindo o transporte para a parte aérea (Malavolta, 1997).

#### 5.5.4. Efeitos no Solo após o Cultivo do Girassol

A aplicação da torta de crambe e do cascalho de perfuração ao solo promoveram alterações significativas nas concentrações de bases trocáveis, fósforo assimilável, porcentagem de bases trocáveis, pH e condutividade elétrica do solo. Na Tabela 32 está apresentado o resumo da análise de variância das avaliações realizadas no solo após o cultivo do girassol.

**Tabela 32.** Valores quadrado médio da análise de variância das análises de fertilidade do solo após o cultivo do girassol.

Fonte de variação	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	P	pH	H+Al	PST	CE
Cascalho (C)	92,5 <sup>**</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	14,4 <sup>**</sup>	1,24 <sup>**</sup>	0,21 <sup>**</sup>	288 <sup>**</sup>	2,51 <sup>**</sup>	25,6 <sup>**</sup>	0,82 <sup>**</sup>	37,2 <sup>**</sup>
Torta (T)	0,42 <sup>ns</sup>	0,84 <sup>**</sup>	1,36 <sup>**</sup>	0,60 <sup>**</sup>	0,04 <sup>**</sup>	6.188 <sup>**</sup>	0,27 <sup>**</sup>	0,44 <sup>**</sup>	0,03 <sup>**</sup>	7,9 <sup>**</sup>
C*T	0,40 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>**</sup>	27 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>**</sup>	0,31 <sup>**</sup>	0,01 <sup>*</sup>	1,1 <sup>*</sup>
CV	21	32	13,7	41,3	38	25	4,2	15	8,5	35

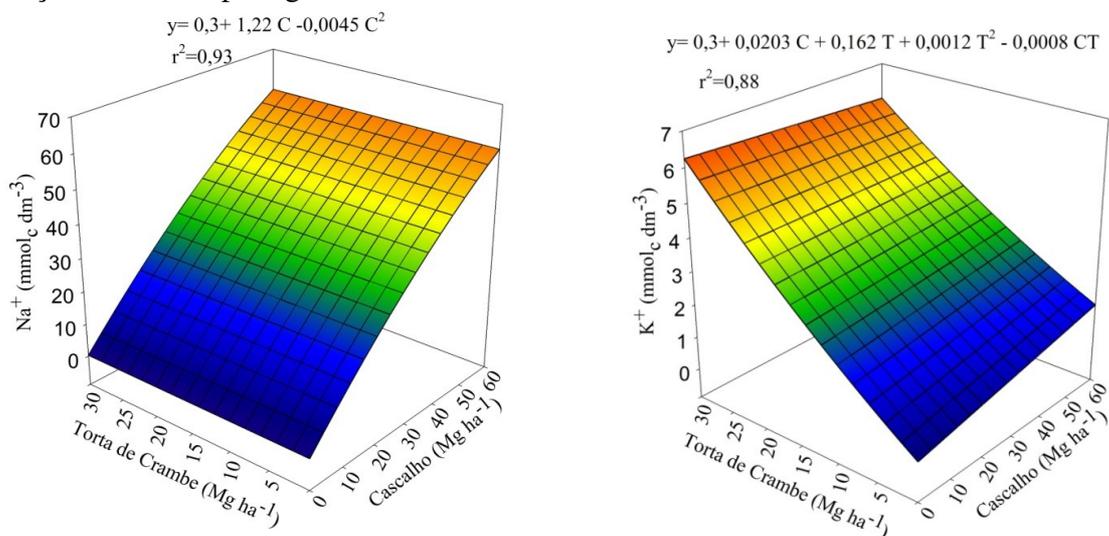
<sup>\*</sup>, <sup>\*\*</sup>: Fator significativo pelo teste F com p<0,05 e 0,01, respectivamente; <sup>ns</sup>: não significativo. P: Extraído com Mehlich 1.

Dentre as análises realizadas no solo, somente a concentração de potássio trocável não foi influenciada pelas doses de cascalho de perfuração, assim como a torta não influenciou na concentração de sódio trocável. A interação entre os fatores não foi significativa para as bases trocáveis (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>) e para o P assimilável, mostrando que a concentração destes nutrientes é alterada basicamente pelo aporte de cascalho e de torta de crambe. Nas demais avaliações houve interação significativa, ou seja, ao menos um nível de um dos fatores está influenciando no outro.

Para ilustrar os efeitos de cada fator, assim como possível interação entre os fatores quantitativos, os gráficos a seguir apresentam a regressão entre as leituras de cada avaliação realizada no solo em função das doses de cascalho de perfuração (C) e torta de crambe (T). Na Figura 32 observa-se que a concentração de sódio trocável aumenta significativamente com as doses de cascalho de perfuração. Essa tendência é devida basicamente ao aporte de sódio promovido pelo cascalho de perfuração.

Já em relação ao K<sup>+</sup> trocável (Figura 32), o aumento da concentração pode ser atribuído principalmente à torta de crambe que apresenta considerável concentração desse nutriente em sua composição, o cascalho de perfuração contribui em menor escala. O potássio é um nutriente requerido em grande quantidade pelas plantas, particularmente, o girassol apresenta uma demanda ainda maior. Deve-se considerar ainda que a concentração de K<sup>+</sup>

observada no solo após o cultivo está relativamente baixa, provavelmente pela considerável fração absorvida pelo girassol.

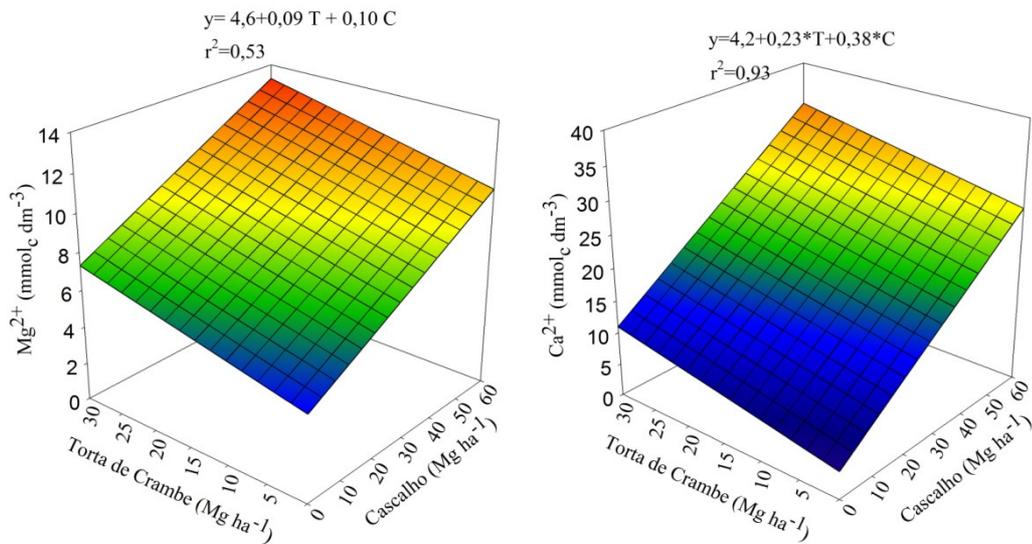


**Figura 32.** Teores de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  trocáveis ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) após o cultivo do girassol em função da aplicação de doses de cascalho de perfuração e torta de crambe. Coeficientes da equação de regressão significativos com  $p < 0,05$ .

Os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocável, apresentados na Figura 33, também apresentam tendência de aumento significativo com as doses de cascalho e torta de crambe. O teor de  $\text{Ca}^{2+}$  trocável no solo sem os efeitos dos tratamentos foi de  $4,2 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$  representando um teor limitante ao desenvolvimento do girassol, pois o ideal seria que a soma de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  sejam em torno de  $30 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$  (Castro e Oliveira, 2005). Com a aplicação dos tratamentos houve aumento significativo do teor de  $\text{Ca}^{2+}$  trocável. De acordo com a equação de regressão, para cada megagrama (tonelada) de torta de crambe adicionada ao solo ocorre um aumento de  $0,23 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ , enquanto que o cascalho de perfuração promove um aumento unitário de  $0,38 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ . Com base nestes coeficientes pode-se afirmar que o cascalho fornece ao solo mais  $\text{Ca}^{2+}$  que a própria torta de crambe. Esse efeito está de acordo com a caracterização<sup>i</sup> do cascalho e da torta de crambe que apresentam, respectivamente, um teor de  $\text{Ca}^{2+}$  total de  $31,8$  e  $8,6 \text{ g kg}^{-1}$ . Nestas circunstâncias a aplicação do cascalho e da torta de crambe promoveram um ganho no teor de  $\text{Ca}^{2+}$  do solo em uma faixa que pode ser considerada responsiva pelo girassol.

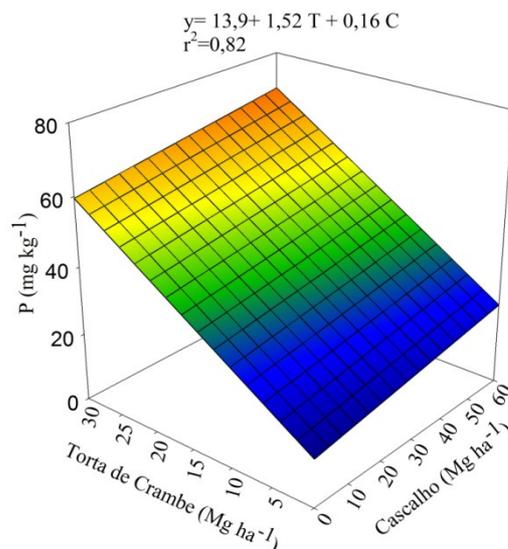
De forma análoga, o teor de  $\text{Mg}^{2+}$  trocável do solo após o cultivo do girassol, também apresentou aumento significativo com a aplicação da torta de crambe e do cascalho de perfuração (Figura 33). Enquanto o teor de  $\text{Mg}^{2+}$  no solo sem a aplicação dos tratamentos foi de aproximadamente  $4,5 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ , para cada aumento unitário da dose de torta e de cascalho e ocorre um ganho de  $0,09$  e  $0,10 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ , respectivamente. Com a aplicação dos tratamentos, o teor de  $\text{Mg}^{2+}$  do solo tornou-se mais adequado ao cultivo do girassol. Avaliando os coeficientes da equação de regressão observa-se que a torta e o cascalho contribuíram de forma semelhante no aumento do teor de  $\text{Mg}^{2+}$  do solo, entretanto o cascalho apresenta em sua composição um teor de  $\text{Mg}^{2+}$  total mais elevado ( $15,2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) que a torta de crambe ( $3,1 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

<sup>i</sup> Caracterização da torta de crambe e do cascalho de perfuração apresentada na Tabela 27, página 81.



**Figura 33.** Teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) do solo após o cultivo do girassol em função da aplicação de doses de cascalho de perfuração e torta de crambe. Coeficientes da equação de regressão significativos com  $p < 0,05$ .

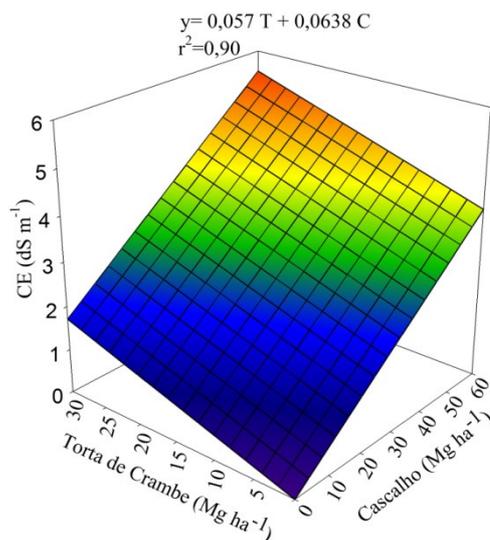
O teor de fósforo assimilável (P) do solo após o cultivo do girassol em função das doses de cascalho de perfuração e torta de crambe está apresentado na Figura 34. Sem a adição dos tratamentos (controle) o teor de P no solo foi de  $14 \text{ mg kg}^{-1}$ , ou seja, um teor relativamente baixo. Os dois fatores contribuíram com o aumento do teor de P do solo, entretanto a torta de crambe foi mais influente nesta variável, pois para cada megagrama de torta adicionada ao solo ocorreu um aumento de  $1,52 \text{ mg kg}^{-1}$  de P, enquanto que o cascalho apenas  $0,16 \text{ mg kg}^{-1}$ . Essa tendência corrobora com o teor de P total da composição dos fatores, onde a torta de crambe apresenta um teor de  $3,12 \text{ g kg}^{-1}$ , enquanto que o cascalho de perfuração  $0,56 \text{ g kg}^{-1}$ .



**Figura 34.** Teor de fósforo assimilável ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) após o cultivo do girassol em função da aplicação de doses de cascalho de perfuração e torta de crambe. Coeficientes da equação de regressão significativos pelo teste t com  $p < 0,01$ .

A condutividade elétrica do solo é um dos principais indicadores de possíveis efeitos de salinidade do solo, pois integra em uma única medida os principais íons com potencial de salinização. O efeito do cascalho de perfuração e da torta de crambe na condutividade elétrica

do solo está apresentado na Figura 35, onde se constatou que ambos os fatores contribuíram com o aumento da condutividade elétrica do solo. No entanto, avaliando os coeficientes angulares do modelo de regressão constatou-se que a contribuição da torta de crambe na CE do solo foi inferior ao efeito do cascalho de perfuração.



**Figura 35.** Condutividade elétrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) do solo após o cultivo do girassol em função da aplicação de doses de cascalho de perfuração e torta de crambe. Coeficientes da equação de regressão significativos com  $p < 0,05$ .

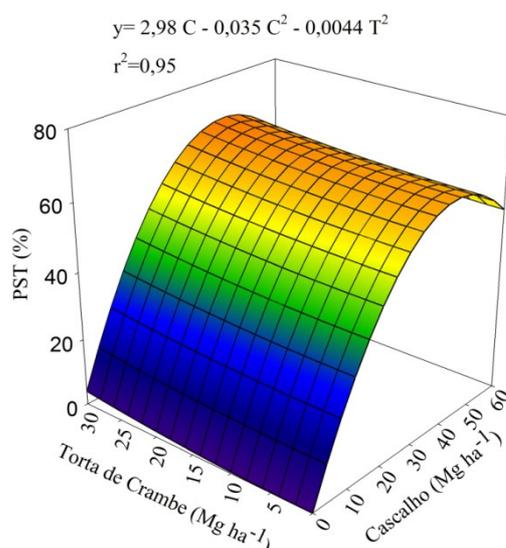
A CE do solo observada no controle foi muito baixa, apontando para uma limitação de disponibilidade de nutrientes nesse solo, como foi constatado nas análises de fertilidade. Com o aumento da dose de torta de crambe, houve incremento significativo da CE do solo promovido pelo aporte de nutrientes, sendo que na maior dose de torta, a CE máxima seria de aproximadamente  $2 \text{ dS m}^{-1}$ . Já o efeito isolado do cascalho de perfuração promoveu maiores ganhos da CE, atingindo  $4 \text{ dS m}^{-1}$  com a aplicação de  $60 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Aplicando as maiores doses de cada fator isoladamente não seria o suficiente para resultar em uma CE que comprometesse o crescimento vegetal. Com a aplicação conjunta dos fatores, a condutividade aumenta significativamente, atingindo valores próximos a  $6 \text{ dS m}^{-1}$ .

De acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013) a faixa de CE para considerar um solo como salino é de  $4$  a  $7 \text{ dS m}^{-1}$ . Enquanto que CE superiores a  $7 \text{ dS m}^{-1}$  caracteriza o solo como caráter sálico. As plantas se comportam diferentemente em relação à salinidade. Algumas culturas podem tolerar concentrações relativamente elevadas de sais, outras são extremamente sensíveis. A tolerância varia não só com a concentração salina, mas também com práticas de manejo, clima e proporções relativas dos íons na solução do solo (Fuller, 1967; Richards, 1954). Estes autores informam que para CE de até  $2 \text{ dS m}^{-1}$  normalmente não se observa nenhum efeito, a não ser em condições muito desfavoráveis; entre  $2$  e  $4 \text{ dS m}^{-1}$  a produtividade de culturas relativamente não tolerantes como feijão, aipo, citros, abacate, banana, goiaba e manga já é afetada. Entre  $4,0$  e  $8,0 \text{ dS m}^{-1}$ , os rendimentos de muitas culturas como sorgo granífero, milho, mamona, soja, melão, uva são reduzidos; entre  $8$  e  $12 \text{ dS m}^{-1}$ , somente culturas consideradas tolerantes produzem satisfatoriamente como algodão, arroz, alfafa, beterraba de mesa, espinafre e figo (Ayers e Westcot, 1999).

Apesar da CE apresentar informações relevantes à respeito da salinidade do solo por integrar a maior parte dos sais com potencial de salinização, a proporção entre esses íons também é de extrema relevância. Por isso a relação entre o teor de  $\text{Na}^+$  trocável com as demais bases trocáveis, denominada de saturação por sódio ou porcentagem de sódio trocável (PST) permite avaliar melhor o potencial de efeitos de salinização ao solo e às plantas.

Valores de saturação por sódio igual ou superior a 15% pode caracterizar ao solo o caráter sódico, pois essa porcentagem de sódio causa toxidez à maioria das plantas, afetando o seu crescimento. Além dos efeitos diretos às plantas, a presença de sódio inibe a adsorção de cálcio e magnésio, elementos vitais ao seu desenvolvimento, e ainda causa a dispersão das argilas.

Na Figura 36 está apresentado a PST do solo após o cultivo do girassol em função das doses de cascalho de perfuração e torta de crambe. A PST aumentou significativamente com a aplicação do cascalho de perfuração, assumindo valores bem superiores ao limite de 15% sugerido na literatura. O modelo sugerido apontou para tendência de estabilização da PST para doses de cascalho superiores a 40 Mg ha<sup>-1</sup>. A aplicação da torta de crambe reduziu significativamente na PST do solo, esse efeito está associado ao aporte de bases trocáveis ao solo que reduziu a proporção de Na<sup>+</sup> em relação às demais bases trocáveis. De acordo com o modelo a dose máxima de cascalho para não ultrapassar a PST crítica de 15% seria de 5 Mg ha<sup>-1</sup>.



**Figura 36.** Porcentagem de sódio trocável (PST %) do solo após o cultivo do girassol em função da aplicação de doses de cascalho de perfuração e torta de crambe. Coeficientes da equação de regressão significativos com  $p < 0,05$ .

Em relação aos hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP), a elevada concentração desse compostos presentes no cascalho de perfuração (20.271 mg kg<sup>-1</sup>) resultou em significativo aporte ao solo. Entretanto, ao avaliarmos a concentração de HTP no solo após o cultivo em função das doses de cascalho de perfuração (sem a torta) constata-se que os valores estão relativamente baixos (Tabela 33). Mesmo com a aplicação de 60 Mg ha<sup>-1</sup> de cascalho de perfuração o teor de HTP após o cultivo foi de 7,2 mg kg<sup>-1</sup>, abaixo do valor de referência de qualidade segundo a Lista Holandesa (2009) que é de 50 mg kg<sup>-1</sup>. Apesar da dosagem do cascalho ao solo resultar em diluição do HTP, os baixos teores constatados são devido a intensa mineralização desses compostos. Esse efeito pode ser comprovado através do balanço de massa entre a quantidade de HTP aplicada com o cascalho e a quantidade de HTP detectada após o cultivo do girassol. Essa proporção está apresentada na Tabela 33 em função das doses do cascalho de perfuração, onde constata-se que nas condições e doses avaliadas a fração de decomposição dos HTP foi superior a 90%. As análises de HTP foram realizadas somente nas parcelas em que não foi adicionado torta de crambe a fim de otimizar recursos.

**Tabela 33.** Teor de HTP do solo ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) e balanço de massa entre a quantidade de HTP aplicado (calculado com base no teor do cascalho) e quantidade detectada no solo de cada parcela após o cultivo do girassol em função das doses de cascalho de perfuração (sem a torta).

Dose	Concentração de HTP no solo ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Quantidade ( $\text{mg parcela}^{-1}$ )		Proporção (%)
		HTP <sub>Aplicado</sub>	HTP <sub>detectado</sub>	% HTP <sub>decomposto</sub>
0	2,6	-	-	-
5	3,0	437	36	-92%
15	6,9	1248	83	-93%
30	12,5	2464	151	-94%
45	4,5	3680	54	-99%
60	7,2	4897	87	-98%

HTP: Hidrocarbonetos totais de petróleo; HTP<sub>Aplicado</sub>: Massa (mg) de HTP aplicada com o cascalho, calculada com base nos teores do solo e do cascalho; HTP<sub>detectado</sub>: Massa (mg) de HTP detectada na análise; % HTP<sub>decomposto</sub>: Proporção do HTP que foi mineralizado durante o cultivo das plantas.

É importante destacar que essa determinação de HTP não discrimina os diferentes tipos de hidrocarbonetos de petróleo, assim a toxicidade e periculosidade do HTP detectado no cascalho de perfuração não pode ser avaliada. Do mesmo modo, não é possível avaliar se houve diferença na degradação entre compostos que compõem o conjunto dos HTP.

## 5.6 CONCLUSÕES

A torta de crambe aumenta significativamente a evolução de CO<sub>2</sub> do solo, mas o cascalho de perfuração não contribui significativamente com carbono mineralizável e nem afeta a mineralização da torta de crambe.

O acúmulo de biomassa do girassol é favorecido pela aplicação de doses intermediárias de torta de crambe, para aplicações acima de 20 Mg ha<sup>-1</sup> ocorre inversão no efeito. A aplicação de doses de cascalho de perfuração maiores que 30 Mg ha<sup>-1</sup> provoca uma redução da biomassa do girassol, sendo que esse efeito é parcialmente atenuado com a aplicação da torta de crambe.

O cascalho de perfuração promove ganhos nos teores de Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Fe e Cu no tecido vegetal do girassol. Enquanto que a torta de crambe favorece o acúmulo de K<sup>+</sup> e Fe, e redução nos teores de Mg<sup>2+</sup>, Cu, Mn e Zn.

A torta de crambe favorece o acúmulo de K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> trocáveis e P assimilável do solo após o cultivo, enquanto que a aplicação do cascalho de perfuração resulta em aumento significativo no teor de Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> trocáveis e P assimilável. A contribuição do cascalho de perfuração às bases trocáveis é relevante, porém o considerável aporte de Na<sup>+</sup> trocável limita a dose de cascalho, para não causar efeitos de salinização ao solo.

Após o período de cultivo das plantas, mais de 90% dos HTP adicionados ao solo com o cascalho são mineralizados, sendo que o teor médio de HTP remanescente após esse período é de 6,3 mg kg<sup>-1</sup>.

## 6 CONCLUSÕES GERAIS

Em relação à salinidade nas variedades de girassol:

- A salinidade em solução nutritiva prejudica o crescimento inicial das 9 variedades de girassol. A diferença entre as variedades permite concluir que a variedade BRS 321 é a mais sensível do grupo, enquanto que a Neon pode ser considerada a mais tolerante.
- O  $\text{Na}^+$  em solução nutritiva prejudica a absorção de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  pelo girassol. Os teores desses nutrientes são reduzidos principalmente nas raízes, onde o teor de  $\text{Na}^+$  aumenta gradativamente com o nível de salinidade.

Em relação aos fluidos de perfuração:

- A aplicação de até  $1 \text{ Mg ha}^{-1}$  do fluido catiônico promove ganhos da biomassa do girassol, mas para doses superiores o efeito não é significativo. No solo esse fluido promove melhorias nos teores de  $\text{K}^+$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis, sem relevante aporte de  $\text{Na}^+$  e HTP.
- A aplicação de até  $1 \text{ Mg ha}^{-1}$  dos fluidos não aquosos (saturados com NaCl ou KCl) não causam efeitos significativos no desenvolvimento do girassol. Mas para doses superiores, o efeito deixa de ser não significativo, inclusive prejudicando o desenvolvimento em doses superiores a  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$ .
- Os fluidos não aquosos saturados com NaCl e KCl aumentam, respectivamente, o teor  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  trocáveis do solo. Doses de até  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  desses fluidos não causam efeitos de salinidade ao solo e às plantas.
- Os fluidos não aquosos promovem relevante aporte de HTP ao solo, porém mais 90% desses compostos são mineralizados após 40 dias de cultivo do girassol. Para doses de até  $1 \text{ Mg ha}^{-1}$  esse índice ultrapassa dos 95%.

Em relação ao cascalho de perfuração e à torta de crambe:

- O cascalho de perfuração não afeta a evolução de  $\text{CO}_2$  durante o processo de mineralização da torta de crambe.
- A aplicação de até  $30 \text{ Mg ha}^{-1}$  de cascalho de perfuração não influencia no crescimento do girassol, porém para doses superiores ocorre redução do crescimento.
- O cascalho promove melhorias na fertilidade do solo, com o aporte de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis, porém o relevante aporte de  $\text{Na}^+$  limita a sua dosagem.
- Mais de 90% dos HTP oriundos do cascalho de perfuração aplicados ao solo são decompostos em até os 45 dias de cultivo.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Utilização de resíduos sólidos. **ABNT NBR 10.005:2004** – Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. 16p, 2004a.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Utilização de resíduos sólidos. **ABNT NBR 10.006:2004** – Solubilização de resíduos sólidos. 3p, 2004b.
- ADITC - Australian Drilling Industry Training Committee Limited. **The manual of methods, applications and management**. 4 ed. Flórida: Lewes Publishers, 1997.
- ALBUQUERQUE, M. C. DE F. E.; MORO, F. V.; FAGIOLI, M.; RIBEIRO, M. C. Testes de condutividade elétrica e de lixiviação de potássio na avaliação da qualidade fisiológica de sementes de girassol. **Revista Brasileira de Sementes**, v.23, p.1-8, 2001.
- AL-KARAKI, G.; AL-AJMI, A.; OTHMAN, Y. Response of soilless grown bell pepper variedades to salinity. **Acta Horticulturae**, v.807, p.227-232, 2009.
- AMABILE, R. F.; GUIMARÃES, D. P.; FARIAS, N., AUSTECLÍNIO L. de.; Análise de crescimento de girassol em Latossolo com diferentes níveis de saturação por bases no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 38(2):219-224, 2003.
- AMORIN, L.V.; VIANA, J.D.; FÁRIAS, K.V.; BARBOSA, M.I.R.; FERREIRA, H.C. Estudo comparativo entre variedades de argilas bentoníticas de Boa Vista, Paraíba. **Revista Matéria**, v.11, p.30-40, 2006.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Trad. GHEYI, H. R.; MEDEIROS, J. F. DE; DAMASCENO, F. A. V. Campina grande: UFPB, 1999. 153p.
- BALL, A. S.; STEWART, R. J.; SCHLIEPHAKE, K.. A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cutting. **Waste Management e Research**, v.30, p.457-473, 2012.
- BLAMEY, F. P. C.; EDWARDS, D. G.; ASHER, C. J. **Nutritional disorders of sunflower**. Brisbane: University of Queensland,. 72 p., 1987.
- CALLAHAN M.A.; STEWART A.J.; ALARCON C.; MCMILLEN, S.J., Effects of earthworm (*Eisenia fetida*) and wheat (*Triticum aestivum*) straw additions on selected properties of petroleum contaminated soils, **Environmental Toxicology and Chemistry**, 21:1658–1663, 2002.
- CAPUANI, J. P. S.; RIGON, J. P. G.; BELTRÃO, N. E. de M.; NETO, J. F. de B.N. Atividade microbiana em Solos, influenciada por resíduos de algodão e torta de mamona. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 16:1269-1274, 2012.
- CARUSO, G.; VILLARI, G. Effect of EC-level and plant shading on the NFT-grown "Friariello Pepper". **Acta Horticulturae**, v.659, p.576-585, 2004.
- CASTIGLIONI, V. B. R.; BALLA, A.; CASTRO, C.; SILVEIRA, J. M. **Fases de desenvolvimento da planta de girassol**. Londrina: Embrapa Soja, (Documentos, 59), 24p., 1997.
- CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A.; Nutrição e adubação do girassol. In: **Girassol no Brasil**. Londrina: MBRAPA SOJA, 1, 317-374, 2005.

CETESB. Valores orientadores para solos e água subterrânea no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos valores orientadores de 2001, e dá outras providências. Decisão de Diretoria nº195-2005-E, de 23 de novembro de 2005: **CETESB**, 2005.

CHEESEMAN, J.M. Mechanisms of salinity tolerance in plants. **Plant Physiology**. 87:547-550. 1988.

CONAB. Acessado em 22 de agosto de 2012, disponível em: [http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12\\_08\\_13\\_15\\_51\\_40\\_girassoljulho2012.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_08_13_15_51_40_girassoljulho2012.pdf)

CORRÊA, I. M. MAZIERO, J. V. G.; ÚNGARO, M. R.; BERNARDI, J. A.; STORINO, M. Desempenho de motor diesel com mistura de biodiesel de óleo de girassol. **Ciências Agrotécnicas**, v. 32, n. 03, p. 923-928, 2008.

DE JONG, E. The effect of a crude oil spill on cereals. **Environmental Pollution**, 22:187–196, 1980.

DUARTE, R. G.; Avaliação da interação Folhelho-Fluido de perfuração para estudos de estabilidade de poços. **Dissertação de Mestrado**; Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio; 2004.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3ª Edição. Rio de Janeiro, Embrapa Solo, 2013. 353p.

FALASCA, S.L.; FLORES, N.; LAMAS, M.C.; CARBALLO, S.M.; ANSCHAU, A.; *Crambe abyssinica*: An almost unknown crop with a promissory future to produce biodiesel in Argentina; **International Journal of Hydrogen Energy**, 35, p.5808-5812, 2010.

FARIAS, K.V.; AMORIM, H.C.; PEREIRA, E. Estudo da reologia e espessura do reboco de fluido de perfuração: Influencia de dispersante e umectante aniônicos. São Paulo: **Cerâmica** v.52, p.307-314, 2006.

FREITAS, C. A. S. de; SILVA, A. R. A. da; BEZERRA, F. M. L.; ANDRADE, R. R. de.; MOTA, F. S. B.; AQUINO, B. F. de; Crescimento da cultura do girassol irrigado com diferentes tipos de água e adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 16(10):1031-1039, 2012.

FREITAS, F. C. de; Caracterização química de cascalhos de perfuração de poços de petróleo e seus efeitos em plantas e nas bases trocáveis do solo. (**Tese de Doutorado**) Agronomia-Ciência do Solo. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2013.

FRENKEL, H.; GOERTZEN, J.O. e RHOADES, J.D. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society America Journal**, Madison, 42:32-39, 1978.

FULLER, W. H. **Water soil and crop management, principles for the control of salts**. Tucson: University of Arizona. 1967. 21 p. (University of Arizona. Bulletin, A – 23).

GASTALDI, G. CAPRETTI, G.; FOCHER, B.; COSENTINO, C.; Characterization and proprieties of cellulose isolated from the *Crambe abyssinica* hull. **Industrial Crops and Products**, 8(3):205-218, 1998.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soils**. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 347p., 1950.

JORGENSEN K. S.; PUUSTINEN, J.; SUORTTI, A.-M.; Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil by composting in biopiles. **Environmental Pollution**, 107: 245–254, 2000.

- KATERJI, N.; VAN HOORN, J. W.; HAMDY, A.; MASTRORILLI, M. Salt tolerance classification of crops according to soil salinity and to water stress day index. **Agricultural Water**, v.43, p.99-109. 2000.
- LAZZAROTTO, J. J.; ROESSING, A. C.; MELLO, H. C. O agronegócio do girassol no mundo e no Brasil. In: LEITE, R. M. V. B. C.; BRIGHENTI, A. M.; CASTRO, C. **Girassol no Brasil**. Londrina, p.15-42, 2005.
- LISTA HOLANDESA. Soil Remediation Circular 2009. **Esdat Environmental Database Management Software**. Disponível em: <http://www.esdat.com.au/Environmental%20Standards/Dutch/ENGELSE%20versie%20circulaire%20Bodemsanering%202009.pdf>. Acessado em 5 de Fevereiro de 2014.
- LEITE, L. F. C.; ARAUJO, A. S. F.; **Ecologia Microbiana do Solo**. Teresina: EMBRAPA Meio Norte, (Documentos 164), 24 p., 2007.
- MAAS, E.V.; HOFFMAN, G.J. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**; 103:115-134.
- MAGALHÃES, M.; Dinâmica do Bário em Solos Contaminados Por Resíduos Oriundos da Perfuração de Poços de Petróleo. (**Tese de Doutorado**) Agronomia-Ciência do Solo. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2011
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.
- MANDARINO, J. M. G. Características bioquímicas e nutricionais do óleo e do farelo de girassol. Londrina, Embrapa-CNPSo, (Documento 52), 25p, 1992.
- MARSCHNER, H. 1997. **Mineral nutrition of higher plants**. 2.ed. Academic Press. San Diego, Ca. USA. 889 p.
- MCMILLEN, S.J.; KERR, J.M.; GRAY, N.R.; Microcosm studies of factors that influence bioremediation of crude oils in soil. In: Exploration e Production Environments Conference, Texas, USA, SPE 25981, p.389-400, 1993.
- MCNICOLL, D. M. e BAWEJA, A. S. Bioremediation of Petroleum-contaminated Soils: An Innovative, **Environmental Friendly Technology** Environment Canada, 1995.
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 107p., 2005.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. Bem: Intern, Postash Institute. 687p. 1987.
- MEURER, E. J. Potássio. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição mineral de Plantas**. SBCS, 2006. p.281-298.
- MITTOVA, V.; TAL, M.; VOLOKITA, M.; GUY, M. Salt stress induces up-regulation of an efficient chloroplast antioxidant system in the salt-tolerant wild tomato species but not in the cultivated species. **Physiologia Plantarum**, v.115, p.393-400, 2002
- MONOTTI M. Growing non-food sunflower in dryland conditions. Italian **Journal of Agronomy**, v.8, p.3-8, 2004.
- MORGADO, L. N.; CARVALHO, C. F.; SOUZA, B.; SANTANA, M. P. Fauna de abelhas (Hymenoptera: Apoidea) nas flores de girassol *Helianthus annuus* L., em Lavras, MG. **Revista Ciência Agrotecnologia**, v. 26, n 06, p.1167-1177, 2002.

- NEVES, M. B.; BUZETTI, S.; CASTILHO, R.M.M. de; CARMEN SÍLVIA FERNANDES BOARO, C. S. F. Desenvolvimento de plantas de girassol ornamental (*Helianthus annuus* L.) em vasos, em dois substratos com solução nutritiva e em solo. **Científica**, v. 33, n. 02, p.127-133, 2005.
- NOBRE, R. G.; GHEYI, H. R.; CORREIA, K. G.; SOARES, F. A. L.; ANDRADE, L. O. Crescimento e floração do girassol sob estresse salino e adubação nitrogenada. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n 03, p. 358-365, 2010
- OLIVA, A. C. E.; Qualidade de sementes de crambe submetidas a métodos de secagem e períodos de armazenamento (**Dissertação de Mestrado**); Universidade Estadual Paulista-UNESP, Botucatu, SP, 78p. 2010.
- ONOREVOLI, B. Estudo do *Crambe Abyssinica* como fonte de matérias primas oleaginosas: óleo vegetal, ésteres metílicos e bio-óleo. (**Dissertação de Mestrado**) UFRGS, Porto alegre, 132p., 2012.
- OUYANG, W.; LIU, H.; MURYGINA, V.; YU, Y.; XIU, Z.; KALYUSHNYI, S.; Comparison of bio-augmentatin and composting for remediation of oily sludge: a field-scale study in China. *Process Biochemistry* 40:763–768, 2005.
- PAGE, P.W., GREAVES, C., LAWSON, R. e BOYLE, F. Options for the recycling of drill cuttings, SPE 805583, **Proceedings of the SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference**, San Antonio, TX, 2003.
- PINTOL, C.; BROCH, D. L.; ROSCOE, R. Tecnologia e produção: crambe; Fundação MS, Maracajú, MS, 2010. Disponível em: <http://www.fundacaoms.org.br/page.php?123> Acessado em Agosto de 2013.
- PIRES, P. J. M. ; ARARUNA JUNIOR, J. T. ; ALEXANDRE, J. . Reciclagem de Resíduo EeP como material de construção. **Revista TN Petróleo**, p. 110 - 115, 01 dez. 2008.
- POÇAS, E.C.; TEIXEIRA, É.M.; YADA, M.M.; BALOTA, E.L. Mineralização do C em solos submetidos à adição de diferentes tortas de oleaginosas. **Synergismus scyentifica**, UTFPR, Pato branco, 04 (1), 2009.
- PRADO, R. M. e LEAL, R. M. Desordens nutricionais por deficiência em girassol var. Catissol-01. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 36:187-193, 2006.
- QUEIROZ, A. F. de S.; CELINO, J. J. (Org.). Avaliação de ambientes na Baía de Todos os Santos: aspectos geoquímicos, geofísicos e biológicos. Salvador: UFBA, 300p. 2008.
- RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Salinity Laboratory. USDA: Agriculture Handbook, 1954.
- ROJAS, A.N.G.; ROLDAN, C. T.; ZEGARRA, M. H.; MUNOZ, C. A.M.; FERNANDEZ, L.L.C.; A field trial for an exsitu bioremediation of a drilling mud-polluted site. **Chemosphere**, 66: 1595–1600, 2007.
- ROSCOE, R., Crambe: nova alternativa para os biocombustíveis. Embrapa Agroenergia, 2012.
- RUBIO, J. S.; GARCÍA-SÁNCHEZ, F.; RUBIO, F.; MARTÍNEZ, V. Yield, blossom-end rot incidence, and fruit quality in pepper plants under moderate salinity are affected by K<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup> fertilization. **Scientia Horticulturae**, v.119, p.79-87, 2009.
- SANTOS, R.V.; MURAOKA, T. Interação salinidade e fertilidade do solo. In: Gheyi HR, Queiroz, J.E.; Medeiros, J.F. (Eds.) **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**. Campina Grande, UFPB. p.289-317, 1997.

- SANTOS, L. G.; SOUZA, U. O.; PRIMO, D. C.; SILVA, P. C. C.; SANTOS, A. R. Estado nutricional da cultura do girassol submetida à adubação com fósforo e boro. **Enciclopédia Biosfera**, v.6, p.1-14, 2010.
- SANTOS, R.V.; MURAOKA, T. Interações salinidade e fertilidade do solo. In: GHEYI, H.R.; QUIEROZ, J.E.; MEDEIROS, J.F. (ed) **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**. Campina Grande: UFPB/SBEA, p.289-317, 1997.
- SAS Institute Inc., SAS OnlineDoc® 9.2. SAS Institute Inc., Cary, NC, 2010.
- SAVVAS, D.; STAMATIB, E.; TSIROGIANNISB, I. L.; MANTZOSB, N.;BAROUCHASB, P.E; KATSOULASC, N.; KITTASC; C. Interactions between salinity and irrigation frequency in greenhouse pepper grown in closed-cycle hydroponic systems. **Agricultural Water Management**, v.91, p.102-111, 2007.
- SERRA, A. C. S. A influência de aditivos de lama de perfuração sobre as propriedades geoquímicas de óleo. (**Tese de Doutorado**) Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- SEVERINO, L. S.; COSTA, F. X.; BELTRÃO, N. E. DE M.; LUCENA, A. M. A. de; GUIMARÃES, M. M. B. Mineralização da torta de mamona, esterco bovino e bagaço de cana estimada pela respiração microbiana. *Revista de Biologia e Ciência da Terra*, 5:54-59, 2005.
- SFREDO, G.J.; SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. Absorção de nutrientes por duas cultivares de girassol (*Helianthus annuus*, L.), em condições de campo. III. Acúmulo de macronutrientes. **Anais ESALQ**, 40:1189-1217, 1983.
- SILVA, R.B. Substituição de farelo de sola por torta de crambe para ovinos em crescimento. **Dissertação** (Mestrado em Zootecnia). Universidade Federal de Lavraas, MG, 57p. 2013.
- SILVA, M. de L. O. Aplicações de lâminas de água e doses de boro na cultura do girassol. (**Tese Doutorado**), Lavras: UFLA, 115p, 2005.
- SOUZA, M. R. de. Comportamento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. CV Eriparza) submetido a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação. **Dissertação** (Mestrado). Universidade Federal de Lavras, Lavras (MG), Brasil. 94 p. 1995.
- STOTZKY, G. Microbial respiration. In: BLACK, C. A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. American Society Agronomy, Madison. p.1550-1572, 1965.
- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. Análise de solo, plantas e outros materiais. **Boletim técnico**, n. 5, 2ª edição, Departamento de Solos, UFRGS, Porto Alegre, 174p. 1995.
- THOMAS J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2001. 271p.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. Introduction to Phytoremediation. Washington, DC. EPA/600/R-99/107, 2000.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. Method 3052 - Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. 1996. 20p. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3052.pdf>>. Acessado em: 25 de junho de 2012.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. Method 8015D – No halogenated organics using GC/FID. 2003. 37p. Disponível em: <[http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/pdfs/8015d\\_r4.pdf](http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/pdfs/8015d_r4.pdf)>. Acessado em 28 de Junho de 2013.

VIDAL, E.L.F. **Relatório de estágio**. (Documento interno da Petrobras), Natal-RN, 27p. 2007.

VROM. Intervention values and target values: soil quality standards. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment. Premises for risk management: annex to the Dutch Environmental Policy Plan. The Hague: Lower House, DBO/07494013, 1994. 19p.

WALLACE, A. Interactions of water stress and aluminum stress in barley and sunflower cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 13(3) p.425-436, 1990.

XAVIER, T.F.; CAZETTA,J.O; LIMA,A.S.T.; FREITAS,J.C. Evolução do CO<sub>2</sub> e atividade enzimática de solo incubado com concentrado de vinhaça biodigerida. XIX Congresso Venezuelano de La Ciencia Del Suelo, 2011, Calabozo. XIX Congresso Venezuelano de La Ciencia Del Suelo, 2011.

ZOBIOLE, L. H. S.; CASTRO, C. de; OLIVEIRA, F. A. de; OLIVEIRA J., A. de; Marcha de absorção de macronutrientes na cultura do girassol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:425-433, 2010.

## 8 ANEXOS

Procedimentos estatísticos utilizados no SAS para determinação da regressão linear segmentada.

```
title regressão linear segmentada;  
-----  
proc nlin data=girassol.girassol2;  
parameters I=1 u=-500 v=10 r=30;  
z1=(dose<r)*(r-dose);  
z2=(dose>r)*(dose-r);  
by varie;  
model nar=I+u*(z1)+v*(z2);  
output out=saida p=previsto r=residuo;  
run;  
-----  
proc gplot;  
plot nar*residuo;  
by varie;  
run;  
-----  
proc univariate data=saida normal plot;  
var residuo;  
by varie;  
title normalidade dos resíduos;  
run;
```