

**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**AGRÍCOLA E AMBIENTAL**

**DISSERTAÇÃO**

**EFEITO DA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE**  
**PERFURAÇÃO E O POTENCIAL DE**  
**LIXIVIAÇÃO DE CONTAMINANTES NOS**  
**SOLOS**

**Guilherme Araujo Rocha**

**2022**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE AGRONOMIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL**

**EFEITO DA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE PERFURAÇÃO E O**  
**POTENCIAL DE LIXIVIAÇÃO DE CONTAMINANTES NOS SOLOS**

**GUILHERME ARAUJO ROCHA**

*Sob a Orientação do Professor*

**Everaldo Zonta**

*e Coorientação do Doutor*

**Júlio César Ribeiro**

Dissertação submetida comorequisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental- PGEAAmb, Área de concentração em Meio Ambiente.


Seropédica, RJ  
Agosto, 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

GUILHERME ARAUJO ROCHA


Dissertação/Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, área de Concentração em meio ambiente.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 29 DE AGOSTO DE 2022.

Documento assinado digitalmente  
 EVERALDO ZONTA  
Data: 29/11/2022 08:55:35-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>


---

Everaldo Zonta, Dr. UFRRJ(Orientador)

Documento assinado digitalmente  
 ERICA SOUTO ABREU LIMA  
Data: 29/11/2022 09:45:48-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Erica Souto Abreu Lima, Dra.  
UFRRJ

Documento assinado digitalmente  
 MARCIO OSVALDO LIMA MAGALHAES  
Data: 29/11/2022 18:46:08-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Marcio Osvaldo Lima Magalhães, Dr.  
UNEMAT

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

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R672e Rocha, Guilherme Araujo, 1995-  
EFEITO DA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE PERFURAÇÃO E O  
POTENCIAL DE LIXIVIAÇÃO DE CONTAMINANTES NOS SOLOS /  
Guilherme Araujo Rocha. - Rio de Janeiro, 2022.  
71 f.: il.

Orientador: Everaldo Zonta.  
Coorientador: Júlio Cesar Ribeiro.  
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal  
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós graduação em  
Engenharia Agrícola e Ambiental , 2022.

1. Pós-sal. 2. Pré-sal. 3. Contaminação de solo. 4.  
Sódio. 5. Metais pesados. I. Zonta, Everaldo , 1970-,  
orient. II. Ribeiro, Júlio Cesar , 1985-, coorient.  
III Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.  
Programa de Pós graduação em Engenharia Agrícola e  
Ambiental . IV. Título.

“ O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES)- Código Financiamento 001”



*A mim, que persisti em finalizar e fazer o meu melhor para obter êxito no compromisso mais desafiador que tive até hoje*

*Dedico.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e aos orixás por guiarem meus passos, mostrando o caminho e a forma correta de obter meus objetivos, dando-me força e determinação para que pudessem ser finalizados.

Aos meus pais, Tânia e Francisco que me ensinaram a lutar pelos meus objetivos, e de certa forma, possibilitar a realização do mestrado.

A minha esposa, Isabelle Hypólito por estar ao meu lado, com incentivos e práticas, que possibilitaram o término da Pós-graduação.

Ao meu orientador Everaldo Zonta pela confiança depositada no trabalho.

Ao meu co-orientador Júlio Ribeiro, que me ajudou desde o início do projeto até na finalização da dissertação, dando conselhos e mensagens para que pudesse obter êxito no trabalho.

A minha amiga Joyce Carvalho, que entrou nesse desafio junto comigo, enfrentando as mesmas vitórias e estresses desse desafio. Agradeço aos seus conselhos, mensagens e incentivos.

Ao grupo do LSP, que esteve sempre à disposição para me ajudar e orientar na experimentação em campo e laboratorial.

À CAPES pela concessão da bolsa.

Ao PGEEAmb, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa.

À UFRRJ, pela disponibilidade de infraestrutura e recursos.

Á todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

## RESUMO

ROCHA, Guilherme Araujo. Dinâmica de elementos do cascalho de perfuração marítimo de poços de petróleo do Pré-sal e Pós-sal no solo. 2022 p dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental, Meio Ambiente). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

A indústria petrolífera a partir da perfuração de poços de petróleo gera resíduos que, quando dispostos de forma inadequada, podem ocasionar problemas ambientais. Dentre os principais resíduos, destaca-se o cascalho de perfuração, material composto principalmente por rocha triturada e fluido de perfuração. Nas últimas décadas, estudos vêm sendo realizados a fim de solucionar problemas ligados a deposição do cascalho no solo. Tal resíduo apresenta em sua composição uma série de metais pesados, salinidade e compostos derivados de petróleo. Deste modo, torna-se necessário rotas tecnológicas para viabilização do uso do cascalho, promovendo um fim ambientalmente correto à este. O objetivo do presente estudo foi avaliar a dinâmica de macro e micronutrientes em solos que receberam diferentes doses de cascalho de perfuração do pós e pré sal, e o potencial risco de contaminação do solo e do lençol freático. Os ensaios de lixiviação foram conduzidos no Laboratório das Relações Solo - Planta (LSP), localizado no Departamento de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com cinco doses de cascalho de perfuração de poços de petróleo proveniente do Pré-sal e Pós-sal (0, 25, 50, 100 e 200 Mg.ha<sup>-1</sup>), arranjados sobre Argissolo e Planossolo em colunas de lixiviação. Realizou-se análise do lixiviado e dos teores biodisponíveis de macro e micronutrientes dos solos, após a aplicação do resíduo. A lâmina de água aplicada foi de 200 mm, equivalente a precipitação máxima média das cidades de Santos (SP), Vitória (ES) e Macaé (RJ) em que há a possibilidade de receptor os resíduos provenientes da extração marítima. Assim, a água percolada pela aplicação das lâminas, foi quantificada, observando teores críticos de sódio para ambos os solos nas maiores doses, havendo a possibilidade da formação de solos salinos. O quantitativo de bário foi afetada com o aumento das doses de resíduo. Em relação a contaminação do solo, observou-se maior concentração de sódio para os tratamentos do Pós-sal em ambos os solos, e conseqüentemente, maior arraste no Planossolo. Na análise dos elementos avaliados no lixiviado e no solo, a dose de 25 Mg.ha<sup>-1</sup> de ambos resíduos, apresentou-se com melhores resultados, sem apresentar interferência ao ambiente.

**Palavras-chave:** Pós-sal. Pré-sal. Contaminação de solo. Sódio. Metais pesados.



## ABSTRACT

ROCHA, Guilherme Araujo. Dynamics of marine drilling gravel elements of pre-salt and post-salt oil wells in the soil. 2022 p dissertation (Master's degree in Agricultural and Environmental Engineering, Environment). Institute of Technology, Department of Engineering, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

The oil industry from oil well drilling generates waste that, when improperly disposed, can cause environmental problems. Among the main residues, the drilling gravel stands out, material composed mainly of crushed rock and drilling fluid. In recent decades, studies have been carried out in order to solve problems related to the deposition of gravel in the soil. This residue presents in its composition a series of heavy metals, salinity and petroleum-derived compounds. Thus, it is necessary technological routes to enable the use of gravel, promoting an environmentally correct end to it. The aim of this study was to evaluate the dynamics of macro and micronutrients in soils that received different doses of post and pre salt drilling gravel, and the potential risk of soil and groundwater contamination. Leaching tests were conducted at the Laboratory of Soil Relations - Plant (LSP) located in the Soil Department of the Federal Rural University of Rio de Janeiro (UFRRJ). The experimental design was completely randomized with five doses of oil well drilling gravel from pre-salt and post-salt (0, 25, 50, 100 and 200 Mg.ha<sup>-1</sup>), arranged on Argisol and Planossol in leaching columns. Leaching and bioavailable contents of soil macro and micronutrients were performed after residue application. The applied water depth was 200 mm, equivalent to the average maximum precipitation of the cities of Santos (SP), Vitória (ES) and Macaé (RJ) in which there is the possibility of receiving the residues from maritime extraction. Thus, the water percolated by the application of the slides was quantified, observing critical sodium contents for both soils at the highest doses, with the possibility of saline soil formation. The quantity of bário was affected with the increase of residue doses. In relation to soil contamination, of the soil, a higher sodium concentration was observed for post-salt treatments in both soils, and consequently, higher drag in planossolo. In the analysis of the elements evaluated in leaching and soil, the dose of 25 Mg.ha<sup>-1</sup> of both residues presented better results, without presenting interference to the environment..

**Keywords:** Pré-sal. Pós-salt. Soil contamination. Sodium. Heavy metals.

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1.</b> Teores biodisponíveis médios de nutrientes no cascalho offshore Pré-sal (Poço 9-MLL-83-RJS - 4450 a 4520m de profundidade); cascalho offshore Pós-sal (Poço 7-MLL-82HA-RJS - 3400m de profundidade) .....               | 17 |
| <b>Tabela 2.</b> Teores pseudototais médios de nutrientes e metais pesados no cascalho offshore Pré-sal (Poço 9-MLL-83-RJS - 4450 a 4520m de profundidade); cascalho offshore Pós-sal (Poço 7-MLL-82HA-RJS - 3400m de profundidade)..... | 17 |
| <b>Tabela 3.</b> Teores biodisponíveis do Argissolo e Planossolo utilizados no experimento.....  | 18 |
| <b>Tabela 4.</b> Concentração de macronutrientes e metais pesados ( $Mg.kg^{-1}$ ) no lixiviado de Argissolo e Planossolo com diferentes doses de cascalhos de perfuração offshore de Pós-sal e Pré-sal.....                             | 23 |
| <b>Tabela 5 .</b> Concentração de teores biodisponíveis ( $mg.kg^{-1}$ ) no Argissolo com diferentes doses de cascalhos de perfuração offshore de Pós-sal e Pré-sal .....  | 33 |
| <b>Tabela 6.</b> Teores biodisponíveis c ( $mg.kg^{-1}$ ) no Planossolo com diferentes doses de cascalhos de perfuração offshore de Pós-sal e Pré-sal .....  | 37 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Simulação das camadas de Pós-sal e Pré-sal respectivamente (PETROBRAS, 2020).<br>.....   | 5  |
| <b>Figura 2.</b> Diferentes tipos de plataformas offshore (PETROBRAS, 2022) .....   | 6  |
| <b>Figura 3.</b> Procedimento da perfuração de um poço de petróleo offshore (IOGP, 2003) .....  | 7  |
| <b>Figura 4.</b> Aspecto visual do material recebido. A) Cascalho com aspecto granulométrico mais fino, referente ao Pós-sal (Poço 7-MLL-82HA-RJS), coletado a 3400m de profundidade; B) Cascalho com aspecto granulométrico mais grosseiro, referente ao Pré-sal (Poço 9-MLL-83-RJS), coletado entre 4450 a 4520m de profundidade. Fotos: Ribeiro, J. C. (2019)..... | 14 |
| <b>Figura 5.</b> Preparo dos resíduos para utilização nos experimentos. A) Cascalhos espalhados em leiras e constantemente revolvidos para secagem mais rápida; B) Cascalhos peneirados em peneira de malha de 4mm; C) Cascalhos preparados para armazenagem em sacos plástico. Fotos: Ribeiro, J. C. (2019).....   | 15 |
| <b>Figura 6.</b> Preparo dos resíduos para as análises químicas e experimentos. A e B) Moinhos de bola utilizados para a trituração dos cascalhos offshore do Pós-sal e Pré-sal; C) Preparo do cascalho de perfuração posterior ao peneiramento. Fotos: Ribeiro, J. C. (2019).....  | 15 |
| <b>Figura 7.</b> Solos utilizados no experimento. A) Perfil do Argissolo Vermelho-Amarelo, demarcados os seus horizontes A, A/B e B, respectivamente; B) Planossolo. Fotos: Ribeiro, J. C. (2019).....  | 18 |
| <b>Figura 8.</b> Coluna de lixiviação. 1) Tubo PVC com dimensões de 60cm de comprimento e 100mm de diâmetro; 2) Trougha de brita nº1 envolta em tela de nylon; 3) Redução concêntrica de 100x75mm; 4) Redução concêntrica de 75x50mm e 50x25mm, respectivamente.....  | 19 |
| <b>Figura 9.</b> Figura. A) colunas em processo de saturação; B) Colunas acomodadas em estruturas metálicas para que permanecessem na posição vertical; C) Embaixo de cada coluna instalou-se uma garrafa plástica com funil próximo ao orifício da redução concêntrica para a recepção do lixiviado, sendo estas fixas por uma malha de arame e fita adesiva .....   | 20 |
| <b>Figura 10.</b> Figura. Procedimentos iniciais para análise dos solos das colunas de lixiviação. A) Cortes realizados a cada 10cm de profundidade, totalizando quatro faces em cada coluna; B) utilização de maquina para o corte das colunas; C) Amostras secas a sombra em sacos plásticos, peneiradas em peneira em malha de 2mm.....                            | 21 |
| <b>Figura 11.</b> Teor de P no lixiviado referente ao Argissolo e Planossolo utilizando as respectivas doses de cascalho offshore do Pós-sal e Pré-sal.....   | 25 |
| <b>Figura 12.</b> Teor de Ca no lixiviado referente ao Argissolo e Planossolo utilizando as respectivas doses de cascalho <i>offshore</i> do Pós-sal e Pré-sal .....  | 27 |
| <b>Figura 13.</b> Teor de K no lixiviado referente ao Argissolo e Planossolo utilizando as respectivas doses de cascalho offshore do Pós-sal e Pré-sal.....   | 28 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 14.</b> Teor de Na no lixiviado referente ao Argissolo e Planossolo utilizando as respectivas doses de cascalho offshore do Pós-sal e Pré-sal..... | 29 |
| <b>Figura 15.</b> Teor de CE no lixiviado referente ao Argissolo e Planossolo utilizando as respectivas doses de cascalho offshore do Pós-sal e Pré-sal..... | 31 |
| <b>Figura 16.</b> Teor de Na de 0 a 40 cm de profundidade no Argissolo com as respectivas doses de cascalho offshore do Pós-sal .....                        | 41 |
| <b>Figura 17.</b> Teor de Na de 0 a 40 cm de profundidade no Argissolo com as respectivas doses de cascalho offshore do Pré-sal.....                         | 42 |
| Figura 18. Teor de Na de 0 a 40 cm de profundidade no Planossolo com as respectivas doses de cascalho offshore do Pós-sal .....                              | 42 |
| <b>Figura 19.</b> Teor de Na de 0 a 40 cm de profundidade no Planossolo com as respectivas doses de cascalho offshore do Pré-sal.....                        | 42 |
| <b>Figura 20.</b> Teor de K de 0 a 40 cm de profundidade no Argissolo com as respectivas doses de cascalho offshore do Pós-sal .....                         | 46 |
| <b>Figura 21.</b> Teor de K de 0 a 40 cm de profundidade no Argissolo com as respectivas doses de cascalho offshore do Pré-sal.....                          | 46 |
| Figura 22. Teor de K de 0 a 40 cm de profundidade no Planossolo com as respectivas doses de cascalho offshore do Pós-sal .....                               | 47 |
| <b>Figura 23.</b> Teor de K de 0 a 40 cm de profundidade no Argissolo com as respectivas doses de cascalho offshore do Pré-sal.....                          | 47 |
| <b>Figura 24.</b> Teor de Ca de 0 a 40 cm de profundidade no Argissolo com as respectivas doses de cascalho offshore do Pós-sal .....                        | 50 |
| <b>Figura 25.</b> Teor de Ca de 0 a 40 cm de profundidade no Argissolo com as respectivas doses de cascalho offshore do Pré-sal.....                         | 50 |
| <b>Figura 26.</b> Teor de Ca de 0 a 40 cm de profundidade no Planossolo com as respectivas doses de cascalho offshore do Pós-sal .....                       | 51 |
| <b>Figura 27.</b> Teor de Ca de 0 a 40 cm de profundidade no Planossolo com as respectivas doses de cascalho offshore do Pré-sal.....                        | 51 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1 Geração de resíduos e suas problemáticas.....  | 3         |
| 2.2 Definição e classificação dos resíduos em geral .....                                    | 3         |
| 2.3 Petróleo offshore do pré-sal e pós-sal.....  | 4         |
| 2.3 Resíduos de perfuração de poços de petróleo offshore do Pré-sal e Pós-sal .....          | 5         |
| 2.4 Impactos ambientais referente ao descarte de cascalho offshore no oceano .....           | 8         |
| 2.5 Potencialidade de contaminação do solo a partir de cascalho de perfuração offshore ..... | 9         |
| 2.6 Efeito de metais pesados no solo .....   | 10        |
| 2.7 Efeito do sódio no solo .....  | 12        |
| <b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>   | <b>14</b> |
| 3.2 Localização.....   | 14        |
| 3.4 Coleta e preparo do solo utilizado .....   | 16        |
| 3.5 Ensaio com coluna de lixiviação .....  | 19        |
| 3.6 Análises de nutrientes no solo após ensaio.....  | 21        |
| <b>4 ANALISE ESTATÍSTICA .....</b>   | <b>22</b> |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>  | <b>22</b> |
| 5.1 Ensaio de lixiviação.....  | 22        |
| 5.1.2 Cálcio (Ca).....   | 26        |
| 5.1.3 Potássio (K).....  | 28        |
| 5.1.4 Sódio (Na).....  | 29        |
| 5.1.5 Metais pesados .....   | 31        |
| 5.2 Análise de fertilidade do solo .....   | 32        |
| 5.2.1 Sódio .....  | 41        |
| 5.2.2 Potássio (K).....  | 45        |
| 5.2.3 Cálcio .....   | 49        |
| <b>6 CONCLUSÕES .....</b>  | <b>52</b> |
| <b>7 REFERÊNCIA .....</b>  | <b>53</b> |



## 1.INTRODUÇÃO

Com a descoberta do Pré-sal e Pós-sal do Brasil, as reservas petrolíferas *offshore* do país aumentaram substancialmente (CORDES, 2016). No processo de perfuração de poços de petróleo, gera-se o cascalho de perfuração. Resíduo formado de rochas moídas e fluidos de perfuração, que contém substâncias químicas, incluindo metais pesados e óleos que podem contaminar e poluir o solo, lençol freático e ambientes marinhos a depender da sua deposição final (IOGP, 2016; OKPARANMA et al., 2018).

Dentre os diferentes insumos utilizados no fluido de perfuração, pode-se destacar a presença de diversos tipos de minerais como calcários, argilas, ferro, alumínio e arenitos (SOUZA; MENDES, 2013). Embora essa atividade apresente resíduos que geram impactos ambientais severos, se tratados adequadamente ou reciclados, poderão minimizar esses respectivos efeitos (BEHLING, 2005).

A partir da Instrução Normativa nº 1 de 02 de janeiro de 2018 do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), ficou explicitado que as indústrias do setor petrolífero *offshore*, deveriam elaborar técnicas ou rotas tecnológicas para o tratamento ideal dos resíduos gerados, impedindo o lançamento desses resíduos ao mar. No entanto, tal instrução ainda não entrou em vigor, possibilitando um maior tempo para estudos e projetos a serem definidos para o tratamento adequado dos respectivos resíduos.

Para que isso possa ser delineado, tem-se a necessidade de avaliar a dinâmica do resíduo no solo ao longo do tempo, e verificar se há possibilidade de ocorrer contaminação do solo e do lençol freático, uma vez que são fontes de metais pesados e outros elementos tóxicos, assim como o sódio (OKPARANMA et al., 2010). Desse modo, se faz necessário adotar ações para quantificar e caracterizar o cascalho de perfuração gerado.

O ensaio de lixiviação tem um papel fundamental nesse quesito, possibilitando determinar e avaliar a estabilidade química dos resíduos no solo. Ou seja, quando em contato com soluções aquosas, permite-se verificar o grau de imobilização de contaminantes. A partir desse ensaio, é possível verificar as demais características do resíduo no solo, obtendo conhecimento quanto aos sistemas de tratamentos mais adequados, bem como o seu reaproveitamento e até mesmo a reciclagem.

Sabe-se pouco em relação ao material e à sua utilização na agricultura (ZAMORA-LEDEZMA, 2013; KOGBARA et al., 2017; OKPARANMA et al., 2018). Entretanto, Zonta et

al. (2005), mostraram que, quando corrigidos os problemas ligados à composição contaminante do cascalho *onshore*, há a possibilidade de utilização no solo, gerando melhoria das propriedades químicas, como elevação da fertilidade, assim como melhorias nas propriedades físicas. Logo, o uso agrícola deste resíduo pode ser uma possível rota tecnológica em sua disposição final

Assim, o presente estudo, que é inédito quanto ao cascalho marítimo, teve como princípio, avaliar a dinâmica dos elementos biodisponíveis de macro e micronutrientes e metais pesados no solo com vistas a verificar se houve lixiviação destes para o lençol freático, e também aferir o arraste dos elementos no solo, de acordo com a profundidade.



## **2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Geração de resíduos e suas problemáticas**

O meio ambiente é formado por meio físico, químico e biológico (LANDULFO, 2020). Em cada um desses ambientes, devido ao desenvolvimento e às necessidades da sociedade moderna, o homem vem utilizando tecnologias que facilitam a exploração dos recursos naturais, o que leva a redução da diversidade e saúde dos ecossistemas (MANISALIDIS et al., 2020).

No que tange ao setor industrial, pode-se observar que a partir do crescimento exponencial da população na Terra, o nível de consumo de recursos minerais também está próximo do seu exponencial (SAMARINA et al., 2017). Contudo, junto a este crescimento, o meio ambiente vem sofrendo diversos malefícios, qualificado pela valorosa geração de resíduos que não apresentam um tratamento adequado (MATOS, 2020). Em especial, a contaminação de solos, diante da disposição descontrolada e abandono de resíduos tóxicos expostos ao intemperismo e à erosão no solo. A partir do descarte inadequado desses resíduos no solo, ocorre o desequilíbrio ambiental, resultando na contaminação de lençóis freáticos e todo o seu meio circundante (GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, et al., 2017; MATOS, 2020).

Atualmente, a preocupação com o meio ambiente por parte governamental vem crescendo, a partir da criação de portarias, leis, resoluções e decretos com cobranças mais rigorosas ligadas ao tratamento de resíduos nos setores industriais, agrícolas, marítimos, energéticos e demais (CORREA et al., 2017). Deste modo, esses setores vem sendo obrigados a minimizar a poluição, aumentar a sustentabilidade e elaborar estratégias que atinjam o meio ambiente da menor forma possível (CETESB, 2005).

Torna-se evidente, portanto, que a detecção de metais pesados e substâncias tóxicas orgânicas e inorgânicas no solo são essenciais para evitar sua contaminação e conseqüente degradação ambiental, imprescindível para sua sustentabilidade.

### **2.2 Definição e classificação dos resíduos em geral**

Os resíduos sólidos são definidos de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) – NBR 10004:2004 como “Os resíduos nos estados: sólido e semi-sólidos

que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição”. A designação resíduo sólido refere-se ao descarte dos materiais sólidos provenientes das operações de indústrias, comércios, agricultura e da comunidade em geral. Em meio a crescente evolução e demanda da sociedade, a geração de resíduos vem sendo cada vez maior, sendo estes caracterizados por qualquer lixo, lodo, lama, refugo e borras provenientes das atividades domésticas, profissional, agrícola, industrial ou de serviço.

De acordo com a ABNT – NBR 10004:2004, os resíduos são classificados como:

- Resíduo Classe I – Perigosos: Apresentam umas das características descritas, como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade ou constam no anexos A ou B presentes na norma.
- Resíduo Classe II – Não Perigosos:
- Resíduo Classe II A – Não Inertes: Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I, podendo ter propriedades tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Resíduo Classe II B – Inertes: Qualquer resíduo que quando submetido ao teste de solubilidade, conforme ABNT NBR 10006, não tiveram nenhum dos seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aos aspectos turbidez, cor, dureza e sabor.

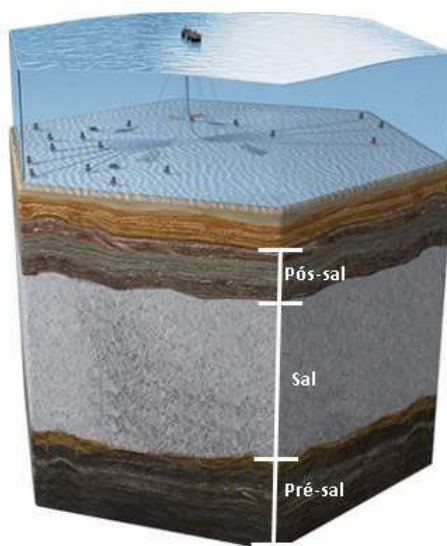
### **2.3 Petróleo offshore do pré-sal e pós-sal**

Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás natural e Biocombustível (ANP), a extração do Pré-sal já equivale a 70% de toda produção de petróleo brasileira. Com isso, a exportação de petróleo vem crescendo de forma gradual, criando-se expectativas de se tornar um dos maiores produtores e exportadores globais de petróleo (ANP, 2020).

O Pré-sal é caracterizado como uma sequência de rochas sedimentares de aproximadamente 150 milhões de anos, desenvolvido pela separação dos atuais continentes Americano e Africano. Entre os dois continentes formaram-se inicialmente, grandes depressões, que deram origem a grandes lagos. Ali foram depositadas, ao longo de milhões de

anos, as rochas geradoras de petróleo do Pré-sal. Como todos os rios dos continentes que se separavam correram para as regiões mais baixas, grandes volumes de matéria orgânica foram ali depositadas (PETROBRAS, 2020).

À medida que os continentes se distanciavam, os materiais orgânicos então acumulados nesse novo espaço foram cobertos pelas águas do Oceano Atlântico. Dava-se início a formação de uma camada de sal que atualmente chega a 2 mil metros de espessura. Essa camada de sal depositou-se sobre a matéria orgânica acumulada, retendo-a por milhões de anos, até que processos termoquímicos transformassem a camada orgânica em hidrocarbonetos (PETROBRAS, 2020). Já a camada de Pós-sal, inserida sobre o sal, apresenta o petróleo localizado a uma faixa menos profunda ao se comparar com o Pré-sal (Figura 1) (PETROBRAS, 2020).



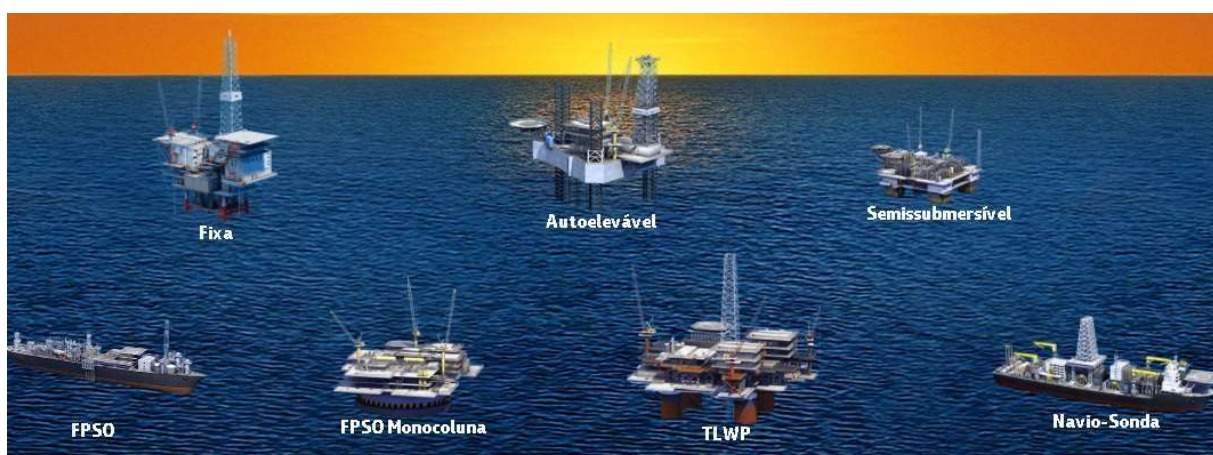
**Figura 1.** Simulação das camadas de Pós-sal e Pré-sal respectivamente (PETROBRAS, 2020).

### **2.3 Resíduos de perfuração de poços de petróleo offshore do Pré-sal e Pós-sal**

Como parte de qualquer projeto de óleo e gás, as operações de perfuração de poços de petróleo têm potencial para gerar resíduos, destacando-se os fluidos de perfuração e cascalhos (COCHRANE et al., 2019). Diferentes tipos de instalações são comumente usados para diferentes cenários na perfuração *offshore*. Tais operações de perfuração são realizadas a partir de unidades móveis ou plataformas de produção permanente (IOGP, 2003).

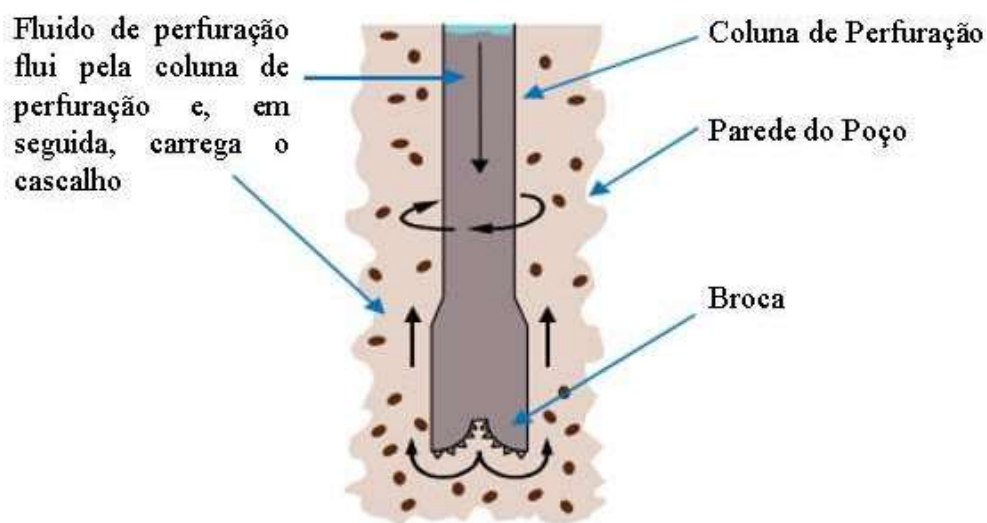
Dentre as principais características das unidades móveis são as facilidades de movimentação de equipamentos e de locomoção de um local de perfuração para outro. Pode-se

destacar dois modelos principais, as unidades com suporte inferior e as unidades flutuantes. As unidades de suporte inferior são normalmente utilizadas para perfuração de até 150 metros. Já as unidades flutuantes, são embarcações ancoradas ou posicionadas dinamicamente e em forma de navio. São utilizadas para perfurar águas mais profundas, possibilitando a perfuração de ambientes de até 2000 metros de profundidade, e em locais distantes da costa (IOGP, 2003). As plataformas de produção permanentes incluem plataformas fixas ou torres compatíveis (classificadas em Fixa e Autoelevável) ou instalações flutuantes (disponíveis como Semissubmersível, FPSO, FPSO Monocoluna, TLWP e Navio-Sonda) (Figura 2).



**Figura 2.** Diferentes tipos de plataformas *offshore* (PETROBRAS, 2022).

Durante o processo de perfuração de poços de petróleo, a rocha é perfurada pela ação de rotação e peso a partir da broca existente na extremidade da coluna de perfuração. Com a torre de perfuração apoiada sobre uma estrutura com a presença da mesa rotativa que comunica o torque à coluna de perfuração, formada por diversos tubos conectados entre si, apresentando uma broca em sua extremidade, perfura as rochas em direção aos reservatórios de interesse (Figura 3). Quanto mais profundo, mais tubos de perfuração se encaixam na face superior da superfície. A broca lança um fluido que circula pelo poço, denominado fluido perfuração (THOMAS, 2001; SCHAFFEL, 2002).



**Figura 3.** Procedimento da perfuração de um poço de petróleo *offshore* (IOGP, 2003)

O fluido de perfuração durante a fase da perfuração, apresenta funções relevantes como, resfriar a broca, lubrificar a coluna, estabilizar as formações rochosas, auxiliar no suporte da coluna de perfuração, além de ser responsável pelo transporte dos cascalhos até a superfície (COMITÊ, 2011).

Os fluidos de perfuração são misturas de diferentes componentes, podendo destacar o sódio e, ainda em alguns casos, a presença de hidrocarbonetos e metais pesados (THOMAS, 2001; BALL et al., 2012). Conforme Veiga (2010), os fluidos podem ser classificados de duas maneiras: fluidos de base aquosa e fluidos de base não aquosa. Os fluidos aquosos ou de base aquosa são aqueles que apresentam água como sua fase contínua. Estes consistem basicamente de 100% a 90% de água por volume e adição de componentes. Dentre as possíveis formas de bases aquosas, destacam-se a água industrial, água do mar ou soluções salinas saturadas. Os fluidos de base não aquosa são formulados com produtos orgânicos, com presença de metais pesados, como fase contínua e água como fase dispersa. (BAKKE et al., 2013; KHONDAKER, 2000).

Como resíduo das operações de exploração de petróleo e gás natural, há a geração de cascalhos de perfuração que está revestidos com fluido de perfuração (ou lama de perfuração, como também é chamado). Esses resíduos são partículas de rocha geradas pela ação da broca na perfuração do poço que podem ser descarregadas no oceano, injetadas novamente em uma

formação adequada de descarte ou transportada para a costa para tratamento, descarte e/ou reuso (VEIGA, 2010; IOGP, 2016; SANTOS, 2018).

Esse material, passa por um processo de separação do cascalhos e do fluido de perfuração (separação sólido-líquido) (SCHAANNING et al., 2008 ).

Dependendo de cada situação operacional, os fluidos podem ser reconstituídos e reutilizados a partir da recuperação dos seus componentes após a conclusão da perfuração, ao propósito de ser reutilizado em outros poços (CAMPOS, 2016).

A possibilidade de descarte dos resíduos de perfuração no mar é restrita por requisitos regulamentares na maioria das áreas exploradas. Segundo a Associação Internacional de Produtores de Petróleo e Gás (IOGP), os fluidos de perfuração de base aquosa e cascalhos gerados durante operações com este tipo de fluido ainda podem ser lançados ao mar depois de submetidos a tratamento por equipamentos de controle de sólidos (IOGP, 2003). Diferentemente destes, os fluidos de base não aquosa, nos demais países, são proibidos de serem descartados (CAMPOS, 2016).

## **2.4 Impactos ambientais referente ao descarte de cascalho offshore no oceano**

Grande atenção é dada a descarga de resíduos, uma vez que as perfurações de poços de petróleo marítimo são acompanhadas de volumosos despejos de resíduos sólidos, líquidos e gasosos no ambiente. Segundo o National Research Council (NRC, 2003), dentre os demais resíduos, destacam-se os fluidos e cascalhos de perfuração.

Os impactos ambientais durante as demais fases de instalação, operação, geração e descarte dos materiais produzidos na indústria *offshore* de óleo e gás são identificados e avaliados do ponto de vista físico, biótico e econômico da área de influência da atividade. Uma variedade de fatores ambientais em meios bióticos e físicos, como fundo marinho, plâncton, comunidade bentônica, baleias, golfinhos, tartarugas marinhas, recursos pesqueiros, pássaros, biodiversidade, água local, ar atmosférico e clima, são afetados (BUSSMEYER; HENKES, 2015; GAUDÊNCIO et al., 2021).

As comunidades bentônicas sofrem impactos severos quando relacionados as descargas de cascalho de perfuração ao mar em função do elevado volume de material particulado fino presente no resíduo. Seguindo, os fluidos de perfuração mostram-se com alta toxicidade residual, podendo alterar a abundância e a diversidade de espécies bentônicas e/ou alterações na demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e na demanda química de oxigênio (DQO) que se deve a matéria orgânica residual associada à descarga (THE ROYAL SOCIETY OF CANADA, 2004).

Os despejos tanto de lama de perfuração quanto de cascalho também contêm elementos inorgânicos (mercúrio, cádmio, zinco, cromo, cobre, chumbo e sódio), que podem enriquecer os sedimentos próximos às plataformas, conforme evidencia o estudo de Ball et al. (2012). Além disso, a economia é impactada, de forma negativa, por fatores relacionados a atividade pesqueira artesanal e industrial, tráfego marítimo, infraestrutura portuária, infraestrutura de disposição de resíduos, ocupação do solo e custo de vida (GAUDÊNCIO et al., 2021).

Atualmente, somente os resíduos de perfuração que não podem ser descartados ao mar, como o caso de fluidos de base não-aquosa e o cascalho de perfuração com presença de fluidos de base não-aquosa, são encaminhados para destinação em terra, seguido do transporte marítimo e terrestre para o tratamento, se necessário, e disposição final. A destinação final mais comum para estes resíduos é em aterros industriais. O método de tratamento que cada resíduo será submetido, dependerá do seu tipo, composição e padrões da gerenciadora de resíduos (CAMPOS et al., 2016).

## **2.5 Potencialidade de contaminação do solo a partir de cascalho de perfuração offshore**

Quando quaisquer resíduos forem depositados ao solo, é necessário obter conhecimento quanto a forma de tratamento e o seu armazenamento final. Atualmente, os cascalhos de perfuração são levados a aterros sanitários industriais. As vantagens do enterramento local de resíduos de perfuração incluem o fato da utilização de tecnologia simples e de baixo custo para resíduos sólidos contaminados (BALL et al., 2011).

Dentre as principais características que um aterro sanitário industrial deve apresentar para receber da melhor maneira possível os respectivos resíduos, Ball et al. (2011) destacaram:

- Profundidade do aterro - Necessita-se da distância de pelo menos 1,5 metros acima de qualquer lençol freático. Assim, o risco de contaminação do lençol freático poderá ser minimizado.
- Tipo de solo - O tipo de solo varia de solos impermeáveis (argilosos) a solos permeáveis (arenosos).
- Controle de escoamento e lixiviado - O uso de geomembranas e argila como revestimento do poço para auxiliar o controle das frações aquosas, no propósito de evitar a contaminação do lençol freático.
- Monitoramento - A amostragem e o monitoramento regulares ajudarão a reduzir o potencial de danos ambientais causados pela falha do poço em controlar os resíduos de perfuração.
- Composição química - O conhecimento da composição química original dos resíduos de perfuração é essencial para determinar o risco potencial de soterramento e para determinar o procedimento ideal de soterramento.

O ponto crítico que deve ser levado em consideração é o potencial contaminação do solo e das águas subterrâneas. Altas concentrações de sal solúvel no solo aumentam o potencial osmótico, causando danos as plantas, além da possibilidade de contaminação dos lençóis freáticos por lixiviação. Ainda assim, nesses resíduos podem estar presentes metais como os detectados no cascalho: arsênio, bário, cádmio, chumbo, mercúrio, prata, selênio e sódio (FREEMAN, 1997; FIALHO, 2012; FREITAS, 2015).

Com o aumento da pressão sobre o espaço do aterro e os códigos de classificação de resíduos, juntamente com uma maior ênfase na sustentabilidade, há uma necessidade urgente de identificar estratégias sustentáveis para o gerenciamento de cascalhos de perfuração. Desta forma, o conhecimento dos metais pesados e substâncias tóxicas orgânicas e inorgânicas presentes nos resíduos e suas ações no solo tornam-se essenciais, a fim de evitar a poluição e consequente degradação ambiental do local em uso (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000).

## **2.6 Efeito de metais pesados no solo**

Entre os numerosos contaminantes poluentes do solo, os metais pesados ou elementos-traço são especialmente perigosos devido à alta toxicidade, persistência ambiental e



bioacumulação da cadeia alimentar (ESMAEILI et al., 2014). O termo metal pesado é utilizado para identificar um grupo de metais e metaloides com densidade atômica maior que  $6 \text{ g cm}^{-3}$  e/ou número atômico maior que vinte (COSTA et al., 2006). Por mais que estejam em pequenas quantidades, a sua presença pode causar inúmeros problemas ambientais e de saúde pública (ONG et al., 2013; ESMAEILI et al., 2014; GHERASIM, 2016).

Os metais pesados são substâncias químicas inorgânicas, cuja dispersão gera uma grande preocupação pelo fato de persistirem na natureza e serem potencialmente tóxicos aos organismos vivos e, quando presentes em concentrações disponíveis, são passíveis de gerar contaminação ambiental. Estão presentes naturalmente na geosfera, atmosfera, hidrosfera e biosfera, porém as atividades antrópicas, proporcionam um incremento da concentração destes elementos no ambiente, onde a principal fonte de acumulação dos metais é o solo (CAMARGO et al., 2001).

Os metais pesados de maior preocupação no tratamento de águas residuais são cobre, cádmio, ferro, chumbo, zinco, mercúrio, cromo e prata, por serem altamente tóxicos, não biodegradáveis e com tendência a se acumular em organismos vivos (LANOUILLE, 1977). As principais fontes de metais pesados são curtimento, refino de petróleo, fabricação de produtos químicos, mineração, indústria têxtil, fábricas de fertilizantes, indústria de processamento fotográfico, fabricação de baterias, processamento e acabamento de metal e aço e lixiviados de aterro (GHERASIM et al., 2014).

No que se refere a contaminação de aquíferos e solos, a disposição inadequada de fluidos e de cascalho de perfuração representam um dos potenciais impactos ambientais que podem ser causados na atividade de exploração de petróleo (AMARAL et al., 2019). Os metais presentes nos cascalhos de perfuração, ao serem depositados sob o solo, podem ser lixiviados para zonas mais profundas do solo e atingir corpos hídricos. Contudo, de acordo com Lemos (1997), os metais pesados podem se acumular em organismos proporcionando problemas ligados ao sistema nervoso, inclusive ao aumento de casos de câncer.

Para que possa ser contabilizado e avaliado quanto a presença dos metais pesados nos respectivos resíduos, toma-se como base as resoluções 420/2009 e 430/2011 do CONAMA. Apresentando a regulamentação do estabelecimento de critérios e valores orientadores referentes à presença de substâncias químicas, para a proteção da qualidade do solo e dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, respectivamente.

## 2.7 Efeito do sódio no solo

Os cascalhos, em sua composição, contém fragmentos de rochas, com constituição diversa quanto aos metais pesados e uma fração residual de fluido de perfuração, que por sua vez, apresentam a sua composição, barita, soda cáustica, cloreto de sódio, hidróxido de cálcio, metais pesados e outros componentes sintéticos (CAENN et al., 2011).

Os solos afetados por sais podem interferir negativamente no desenvolvimento das culturas, sendo variável a sensibilidade às condições salinas de acordo com a espécie. De acordo com Meurer et al. (2010), esses mesmos solos podem ser classificados como: **Salinos** - os quais apresentam elevada concentração de sais solúveis, que os tornam floculados, porém permeáveis não apresentando problemas de natureza física; **Sódicos** - os quais apresentam elevadas concentrações de sódio trocável, causando dispersão da argila e possível dispersão da matéria orgânica quando em concentrações muito elevadas levando a problemas químicos e físicos, além de limitar o crescimento das plantas e; **Salino-sódicos** - os quais apresentam elevadas concentrações de sais e de sódio trocável, causando características semelhantes às dos solos salinos, porém com maior concentração de sódio.

Nos solos salinos, o maior problema está relacionado ao desenvolvimento das culturas, uma vez que, com o excesso de sais solúveis, há uma redução do potencial osmótico da solução do solo, o que dificulta a absorção da água pela planta (CARVALHO; STAMFORD, 1999; DUTRA et al., 2000; VIANA et al., 2001; AMORIM ET et al., 2002). Nota-se que quando o Na é o íon predominante sem que o solo não apresente alta salinidade, as plantas tendem a apresentar maior toxidez, dispersão de argilas e desestruturação dos solos, tornando-os impermeáveis (LEBRON et al., 2002; MCBRIDE; BAVEYE, 2002).

Solos salino-sódicos, apresentam como característica elevada concentração de sódio, fazendo com que possuam permeabilidade menos crítica do que os solos sódicos, em razão do efeito floculante dos sais solúveis. Quando ocorre o processo de recuperação desses solos, a retirada imediata dos sais, antes mesmo que o corretivo aplicado tenha a sua maior parte solubilizada, pode ocasionar na redução da drenagem e inviabilizá-los para a agricultura (OLIVEIRA et al., 2002; FREIRE et al., 2003).

Como pode ser notado, o excesso de sais solúveis e/ou Na trocável que caracteriza os solos como salinos, salino-sódicos ou sódicos, dificulta a absorção de água pelas plantas, induz a toxicidade de íons específicos (principalmente sódio e cloreto), causa desequilíbrio

nutricional e impede a infiltração de água no solo, oferecendo reduções no crescimento e rendimento das culturas (SILVA et al., 2011b).

Tomando como referência o conceito de desenvolvimento sustentável, fica evidente que atividades desta natureza não podem ser mantidas sem que algo seja feito com o intuito de minimizar os impactos gerados pela atividade (DE ALMEIDA et al., 2017). Rotas tecnológicas devem ser pensadas, a partir de uma alternativa que faça uso e eliminação desses resíduos, para a recuperação de áreas degradadas pelas atividades industriais e petrolíferas.

Dentre as possíveis rotas tecnológicas aplicáveis a esses resíduos, podem-se destacar a utilização na construção de estradas e fabricação de cimentos (SCHUMAKER et al., 1991; TUNCAN et al., 2000; PAGE et al., 2003; MOSTAVI et al., 2015), estabilização/ solidificação (LEONARD; STEGEMANN, 2010), confecção de tijolos solo-cimento (MARQUES, 2010) e fabricação de material cerâmico (MEDEIROS, 2010).

Sabe-se pouco em relação ao material e à sua utilização na agricultura (ZAMORA-LEDEZMA, 2013; KOGBARA et al., 2017; OKPARANMA et al., 2018). Entretanto, Zonta et al. (2005), mostraram que, quando corrigidos os problemas ligados à composição contaminante do cascalho, há a possibilidade de utilização no solo, gerando melhoramento das propriedades químicas, como elevação da fertilidade, assim como melhorias nas propriedades físicas. Logo, o uso agrícola deste resíduo pode ser uma possível rota tecnológica em sua disposição final.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.2 Localização

O experimento foi conduzido no Departamento de Solos do Instituto de Agronomia, localizado no *Campus* da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro- UFRRJ, município de Seropédica - Rio de Janeiro (22°47' de latitude sul e 43°40' de longitude oeste).

#### 3.3 Recebimento e processamento dos cascalhos de perfuração de poços de petróleo *offshore* de Pré-sal e Pós-sal

Os cascalhos utilizados no experimento foram provenientes dos poços 7-MLL-82HA-RJS (Pós-sal) e 9-MLL-83-RJS (Pré-sal), do campo de produção de Marlin, localizado na Bacia de Campos, distante aproximadamente 110 Km do litoral do Rio de Janeiro. O material do poço de Pós-sal, coletado entorno de uma profundidade de 3.400m, apresentou o aspecto visual granulométrico mais fino (Figura 4 A), quando comparado ao material referente ao poço de Pré-sal (Figura 4 B), sendo este coletado entre 4450 a 4520m de profundidade.



**Figura 4.** Aspecto visual do material recebido. A) Cascalho com aspecto granulométrico mais fino, referente ao Pós-sal (Poço 7-MLL-82HA-RJS), coletado a 3400m de profundidade; B) Cascalho com aspecto granulométrico mais grosseiro, referente ao Pré-sal (Poço 9-MLL-83-RJS), coletado entre 4450 a 4520m de profundidade.

Após o recebimento do material, os cascalhos de perfuração *offshore* foram secos a sombra, destorroados, peneirados em peneira com malha de 4 mm e armazenados em sacos plásticos dentro de tambores devidamente identificados e protegidos (Figura 5).



**Figura 5.** Preparo dos resíduos para utilização nos experimentos. A) Cascalhos espalhados em leiras e constantemente revolvidos para secagem mais rápida; B) Cascalhos peneirados em peneira de malha de 4mm; C) Cascalhos preparados para armazenagem em sacos plástico.

Do material armazenado, retirou-se uma alíquota de ambos para serem avaliados quanto aos teores biodisponíveis e pseudototais de nutrientes e metais pesados. Para tal, o material foi finalmente triturado em moinhos de bolas (Figura 6), com posterior peneiramento em malha de 1mm.



**Figura 6.** Preparo dos resíduos para as análises químicas e experimentos. A e B) Moinhos de bola utilizados para a trituração dos cascalhos offshore do Pós-sal e Pré-sal; C) Preparo do cascalho de perfuração posterior ao peneiramento. Fotos: Ribeiro, J. C. (2019)

Os respectivos cascalhos (Pós-sal e Pré-sal) passaram pela caracterização de acordo com os valores estabelecidos na ABNT NBR 10004:2004 de 30/11/2004- Massa bruta. Sendo assim, com base nos ensaios de massa bruta, lixiviado e solubilizado conclui-se que os resíduos são: Resíduo Não Perigoso- Classe II A- Não Inerte.

Os teores biodisponíveis foram determinados de acordo com o proposto por Teixeira et al. (2017). Os teores pseudototais foram determinados a partir da metodologia estabelecida pela USEPA (United States Environmental Protection Agency) SW-846 3050B (1996), assim como, recomendado pela resolução nº 375 (2006) e nº 420 (2009) do CONAMA; e decisão de diretoria nº 256 da CETESB (2016). Os resultados dos teores biodisponíveis e pseudototais estão apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

### **3.4 Coleta e preparo do solo utilizado**

No experimento utilizou-se dois tipos de solo, Planossolo e o perfil completo de um Argissolo Vermelho-Amarelo. Na Figura 7 são apresentados o perfil do Argissolo Vermelho-Amarelo e o Planossolo de onde foram retirados as amostras, respectivamente. A escolha desses solos teve por finalidade observar como o resíduo se comportaria em solos de texturas contrastantes. Os respectivos solos foram coletados no município de Seropédica e levados para local coberto para secagem. Após secos, foram peneirados em peneira de malha de 4 mm para retirada de raízes e demais impurezas. As características químicas e físicas do solo foram analisadas de acordo com a metodologia proposta por Teixeira (2017).

**Tabela 1.** Análise de fertilidade dos nutrientes no cascalho *offshore* Pré-sal (Poço 9-MLL-83-RJS - 4450 a 4520m de profundidade); cascalho *offshore* pós-sal (Poço 7-MLL-82HA-RJS - 3400m de profundidade).

| Resíduo                            | Na                                 | Ca    | Mg   | K     | H+Al | Al   | S      | T      | V      | M    | N     | pH <sub>água</sub> | Corg | Mo                | P    | K       |
|------------------------------------|------------------------------------|-------|------|-------|------|------|--------|--------|--------|------|-------|--------------------|------|-------------------|------|---------|
|                                    | Cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> |       |      |       |      |      |        |        |        |      | %     | 1:2,5              | %    | m L <sup>-1</sup> |      |         |
| Cascalho <i>offshore</i> - Pré-sal | 91,40                              | 2,98  | 7,58 | 24,50 | 0,00 | 0,00 | 126,46 | 126,46 | 100,00 | 0,00 | 72,28 | 9,32               | 1,10 | 1,90              | 5,29 | 9417,50 |
| Cascalho <i>offshore</i> - Pós-sal | 73,90                              | 14,15 | 2,22 | 0,18  | 0,00 | 0,00 | 90,45  | 90,45  | 100,00 | 0,00 | 81,70 | 11,25              | 2,00 | 3,40              | 2,74 | 70,00   |

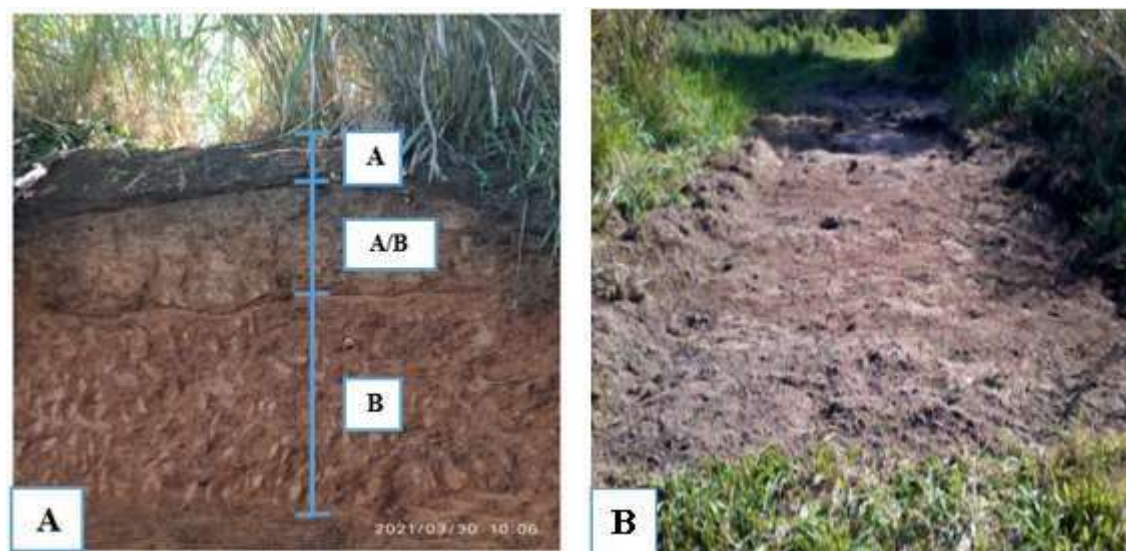
m - saturação por Al; n - saturação por sódio; Sb - soma de bases, T - capacidade efetiva de troca de cátions a pH 7,0; V - saturação por bases; t - Capacidade de troca efetiva de cátions (CTC ef.):  $t = Sb + Al^{3+}$ , em cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>

**Tabela 2.** Teores pseudototais médios de nutrientes e metais pesados no cascalho *offshore* pré-sal (Poço 9-MLL-83-RJS - 4450 a 4520m de profundidade); cascalho *offshore* pós-sal (Poço 7-MLL-82HA-RJS - 3400m de profundidade).

| Identificação                      | Al                  | Ca        | Mg       | Cu    | Fe       | Mn     | Zn     | Pb    | Cd   | Ni    | Cr     | P       | K       | Na       |
|------------------------------------|---------------------|-----------|----------|-------|----------|--------|--------|-------|------|-------|--------|---------|---------|----------|
|                                    | mg kg <sup>-1</sup> |           |          |       |          |        |        |       |      |       |        |         |         |          |
| Cascalho <i>offshore</i> - Pré-sal | 1077,65             | 490775,35 | 57041,69 | 24,54 | 11158,25 | 183,32 | 160,16 | 13,58 | 0,35 | 10,39 | 30,00  | 5521,51 | 219,68  | 21559,59 |
| Cascalho <i>offshore</i> - Pós-sal | 336,65              | 63757,19  | 23231,57 | 4,01  | 3217,64  | 38,60  | 20,43  | 1,57  | 0,25 | 94,24 | 122,07 | 4126,54 | 9303,51 | 19668,52 |

**Tabela 3.** Análise de Fertilidade Argissolo e Planossolo utilizados no experimento

| Resíduo                               | Na                                 | Ca   | Mg   | K    | H+Al | Al   | S    | T    | V     | M    | n    | pH <sub>água</sub> | Corg | Mo   | P                  | K  |
|---------------------------------------|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|--------------------|------|------|--------------------|----|
|                                       | Cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> |      |      |      |      |      |      |      |       | %    |      | 1:2,5              | %    |      | mg L <sup>-1</sup> |    |
| Hori B Argissolo Vermelho-<br>Amarelo | 0,03                               | 3,33 | 2,13 | 0,07 | 2,27 | 0,00 | 5,55 | 5,55 | 71    | 0,00 | 0,38 | 6,20               | 0,87 | 1,50 | 25,53              | 48 |
| Planossolo                            | 0,02                               | 0,99 | 0,97 | 0,03 | 3,43 | 0,10 | 2,02 | 2,12 | 37,03 | 4,72 | 0,32 | 5,30               | 0,87 | 0,71 | 22,60              | 23 |



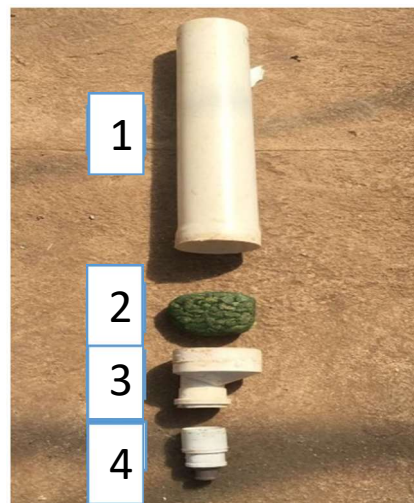
**Figura 7.** Solos utilizados no experimento. A) Perfil do Argissolo Vermelho-Amarelo, demarcados os seus horizontes A, A/B e B, respectivamente; B) Planossolo. Fotos: Ribeiro, J. C. (2019).



### 3.5 Ensaio com coluna de lixiviação

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial  $2 \times 5 \times 2$ , sendo dois tipos de cascalho de perfuração de poços de petróleo *offshore* (Pré-sal e Pós-sal) com cinco doses de cada um desses cascalhos (0, 25, 50, 100 e 200 Mg ha<sup>-1</sup>) e dois tipos de solo (Planossolo e Argissolo Vermelho-Amarelo), com três repetições, totalizando 60 unidades experimentais.

As unidades experimentais foram constituídas de tubo tipo PVC, com dimensões de 60 cm de comprimento e diâmetro de 100 mm. Foi adaptado na base de cada tubo reduções concêntricas, sendo estas preenchidas com trouxas de britas n°1 envolta em tela de nylon para facilitar a drenagem e evitar perda de solo durante a lixiviação (Figura 8). As bordas das reduções foram vedadas com cola de silicone para evitar vazamentos. Os materiais foram descontaminados utilizando solução de ácido clorídrico 3% e lavados com água ionizada antes de serem preenchidos com os solos e resíduos.

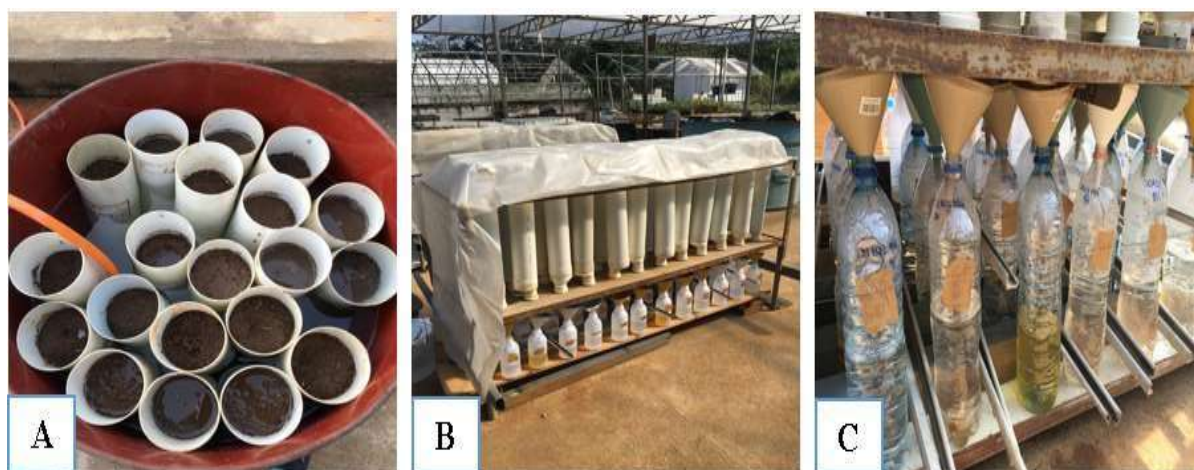


**Figura 8.** Coluna de lixiviação. 1) Tubo PVC com dimensões de 60cm de comprimento e 100mm de diâmetro; 2) Trouxa de brita n°1 envolta em tela de nylon; 3) Redução concêntrica de 100x75mm; 4) Redução concêntrica de 75x50mm e 50x25mm, respectivamente.

Em seguida, o volume aproximado de 4 dm<sup>3</sup> de cada solo foi despejado nas colunas. As colunas de lixiviação que representam o Argissolo Vermelho-Amarelo foram montadas conforme o perfil do solo observado no local de coleta, sendo composto por horizonte A,

horizonte A/B e horizonte B. Para que atingissem a saturação do solo, as colunas foram alojadas em tonéis abastecidos com água destilada (Figura 9A). Após a saturação, as colunas foram vedadas com papel alumínio em sua superfície a fim de evitar a evaporação da água, e manter o solo o mais próximo da capacidade de campo, possível. Estas colunas foram acomodadas em estruturas metálicas desenvolvidas para que permanecessem na posição vertical. Estas permaneceram durante 15 dias, até que toda água pudesse ser percolada. Após esse período, na área superficial das colunas foram adicionadas nas superfícies dos solos, as correspondentes doses dos resíduos de cada tratamento com 0, 25, 50, 100 e 200 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 9B).

Para que fosse possível receptor o lixiviado, instalou-se embaixo de cada coluna, uma garrafa plástica com funil próximo ao orifício da redução concêntrica. As garrafas ficaram fixadas com fitas adesivas em malha de arame com o propósito de proteger contra a ação de vento (Figura 9C). Todas as unidades experimentais foram cobertas com papel alumínio e filme plástico 200µm, para evitar a perda de água por evaporação (Figura 9B).



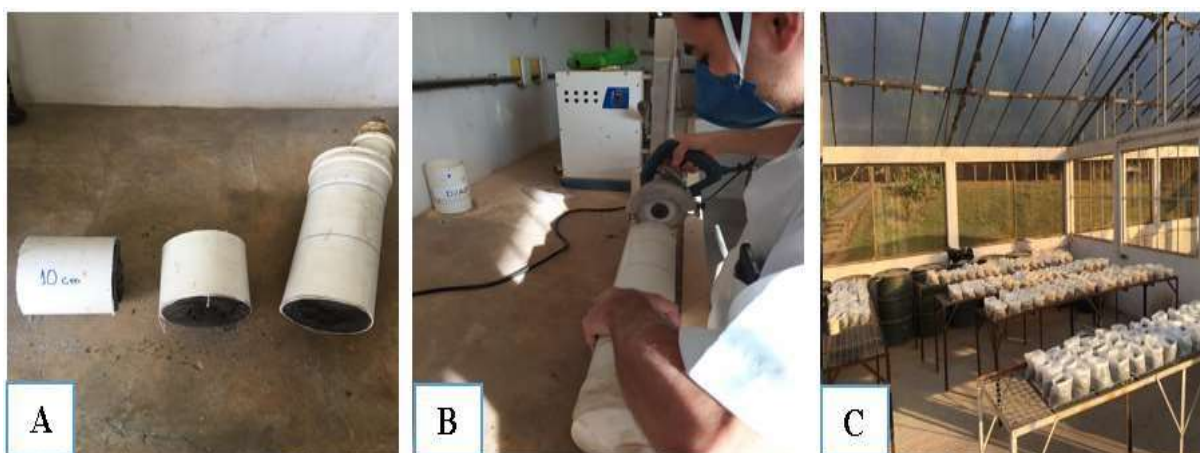
**Figura 9.** Figura. A) colunas em processo de saturação; B) Colunas acomodadas em estruturas metálicas para que permanecessem na posição vertical; C) Embaixo de cada coluna instalou-se uma garrafa plástica com funil próximo ao orifício da redução concêntrica para a recepção do lixiviado, sendo estas fixas por uma malha de arame e fita adesiva.

No que concerne a lâmina de água destilada aplicada, levou-se em consideração as precipitações pluviométricas máximas das regiões de Santos (SP), Macaé (RJ) e Vitória (ES), pois é nestas localidades que apresentam-se portos com capacidade de receber os cascalhos provenientes da perfuração de poços de petróleo *offshore*. Assim, a lâmina de água aplicada foi de 200 mm, valor próximo a precipitação máxima já ocorrida nas três localidades, sendo

200 mm, 189 mm e 199 mm em Santos, Macaé e Vitória (INMET, 2021), respectivamente. À água destilada foi aplicada em três dias consecutivos uma vez que as colunas não suportavam a adição de 200mm de uma só vez. Deste modo, a água percolada pela aplicação das lâminas foi coletada após uma semana (7 dias) e nela quantificada os valores de pH, P, K, Ca, Mg, Al e Na pela metodologia Teixeira et al (2017). O Cu, Mn, Ni, Co, Cr, Zn, Cd, Pb, Mg, Al, Ca e Ba foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica em equipamento de marca Agilent Technologies, modelo Varian SpectraAA 55B.

### 3.6 Análises de nutrientes no solo após ensaio

Após o ensaio de lixiviação, iniciou-se o processo de análises dos solos de cada coluna. Primeiramente, as colunas foram demarcadas a cada 10 cm, totalizando quatro cortes (Figura 10A), partindo da face superior até a face inferior da unidade experimental. Estes cortes seguiram o princípio de avaliar a fertilidade e contaminação de solos a partir de elementos presentes nos respectivos resíduos e nas respectivas doses, de acordo com a profundidade do perfil simulado nas colunas. Os cortes foram efetuados com os solos úmidos a partir da utilização de serra circular (Figura 10B) e em seguida, depositados em sacos plásticos identificados. Tais amostras foram secas a sombra, posteriormente peneiradas em peneira de malha de 2 mm, homogeneizadas e acondicionadas em sacos plásticos para posterior análise química (Figura 10C).



**Figura 10.** Figura. Procedimentos iniciais para análise dos solos das colunas de lixiviação. A) Cortes realizados a cada 10cm de profundidade, totalizando quatro faces em cada coluna; B) utilização de maquina para o corte das colunas; C) Amostras secas a sombra em sacos plásticos, peneiradas em peneira em malha de 2mm.

Em cada amostra de solo foram determinados os parâmetros relacionados a fertilidade do solo e os teores trocáveis (disponíveis) de metais pesados. A leitura de fósforo foi realizada por calorimetria do metavanadato (MALAVOLTA et al., 1997), o sódio e potássio por fotometria de chama e, os demais elementos por espectrofotometria de absorção atômica com em equipamento de marca Agilent Technologies, modelo Varian SpectrAA 55B (TEIXEIRA et al., 2017).

Os valores de pH, assim como, os teores trocáveis de P, K, Ca, Mg e Na, foram determinados pela metodologia Teixeira (2017). Os metais pesados foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica em equipamento de marca Agilent Technologies, modelo Varian SpectrAA 55B.

#### **4 ANÁLISE ESTATÍSTICA**

Os dados foram avaliados por análise de variância com aplicação do teste F ( $p < 0,05$ ), sendo os valores médios comparados pelo teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ). Todas as análises estatísticas foram feitas por meio dos Programa Estatístico Sisvar.

#### **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

##### **5.1 Ensaio de lixiviação**

A partir da aplicação das lâminas d'água nas colunas de lixiviação, Foi possível quantificar os teores dos elementos estudados no lixiviado. Contudo, conforme a Tabela 4 é possível notar que houve o arraste considerável a depender do elemento e da dose aplicada no solo. Em geral, pode-se observar uma alta mobilidade dos elementos analisados, destaque para Na, Mg, K, Ca. Em relação aos metais o Ba foi o que foi apresentou maior concentração no lixiviado, possivelmente, devido aos maiores teores encontrados nos resíduos analisados.

**Tabela 4.** Concentração de macronutrientes e metais pesados (Mg.L<sup>-1</sup>) no lixiviado de Argissolo e Planossolo com diferentes doses de cascalhos de perfuração *offshore* de Pós-sal e Pré-sal.

| Solo | Cascalho | Elementos | 0                              | 25      | 50       | 100      | 200      |
|------|----------|-----------|--------------------------------|---------|----------|----------|----------|
|      |          |           | -----Mg.há <sup>-1</sup> ----- |         |          |          |          |
| Arg  | Pós-sal  | pH        | 6,06 B                         | 6,05 B  | 6,11 B   | 5,95 B   | 5,91 A   |
|      | Pré-sal  |           | 5,81 B                         | 6,11 B  | 6,04 B   | 5,89 B   | 5,09 B   |
|      | Pós-sal  | CE        | 0.39 A                         | 0.71 A  | 1.50 A   | 1.74 B   | 2.16 B   |
|      | Pré-sal  |           | 0.39 A                         | 0.68 A  | 1.26 A   | 2.49 A   | 6.78 A   |
|      | Pós-sal  | Ca        | 2.15 B                         | 5,33 B  | 8.22 B   | 13.66 B  | 14.18 B  |
|      | Pré-sal  |           | 2.51 B                         | 4.79 B  | 6.49 B   | 12.28 B  | 27.12 A  |
|      | Pós-sal  | Mg        | 6,70 B                         | 19,69 B | 27,81 B  | 41,76 B  | 49,34 B  |
|      | Pré-sal  |           | 5,99 B                         | 10,24 B | 16,68 B  | 39,99 B  | 76,30 A  |
|      | Pós-sal  | P         | 6,56 A                         | 6,20 A  | 6,25 A   | 4,61 B   | 7,72 B   |
|      | Pré-sal  |           | 1,99 B                         | 3,52 B  | 2,33 B   | 3,68 B   | 2,69 B   |
|      | Pós-sal  | K         | 9,92 B                         | 17,19 B | 24,62 A  | 32,39 A  | 29,96 A  |
|      | Pré-sal  |           | 10,20 A                        | 14,90 A | 13,65 A  | 25,51 A  | 34,37 A  |
|      | Pós-sal  | Na        | 22,95 B                        | 80,89 B | 177,15 B | 220,38 B | 324,23 B |
|      | Pré-sal  |           | 21,98 B                        | 71,29 B | 150,61 B | 313,43 B | 1139,1 A |
|      | Pós-sal  | Cu        | 0,03 A                         | 0,03 A  | 0,04 A   | 0,04 A   | 0,05 A   |
|      | Pré-sal  |           | 0,04 A                         | 0,04 A  | 0,03 A   | 0,04 A   | 0,06 A   |
|      | Pós-sal  | Co        | 0,00 B                         | 0,00 B  | 0,00 B   | 0,00 B   | 0,00 B   |
|      | Pré-sal  |           | 0,00 B                         | 0B      | 0,0025 B | 0,004 B  | 0,013 A  |
|      | Pós-sal  | Cr        | 0,160 B                        | 0,212 B | 0,215 B  | 0,202 B  | 0,203 B  |
|      | Pré-sal  |           | 0,217 A                        | 0,220 B | 0,190 B  | 0,219 B  | 0,231 B  |
|      | Pós-sal  | Zn        | 0,776 B                        | 2,229 A | 1,64 A   | 1,318 B  | 1,219 B  |
|      | Pré-sal  |           | 0,770 B                        | 1,374 B | 0,715 B  | 1,140 B  | 0,747 B  |
|      | Pós-sal  | Cd        | 0,000 B                        | 0,000 B | 0,0005 B | 0,001 B  | 0,005 B  |
|      | Pré-sal  |           | 0,0005 B                       | 0,002 A | 0,001 B  | 0,0063 A | 0,011 A  |
|      | Pós-sal  | Mn        | 0,09 B                         | 0,32 B  | 0,30 A   | 0,41 B   | 0,48 B   |
|      | Pré-sal  |           | 0,15 B                         | 0,22B   | 0,21 B   | 0,32 B   | 0,66 B   |
|      | Pós-sal  | Pb        | 0,000 B                        | 0,000 B | 0,000 B  | 0,000 B  | 0,038 B  |
|      | Pré-sal  |           | 0,000 B                        | 0,000 B | 0,000 B  | 0,077 A  | 0,224 A  |
|      | Pós-sal  | Ba        | 8.07 B                         | 7.64 B  | 8,99 A   | 9.33 B   | 9.66 B   |
|      | Pré-sal  |           | 6.96 B                         | 7.97 B  | 7.24 B   | 9.44 B   | 9.40 B   |

Continua...

... continuação

| Solo | Cascalho | Elementos | 0                              | 25       | 50       | 100      | 200       |
|------|----------|-----------|--------------------------------|----------|----------|----------|-----------|
|      |          |           | -----Mg.ha <sup>-1</sup> ----- |          |          |          |           |
| Plan | Pós-sal  | pH        | 6,97 B                         | 6,54 B   | 6,69 B   | 6,99 A   | 6,80 B    |
|      | Pré-sal  |           | 7,20 B                         | 6,64 B   | 6,71 B   | 6,53 B   | 6,63 B    |
|      | Pós-sal  | CE        | 1.32 A                         | 1.92 A   | 2.58 B   | 4.73 A   | 5.29 B    |
|      | Pré-sal  |           | 1.10 A                         | 1.58 A   | 3.28 A   | 4.65 A   | 9.6 A     |
|      | Pós-sal  | Ca        | 5,66 B                         | 6.64 A   | 10.02 B  | 19.97 A  | 18.16 B   |
|      | Pré-sal  |           | 2.51 B                         | 4.79 B   | 6.49 B   | 12.28 B  | 27.12 A   |
|      | Pós-sal  | Mg        | 28,13 A                        | 53,52 A  | 69,92 B  | 99,28 A  | 92,52 B   |
|      | Pré-sal  |           | 25,76 B                        | 32,07 B  | 80,11 B  | 73,47 B  | 94,61 B   |
|      | Pós-sal  | P         | 113,02 A                       | 141,75 A | 99,01 B  | 64,09 B  | 44,82 B   |
|      | Pré-sal  |           | 88,78 B                        | 75,16 B  | 90,33 B  | 60,88 B  | 80,90 A   |
|      | Pós-sal  | K         | 25,59 B                        | 38,99 A  | 42,20 B  | 143,76 A | 161,08 A  |
|      | Pré-sal  |           | 23,83 B                        | 20,06 B  | 35,84 B  | 39,46 B  | 41,17 B   |
|      | Pós-sal  | Na        | 40,59 B                        | 148,02 B | 207,43 B | 641,78 B | 740,87 B  |
|      | Pré-sal  |           | 26,26 B                        | 47,58 B  | 441,57 A | 737,42 B | 1565,60 A |
|      | Pós-sal  | Cu        | 0,07 A                         | 0,08 A   | 0,09 A   | 0,11 A   | 0,20 A    |
|      | Pré-sal  |           | 0,1 A                          | 0,06 A   | 0,09 A   | 0,11 A   | 0,13 A    |
|      | Pós-sal  | Co        | 0,001 B                        | 0,00 B   | 0,00 B   | 0,005 B  | 0,013 B   |
|      | Pré-sal  |           | 0,003 B                        | 0,00 B   | 0,00 B   | 0,0014 B | 0,21 A    |
|      | Pós-sal  | Cr        | 0,236 B                        | 0,233 A  | 0,205 B  | 0,234 B  | 0,239 B   |
|      | Pré-sal  |           | 0,226 B                        | 0,193 B  | 0,240 B  | 0,227 B  | 0,215 B   |
|      | Pós-sal  | Zn        | 1,134 A                        | 0,541 A  | 1,283 A  | 1,515 A  | 1,466 A   |
|      | Pré-sal  |           | 0,767 A                        | 0,575 A  | 1,373 A  | 1,790 A  | 1,990 A   |
|      | Pós-sal  | Mn        | 1,16 B                         | 1,23 A   | 1,78 B   | 5,33 B   | 7,95 B    |
|      | Pré-sal  |           | 0,61 B                         | 0,03 B   | 4,31 A   | 4,24 B   | 7,52 B    |
|      | Pós-sal  | Pb        | 0,151 A                        | 0,044 B  | 0,073 B  | 0,132 B  | 0,248 B   |
|      | Pré-sal  |           | 0,053 B                        | 0,065 B  | 0,121 A  | 0,154 B  | 0,240 B   |
|      | Pós-sal  | Ba        | 5.51 B                         | 5.74 B   | 5.75 B   | 7.73 B   | 9.67 B    |
|      | Pré-sal  |           | 7.05 B                         | 6.39 B   | 8.34 A   | 9.06 B   | 9.62 B    |

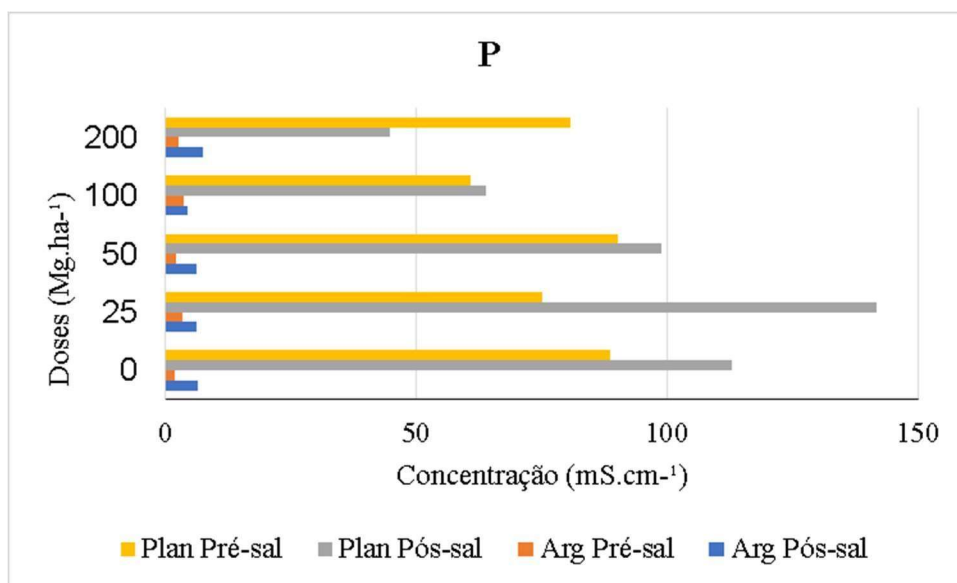
Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na linha, não diferem entre si entre os resíduos

(Pós-sal e Pré-sal), pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

### 5.1.1 Fósforo (P)

Para o teor de P no lixiviado (Figura 11), observa-se diferentes resultados de acordo com a textura do solo e o tipo de cascalho utilizado. No Argissolo, em ambos resíduos (Pré-sal e Pós-sal), os valores encontrados variaram de 2,33 até 7,32 mg.L<sup>-1</sup>. Assim, pode-se notar que o quantitativo de P no lixiviado não apresentou valores elevados. Ainda assim, o resultado apresenta diferença estatística entre os resíduos. Nota-se que apresentou diferença estatística nas doses de 0, 25 e 50 Mg.ha<sup>-1</sup> com o cascalho do Pós-sal.

Por sua vez, em solos de textura média e argilosa, o P tende a ser adsorvido pela argila a partir de pontes argila-cátion-P, sendo o cátion, comumente, o cálcio e o magnésio (MATOS et al., 2017). Dessa forma, é possível que os resultados obtidos possam ser justificáveis a partir da análise dos solos.



**Figura 11.** Teor de P no lixiviado referente ao Argissolo e Planossolo utilizando as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pós-sal e Pré-sal.

Diferentemente do Argissolo, o arraste de P no Planossolo ocorreu de forma oposta. Já na dose controle do solo, apresentou maior arraste do macronutriente para o lixiviado,



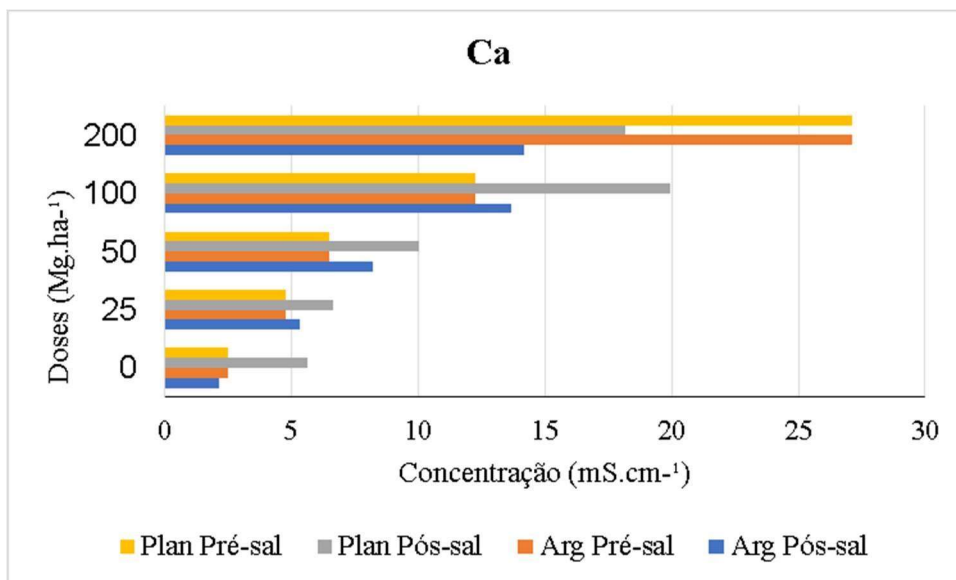
chegando ao valor de 113,02 mg.L<sup>-1</sup>, valor bem superior ao encontrado no lixiviado do Argissolo.

Além de diferenciar-se do Argissolo, os resultados com o Planossolo a partir da utilização dos cascalhos Pós-sal e Pré-sal, respectivamente, diferenciaram-se entre si estatisticamente. Nota-se que na dose de 25 Mg/há, no lixiviado, ocorreu o arraste mais expressivo de P entre as demais doses (141,33 mg.kg<sup>-1</sup>). O P em solos arenosos acumulase, quase que totalmente, na solução do solo (MATOS et.al, 2021). Pela Figura é possível notar grandes diferenças entre os resíduos e texturas utilizadas.

Outro ponto que deve-se observar é o comportamento do macronutriente assim que aumenta a dose do cascalho do Pós-sal. Os maiores arrastes apresentam-se nas menores doses (141,33 mg.kg<sup>-1</sup>) e diminuindo para as maiores doses, como no caso de 200 Mg.ha<sup>-1</sup>, que obteve o menor dos resultados (44,82 mg.kg<sup>-1</sup>). Tal resultado obtido na maior dose no Pós-sal, ao se comparar aos resultados do Pré-sal, também apresentou diferença estatística com a dose de 200 Mg.ha<sup>-1</sup> do cascalho do Pré-sal, mostrando o quão baixo foi o arraste do P.

### 5.1.2 Cálcio (Ca)

De acordo com a Figura 12, é possível observar o comportamento do cálcio (Ca) de acordo com as doses e os solos utilizados.



**Figura 12.** Teor de Ca no lixiviado referente ao Argissolo e Planossolo utilizando as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pós-sal e Pré-sal.

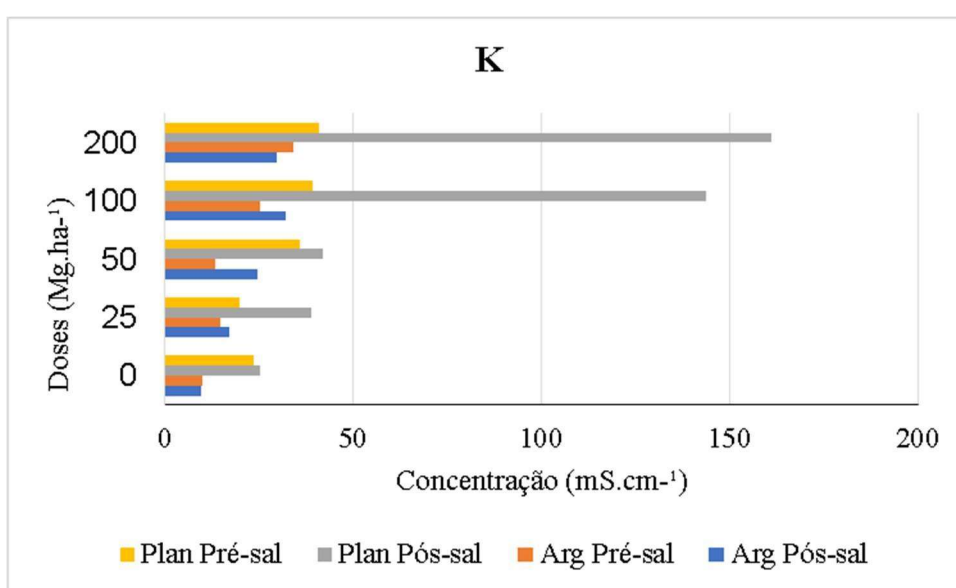
A partir do aumento da dose dos respectivos resíduos, independentemente do solo utilizado, o quantitativo de Ca no lixiviado também se eleva. Os valores encontrados no lixiviado a partir do Argissolo com o cascalho do Pós-sal não diferiram estatisticamente entre si nas doses utilizadas. Contudo, quando comparado os valores de Ca entre os diferentes tipos de cascalho (Pré-sal e Pós-sal) utilizados, o solo com cascalho do Pré-sal apresentou valor estatisticamente maior.

Nota-se que no Argissolo com o cascalho do Pré-sal, apenas a maior dose utilizada (200 Mg.ha<sup>-1</sup>) apresentou valor de Ca no lixiviado, significativamente superior as demais doses utilizadas. Para o Planossolo, assim como no Argissolo, pode-se observar o baixo teor de Ca no lixiviado dos cascalhos tanto do Pós-sal quanto do Pré-sal.

Ao avaliar o efeito da lixiviação de íons em dois solos (Latossolo e Planossolo) que recebem fluidos de perfuração de poços de petróleo *onshore* nas concentrações de 4, 8 e 16%, Freitas et al. (2015) observaram que na dose mais baixa (4%) a concentração de Ca foi cinco vezes maior que o controle em um Planossolo e duas vezes maior que o controle em um Latossolo.

### 5.1.3 Potássio (K)

Quanto ao potássio (Figura 13) encontrado no lixiviado a partir da aplicação dos resíduos nos respectivos solos, nota-se o aumento do teor do metal quando as doses de cascalho foram associadas às doses crescentes no Planossolo. Observa-se ainda que o maior teor de K encontrado ocorreu na associação da dose de cascalho Pós-sal do Planossolo com a dose de 200 Mg.ha<sup>-1</sup> chegando ao valor próximo de 160 mg.L<sup>-1</sup>.



**Figura 13.** Teor de K no lixiviado referente ao Argissolo e Planossolo utilizando as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pós-sal e Pré-sal.

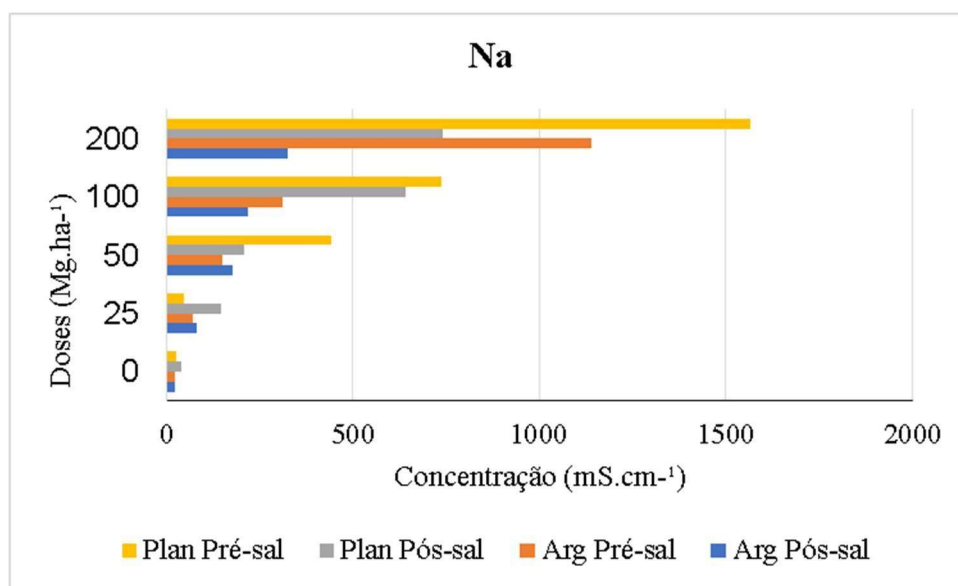
O que chama a atenção é que a dose de 50 Mg.ha<sup>-1</sup> é a única que não diferencia estatisticamente da dose controle com o Pós-sal do Planossolo. O oposto ocorre com o Argissolo, a única dose que diferencia estatisticamente das demais é a dose de 50 Mg.ha<sup>-1</sup>. Para os resíduos do Pré-sal, tanto no Argissolo quanto no Planossolo, nenhuma dose utilizada se diferencia estatisticamente entre si.

Resultados similares foram encontrados por Carvalho (2013), e Lima (2013), estudando resíduos de perfuração *onshore* de petróleo oriundos de Alagoas. Os autores verificaram baixa remoção do potássio, demonstrando que a forma presente do metal nos resíduos apresentava baixa solubilidade em água. Guedes (2014) ao avaliar o comportamento do cascalho *onshore*

em ensaio de lixiviação, também demonstrou que a forma do potássio presente nos resíduos apresentaram baixa solubilidade em água e de difícil extração, uma vez que em seus resultados, apresentou baixos valores de potássio no lixiviado. Este fato é um ponto positivo do ponto de vista agrícola, uma vez que ensaios mostraram que as perdas de potássio por lixiviação certamente serão baixas.

#### 5.1.4 Sódio (Na) e condutividade elétrica

A partir desses resultados a seguir (Figura 14), deve-se levar em consideração os riscos que possam ser causados aos solos que venham receptor esses resíduos. Tais riscos estão relacionados a mudança de características nos solos, como solos salinos, sódicos ou salino-sódicos. Contudo, é possível notar diferença de comportamento entre os dois tipos de resíduos utilizados em diferentes texturas de solo.



**Figura 14.** Teor de Na no lixiviado referente ao Argissolo e Planossolo utilizando as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pós-sal e Pré-sal.

Nota-se que os dois solos apresentam baixo quantitativo de Na no lixiviado para a dose controle. A partir da aplicação das respectivas doses de cascalhos de Pré-sal e Pós-sal,

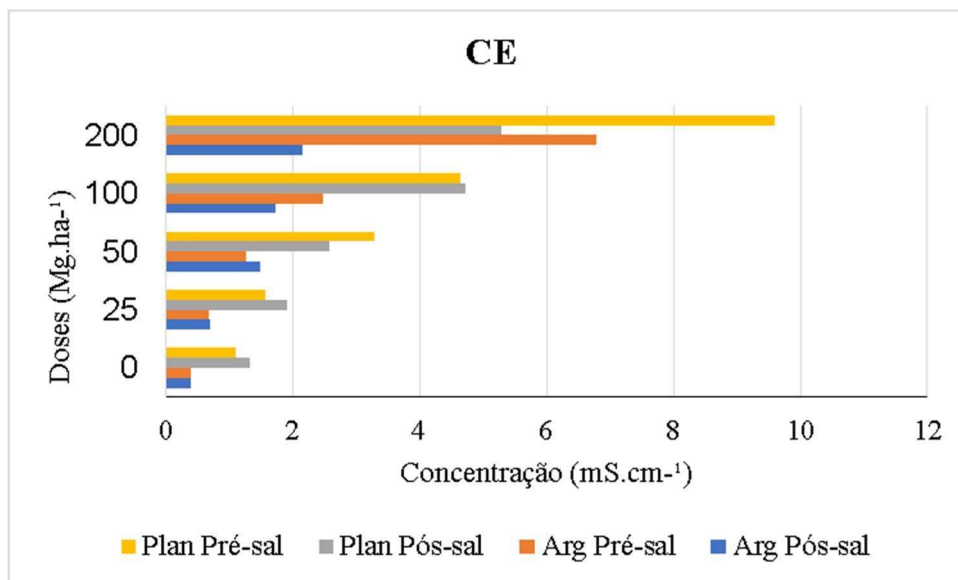
ocorre o aumento de arraste de sódio para o lixiviado. Para a dose 25 Mg.ha<sup>-1</sup>, observou-se o menor arraste entre as demais doses, em que o Planossolo Pós-sal obteve o maior arraste entre os demais, porém, sem apresentar diferenças estatísticas entre si.

A partir da dose de 50 Mg.ha<sup>-1</sup> a lixiviação de sódio nos ambientes analisados começou a ter valores significativos a fim de gerar problemas de contaminação de lençol freático. O Planossolo Pré-sal foi o que se destacou entre os demais, apresentando a média de 441,57 mg.L<sup>-1</sup>, o dobro do obtido no Planossolo Pós-sal.

A partir da dose 100 e 200 Mg.ha<sup>-1</sup>, todos os tratamentos apresentam resultados que trazem malefícios ao meio ambiente e possível contaminação dos lençóis freáticos, chegando a superar a 1500 mg.L<sup>-1</sup> na maior dose do Planossolo Pré-sal. Existem algumas possíveis justificativas para os respectivos resultados acima. Uma delas é a textura do solo, os solos arenosos apresentam fragilidade textural pois, além dos teores de areia elevados, possuem conteúdos de matéria orgânica baixos, capacidade de troca catiônica baixa (MIELNICZUK et al., 2003) e estabilidade dos agregados reduzida (WOHLENBERG et al., 2004; REELEDER et al., 2006; MARCATTO; SILVEIRA, 2016), facilitando o arraste dos sais e a contaminação de lençóis freáticos. Ainda assim, o Argissolo que possui a textura oposta ao do Planossolo, também apresentou o alto arraste de Na para águas superficiais, levando a crer que a dose aplicada traz sérios riscos a qualquer textura de solo, que venha ser depositada.

Ao avaliar o efeito da lixiviação de íons em dois solos (Latossolo e Planossolo) que recebem fluidos de perfuração de poços de petróleo *onshore* nas concentrações de 4, 8 e 16%, Freitas et al (2015) demonstra que a adição dos fluidos de perfuração nos solos a partir das concentrações testadas, promoveu aumento de Na, em comparação ao controle. Entretanto, justificou que dependendo da dosagem aplicada, a adição desses fluidos pode tornar os solos salinos.

Outro ponto que deve ser levado em consideração é o comportamento da condutividade elétrica em ambos os solos com as respectivas doses (Figura 15).



**Figura 15.** CE no lixiviado referente ao Argissolo e Planossolo utilizando as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pós-sal e Pré-sal.

A CE mostrou que as misturas dos dois resíduos em doses mais elevadas causaram a salinização do solo, elevando a CE acima do valor considerado normal para culturas agrícolas ( $>4,0 \text{ dS m}^{-1}$ ) (HILLEL, 2000). Esse aumento reflete diretamente o aumento do teor de Na nos cascalhos de perfuração. Como pode ser provado, a partir da dose  $100 \text{ Mg.ha}^{-1}$  o Planossolo Pré-sal e Planossolo Pós-sal apresentaram valores acima de  $4 \text{ dSm}^{-1}$ . Com a maior dose aplicada de  $200 \text{ Mg.ha}^{-1}$ , todos os tratamentos, exceto o Argissolo Pós-sal, aferiram o valor acima do referencial para culturas agrícolas.

O que deve-se levar em consideração é que em ambos solos, a dose de  $25 \text{ Mg.ha}^{-1}$  apresentou baixa solubilidade e arraste de Na, aproximando-se dos resultados encontrados no controle.

### 5.1.5 Metais pesados

Avaliou-se os resultados obtidos a partir da resolução nº 420 do CONAMA. O que chama a atenção é o comportamento do Bário nos lixiviados. Por ser um elemento muito utilizado na operação de perfuração de poços de petróleo, tal elemento apresenta-se com valor alto no lixiviado dos demais tratamentos e doses no experimento, para Ba o valor limite em

águas subterrâneas seria de 0,7 mg/L, apresentando valores bem acima desde o tratamento controle. Possivelmente, ao colocar a umidade na CC e depois adicionar uma lâmina de 200mm, promoveu uma condição redutora, visto que, não foi possível adicionar a lâmina em um único dia.

Isso é justificável pelo fato do bário ser um metal que apresenta baixa solubilidade em água, mostrando-se imóvel e pouco biodisponível (MAGALHÃES, 2011). Sampaio Júnior (2012) ao avaliar os efeitos da aplicação de resíduos de perfuração de poços de petróleo *onshore* no desenvolvimento de plantas e no risco de lixiviação de metais corrobora com os resultados obtidos no experimento, demonstrando que o sulfato de bário proveniente da baritina é pouco solúvel.

Magalhães (2011) ao avaliar a dinâmica do bário em solos contaminados por resíduos oriundos da perfuração de poços de petróleo *onshore*, também demonstrou que em seu ensaio que apenas 0,05% do total de bário contido na coluna que recebeu a maior dose (3000 mg kg<sup>-1</sup>) foram perdidos por lixiviação.

## 5.2 Análise de fertilidade do solo

A fim de obter o conhecimento dos resíduos em diferentes texturas de solo, após a lixiviação, foi feita a análise de fertilidade do solo em diferentes profundidades. Desse modo, pode-se destacar na Tabela 5, os valores encontrados nos macronutrientes e micronutrientes presentes no solo após a aplicação dos respectivos resíduos do cascalho de perfuração *offshore*.

**Tabela 5** . Concentração de teores biodisponíveis ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) no Argissolo com diferentes doses de cascalhos de perfuração *offshore* de Pós-sal e Pré-sal.

| Prof<br>(cm) | Cascalho Elementos | 0                   | 25       | 50       | 100      | 200      |
|--------------|--------------------|---------------------|----------|----------|----------|----------|
|              |                    | Mg.ha <sup>-1</sup> |          |          |          |          |
| 0 a 10       | Pós Ca             | 3,05 A              | 3,31 A   | 3,42 A   | 3,30 A   | 2,64 A   |
|              |                    | Pré                 | 3,05 B   | 4,29 A   | 4,08 A   | 4,18 A   |
|              | Pós Mg             | 1,47 B              | 1,77 B   | 1,76 A   | 1,74 A   | 1,88 A   |
|              |                    | Pré                 | 1,47 B   | 1,61 B   | 1,39 B   | 1,32 B   |
|              | Pós P              | 2,85 B              | 3,36 B   | 3,96 B   | 11,09 A  | 5,23 B   |
|              |                    | Pré                 | 2,85 B   | 5,62 A   | 4,63 A   | 5,36 B   |
|              | Pós K              | 174,33 B            | 237,67 A | 273,00 A | 440,00 A | 822,00 A |
|              |                    | Pré                 | 174,33 B | 184,67 B | 172,67 B | 170,67 B |
|              | Pós Na             | 9,00 B              | 93,00 B  | 158,00 B | 199,00 B | 738,67 A |
|              |                    | Pré                 | 9,00 B   | 137,67 A | 225,33 A | 302,67 A |
|              | Pós Fe             | 9,44 B              | 13,76 B  | 11,66 B  | 16,08 A  | 15,17 B  |
|              |                    | Pré                 | 9,44 B   | 12,30 B  | 9,50 B   | 10,53 B  |
|              | Pós Cu             | 0,76 A              | 0,86 A   | 0,85 A   | 0,96 A   | 0,80 A   |
|              |                    | Pré                 | 0,76 A   | 0,84 A   | 0,89 A   | 0,81 A   |
|              | Pós Zn             | 2,79 B              | 4,62 B   | 4,14 B   | 6,31 A   | 5,76 B   |
|              |                    | Pré                 | 2,79 B   | 5,59 A   | 4,61 A   | 5,05 B   |
|              | Pós Mn             | 20,45 B             | 36,25 B  | 27,83 B  | 45,16 A  | 45,08 A  |
|              |                    | Pré                 | 20,45 B  | 40,96 A  | 32,03 A  | 38,69 B  |
|              | Pós Ni             | 0,60 A              | 0,75 A   | 0,59 A   | 0,47 A   | 0,36 A   |
|              |                    | Pré                 | 0,60 A   | 0,21 A   | 0,14 A   | 0        |
| Pós Pb       | 1,03 B             | 1,13 B              | 1,27 A   | 1,23 A   | 1,13 A   |          |
|              | Pré                | 1,03 B              | 0,83 B   | 0,03 B   | 0        | 0        |

Continua...



... continuação

| Prof<br>(cm) | Cascalho Elementos | 0                   | 25       | 50       | 100      | 200      |          |
|--------------|--------------------|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|              |                    | Mg.ha <sup>-1</sup> |          |          |          |          |          |
| 10 a 20      | Pós                | Ca                  | 1,38 A   | 1,53 A   | 1,38 A   | 1,20 A   | 1,14 A   |
|              | Pré                | Ca                  | 1,38 A   | 1,63 A   | 1,47 A   | 1,48 A   | 1,34 A   |
|              | Pós                | Mg                  | 0,95 A   | 0,85 A   | 0,74 A   | 0,61 A   | 0,67 A   |
|              | Pré                | Mg                  | 0,95 A   | 0,70 A   | 0,70 A   | 0,69 A   | 0,45 A   |
|              | Pós                | P                   | 0,88 B   | 0,57 B   | 1,06 B   | 0,85 B   | 0,46 B   |
|              | Pré                | P                   | 0,88 B   | 0,46 B   | 1,31 B   | 1,08 B   | 1,06 A   |
|              | Pós                | K                   | 107,00 B | 130,33 B | 154,67 B | 304,00 A | 376,00 A |
|              | Pré                | K                   | 107,00 B | 129,00 B | 131,33 B | 140,33 B | 122,33 B |
|              | Pós                | Na                  | 8,00 B   | 50,67 B  | 80,33 B  | 191,33 B | 307,00 A |
|              | Pré                | Na                  | 8,00 B   | 64,67 B  | 118,67 B | 191,00 B | 205,00 B |
|              | Pós                | Fe                  | 12,95 B  | 11,16 B  | 9,90 B   | 13,59 A  | 15,04 B  |
|              | Pré                | Fe                  | 12,95 B  | 12,74 B  | 12,27 B  | 10,21 B  | 13,01 B  |
|              | Pós                | Cu                  | 0,64 A   | 0,56 A   | 0,63 A   | 0,66 A   | 0,66 A   |
|              | Pré                | Cu                  | 0,64 A   | 0,64 A   | 0,66 A   | 0,58 A   | 0,61 A   |
|              | Pós                | Zn                  | 0,57 B   | 0,53 B   | 0,46 B   | 0,80 A   | 0,71 B   |
|              | Pré                | Zn                  | 0,57 B   | 0,62 B   | 0,44 B   | 0,41 B   | 0,56 B   |
|              | Pós                | Mn                  | 2,59 A   | 2,84 A   | 3,02 A   | 4,73 A   | 6,41 A   |
|              | Pré                | Mn                  | 2,59 A   | 4,96 A   | 3,17 A   | 3,51 A   | 4,57 A   |
|              | Pós                | Ni                  | 0,43 B   | 0,55 A   | 0,41 B   | 0,28 B   | 0,26 B   |
|              | Pré                | Ni                  | 0,43 B   | 0,03 B   | 0,40 B   | 0        | 0        |
| Pós          | Pb                 | 1,13 B              | 1,30 B   | 1,40 A   | 1,53 A   | 1,40 A   |          |
| Pré          | Pb                 | 1,13 B              | 0,90 B   | 0,57 B   | 0        | 0        |          |

Continua...

... continuação

| Prof<br>(cm) | Cascalho | Elementos | 0                   | 25      | 50       | 100      | 200      |
|--------------|----------|-----------|---------------------|---------|----------|----------|----------|
|              |          |           | Mg.ha <sup>-1</sup> |         |          |          |          |
| 20 a 30      | Pós      | Ca        | 1,48 A              | 1,97 A  | 1,86 A   | 1,79 A   | 1,63 A   |
|              | Pré      |           | 1,48 A              | 1,83 A  | 2,01 A   | 1,68 A   | 1,33 A   |
|              | Pós      | Mg        | 0,90 B              | 0,85 B  | 0,96 B   | 0,85 B   | 0,99 A   |
|              | Pré      |           | 0,90 B              | 0,85 B  | 0,94 B   | 0,75 B   | 0,68 B   |
|              | Pós      | P         | 1,06 B              | 0,62 B  | 0,39 B   | 2,30 A   | 0,53 B   |
|              | Pré      |           | 1,06 B              | 0,81 B  | 2,14 A   | 1,31 B   | 1,47 A   |
|              | Pós      | K         | 74,00 B             | 98,00 B | 118,00 B | 222,67 A | 257,67 A |
|              | Pré      |           | 74,00 B             | 91,00 B | 94,33 B  | 107,33 B | 128,00 B |
|              | Pós      | Na        | 10,33 B             | 69,00 B | 99,67 B  | 225,00 B | 376,67 A |
|              | Pré      |           | 10,33 B             | 59,67 B | 124,00 B | 245,00 B | 317,00 B |
|              | Pós      | Fe        | 12,08 A             | 9,26 A  | 8,76 A   | 9,94 A   | 10,47 A  |
|              | Pré      |           | 12,08 A             | 9,40 A  | 8,04 A   | 9,63 A   | 12,83 A  |
|              | Pós      | Cu        | 0,70 A              | 0,61 A  | 0,56 A   | 0,62 A   | 0,59 A   |
|              | Pré      |           | 0,70 A              | 0,55 A  | 0,59 A   | 0,63 A   | 0,73 A   |
|              | Pós      | Zn        | 0,36 A              | 0,32 A  | 0,23 A   | 0,39 A   | 0,24 A   |
|              | Pré      |           | 0,36 A              | 0,18 A  | 0,19 A   | 0,20 A   | 0,27 A   |
|              | Pós      | Mn        | 0,58 A              | 0,62 A  | 0,50 A   | 0,75 A   | 0,67 A   |
|              | Pré      |           | 0,58 A              | 0,61 A  | 0,50 A   | 0,54 A   | 0,66 A   |
|              | Pós      | Ni        | 0,38 B              | 0,53 A  | 0,41 B   | 0,42 A   | 0,06 B   |
|              | Pré      |           | 0,38 B              | 0       | 0,14 B   | 0        | 0        |
| Pós          | Pb       | 1,23 B    | 1,63 A              | 1,50 A  | 1,87 A   | 1,87 A   |          |
| Pré          |          | 1,23 B    | 0,70 B              | 0,63 B  | 0,37 B   | 0,43 B   |          |

Continua...

... continuação

| Prof<br>(cm) | Cascalho Elementos | 0                   | 25      | 50      | 100     | 200      |          |
|--------------|--------------------|---------------------|---------|---------|---------|----------|----------|
|              |                    | Mg.ha <sup>-1</sup> |         |         |         |          |          |
| 30 a 40      | Pós                | Ca                  | 1,85 B  | 2,10 B  | 2,02 B  | 2,23 B   | 2,32 A   |
|              |                    |                     | Pré     | 1,85 B  | 1,91 B  | 2,28 B   | 2,19 B   |
|              | Pós                | Mg                  | 0,75 B  | 1,04 B  | 0,87 B  | 0,95 A   | 0,94 A   |
|              |                    |                     | Pré     | 0,75 B  | 0,88 B  | 0,70 B   | 0,60 B   |
|              | Pós                | P                   | 0,71 B  | 0,97 B  | 0,81 B  | 4,79 A   | 0,88 B   |
|              |                    |                     | Pré     | 0,71 B  | 0,60 B  | 2,69 A   | 1,47 B   |
|              | Pós                | K                   | 68,00 B | 90,00 B | 85,67 B | 88,67 B  | 159,67 A |
|              |                    |                     | Pré     | 68,00 B | 81,00 B | 81,33 B  | 96,67 B  |
|              | Pós                | Na                  | 19,33 B | 53,33 B | 86,67 B | 283,33 B | 379,33 B |
|              |                    |                     | Pré     | 19,33 B | 61,00 B | 126,00 B | 403,00 A |
|              | Pós                | Fe                  | 13,01 B | 12,21 A | 10,58 A | 10,85 B  | 11,06 B  |
|              |                    |                     | Pré     | 13,01 B | 8,51 B  | 8,41 B   | 8,77 B   |
|              | Pós                | Cu                  | 0,62 B  | 0,59 B  | 0,64 B  | 1,04 A   | 0,59 B   |
|              |                    |                     | Pré     | 0,62 B  | 0,56 B  | 0,61 B   | 0,76 B   |
|              | Pós                | Zn                  | 0,41 A  | 0,50 A  | 0,33 A  | 0,44 A   | 0,32 A   |
|              |                    |                     | Pré     | 0,41 A  | 0,24 A  | 0,21 A   | 0,30 A   |
|              | Pós                | Mn                  | 0,73 A  | 0,79 A  | 0,82 A  | 0,94 A   | 1,04 A   |
|              |                    |                     | Pré     | 0,73 A  | 0,59 A  | 0,96 A   | 0,65 A   |
|              | Pós                | Ni                  | 0,17 B  | 0,58 A  | 0,28 B  | 0,31A    | 0        |
|              |                    |                     | Pré     | 0,17 B  | 0,04 B  | 0,46 B   | 0        |
| Pós          | Pb                 | 1,30 B              | 1,37 A  | 1,53 A  | 2,00 A  | 2,03 A   |          |
|              |                    | Pré                 | 1,30 B  | 0,40 B  | 0,50 B  | 0,57 B   | 0,47 B   |

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na coluna dentro do elemento analisado, não diferem entre si entre os resíduos (pós-sal e pré-sal), pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

**Tabela 6.** Teores biodisponíveis c ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) no Planossolo com diferentes doses de cascalhos de perfuração *offshore* de Pós-sal e Pré-sal.

| Prof (cm) | Cascalho | Elementos | 0                   | 25      | 50       | 100      | 200      |
|-----------|----------|-----------|---------------------|---------|----------|----------|----------|
|           |          |           | Mg.ha <sup>-1</sup> |         |          |          |          |
| 0 a 10    | Pós      | Ca        | 1,24 B              | 1,22 B  | 1,21 B   | 1,06 B   | 0,85 B   |
|           |          |           | Pré                 | 1,24 B  | 1,21 B   | 1,24 B   | 1,03 B   |
|           | Pós      | Mg        | 0,82 B              | 0,68 B  | 0,45 B   | 0,76 B   | 1,09 A   |
|           |          |           | Pré                 | 0,82 B  | 0,69 B   | 0,74 A   | 0,69 B   |
|           | Pós      | P         | 24,82 B             | 27,14 A | 22,84 A  | 24,59 B  | 25,46 A  |
|           |          |           | Pré                 | 24,82 B | 23,20 B  | 21,53 B  | 25,23 B  |
|           | Pós      | K         | 31,67 B             | 87,00 A | 140,00 A | 180,33 A | 355,33 A |
|           |          |           | Pré                 | 31,67 B | 18,66 B  | 16,66 B  | 19,66 B  |
|           | Pós      | Na        | 8,33 B              | 52,00 B | 114,00 A | 105,00 B | 229,00 A |
|           |          |           | Pré                 | 8,33 B  | 68,67 B  | 65,00 B  | 123,67 B |
|           | Pós      | Fe        | 43,84 B             | 42,67 B | 43,79 B  | 41,57 B  | 48,58 A  |
|           |          |           | Pré                 | 51,59 B | 50,49 A  | 40,13 B  | 39,48 B  |
|           | Pós      | Cu        | 0,68 B              | 0,33 B  | 0,31 B   | 0,31 B   | 0,50 A   |
|           |          |           | Pré                 | 0,68 B  | 0,33 B   | 0,32 B   | 0,16B    |
|           | Pós      | Zn        | 2,66 B              | 1,76 B  | 2,21 B   | 2,22 A   | 2,13 B   |
|           |          |           | Pré                 | 2,66 B  | 1,96 B   | 2,42 B   | 1,53 B   |
|           | Pós      | Mn        | 19,19 B             | 18,49 B | 19,63 B  | 18,59 A  | 19,87 A  |
|           |          |           | Pré                 | 19,19 B | 19,41B   | 18,67 B  | 14,75 B  |
|           | Pós      | Pb        | 0,53 B              | 0,63 B  | 1,03 B   | 1,30 B   | 1,73 B   |
|           |          |           | Pré                 | 0,53 B  | 1,50 A   | 1,70 A   | 1,87 A   |

Continua...

...Continuação

| Prof (cm) | Cascalho | Elementos | 0                   | 25      | 50       | 100      | 200      |
|-----------|----------|-----------|---------------------|---------|----------|----------|----------|
|           |          |           | Mg.ha <sup>-1</sup> |         |          |          |          |
| 10 a 20   | Pós      | Ca        | 1,49 B              | 1,32 B  | 0,95 B   | 1,16 B   | 0,85 B   |
|           | Pré      |           | 1,49 B              | 1,27 B  | 1,20 A   | 1,04 B   | 1,04 B   |
|           | Pós      | Mg        | 0,64 A              | 0,66 A  | 0,74 A   | 0,54 A   | 0,64 A   |
|           | Pré      |           | 0,64 A              | 0,60 A  | 0,68 A   | 0,77 A   | 0,48 A   |
|           | Pós      | P         | 22,23 A             | 25,05 A | 25,07 A  | 23,07 B  | 25,51 A  |
|           | Pré      |           | 23,23 A             | 23,60 A | 22,72 A  | 23,00 A  | 22,86 A  |
|           | Pós      | K         | 31,67 A             | 67,00 A | 118,33 A | 146,33 A | 304,67 A |
|           | Pré      |           | 31,67 A             | 18,67 A | 19,00 A  | 20,33 A  | 18,00 A  |
|           | Pós      | Na        | 9,00 B              | 49,67 B | 103,33 A | 122,00 B | 260,33 A |
|           | Pré      |           | 9,00 B              | 65,33 B | 60,67 B  | 121,00 B | 137,00 B |
|           | Pós      | Fe        | 41,55 B             | 39,87 B | 37,33 B  | 44,09 B  | 46,58 B  |
|           | Pré      |           | 41,55 B             | 50,04 A | 49,40 A  | 42,29 B  | 46,89 B  |
|           | Pós      | Cu        | 0,59 A              | 0,5 A   | 0,31 A   | 0,32 A   | 0,50 A   |
|           | Pré      |           | 0,59 A              | 0,30 A  | 0,21 A   | 0,42 A   | 0,45 A   |
|           | Pós      | Zn        | 2,34 A              | 2,29 A  | 2,15 A   | 2,03 A   | 2,09 A   |
|           | Pré      |           | 2,34 A              | 1,83 A  | 2,39 A   | 2,07 A   | 1,58 A   |
|           | Pós      | Mn        | 18,26 A             | 18,40 A | 15,52 A  | 19,67 A  | 19,21 A  |
|           | Pré      |           | 18,26 A             | 19,14 A | 17,35 A  | 18,88 A  | 18,07 A  |
| Pós       | Pb       | 0,33 B    | 0,67 B              | 1,00 B  | 1,33 B   | 2,17 A   |          |
| Pré       |          | 0,33 B    | 1,53 A              | 1,90 A  | 2,17 A   | 2,07 B   |          |

Continua...

...continuação

| Prof (cm) | Cascalho | Elementos | 0                   | 25      | 50      | 100      | 200      |
|-----------|----------|-----------|---------------------|---------|---------|----------|----------|
|           |          |           | Mg.ha <sup>-1</sup> |         |         |          |          |
| 20 a 30   | Pós      | Ca        | 1,44 A              | 1,30 A  | 1,12 A  | 1,09 A   | 0,99 A   |
|           |          |           | Pré                 | 1,44 A  | 1,21 A  | 1,16 A   | 0,99 A   |
|           | Pós      | Mg        | 0,50 B              | 0,83 B  | 0,74 B  | 0,57 B   | 0,71 B   |
|           |          |           | Pré                 | 0,50 B  | 0,72 B  | 0,79 B   | 0,88 A   |
|           | Pós      | P         | 22,19 A             | 27,67 A | 24,49 A | 26,79 A  | 25,94 A  |
|           |          |           | Pré                 | 22,19 A | 24,10 A | 23,23 A  | 23,92 A  |
|           | Pós      | K         | 32,00 B             | 47,67 A | 68,33 A | 148,33 A | 339,33 A |
|           |          |           | Pré                 | 32 B    | 22,67 B | 21,33 B  | 20,33 B  |
|           | Pós      | Na        | 10,00 B             | 53,33 B | 93,00 B | 146,33 B | 359,00 A |
|           |          |           | Pré                 | 10,00 B | 57,67 B | 60,67 B  | 183,33 A |
|           | Pós      | Fe        | 39,88 A             | 52,73 A | 41,14 A | 42,49 A  | 46,10 A  |
|           |          |           | Pré                 | 39,88 A | 46,54 A | 45,14 A  | 46,28 A  |
|           | Pós      | Cu        | 0,36 B              | 0,39 B  | 0,31 B  | 0,44 B   | 0,47 A   |
|           |          |           | Pré                 | 0,36 B  | 0,28 B  | 0,25 B   | 0,33 B   |
|           | Pós      | Zn        | 2,45 B              | 2,33 A  | 1,85 B  | 2,28 A   | 2,46 A   |
|           |          |           | Pré                 | 2,45 B  | 1,75 B  | 2,13 B   | 1,74 B   |
|           | Pós      | Mn        | 16,67 B             | 21,66 A | 19,65 B | 18,82 B  | 21,79 A  |
|           |          |           | Pré                 | 16,67 B | 17,63 B | 19,00 B  | 19,56 B  |
|           | Pós      | Pb        | 0,47 B              | 0,80 B  | 1,00 B  | 1,33 B   | 1,67 B   |
|           |          |           | Pré                 | 0,47 B  | 1,67 A  | 1,73 A   | 2,07 A   |

Continua...



...continuação

| Prof (cm) | Cascalho | Elementos | 0                   | 25      | 50       | 100      | 200      |
|-----------|----------|-----------|---------------------|---------|----------|----------|----------|
|           |          |           | Mg.ha <sup>-1</sup> |         |          |          |          |
| 30 a 40   | Pós      | Ca        | 1,36 B              | 1,17 B  | 1,27 B   | 1,10 B   | 1,32 A   |
|           | Pré      |           | 1,36 B              | 1,26 B  | 1,29 B   | 1,35 A   | 0,97 B   |
|           | Pós      | Mg        | 0,68 B              | 0,94 B  | 0,79 B   | 1,36 A   | 0,61 B   |
|           | Pré      |           | 0,68 B              | 0,78 B  | 0,79 B   | 0,62 B   | 0,74 B   |
|           | Pós      | P         | 25,27 B             | 26,63 A | 23,82 B  | 25,27 A  | 27,71 A  |
|           | Pré      |           | 25,27 B             | 24,43 B | 23,55 B  | 21,57 A  | 24,01 B  |
|           | Pós      | K         | 30,67 B             | 47,00 A | 58,00 A  | 144,33 A | 324,33 A |
|           | Pré      |           | 31,67 B             | 26,00 B | 19,66B   | 23,33 B  | 18,33 B  |
|           | Pós      | Na        | 24,33 B             | 60,67 B | 110,67 A | 252,00 B | 472,67 B |
|           | Pré      |           | 24,33 B             | 64,00 B | 73,33 B  | 274,33 B | 191,33 B |
|           | Pós      | Fe        | 44,04 B             | 51,15 B | 46,96 B  | 43,51 A  | 45,07 B  |
|           | Pré      |           | 44,04 B             | 46,77 B | 53,20 A  | 38,54 B  | 45,88 B  |
|           | Pós      | Cu        | 0,29 B              | 0,33 B  | 0,27 B   | 0,31 B   | 0,41 A   |
|           | Pré      |           | 0,29 B              | 0,20 B  | 0,27 B   | 0,20 B   | 0,21 B   |
|           | Pós      | Zn        | 2,13 B              | 2,36 B  | 2,39 A   | 2,31 B   | 2,84 A   |
|           | Pré      |           | 2,13 B              | 2,08 B  | 1,73 B   | 1,84 B   | 1,48 B   |
|           | Pós      | Mn        | 18,21 B             | 20,19 A | 18,45 B  | 18,88 A  | 16,57 A  |
|           | Pré      |           | 18,21 B             | 18,09 B | 18,86 B  | 15,31 B  | 17,36 B  |
| Pós       | Pb       | 0,50 B    | 0,90 B              | 1,03 B  | 1,20 B   | 1,77 B   |          |
| Pré       |          | 0,50 B    | 1,73 A              | 1,83 A  | 1,87 A   | 2,00 B   |          |

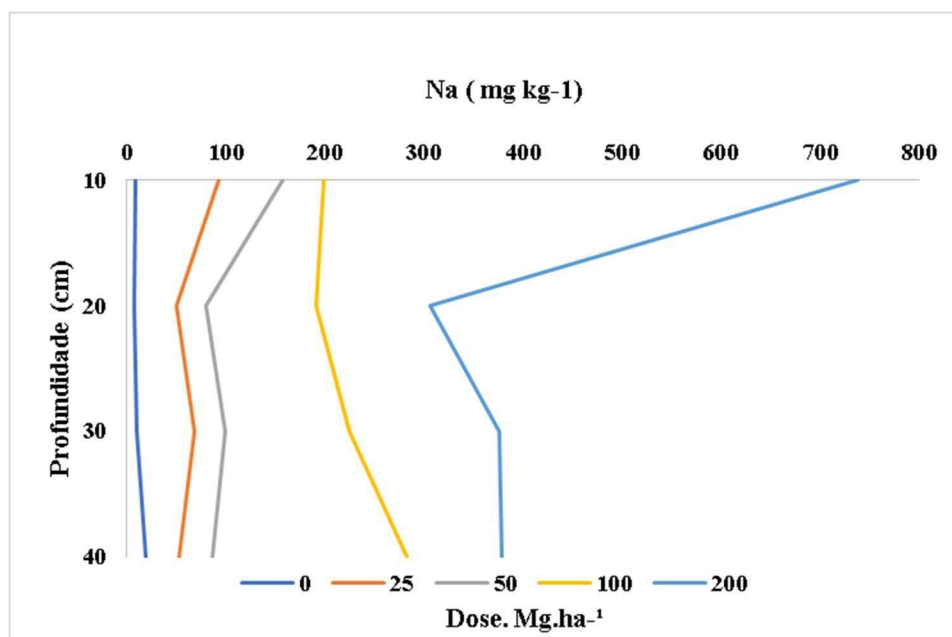
Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na coluna dentro do elemento analisado, não diferem entre si entre os resíduos (pós-sal e pré-sal), pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.



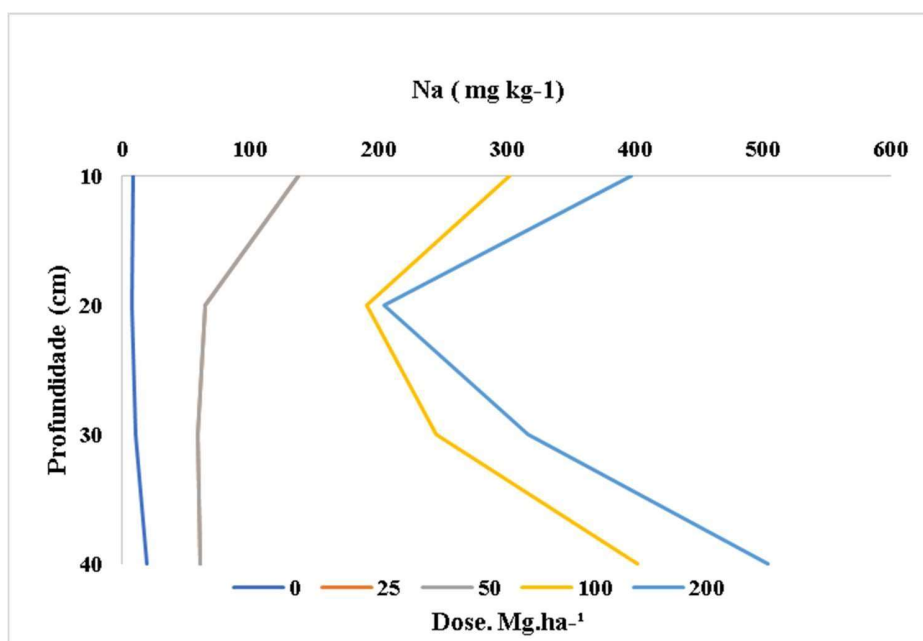
### 5.2.1 Sódio

Este elemento é um dos principais utilizados na formulação do fluido de perfuração, consequentemente, muito presente no resíduo gerado da operação.

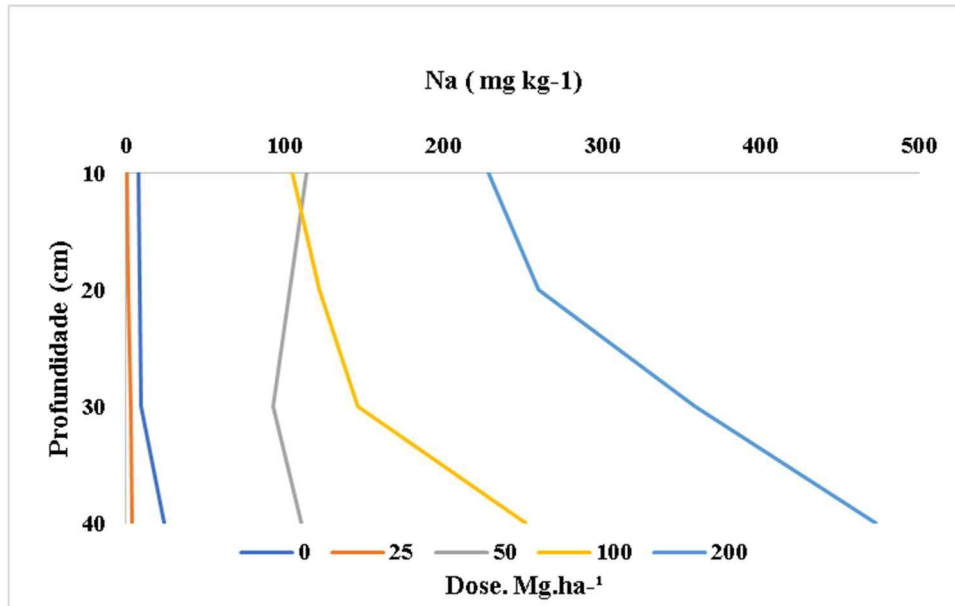
Na Figura 16 está apresentado o comportamento do Na de acordo com a profundidade do perfil do solo nas duas texturas avaliadas, Argissolo e Planossolo, em cinco doses diferentes do cascalho *offshore* do Pós-sal e Pré-sal.



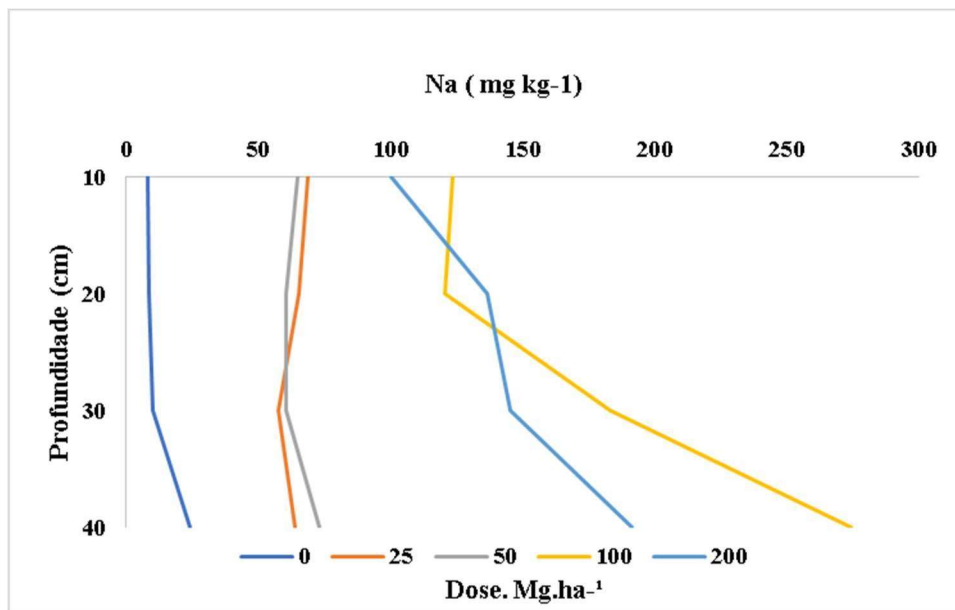
**Figura 16.** Teor de Na de 0 a 40 cm de profundidade no Argissolo com as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pós-sal.



**Figura 17.** Teor de Na de 0 a 40 cm de profundidade no Argissolo com as respectivas doses de cascalho offshore do Pré-sal.



**Figura 18.** Teor de Na de 0 a 40 cm de profundidade no Planossolo com as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pós-sal.



**Figura 19.** Teor de Na de 0 a 40 cm de profundidade no Planossolo com as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pré-sal.

A partir dos resultados obtidos no Planossolo (Figura 17), é possível observar o comportamento do Na presente nas diferentes profundidades do perfil do solo. Observa-se

que duas doses se destacam para o cascalho do Pós-sal no planossolo. A primeira delas é a dose de 50 Mg.ha<sup>-1</sup> do cascalho do Pós-sal, que apresentou-se estatisticamente superior entre as demais doses e profundidades de 0-10, 10-20 e 30-40 cm em comparação ao resíduo do Pré-sal. O interessante que o valor encontrado na profundidade de 0-10 cm é bem próximo ao encontrado em 30-40 cm, havendo uma constante no arraste do Na no solo, diferentemente do que ocorreu para a maior dose dos tratamentos (200 Mg.ha<sup>-1</sup>).

É possível notar que desde a primeira profundidade (0-10cm), os valores encontrados de Na são elevados (229 mg.kg<sup>-1</sup>) se comparado com os demais tratamentos. O que se destaca é o valor encontrado na última camada do solo (30-40cm) com o quantitativo de 472 mg.kg<sup>-1</sup> de Na. Tal valor consiste em mais que o dobro do encontrado em 0-10cm, provando o arraste da superfície do solo para ambientes mais profundos, o que possibilita a contaminação de lençóis freáticos, assim como foi provado nas análises do lixiviado.

Já para o mesmo solo utilizando o resíduo do Pré-sal, foi possível observar que os valores encontrados para as respectivas doses e respectivas profundidades apresentaram-se próximas entre as doses 0, 25 e 50 Mg.ha<sup>-1</sup>. A partir da dose 100 Mg.ha<sup>-1</sup> foi possível observar a presença mais elevada de Na quando comparado com a dose de 200 Mg.ha<sup>-1</sup> para a profundidade de 30-40cm chegando ao valor de 274,33 mg.kg<sup>-1</sup>. Porém, apesar de obter o resultado mais elevado do que as demais doses, apenas a dose 50 Mg.ha<sup>-1</sup>, diferenciou-se estatisticamente, na profundidade de 30-40cm.

Assim como com o resíduo do Pós-sal, ainda que em valores menores aos encontrados nele, é possível notar que nas camadas mais profundas, os valores encontrados de Na no solo na camada de 30-40 cm foram superiores as encontradas na primeira camada, possibilitando dizer que haverá arraste de Na para lençóis freáticos, conforme apresentado nos resultados obtidos no lixiviado.

Diferentemente do que ocorreu no Planossolo, no Argissolo, devido suas características texturais, os valores encontrados para a dose de 200 Mg.ha<sup>-1</sup> com a utilização do cascalho Pós-sal, foram maiores em todas as profundidades. Com essa elevada dose, foi possível observar diferença estatística entre as demais nas profundidades de 0-10, 10-20 e 30-40 cm, ao comparar com o resíduo do Pré-sal. No topo do perfil (0-10cm) nota-se o maior quantitativo de Na com 738 mg.kg<sup>-1</sup> e, a partir que aumenta a profundidade do perfil, é possível observar a redução do Na no solo. Assim, quando avaliou-se a camada mais profunda (30-40 cm), o valor encontrado foi bem menor (379,33 mg.kg<sup>-1</sup>) do que o encontrado em 0-

10cm. Porém, ainda que o valor seja menor, os riscos apresentados ao ambiente mantêm-se em alerta, uma vez que há chances de contaminação.

Com a utilização do cascalho do Pré-sal no Argissolo, foi possível observar que na profundidade de 0-10cm, entre as doses utilizadas, houve diferença estatística entre o resíduo do Pós-sal, notando-se grandes diferenças entre os valores apresentados. A partir do aumento da profundidade, foi possível notar que os valores para as doses 25 e 50 Mg.ha<sup>-1</sup> reduziram e mantiveram-se próximos até a profundidade de 30-40 cm.

O mesmo não ocorre com a dose 100 Mg.ha<sup>-1</sup>. Com o aumento da profundidade, os valores diminuem porém, em 30-40 cm o valor encontrado de Na (403,00 mg.kg<sup>-1</sup>) chega a ser maior do que encontrado na profundidade de 0-10cm (302,67 mg.kg<sup>-1</sup>) diferenciando-se estatisticamente também dos resultados obtidos no Pós-sal, para os mesmos tratamentos. Nessa mesma linha, o valor encontrado para a profundidade de 30-40 cm para dose 200 Mg.ha<sup>-1</sup> também apresentou valores mais elevados do que na superfície do solo, chegando a 504,33 mg.kg<sup>-1</sup> de Na, o valor mais alto encontrado para este resíduo no Argissolo.

É importante observar que os tipos de cascalhos comportaram-se de formas diferentes entre os solos. No Planossolo, todos os valores que diferenciaram-se estatisticamente partiram do cascalho do Pós-sal. Ainda que em alguns casos observados apresentassem alguns valores inferiores aos encontrados no cascalho do Pré-sal, não apresentou diferença estatística, ou seja, não houve diferença significativa.

Para o Argissolo, pode-se observar que os valores encontrados para sódio a partir do cascalho do Pré-sal no solo, foram de uma forma geral mais elevados do que aos encontrados no resíduo do Pós-sal em todos os tratamentos, diferenciou-se estatisticamente do Pós-sal na camada superficial do solo (0-10cm), exceto para a maior dose utilizada (200 Mg.ha<sup>-1</sup>). Ainda que entre as demais doses apresente valores superiores aos encontrados no Pós-sal, diferenciou-se estatisticamente apenas para a dose de 200 Mg.ha<sup>-1</sup> na maior profundidade analisada (30-40cm).

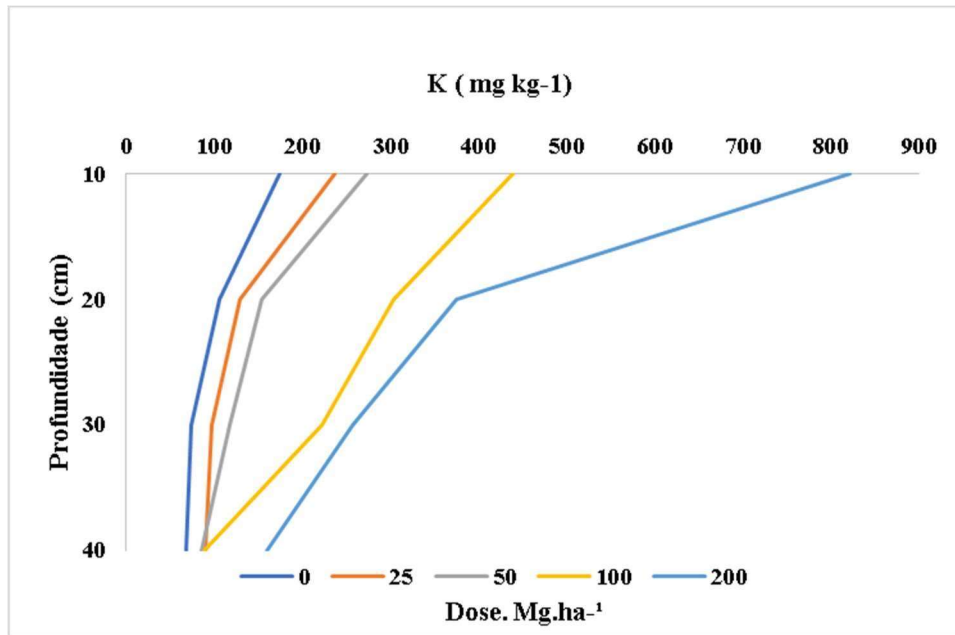
Diante do exposto, Schultz et. al (2019) corroborou com o presente experimento ao avaliar os atributos químicos do solo e crescimento da mamona adubada com o cascalho de perfuração de poços de petróleo *onshore* e torta de mamona, demonstrou que o Na aumentou linearmente a partir das doses de cascalho no solo.

A alta saturação por bases nos cascalhos de perfuração de poços de petróleo também foi verificada por Zamora-Ledezma e García (2013) em um estudo em que o uso de cascalhos de perfuração foi misturado em diferentes proporções com solo para o cultivo de cinco espécies diferentes de plantas em vasos testados em casa de vegetação.

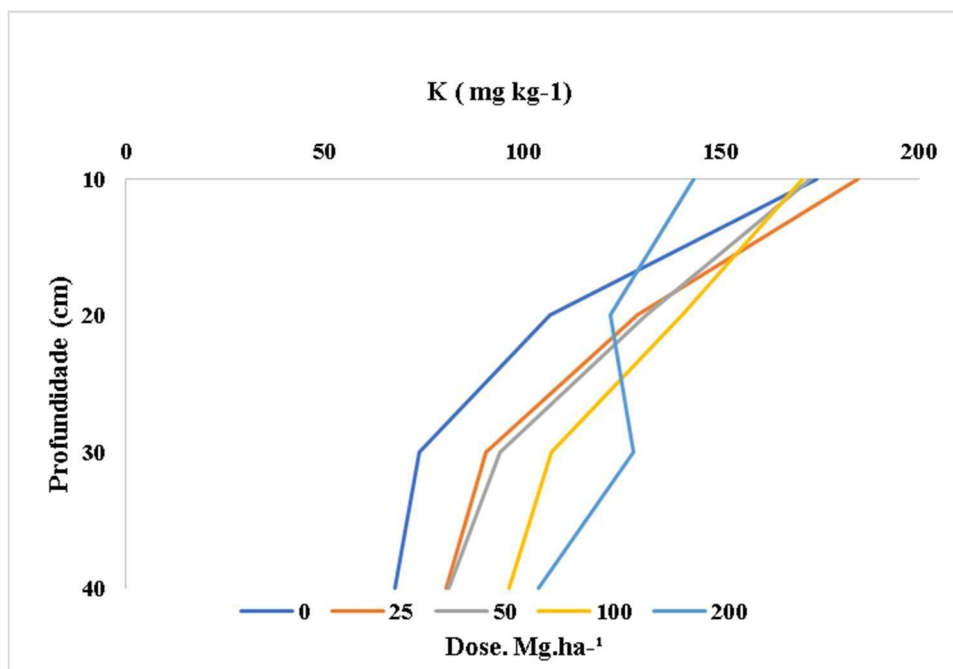
Ao avaliar o efeito da lixiviação de íons em dois solos (Latosolo e Planosolo) que receberam fluidos de perfuração de poços de petróleo *onshore* nas concentrações de 4, 8 e 16%, Freitas et al. (2015) observaram que suas doses ainda que bem acima do normalmente disposto no ambiente, promoveu aumento Na e K dos solos testados, em comparação ao controle, bem como no presente experimento.

### 5.2.2 Potássio (K)

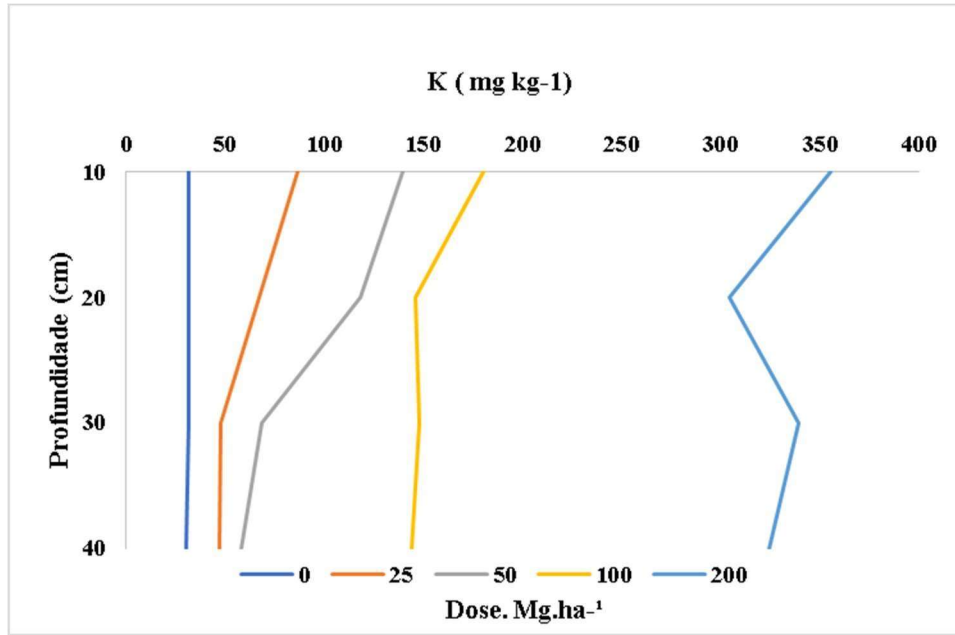
Quanto ao potássio (K) no solo, pode-se observar que no Planossolo utilizando o cascalho do Pós-sal (Figura 18), o quantitativo referente as doses aplicadas foi basicamente estável ao longo do perfil do solo. As doses de 0 (controle) até 200 Mg.ha<sup>-1</sup> mantiveram valores de K próximas nas profundidades testadas. Assim, conforme pode ser notado, utilizando o cascalho do Pós-sal no Planossolo, ocorreu o menor arraste de K nas doses 25 e 50 Mg.ha<sup>-1</sup>, iniciando com 87 e 140 mg.kg<sup>-1</sup> em 0-10 cm e finalizando com 47 e 58 mg.kg<sup>-1</sup> em 30-40 cm, respectivamente. Já para as doses 100 e 200 Mg.ha<sup>-1</sup>, os valores encontrados do macronutriente observado na camada superficial (0-10cm) 180 e 355,33 mg.kg<sup>-1</sup> foi próximo ao encontrado nas camadas mais profundas do solo (30-40cm), 144,33 e 324,33 mg.kg<sup>-1</sup>, respectivamente.



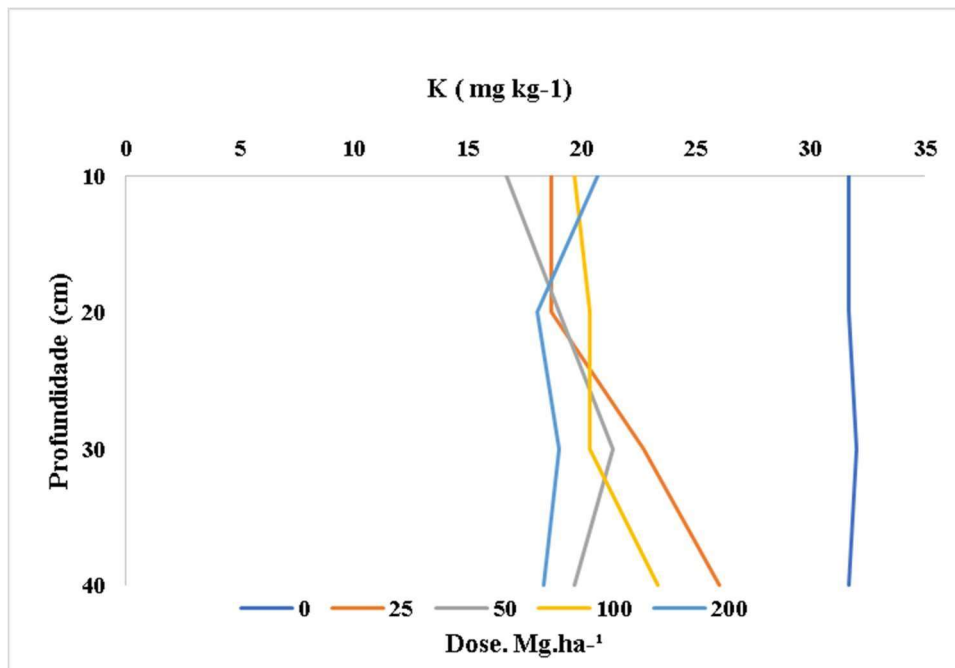
**Figura 20.** Teor de K de 0 a 40 cm de profundidade no Argissolo com as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pós-sal



**Figura 21.** Teor de K de 0 a 40 cm de profundidade no Argissolo com as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pré-sal



**Figura 22.** Teor de K de 0 a 40 cm de profundidade no Planossolo com as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pós-sal



**Figura 23.** Teor de K de 0 a 40 cm de profundidade no Argissolo com as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pré-sal.

Já para o resíduo do Pré-sal no Planossolo (Figura 19), foi possível observar resultados diferentes ao do cascalho do Pós-sal. Nota-se que os valores encontrados com o cascalho Pré-sal são inferiores aos encontrados no Pós-sal, variando entre 18,66 e 26 mg.kg<sup>-1</sup>. Observa-se que os valores do tratamento controle foi superior a todos os demais tratamentos, exceto para todos os tratamentos apresentados em 10-20cm. Dentre esses resultados obtidos, os apresentados na profundidade de 10-20cm nas doses 25 e 50 Mg.ha<sup>-1</sup>, foram os únicos que diferenciaram-se estatisticamente do resíduo do Pré-sal.

Por mais que sejam aplicados no mesmo solo, foi possível observar diferenças no comportamento do K com a utilização dos diferentes resíduos. Com esses resultados, foi possível observar maior quantitativo de K para o resíduo do Pós-sal e, conseqüentemente, maior arraste também. Os valores de K encontrado para o resíduo do Pós-sal, no Planossolo, foram inferiores aos encontrados no cascalho do Pós-sal.

O comportamento do K no Argissolo (Figura 19), utilizando os respectivos resíduos, obteve-se diferentes resultados quando comparados no Planossolo. A partir do resíduo do Pós-sal (Figura 19), nota-se que todos os tratamentos diferenciaram-se da dose controle na profundidade 0-10cm variando de 237,67 kg.mg<sup>-1</sup> (25 Mg.ha<sup>-1</sup>) a 822 kg.mg<sup>-1</sup>(200 Mg.ha<sup>-1</sup>).

Na camada superficial (0-10cm), o valor encontrado para a dose de 200 Mg.ha<sup>-1</sup> foi muito mais elevada (822 kg.mg<sup>-1</sup>) do que aos encontrados nas outras doses, e ao longo do perfil vem diminuindo até chegar ao valor de 159,67 kg.mg<sup>-1</sup> em 30-40 cm, resultado superior as demais doses. Ou seja, o arraste desse macronutriente para essa dose foi menor, ao comparar com os resultados obtidos no Planossolo com o mesmo resíduo.

Outro ponto que chama atenção, são os resultados obtidos nas doses 25 e 50 Mg.ha<sup>-1</sup>. Nesses dois tratamentos, não houve diferença estatística entre os resíduos utilizados, e os resultados obtidos desde a camada de 0-10cm até a de 30-40 cm, os valores de K no solo, foi próximo um ao outro, assim como ocorreu no Planossolo, ao utilizar o resíduos do Pós-sal.

Os resultados obtidos a partir da utilização do cascalho do Pré-sal no Argissolo, foram parecidos aos que foram encontrados no Planossolo. Os valores encontrados para o resíduo do Pós-sal foram superiores aos encontrados no resíduo do Pré-sal, a partir do Argissolo.

O que chama a atenção é que todos os valores observados para a dose de 200 Mg.ha<sup>-1</sup> no resíduo do Pós-sal, diferenciaram-se estatisticamente dos valores obtidos com o cascalho do Pré-sal. Assim como, a partir da dose 100 Mg.ha<sup>-1</sup> pode-se notar que em todas as



profundidades, exceto 30-40cm, diferenciou-se estatisticamente dos resultados do cascalho Pré-sal, apresentando valores maiores. Todos os tratamentos realizados, na profundidade 0-10cm, diferenciaram-se estatisticamente dos resultados do Pré-sal.

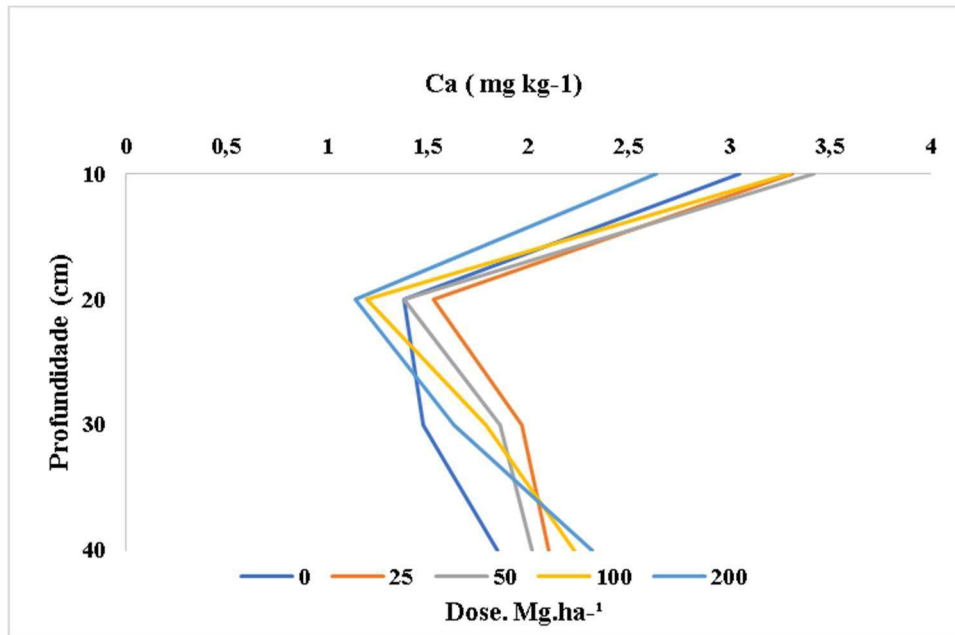
Os valores encontrados de K com a utilização do cascalho do Pré-sal foi menor, se comparado aos do Pós-sal, no mesmo solo. Pode-se observar que os valores encontrados foram maiores quando comparados aos do Planossolo, porém, a dose controle já apresenta um certo quantitativo de K no solo naturalmente, 174,33, 107, 74, e 68 mg.kg<sup>-1</sup> para 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40cm, respectivamente, proveniente do próprio Argissolo.

Observa-se que os resultados obtidos na camada superficial foram maiores do que aos observados nas camadas mais profundas (30-40cm). Os valores encontrados na camada de 30-40 cm para as doses 25 e 50 Mg.ha<sup>-1</sup> foram próximas umas das outras assim como, os valores encontrados para a mesma profundidade utilizando as doses 100 e 200 Mg.ha<sup>-1</sup> também apresentaram valores próximos um aos outros. Pode-se notar que os resultados utilizando as doses 25 e 50 Mg.ha<sup>-1</sup> foram próximos nos dois tipos de resíduos do Argissolo, assim como os tratamentos de 100 e 200 Mg.ha<sup>-1</sup>.

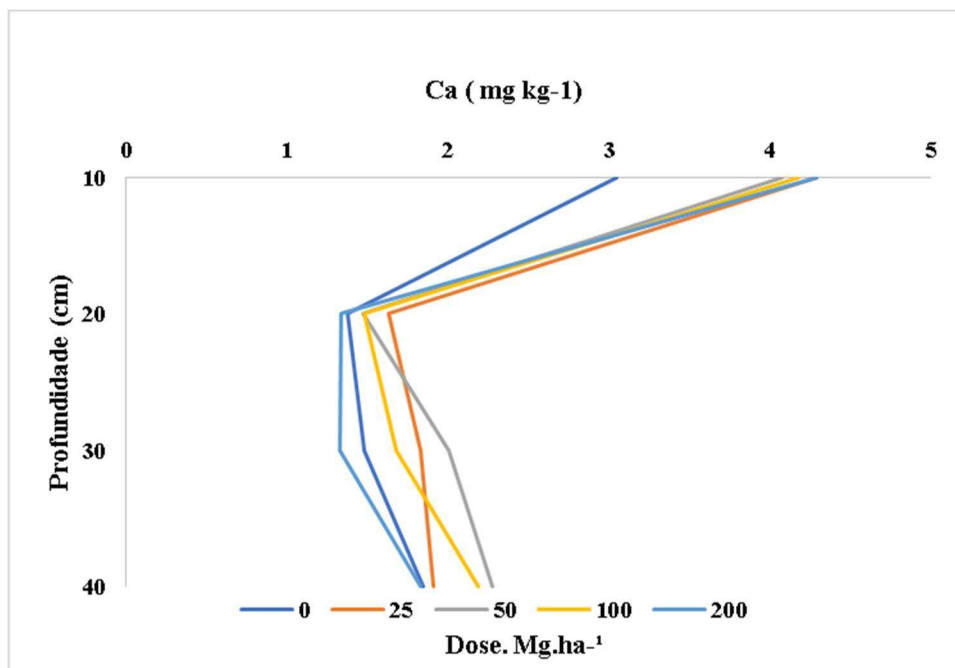
Os resultados encontrados para o planossolo e argissolo no presente experimento corroboram com Schultz (2019), ao avaliar os atributos químicos do solo com cascalho de perfuração de poços de petróleo marítimo e Freitas (2015), após obter conhecimento quanto aos nutrientes do solo após a aplicação de fluidos de perfuração *onshore* sobre o solo o Planossolo e Latossolo.

### 5.2.3 Cálcio

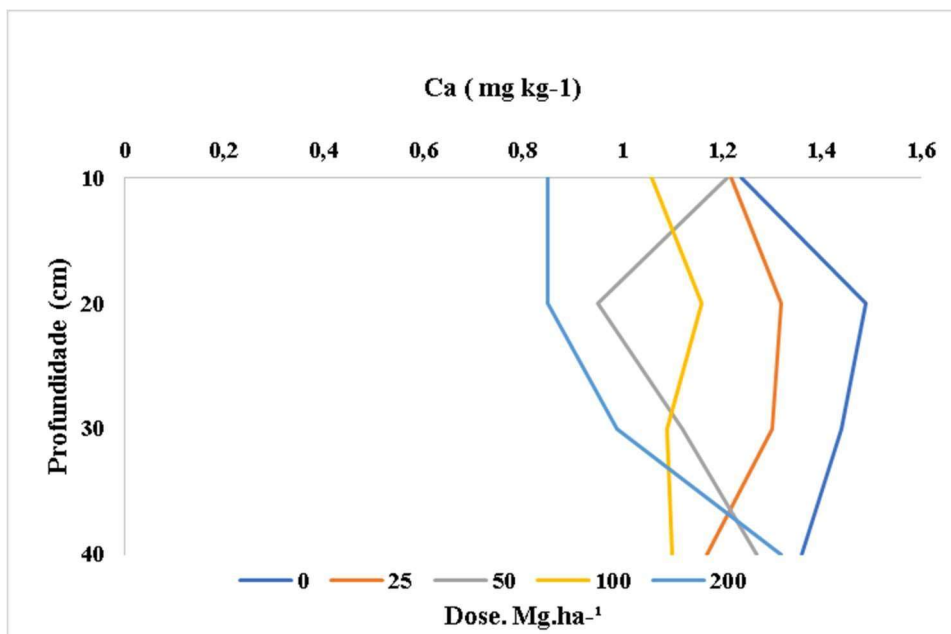
A partir das Figuras 20 e 21 apresentadas referentes aos valores encontrados de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no Planossolo e Argissolo com os respectivos cascalhos de Pré-sal e Pós-sal, pode-se notar que os valores obtidos foram baixos, e próximos aos valores da dose controle para o Argissolo



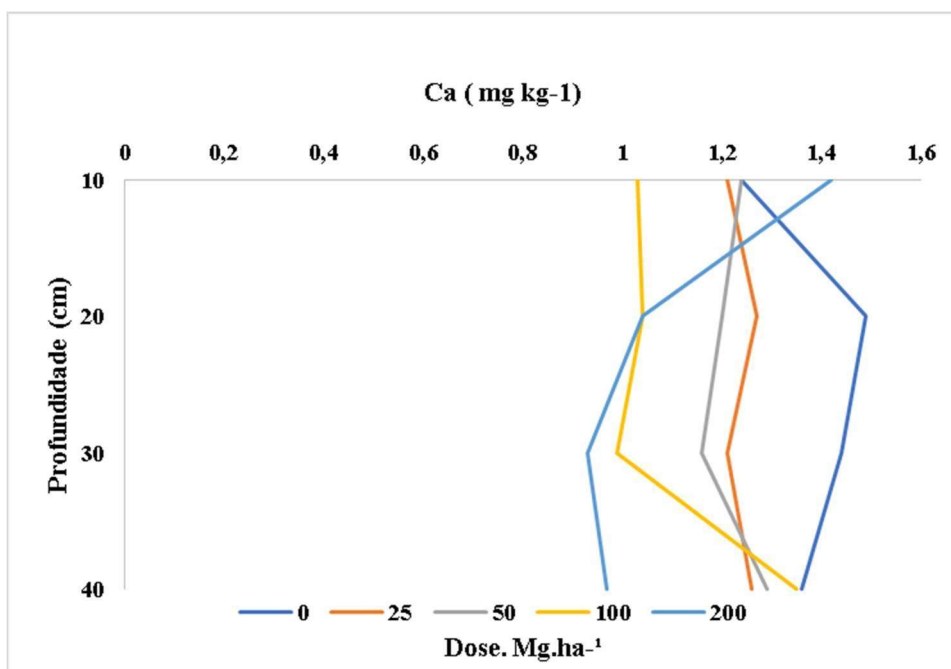
**Figura 24.** Teor de Ca de 0 a 40 cm de profundidade no Argissolo com as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pós-sal.



**Figura 25.** Teor de Ca de 0 a 40 cm de profundidade no Argissolo com as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pré-sal.



**Figura 26.** Teor de Ca de 0 a 40 cm de profundidade no Planossolo com as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pós-sal.



**Figura 27.** Teor de Ca de 0 a 40 cm de profundidade no Planossolo com as respectivas doses de cascalho *offshore* do Pré-sal.

Com os resultados apresentados do Ca no Argissolo foi possível observar que não apresentou alto teor do macronutriente nos demais tratamentos, seja a partir do cascalho do

Pós-sal ou do Pré-sal. Nota-se que não houve diferença estatística entre os resíduos independentemente da dose aplicada e da profundidade em análise, em exceção da dose 200 Mg.ha<sup>-1</sup> na profundidade de 30-40 cm, o único tratamento que diferenciou-se estatisticamente dos demais (Figura 20).

Diferentemente do observado no Argissolo, no Planossolo verificou-se que os valores obtidos pelas respectivas doses na camada superficial do solo (0-10cm) foram baixas, variando entre 0,85 (200 Mg.ha<sup>-1</sup> cascalho Pós-sal) e 1,2 mg.kg<sup>-1</sup> (200 Mg.ha<sup>-1</sup> Pré-sal) para ambos os cascalhos. A partir da profundidade de 10-20 cm em ambos os cascalhos, observou-se maiores valores de cálcio no solo, não havendo diferença estatística entre os dois cascalhos (Figura 21).

Na dose de 200 Mg.ha<sup>-1</sup> com o cascalho do Pós-sal, observou-se o valor de 1,5 mg.kg<sup>-1</sup> de Ca no solo, o maior valor encontrado em todos os tratamentos, sem apresentar diferença estatística entre o resíduo do Pré-sal. Na maior profundidade (30-40cm) os valores observados para ambos resíduos foram próximos aos encontrados na profundidade de 0-10cm.

Os resultados encontrados por Schultz (2019) corroboram com o presente experimento para o Planossolo e Argissolo, ao avaliar os atributos químicos do solo com cascalho de perfuração de poços de petróleo marítimo e Freitas (2015), após obter conhecimento quanto aos nutrientes do solo após a aplicação de fluidos de perfuração *onshore* sobre o solo o Planossolo e Latossolo.

## 6 CONCLUSÕES

- Houve lixiviação de Na nas respectivas doses aplicadas no experimento (25,50,100 e 200 Mg.ha<sup>-1</sup>). A dose 25 Mg.ha<sup>-1</sup> foi a que apresentou menor arraste. As demais doses apresentaram risco de contaminação do lençol freático
- O Ba apresentou concentrações acima do estimado como referência a partir da resolução n°420 CONAMA, no lixiviado.
- No solo, foi possível observar altas concentrações de Na nas respectivas profundidade, principalmente em 0-10cm. A dose que apresentou menores valores de Na ao longo do perfil foi a de 25 Mg.ha<sup>-1</sup>. As demais doses, apresentaram altos valores de Na (ao

comparar com a dose controle), possibilitando a mudança de característica do solo para salino, sódico ou salino-sódico.

## 7 REFERÊNCIA

ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. **Tópicos em ciência do solo**. p 299-352. 2000.

AMARAL, N.M.B.; CEDDIA, M.B.; ZONTA, E.; SOUZA, C.C.B; LIMA, E.S.A. Barium and lead levels in sites for disposal of oil well waste. **Revista Caatinga [online]**.v. 32, n. 4 , p. 1060-1068, 2019.

AMORIM, J.R. de A.; FERNANDES, P.D.; GHEYI, H.R.; AZEVEDO, N.C. de. Efeito da salinidade e modo de aplicação da água de irrigação no crescimento e produção de alho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.167-176, 2002.

BALL, A. S., STEWART, R. J., & SCHLIEPHAKE, K. A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings. **Waste Management & Research**, v.30, e.5, p. 457-473, 2011.

BALTAR, C. A. M; LUZ, A. B. Barita e Bentonita: Funções no Fluido de Perfuração e Potencial de Uso nas Reservas do Nordeste do Brasil. **Para Desenvolver a Terra, Imprensa da Universidade de Coimbra**, p. 314-320, 2012.

BAKKE, T.; KLUNGSOYR, J.; SANNI, S. Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry. **Marine Environmental Research**, v. 92, p.154-169, 2013.

BUSSMEYER, E. C. & HENKES, J. A. (Gestão ambiental na indústria do petróleo: Sistema de gestão ambiental nas sondas de perfuração. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v.3, e.2, p. 398-462, 2015

CAENN, R.; DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. Composition and properties of drilling and completion fluids. In: **Introduction to drilling fluids**. v.6, p. 1-37, 2011.

CAMARGO, O. A; ALLEONI, L. R. F; CASAGRANDE, J. C. Reações dos micronutrientes e elementos tóxicos no solo. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B. van; ABREU, C. A. Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura. Jaboticabal: CNPq/ FAPESP/ POTAFOS, cap.5, p.89-124, 2001.

CAMPOS, L. F. DE; LUGON JÚNIOR, J.; TELLES, W. R.; RODRIGUES, P. P. G. W. Estudo da geração de resíduos nas operações de perfuração e cimentação durante a construção de poços marítimos de petróleo e gás. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamago**, v. 10, n. 1, p. 119-138, 2016.

CARVALHO, F.G.; STAMFORD, N.P. Fixação do N<sub>2</sub> em leucena (*Leucaena leucocephala*) em solo da região semi-árida brasileira submetido à salinização. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.237-243, 1999.

CARVALHO, M. M. Efeito da aplicação de cascalho de perfuração de poço de petróleo no desenvolvimento de cevada (*Hordeum vulgare* L.). 65f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2013.

CETESB. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências. Decisão de Diretoria Nº 195-2005- E, de 23 de novembro de 2005: CETESB,2005.

COCHRANE, S.K.J.; EKEHAUGB, S.; PETTERSENA, R.; REFITA, E.C.; HANSENB, I.M.; AASB, L.M.S. Detection of deposited drill cuttings on the sea floor- A comparison between underwater hyperspectral imagery and the human eye. **Mar. Pollut Bull.** v.145, p.67-80, 2019.

CORRÊA, C. C.; CRUZA, G. F.; VAZ JR., A. S. L.; ARAÚJO, B. S. A.; SILVA, A. A.; RODRIGUES, R. A.; LOMBA, R. F. T.; WALDMANN, A. T. A. Avaliação do potencial uso de bioglicerina como base para formulação de fluidos de perfuração aquosos para poços de petróleo e gás. **Química Nova, São Paulo**, v. 40, n. 4, p. 378-387, 2017.

COSTA, C. N.; MEURER, E. J.; BISSANI, C. A. & SELBACH, P. A. Contaminantes e poluentes do solo e do ambiente. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo 3º Edição**, Porto Alegre: Evangraf, p.285, 2006.

DE ALMEIDA, P. C., ARAÚJO, O. DE Q. F., & DE MEDEIROS, J. L. Managing offshore drill cuttings waste for improved sustainability. **Journal of Cleaner**, 2017.

DUTRA, I.; MEDEIROS, J.F. de; PORTO FILHO, F. de Q.; COSTA, M. da. C. Determinação do fator de cobertura do melão cultivado sob diferentes lâminas e salinidades da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, p.146-151, 2000.

EDUARDO LANDULFO. Meio ambiente & física. **Editora Senac São Paulo**. v.4, p.158, 2020.

EPA. Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils, Revision. In EPA 3050B-R.2, Washington. 1996.

ESMAEILI, A. et al. A geochemical survey of heavy metals in agricultural and background soils of the Isfahan industrial zone, **Catena**, v. 121, n. 1, p. 88-98, 2014.

FIALHO, P.F. Cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás. Estudo do potencial de aplicação em concreto. **Dissertação (Mestrado Engenharia Civil)**. Universidade Federal do Espírito Santo. 2012.

FREEMAN, HM Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal. **McGraw Hill Companies**. 1977.

FREIRE, M.B.G. dos S.; RUIZ, H.A.; RIBEIRO, M.R.; FERREIRA, P.A.; ALVAREZ VENEGAS, V.H.; FREIRE, F.J. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, p.45-52, 2003

FREITAS, F. C. DE, PRESOTTO, R. A., GENÚNCIO, G. DA C., SOBRINHO, N. M. B. DO A., & ZONTA, E. pH, sódio, potássio, cálcio, magnésio e alumínio em solos contaminados com fluido de perfuração de poços de petróleo após ensaios de lixiviação. **Ciência Rural**, v. 45,n.8, p.1418–1423, 2015.

GAUDENCIO, L.M.A., DE OLIVEIRA, R. AND CURI, W.F. Sustainability Indicators System Based on Multicriteria Analysis: A Tool for the Management of the Sustainability of Offshore Oil and Gas Production Units. **Integr Environ Assess Manag**, v.17,p.614-625, 2021.

GUEDES, J.N.Estratégias de Manejo do Cascalho Oriundo da Perfuração de Poços de Petróleo. Doutor em Agronomia - Ciência do solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. p.137, 2014.

GHERASIM, C.V.; MIKULÁŠEK, P. Influence of operating variables on the removal of heavy metal ions from aqueous solutions by nanofiltration. **Desalination**, v. 343, n. 16, p. 67-74, 2014

GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, B., RODRÍGUEZ-VALDÉS, E., BOENTE, C., MENÉNDEZ-CASARES, E., FERNÁNDEZ-BRAÑA, A., & GALLEGRO, J. R. Long-term ongoing impact of arsenic contamination on the environmental compartments of a former mining-metallurgy area. **Science of The Total Environment**, p.610-611, 820–830, 2018

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. Normais climatológicas do Brasil 1961-1990. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br>

IOGP, INTERNATIONAL ASSOCIATION OF OIL & GAS PRODUCERS. Environmental aspects of the use and disposal of non-aqueous drilling fluids associated with Offshore Oil & Gas Operations.p. 114, 2003.

IOGP. Associação Internacional de Produtores de Petróleo e Gás **Destino Ambiental e Efeitos da Descarga Marítima de Cascalhos de Perfuração e Fluidos de Perfuração Associados de Operações Offshore de Petróleo e Gás** Relatório nº 543, p. 144, 2016.

I.PETRI JUNIOR, MS PEREIRA, JM DOS SANTOS, CR DUARTE, CH ATAÍDE, CM PANISSET, Á.Remediação de fragmentos e cascalhos de poços de petróleo por micro-ondas.**J. Petrol. Sci. Eng.** v.134,p.23, 2015

K.H. Lanouette Heavy metals removal **Chem. Eng.**, v.84, e.22, p.73-80, 1977.

KHONDAKER, A.N. Modelling the fate of drilling waste in marine environment: an overview. **Computers & Geosciences, Dhahran**, n. 26, p. 531-540, 2000

KOGBARA, R.B., DUMKHANA, B.B., AYOTAMUNO, J.M., OKPARANMA, R.N.,Recyclingstabilised/solidified drill cuttings for forage production in acidic soils.**Chemosphere**, n.184, p.652–663, 2017.

LEBRON, I.; SUAREZ, D.L.; YOSHIDA, T. Gypsum effect on the aggregate size and geometry of three sodic soils under reclamation. **Soil Science Society of America Journal** v.66, p.92-98, 2002.

LEMOS, F. A. C. Tratamento e destinação final de resíduos de fluidos de perfuração de poços de petróleo. **Monografia (Especialização) - Universidade Católica de Salvador**, 1997.

LIMA, L.S. Influência do tratamento de lavagem de resíduos de perfuração de poços de petróleo no desenvolvimento de plantas de arroz (*Oryza sativa*). 110f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2013.

LEONARD, S.A., STEGEMANN, J.A.. Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings. *J. Hazard Mater.* v. 174, p. 463-472, 2010.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. **Piracicaba: POTAFOS**, 201p. 1997.

MANISALIDIS, I., STAVROPOULOU, E., STAVROPOULOS, A., & BEZIRTZOGLU, E. Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. **Frontiers in Public Health**, v.8, 2020.

MATOS, A. T. Poluição Ambiental: Impactos no Meio Físico; **Editora UFV**. 2020

MATOS, C. H. L.; MELO, V. F.; UCHÔA, S. C. P.; NASCIMENTO, P. P. R. R.; PEREIRA, R. A. Phosphorus adsorption in soils under forest and savanna from Northern Amazon, Brazil. *Semina: Ciências Agrárias (online)*, v. 38, p. 2909-2920, 2017.

MARCATTO, F.S.A.; SILVEIRA, H. Relação entre as propriedades físico-hídricas dos solos e os tipos de uso da terra como subsídio ao manejo e conservação do solo e da água na bacia hidrográfica do rio Pirapó - PR (*Relation between the soil's hydro-physical attributes and the land use*). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 6, p. 1769 - 1783, 2016.

MCBRIDE, M.B.; BAVEYE, P. Diffuse double-layer models, long-range forces, and ordering in clay colloids. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, p.1207-1217, 2002

MEDEIROS, L.C. Adição de cascalho de perfuração da Bacia Potiguar em argilas para uso em materiais cerâmicos: influência da concentração e temperatura de queima. **Dissertação pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Programa de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais**, 2010.

MEURER, E. J.; BISSANI, C. A.; CARMONA, F. C. Solos ácidos e solos afetados por sais. In: ZMEURER, E. J. (Ed) Fundamentos de química do solo. 4 ed. Porto Alegre: Evangraf, cap 6, p. 149-170, 2010.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F.F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ, V.H. Tópicos em Ciência do Solo, eds. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 3, p. 209 - 248, 2003



MT SCHAANNING , HC TRANNUM , S. ØXNEVAD , J. CARROLL , T. BAKKE. Efeitos de cascalhos de perfuração em fluxos biogeoquímicos e macrobentos de sedimentos marinhos. **J. Exp. Mar. Biol. Ecol.** v.361, p. 49 - 57, 2008.

MOSTAVI, E., ASADI, S., UGOCHUKWU, E.. Feasibility study of the potential use of drill cuttings in concrete. **Procedia Eng.** V.118, p.1015-1023, 2015

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). Oil in the sea III: inputs, fates, and effects. **National Academy Press.** p. 258, 2003.

OKPARANMA, R.N., PEREZ, P., ARAKA, P.P., AYOTAMUNO, J.M., MOUAZEN, A.M.. Towards enhancing sustainable reuse of pre-treated drill cuttings for construction purposes by near-infrared analysis: a review. **J. Civ. Eng. Constr. Technol.** v. 9, n.3, p. 19– 39, 2018.

OLIVEIRA, L.B. de; RIBEIRO, M.R.; FERREIRA, M. da G. de V.X.; LIMA, J.F.W.F. de; MARQUES, F.A. Inferências pedológicas aplicadas ao perímetro irrigado de Custódia, PE. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.1477-1486, 2002.

ONG, S. A. et al. Comparative study on kinetic adsorption of Cu (II), Cd (II) and Ni (II) ions from aqueous solutions using activated sludge and dried sludge. **Applied Water Science**, v. 3, n. 1, p. 321-325. 2013.

PRÉ-SAL. PETROBRAS, 2020. Disponível em: <<https://petrobras.com.br//pre-sal/>> Acessado em: 20/07/2020.

PAGE, P.W., et al., 2003. Options for the Recycling of Drill Cuttings. **SPE paper No. 80583**, Texas, p.10–12 , 2003.

PW PAGE , C. GREAVES , R. LAWSON , S. HAYES , F. BOYLE. Options for the recycling of drilling cuttings.. **Proceedings SPE / EPA / DOE Exploration and Production Environmental Conference**, EUA 2003.

REELEDER, R.D.; MILLER, J.J.; BALL, B.R.; COELHO, R.C. Impacts of tillage, cover crop, and nitrogen on populations of earthworms, microarthropods, and soil fungi in a cultivated fragile soil. **Applied Soil Ecology**, v. 33, n. 3, p. 243 - 257, 2006.

SA LEONARD , JA STEGEMANN. Estabilização / solidificação de cascalhos de perfuração de petróleo, 2010.

SAMARINA, V.P. MINERAL Resource industry of Russia in the world market: Current developments. **Min. Inf. Anal. Bull.** v. 3, p.209–216, 2017.

SANTOS, J.M., PETRI, I. JÚNIOR, MOTA, A.C.S., MORAIS, A.S., ATAÍDE, C. H.. Optimization of the batch decontamination process of drill cuttings by microwave heating, **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v.163, p. 349-358, 2018.

SCHAFFEL, S. B. A questão ambiental na etapa de perfuração de poços marítimos de óleo e gás no Brasil. 2002. **Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Programa de Planejamento Energético.** p.147, 2002.

SCHUMAKER, J.P., et al.. Development of an Alaskan North Slope Soils Database for Drill Cuttings Reclamation. **SPE 22094 , Proceedings of the international Arctic technology conference**, Anchorage, p. 321–322, 1991

SCHULTZ, N., LEITE, T. O., DE ANDRADE MARTINS COELHO, L., JUNIOR, C. R.P., & ZONTA, E. Chemical attributes of soil and growth of castor beans fertilized with drilling gravel from oil wells and castor pie. **Science of The Total Environment**, v.695, 2019.

SILVA, H. P.; BRANDÃO JUNIOR, D. S.; NEVES, J. M. G.; SAMPAIO, R. A.; DUARTE, R. F.; OLIVEIRA, A. S. Qualidade de sementes de *Helianthus annuus* L. em função da adubação fosfatada e da localização na inflorescência, *Ciência Rural*, v.41, p.1160-1165, 2011

SOUZA, C. A. de & MENDES, F. S. Coprocessamento em fornos de clínquer: uma alternativa sustentável para destinação do resíduo Cascalho de perfuração de petróleo em Mossoró-RN. **Revista eletrônica de petróleo e gás – Universidade Potiguar**. 2013.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de Métodos de Análise de Solo. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Solos**. v.3, p.574, 2017.

THE ROYAL SOCIETY OF CANADA. Report of the expert panel on science issues related to oil and gas activities, offshore British Columbia. **The Royal Society of Canada, Ottawa**. p,155, 2004.

THOMAS, J. E. Fundamentos de engenharia de petróleo. **Interciência**, 2001.

TUNCAN, A., TUNCAN, M., & KOYUNCU, H.. Use of petroleum-contaminated drilling wastes as sub-base material for road construction. **Waste Management & Research**, v.18, n.5, p.489–505, 2000.

USEPA. Agência de Proteção Ambiental dos EUA. **EUA Regulamentando Descargas de Águas Residuais da Indústria do Petróleo nos Estados Unidos e na Noruega**. 2011

VEIGA, L. F. Avaliação de risco ecológico dos descartes da atividade de perfuração de poços de óleo e gás em ambientes marinhos. **Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Programa de Engenharia Civil**.p.254, 2010.

VIANA, S.B.A.; FERNANDES, P.D.; GHEYI, H.R. Germinação e formação de mudas de alface em diferentes níveis de salinidade de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, p.259-264, 2001.

WOHLENBERG, E.V.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 5, p. 891 - 900, 2004.

ZAMORA-LEDEZMA, E., GARCÍA, J.V. Mineral oil-based drilling cuttings phytotoxicity assessment using species of temperate and tropical climate. **Global J. Environ. Res.** v.7,n.1,p. 01–07, 2013.

ZONTA, E. et. al.; Avaliação de sítios de disposição, no solo, de Resíduos da Exploração & Produção, Relatório Parcial. PETROBRAS-PDP/TEP nº 005, 2005.