

Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária

**João Manoel Dantas de Andrade**

**PERDAS DE QUALIDADE E  
CONTAMINAÇÃO DO SOLO EM MINA DE  
SCHEELITA NO SEMIÁRIDO TROPICAL**

NATAL  
2017

**João Manoel Dantas de Andrade**

**PERDAS DE QUALIDADE E  
CONTAMINAÇÃO DO SOLO EM MINA DE  
SCHEELITA NO SEMIÁRIDO TROPICAL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial á obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

*Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Karina Patrícia Vieira da Cunha*

NATAL  
2017

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Andrade, João Manoel Dantas de.

Perdas de qualidade e contaminação do solo em mina de scheelita no semiárido tropical / João Manoel Dantas de Andrade. - 2017.

47 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária. Natal, RN, 2017.

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Karina Patrícia Vieira da Cunha.

1. Degradação ambiental - Dissertação. 2. Qualidade do solo - Dissertação. 3. Mina Brejuí - Dissertação. 4. Metais pesados - Dissertação. I. Cunha, Karina Patrícia Vieira da. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 504

**João Manoel Dantas de Andrade**

**PERDAS DE QUALIDADE E  
CONTAMINAÇÃO DO SOLO EM MINA DE  
SCHEELITA NO SEMIÁRIDO TROPICAL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial á obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

---

Dr<sup>a</sup>. Karina Patrícia Vieira da Cunha – Orientadora  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

---

Dr. Airon José da Silva – Examinador Externo  
Universidade Federal de Sergipe

---

Dr<sup>a</sup>. Andresa Priscila de Souza Ramos – Examinador Externo  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me deu o dom da inteligência e sabedoria. Saúde e paz na minha vida. Que me deu apoio nos momentos difíceis e me confortou nas minhas orações.

Minha família, meus pais Francisca Eugenia e João Bôsko que me deram muito amor e uma criação digna, sendo um dos mais fortes pilares da minha existência. Meus irmãos Bôsko Junior e Jofranklin por toda a parceira de uma vida.

Minha esposa Alcía Poliana por ser essa companheira incrível e compreensível. Que está presente nas minhas batalhas desde o ensino médio. Mais vitórias virão meu amor.

A minha Orientadora Karina Patrícia Vieira da Cunha, por ser essa incrível professora dentro e fora de sala de aula. Por ter aberto as portas da iniciação científica, por toda a orientação e ajuda na construção dessa dissertação.

A todos os professores e amigos da Pós-Graduação. Que participaram de forma direta ou não na minha caminhada no programa.

A EMPARN, que concedeu as análises do solo no seu laboratório ainda no período de estágio. E aos meus companheiros de trabalho Dutra, Marcos, Maninho, Gerson, Tarcísio, Romildo e o chefe de laboratório Alfredo Osvaldo.

A Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e o Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (LARHISA) pelo espaço concedido para a realização da pesquisa.

A Mineração Brejuí pela autorização da coleta dos solos especialmente ao Senhor Paulo Dutra.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa.

Aos meus colegas Amanda, Diego, Giovana, Jéssica e João Vieira que foram ao campo e me deram uma grande força na coleta das amostras de solo. E ao amigo Gilbrando pela ajuda na construção do abstract.

As minhas amigas mestras Alana Sousa e Giovana Alves pela ajuda e suporte na pesquisa.

A todos que fazem o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária na UFRN. Meu muito obrigado aos docentes que passaram o precioso conhecimento para a minha formação (In memoriam: Cícero Onofre e Guttemberg Martins), pessoal da secretária que estão sempre a disposição para resolver as burocracias necessárias e ao pessoal dos serviços gerais que trabalham com muito zelo.

Por fim, todos os amigos, familiares, antigos professores de ensino fundamental, médio e graduação que torceram e ajudaram para que esse caminho fosse trilhado e alcançado.

Meu muito obrigado!

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
2.1. Área de Estudo.....	4
2.2. Coleta e preparação amostras de solo.....	5
2.3. Avaliação dos atributos físicos e químicos e disponibilidade de metais pesados.....	6
2.4. Análise estatística dos dados.....	7
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	8
4. CONCLUSÃO.....	25
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	26
6. ANEXO.....	30
7. APÊNDICE .....	31

## LISTA DE ABREVIACÕES

\* - Significativo

\*\* - Altamente Significativo

AC - Açude

Al<sup>3+</sup> - Alumínio Trocável

BRFA - Barragem de rejeito fina ativada

BRFA - Barragem de rejeito fino desativada

BR - Brasil Rodovia

CE - Condutividade elétrica

Cd - Cádmio

CN - Currais Novos

Cr - Cromo

CTCp - Capacidade de Troca Catiônica potencial

Cu - Cobre

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

Dp - Densidade de Partícula

Ds - Densidade do solo

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EMPARN - Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte

Fe - Ferro

H<sup>+</sup>+AL<sup>3+</sup> - Acidez Potencial

m - Saturação por Alumínio

MN - Mata nativa

Mn - Manganês

MO - Matéria orgânica

Ni - Níquel

P - Fósforo Disponível

Pb - Chumbo

PCA - Análise de Componentes Principais

PE1 - Pilha de estéril 1

PE2 - Pilha de estéril 2

PIB - Produto Interno Bruto

PMF - Pilha de metal ferroso

Pt - Porosidade Total

RG - Rejeito grosso

RGMF - Rejeito grosso misturado com rejeito ferroso

RN - Rio Grande do Norte

RVEG - Rejeito com revegetação espontânea

SB - Soma de Bases

SAS - Statistical Analysis System

V - Saturação por bases

VRQs - Valores de Referência de Qualidade

TSFA - Terra fina seca ao ar

UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

W - Tungstênio

Zn - Zinco

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localização dos pontos de coleta na Mina Brejuí em Currais Novos-RN.....	5
<b>Figura 2.</b> Atributos físicos dos solos sob mata nativa e das áreas da Mina Brejuí, localizadas em Currais Novos-RN.....	9
<b>Figura 3.</b> Atributos químicos do solo sob mata nativa e das áreas da Mina Brejuí, localizadas em Currais Novos-RN.....	13 e 14
<b>Figura 4.</b> Análise de Componentes Principais dos atributos físicos e químicos do solo de mata nativa e das áreas da Mina Brejuí em Currais Novos/RN.....	17
<b>Figura 5.</b> Teores disponíveis de metais pesados Fe, Zn, Cu, Mn, Ni, Cd, Cr, e Pb do solo sob mata nativa e das áreas da Mina Brejuí, localizadas em Currais Novos-RN....	19
<b>Figura 6.</b> PCA dos metais disponíveis e atributos do solo de mata nativa e das áreas da Mina Brejuí em Currais Novos/RN.....	22

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Classes texturais do solo das áreas da Mina Brejuí e mata nativa, localizadas município de Currais Novos-RN.....	10
---	----

## RESUMO

A disposição irregular de pilhas de rejeito e estéril causa degradação ambiental. Pilhas de rejeito e estéril são fontes de contaminação contínua do ambiente, impactando principalmente o solo, reduzindo sua qualidade a partir de alterações nos seus atributos físicos e químicos e na disposição de metais pesados. O presente trabalho teve como objetivo avaliar os atributos físicos e químicos e teores de metais pesados disponíveis do solo da Mina Brejuí. Foram coletadas amostras de solo em nove locais da mineração e um em mata nativa que serviu de referência de qualidade. Foi feita análise dos atributos físicos (densidade do solo, de partícula, porosidade total e granulometria), químicos (pH, condutividade elétrica,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}, \text{K}^+$ ,  $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , soma de bases, capacidade de troca de cátions potencial, saturação por bases e por alumínio e matéria orgânica) e teores de metais pesados disponíveis (Fe, Mn, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn). A mineração de scheelita provoca perdas de qualidade do solo. Os atributos físicos e químicos, mais sensíveis na distinção entre as áreas mineradas e a mata nativa são Ds, MO,  $\text{Ca}^{2+}$ , CE, pH e acidez potencial, os quais podem ser utilizados em programas de monitoramento ambiental da área. Os processos de degradação do solo mais evidentes nas áreas mineradas são a compactação, salinização, redução dos teores de matéria orgânica e contaminação por metais pesados. Os metais Cd, Ni e Pb estão sendo disponibilizados a partir das pilhas de resíduos da mineração de scheelita ultrapassando os Valores de Referência de Qualidade do Solo do estado do Rio Grande Norte. É necessário a elaboração de um plano de gestão e recuperação da área minerada visando a disposição adequada dos resíduos, com ênfase a pilha de rejeitos ferrosos, e a mitigação dos processos de degradação evidenciados no presente estudo.

**Palavras-Chave:** Mina Brejuí, qualidade do solo, degradação ambiental, metais pesados.

## ABSTRACT

The irregular disposition of amounts of tailings causes environmental degradation. Piles of tailings are regular sources of contamination in the environment, impacting, mainly, in the soil, reducing its quality by changes in its physical and chemical attributes and also by the deposition of heavy metals. The main objective of this study was the evaluation of physical and chemical attributes, and also evaluate the heavy metals content in the soil of Brejuí Mine. It was collected soil samples in nine mining places and also it was collected soil samples from a native forest place, the last one it was used as quality reference. It was analyzed physical attributes (soil particle density, total porosity and granulometry), chemicals (pH, electric conductivity,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$ + $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , sum of bases, potential cation exchange capacity, saturation by bases and by aluminum, organic matter) and available metals contents (Fe, Mn, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn). The scheelite mining causes losses in the soil quality. Physical and Chemicals attributes more affected when compared to native forest areas are Ds, MO,  $\text{Ca}^{2+}$ , CE, pH and potential acidity, those attributes can be used in programs of environmental monitoring of the area. The most evident degradation processes in the mining area are compaction, salinization, depletion in the organic matter contents and contamination by heavy metals. Metals like Cd, Ni e Pb are been available by piles of mining waste of scheelite exceeding reference values of soil quality for Rio Grande do Norte state. It is necessary the elaboration a plan to manage and recover the mining area aiming adequate disposition of wastes, with emphasis on the pile of ferrous tailings, and the mitigation of degradation processes evidenced in the present study.

**Keywords:** Brejuí Mine, soil quality, environmental degradation, heavy metals.

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de recursos naturais acompanha o ser humano desde a sua existência. Nos dias atuais a indústria de mineração se destaca como meio de obtenção da matéria prima necessária para vários produtos do dia-a-dia da sociedade contemporânea. O extrativismo mineral é uma atividade econômica fundamental para o desenvolvimento de um país, envolvendo um conjunto de atividades, processos e técnicas para a extração de recursos minerais de uma região. Essa atividade está ligada diretamente ao desenvolvimento econômico e social de uma nação. Entretanto, com a crescente necessidade por bens pela sociedade e com o avanço da tecnologia de extração, a capacidade de obtenção desses recursos aumentou juntamente com os impactos ao ambiente, ultrapassando os limites de resiliência dos sistemas ecológicos.

Na região do Seridó do Rio Grande do Norte, a mineração é uma das fontes econômicas mais importantes, sendo fonte de renda para vários municípios como, por exemplo, Currais Novos (SOUSA e CAMELO, 2008). A scheelita é o principal minério extraído na região, de onde se obtém o tungstênio. O tungstênio apresenta características peculiares como: dureza elevada, alto ponto de fusão, elevada resistência á corrosão, boa condutividade elétrica, baixo coeficiente de expansão e peso específico igual ao do ouro (GODEIRO *et al.*, 2010; LINHARES, 2014). Por essas qualidades esse elemento é utilizado em vários ramos industriais como: indústria siderúrgica, bélica, espacial, elétrica, eletrônica e química.

Contudo, não se deve considerar apenas importância socioeconômica associada à exploração mineral, as questões ambientais também devem ser levadas em conta. As ações de mineração resultam em drásticas alterações no ambiente, levando a degradação de extensas áreas. Qualquer que seja a atividade feita pelo homem, baseada na transformação energética e material, vai gerar impacto à natureza e algum resíduo a ser descartado. Isso não é motivo para interromper as atividades antrópicas e o progresso de uma sociedade, deve-se, no entanto, buscar um desenvolvimento com características sustentáveis, a fim de conciliar a atividade mineradora de grande importância social e econômica para um país com as questões ambientais.

A mineração resulta na remoção da cobertura vegetal e do solo, modificação da topografia e estruturas geológicas e interrupção do escoamento superficial e subsuperficial (SHRESTHA & LAL, 2011). Assim sendo, em áreas de lavra podem

ocorrer impactos como a poluição visual, poluição sonora, assoreamento e erosão, poluição do ar, solo, águas subterrâneas e superficiais, impactos sobre a fauna e flora (DONTALA *et al.*, 2015).

A contaminação gerada pela mineração pode alcançar grandes distâncias, contaminando áreas além do local que está sendo minerado, o que abrange a área de influencia da mineração. O solo é um sistema aberto e pode atuar com fonte de dispersão de metais pesados que possuem essa capacidade de degradar extensas áreas. Os metais pesados são transportados para o sistema de drenagem da região próximo a mineração, esse levados por processos hídricos ou eólicos para outras áreas (PETTA *et al.*, 2014). A produção de metais gera resíduos sólidos e efluentes que, quando dispostos de maneira inadequada, são potenciais contaminantes dos recursos hídricos da região próximos ao local de extração (CIMINELLI, 2007). A principal fonte contínua dessa contaminação são as pilhas de rejeito e estéril que se encontram no local. Os rejeitos são resíduos de mineração resultantes dos processos de beneficiamento dos minerais e os estéreis são minerais que não possuem valor econômico. A exposição das pilhas de estéril e rejeito aos processos de erosão hídrica e eólica e à lixiviação de contaminantes para o lençol freático desencadeia progressivo grau de contaminação de áreas circunvizinhas (ANDRADE *et al.*, 2009).

A avaliação e monitoramento do solo através de atributos físicos e químicos das áreas degradadas por mineração é necessária pelos evidentes impactos gerados no local de lavra e pelo potencial das pilhas de rejeito, estéril e solos desses locais atuarem como fonte de contaminação difusa da bacia hidrográfica. Os atributos do solo, quando são capazes de indicar a diferença existente entre áreas naturais e degradadas, são considerados indicadores ambientais. Esses indicadores podem ser utilizados em programas de monitoramento da recuperação ambiental, uma vez que, eles deverão deixar de indicar a degradação do solo e sinalizar a aproximação com a área natural, sendo a revegetação uma boa ação de recuperação dessas áreas. Por ocupar extensas áreas, a revegetação das pilhas de rejeito e estéril acaba sendo a opção mais indicada por cumprir o papel de estabilização da área e melhoria estética da região (FROUZ *et al.*, 2008; NETO *et al.*, 2008; BURGOS *et al.*, 2013). Acrescentando a essa discussão salienta-se a lacuna de diagnósticos ambientais e estudos do distrito de mineração em Currais Novos, tendo em vista o tempo de implantação da atividade na região até os dias atuais e a extrema importância dessas avaliações para o monitoramento e recuperação ambiental.

A partir da compreensão da situação atual do solo é possível selecionar medidas que deverão ser tomadas para que os processos de degradação do solo sejam mitigados. A revegetação como uso final das áreas de disposição de rejeitos e estéril é uma boa estratégia para amenizar os impactos no solo, pois a copa das árvores serve para reduzir a dispersão eólica, ao mesmo que as raízes das plantas ajudam a prevenir a erosão hídrica e lixiviação (ASENSIO *et al.*, 2013), promovendo a fitoestabilização do solo.

Diante do exposto, a evidente perda de qualidade do solo gerado pelos impactos da ação de mineração, o objetivo do presente trabalho é foi os atributos físicos e químicos do solo juntamente com os teores disponíveis de metais pesados no solo da área de mineração a fim de selecionar indicadores ambientais e identificar os processos de degradação atuantes na área, devido a ausência de medidas preventivas e de ações que minimizem e recuperem as áreas degradadas que sofrem esses impactos desde o início da exploração mineral até os dias de hoje.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Área de Estudo

A Mineração Brejuí que tem como coordenadas geográficas 6°19'19" Sul; 36°32'52" Oeste, encontra-se no município de Currais Novos-RN (**Figura 1**) situada na mesorregião Central Potiguar e na microrregião Seridó Oriental, que tem como limite os municípios de Lagoa Nova, Cerro Corá, Acari, Campo Redondo, São Vicente e São Tomé e com o Estado da Paraíba,.

O clima da região é muito quente e semiárido classificado como BSh (Estepe) (KOTTEK *et al.*, 2006), com temperaturas média anual de 27,5°C (máxima: 33,0 °C; mínima: 18,0 °C), com insolação e umidade média anual respectivamente 2400 horas/ano e 64%. O período chuvoso é entre os meses de fevereiro e abril, caracterizando um regime de escassez e distribuição desigual de chuvas, com média pluviométrica de 610,5 mm/ano.

Os solos da região são predominantemente classificados como Neossolo Litólico, cujas características são: textura arenosa, fertilidade natural elevada, ocorrência em áreas de relevo plano a levemente ondulado, medianamente profundo e imperfeitamente a moderadamente drenado (EMBRAPA, 1971; EMBRAPA, 2013).

As formações vegetais caracterizadas pelo baixo porte e bem espalhadas entre si e bem marcadas pelo caráter seco, incluem a caatinga subdesértica do Seridó, que se caracteriza pela presença de árvores baixas, ralas, arbustos e com xerofitismo mais acentuado; e a caatinga hiperxerófila, caracterizada por ser uma vegetação de caráter mais seco e apresentar abundância de cactáceas e plantas de porte baixo e espalhadas.

Para a região do Seridó a extração de scheelita ( $\text{CaWO}_4$ ) trouxe desenvolvimento social e econômico. Principalmente para a cidade de Currais Novos onde se encontra a minas Brejuí, Barra Verde, Boca de Lage e Olho d'Água. A mina Brejuí está localizada na propriedade rural denominada "Manoel Paz ou Brejuí" com área de 496,4 ha, sendo 83,5 ha autorizados pelo DNPM para atividade de extração mineral. Na mina Brejuí, desde o início das atividades até a paralisação, o rejeito corresponde aproximadamente a 3.110.400 toneladas (CARVALHO *et al.*, 2002). O ápice da produção e extração do minério foi entre as décadas de 1940 e 1980, quando, por competição desigual, perdeu força econômica para mineradoras da China, que tinham custos de extração menores que as minas da região Seridó, fazendo cair o preço do tungstênio no mercado internacional, inviabilizando economicamente a extração,

acarretando no fechamento das mineradoras seridoenses. Com o aumento do valor do minério no mercado por volta dos anos 2000, a extração do minério foi retomada no ano de 2005 e ainda continua sendo uma fonte de renda para vários municípios inclusive Currais Novos (SOUSA e CAMELO, 2008).



**Figura 1.** Localização dos pontos de coleta na Mina Brejuí em Currais Novos-RN.

## 2.2. Coleta e preparação das amostras de solo

A seleção das áreas para coleta de solo na mina Brejuí, seguiu uma avaliação local com o objetivo de amostrar áreas distintas quanto ao uso e/ou intensidade de degradação, por exemplo, pilhas de estéril, pilhas de rejeito fino e grosso, áreas nas diferentes etapas de beneficiamento e área sob vegetação nativa com pouca ou nenhuma intervenção antrópica, a qual serviu como referência de qualidade do solo da região.

No local foram coletadas amostras deformadas de solo na profundidade de 0-20 cm, em cinco pontos amostrais simples coletados em caminho percorrido no formato zig-zag (EMBRAPA, 1999). As cinco amostras simples foram misturadas e formaram uma amostra composta de aproximadamente 500g. A fim de se obter três repetições de cada área de coleta, todo o procedimento foi repetido três vezes em cada área na quantidade desejada.

No campo foram coletados dez locais distintos (**Figura 1**), cada um com três repetições. As áreas amostradas foram: O ponto PE1 das amostras foi próximo a pilhas de estéril com visíveis sinais de erosão no local (**Foto 1**); O ponto PE2 novamente foi próximo a pilhas de estéril, mas dessa vez, ao lado da entrada principal dos túneis da mina (**Foto 2**); O ponto RVEG está localizado em uma pilha de rejeito muito antiga, que apresenta cobertura vegetal espontânea com evidência de pedogênese. Nesse ponto, a cobertura vegetal existente, está sendo retirada para a utilização como lenha (**Foto 3**); O ponto RG foi no solo próximo de uma pilha de rejeito grosso RG, que começou a ser formada nos anos 1940, começo da extração da scheelita (**Foto 4**); O ponto RGMF é próximo de uma segunda pilha de rejeito que está sendo misturada pela mineração com resíduo ferroso produzido pelo eletroimã (**Foto 5**); O ponto BRFD de coleta foi em uma bacia de rejeito fino que está desativada há 2 anos (**Foto 6**); O ponto BRFA está situado em uma bacia de rejeito fino ativa (**Foto 7**); O ponto de coleta AC está localizado dentro de um pequeno açude que se formou naturalmente, localizado à jusante de todos os outros pontos, e no momento da coletada estava seco (**Foto 8**); O ponto PMF foi retirado de uma pilha de ferroso do eletroimã produto de dois meses de extração (**Foto 9**). O ponto MN foi o de mata nativa que serviu como referência de qualidade para as outras amostras, a área está a três quilômetros da mineração as margens da BR-226 (**Foto 10**).

Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente nomeados, lacrados e armazenados em temperatura ambiente até serem transportados para UFRN e se procederem às análises.

Para análise, o solo foi seco ao ar, destorroado, passado em peneira de 2 mm de abertura de malha para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) e submetido a análises químicas e físicas no laboratório da EMPARN (EMBRAPA, 1999).

### **2.3. Avaliação dos atributos físicos e químicos e disponibilidade de metais pesados**

Foram determinados os atributos físicos a seguir: granulometria pelo método da pipeta e classe textural pelo diagrama triangular simplificado; densidade do solo (Ds) pelo método da proveta; e densidade de partícula (Dp) pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997). A porosidade total do solo foi estimada pela relação entre densidade do solo e de partículas (EMBRAPA, 1997).

Os atributos químicos analisados foram: pH em água (1:25); condutividade elétrica (CE)(1:5);  $K^+$  e  $Na^+$  trocáveis por fotometria de emissão de chama após extração com extrator Mehlich-1;  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  trocáveis por espectrofotometria de absorção atômica após extração por acetato de amônia (EMBRAPA, 1999);  $H^+$ + $Al^{3+}$  por titulação após extração com solução de acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> a pH 7,0;  $Al^{3+}$  trocável por titulação após extração com solução de KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; fósforo disponível por colorimetria após extração com extrator Mehlich-1 (EMBRAPA, 1997; EMBRAPA, 2009).

O Carbono orgânico (C) foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado (SILVA *et al.*, 1999). A matéria orgânica (MO) foi estimada através do produto do valor de carbono orgânico por 1,724, considerando que o húmus contém aproximadamente 58% de carbono (EMBRAPA, 1999).

Foram analisados os teores disponíveis dos metais pesados Fe, Mn, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn. Foi realizada com subamostras de 10 cm<sup>3</sup> de solo, utilizando-se 50 ml do extrator Mehlich-1 (EMBRAPA, 1999).

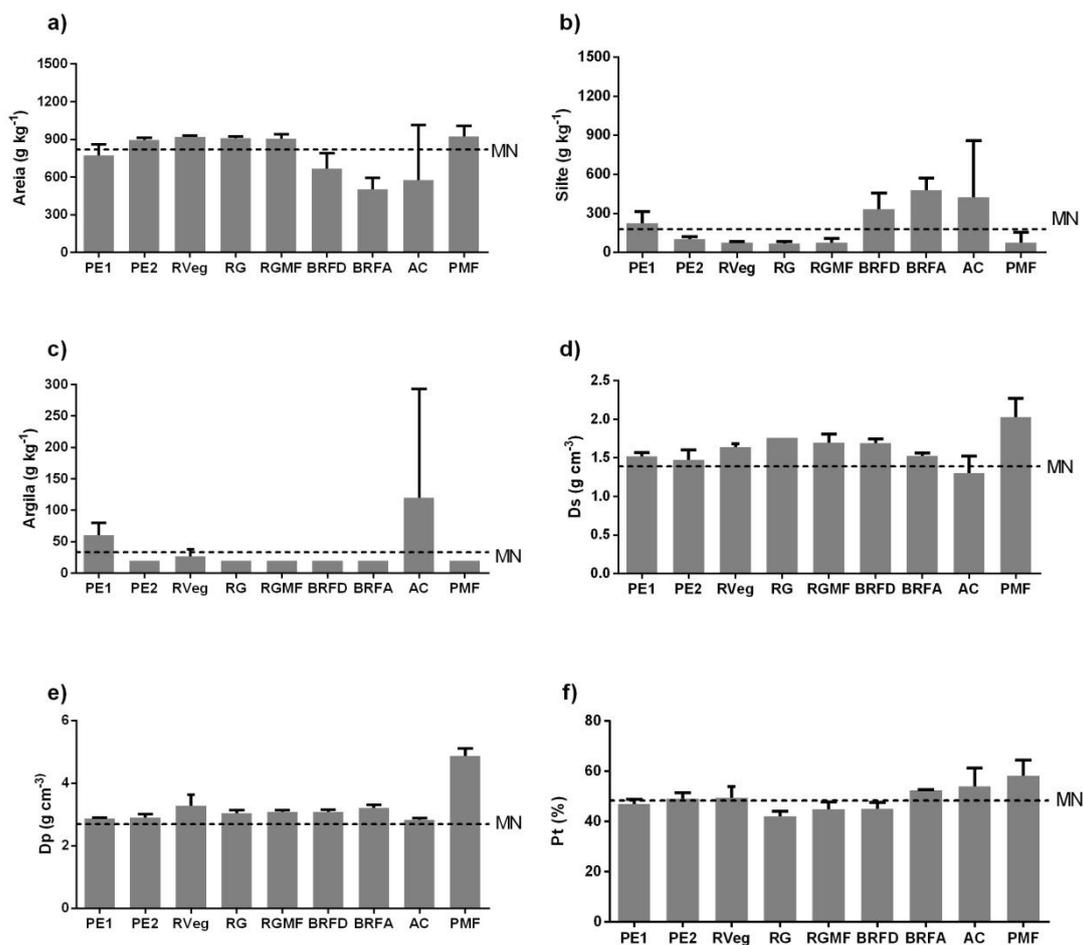
#### **2.4. Análise estatística dos dados**

Procedeu-se pela análise estatística descritiva dos dados dos atributos do solo e dos metais pesados, discriminando as áreas de amostragem na mina e da mata nativa (SAS v.8, 1999). A Correlação Linear de Pearson foi realizada para evidenciar a proporcionalidade entre variáveis do solo e os metais pesados, quando desejado demonstrar e discutir a relação entre elas (SAS v.8, 1999).

Os atributos do solo e os metais pesados foram utilizados para análise de componentes principais (ACP), utilizando o PC-ORD® v.6 (MCCUNE & MEFFORD, 2011).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os solos das áreas estudadas apresentaram predominância da fração granulométrica areia, os maiores teores encontrados foram nos locais: PE1, PE2, RVEG, RG, RGMF e PMF (Figura 2) que possuem valores semelhantes a MN referência de qualidade do solo. O solo das áreas BRFD, BRFA e AC apresentaram texturas que variaram de franco-arenosa a franco-siltosa, nas áreas de pilhas de rejeito fino (Tabela 1). Solo de textura arenosa é comumente encontrado em regiões semiáridas tropicais, uma vez que o clima, caracterizado por altas temperaturas ao longo do ano com pouca chuva, concentradas em apenas três meses do ano, favorece o intemperismo físico em detrimento do intemperismo químico, com isso é comum encontrar na região solos jovens com predominância de minerais primários de tamanho areia. O aumento do teor de areia nas áreas mineradas (Figura 2a) pode ser explicado pela disposição de rejeitos de granulometria grossa e ainda por sua exposição a superfície que concorre para a erosão das áreas mineradas (GUEBERT & GARDNER, 2001), com isso os teores das frações mais finas, silte e argila que possuem papel fundamental na estabilidade dos agregados do solo vão diminuindo, agravando a degradação do solo.



**Figura 2.** Atributos físicos do solo sob mata nativa e das áreas da Mina Brejuí, localizadas em Currais Novos-RN. MN= Mata nativa; PE1= Pilha estéril 1; PE2= Pilha de estéril 2; RVEG= Rejeito com revegetação espontânea; RG= Rejeito grosso; RGMF= Rejeito grosso misturado com rejeito ferroso; BRFD= Barragem de rejeito fino desativada; BRFA= Barragem de rejeito fino ativada; AC= Açude; PMF= Pilha de metal ferroso.

O solo das áreas BRFD e BRFA apresentam teores de areia menores (Figura 2a), uma vez que equivalem a locais de deposição de rejeito fino. O ponto AC (Açude) possui o maior teor de argila com  $120 \text{ g kg}^{-1}$ , esse pequeno reservatório serve como uma bacia natural de sedimentação do local, explicando assim o maior teor de argila. Vale salientar a variabilidade nos teores de argila entre as três repetições coletadas dessa área uma vez que espera-se a mistura de materiais minerais de diferentes granulometrias advindo da erosão das áreas do seu entorno, justificando esse alto valor no desvio padrão nesse ponto (Figura 2b). Os solos da área minerada não apresentaram grandes variações de textura em relação ao ponto de referência de qualidade (MN). Os solos construídos após a mineração tem características herdadas dos materiais geológicos e dos diferentes processos construtivos, bem como os diferentes materiais de deposição da

mina (KÄMPF *et al.*, 1997). Nessa situação, a ocorrência da pedogênese desses locais resultaria em um solo com características texturais próximas a do solo da região, o que facilitaria o processo de recuperação ambiental.

A densidade do solo (Ds), diminuiu na área AC, sendo AC um açude que se encontra a jusante da área de mineração e recebe o aporte de partículas menores, em relação as outras áreas da mineração houve aumento de Ds (Figura 2d). O aumento da Ds em áreas mineradas é esperado devido ao constante tráfego de maquinário pesado durante a abertura da frente de lavra (SHERESTHA & LAL, 2011), somado à remoção de vegetação e sobrecarga das pilhas de rejeito e estéril. O acréscimo nos valores da Ds resulta na má aeração, diminuição de espaços nos poros e da retenção de água e nutrientes, aumento da resistência a penetração de raízes e conseqüentemente da erosão do solo (SEYBOLD *et al.*, 2004). Os valores de Ds elevados estão correlacionados com o aumento do teor de areia nas áreas mineradas, conforme é demonstrado nas correlações positivas verificadas em RVEG ( $r = 0,97^{**}$ ), RG ( $r = 0,96^{**}$ ), RGMF ( $r = 0,89^{*}$ ) e PMF ( $r = 0,90^{*}$ ), o que pode ser resultado da compactação do solo. A vegetação nessas áreas promoveria a estruturação do solo, com a descompactação das camadas superficiais do solo através da ação das raízes, deixando essas camadas menos densas e permeáveis (ZENG *et al.*, 2014). Além disso, a vegetação proporcionaria a proteção do solo contra a erosão hídrica e eólica.

**Tabela 1. Classes texturais do solo das áreas da Mina Brejuí e mata nativa, localizadas município de Currais Novos-RN**

<b>Área</b>	<b>Textura</b>
<b>MN</b>	Areia Franca
<b>PE1</b>	Areia Franca
<b>PE2</b>	Areia
<b>RVEG</b>	Areia
<b>RG</b>	Areia
<b>RGMF</b>	Areia
<b>BRFD</b>	Franco Arenoso
<b>BRFA</b>	Franco Siltoso
<b>AC</b>	Franco Arenoso
<b>PMF</b>	Areia Franca

MN= Mata nativa; PE1= Pilha estéril 1; PE2= Pilha de estéril 2; RVEG= Rejeito com revegetação espontânea; RG= Rejeito grosso; RGMF= Rejeito grosso misturado com rejeito ferroso; BRFD= Barragem de rejeito fino desativada; BRFA= Barragem de rejeito fino ativada; AC= Açude; PMF: Pilha de metal ferroso.

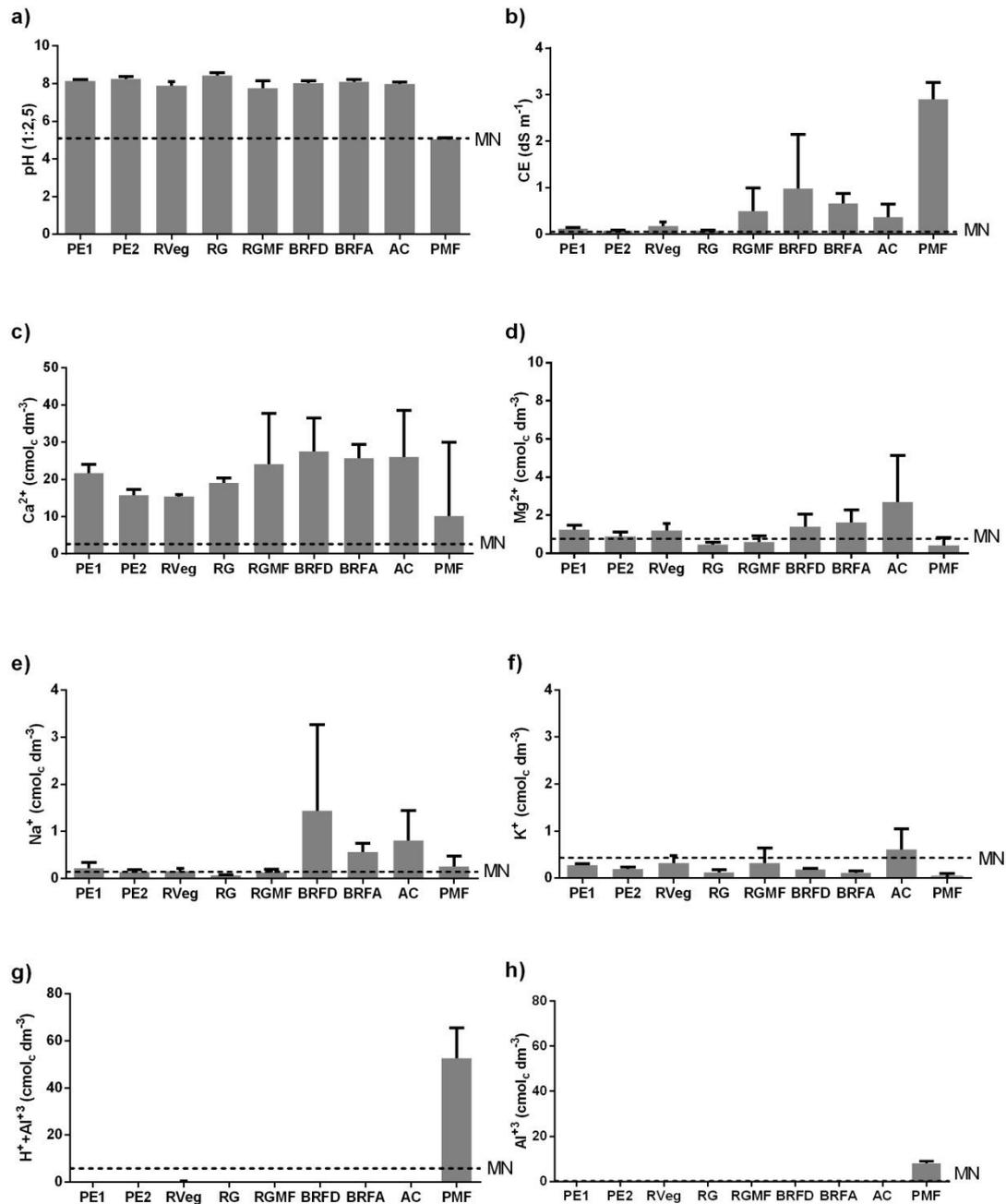
O aumento na Dp dos solos em áreas mineradas (Figura 2e) pode ser explicado pela ausência de matéria orgânica nos resíduos gerados pela mineração e disposto na área e pela baixa cobertura vegetal, a qual contribuiria para o aporte de frações sólidas leves ao solo. No ponto PMF, o aumento do Dp está relacionado à presença de minerais metálicos, pois o mesmo é composto de rejeito advindo do processo de eletroimã.

Conforme esperado, a porosidade total (Pt) reduziu em PE1, RG, RGMF e BRFD (Figura 2f). Essa redução está relacionada com o aumento da Ds nessas áreas, essa relação também foi demonstrada nas correlações, verificadas em PE1 ( $r = -0,88^*$ ), RG ( $r = -0,95^{**}$ ), RGMF ( $r = -0,93^{**}$ ) e BRFD ( $r = -0,85^*$ ). A junção entre redução do volume de poros e aumento da densidade do solo traz dificuldades no crescimento radicular e a modificação das propriedades hidráulicas e de fluxo de nutrientes (KRÜMMELBEIN *et al.*, 2010).

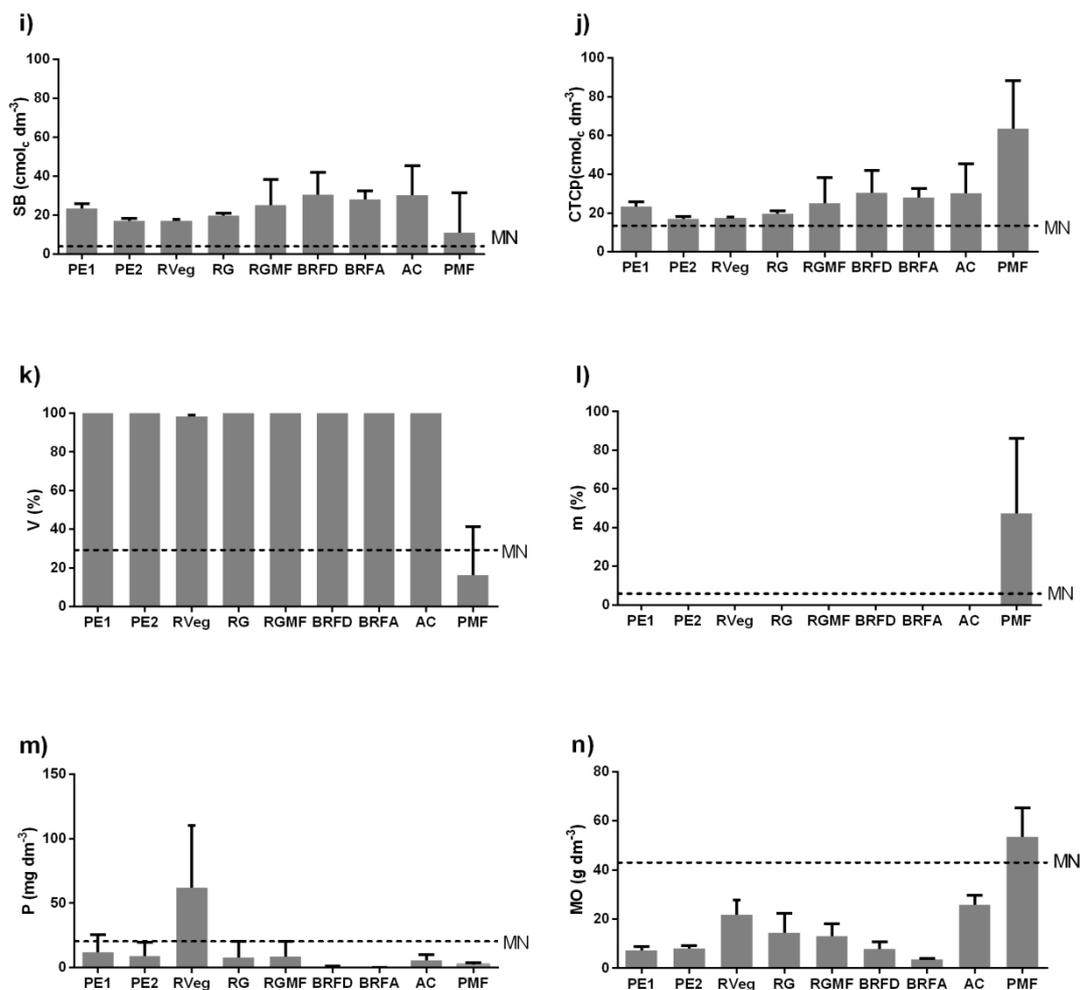
Diante do exposto, as diferenças nos atributos físicos entre a área de referência de qualidade MN e as áreas de influência de mineração (Tabela 1, Figura 2) evidenciam perda de qualidade do solo gerada pelos impactos da atividade de mineração. Com esses impactos, o solo fica suscetível a erosão. A erosão resulta no aporte de contaminantes presentes nas pilhas de rejeito e estéril. Os principais contaminantes encontrados em áreas de mineração são os metais pesados, que tem capacidade de impactar outros componentes da bacia hidrográfica aumentando a área de contaminação. Esses metais pesados são capazes de bioacumular na fauna e flora, representando um grande risco a saúde da população da região (CAI *et al.*, 2015).

Os solos das áreas mineradas apresentaram elevação dos valores de pH em relação a MN, exceto em PMF (Figura 3a). O pH das áreas de influência de mineração tiveram resultados acima de 7,75 caracterizando solos alcalinos. A exposição dos minerais primários presentes nas pilhas de rejeito e estéril explica a alcalinidade do solo, expostos ao ar livre, sem nenhuma medida de contenção após a extração da scheelita, esse minerais ficam mais susceptíveis ao intemperismo, causando a liberação dos sais na solução do solo, contribuindo para o aumento do pH. O íon  $\text{Ca}^{2+}$  teve correlação positiva com pH nas áreas PE1 ( $r = 0,98^{**}$ ), PE2 ( $r = 0,97^{**}$ ), RVEG ( $r = 0,97^{**}$ ), BRFD ( $r = 0,89$ ), BRFA ( $r = 0,96^{**}$ ) e AC ( $r = 0,86$ ), sendo o principal íon que explica o aumento dos valores de pH. A alcalinização do solo afeta negativamente as funções dos microorganismos presentes do solo e na disponibilidade de nutrientes na solução do solo (ZHOU, 2005). Esse impacto acaba por restringir o crescimento da vegetação e recuperação das áreas degradadas.

Os maiores valores de CE foram encontrados nas áreas RGMF, BRFD, BRFA, AC e PMF (Figura 3b). Os valores acrescidos de CE estão relacionados com o aporte de bases trocáveis adicionados ao complexo de troca do solo (NASCIMENTO, 2015). As correlações positivas encontrados entre os íons e CE reforçam essa afirmação. O  $\text{Ca}^{2+}$  apresentou correlação positiva com CE em PE1 ( $r= 0,93^{**}$ ), RG ( $r= 0,81^*$ ), RGMF ( $r= 0,96^{**}$ ), BRFD ( $r= 0,84^*$ ) e BRFA ( $r= 0,97^{**}$ ). O íon  $\text{Mg}^{2+}$  mostrou correlação positiva nas áreas PE1 ( $r= 0,89^*$ ), PE2 ( $r= 0,86^*$ ), RVEG ( $r= 0,96^{**}$ ), BRFD ( $r= 0,96^{**}$ ) e BRFA ( $r= 0,88^*$ ). A área PMF tem valor médio de  $2,91 \text{ dS m}^{-1}$  um aumento de 5820% em relação ao valor médio da mata nativa, esse valor é justificado pela presença de metais que compõe o material retirado nesse ponto. O aumento de CE em RGMF pode ser explicado pela presença de rejeito ferroso no solo, esse rejeito ferroso é descartado após a extração da scheelita utilizando um eletroímã e misturado com as pilhas de rejeito na área RGMF. Nas áreas BRFD, BRFA e AC, o aumento de CE pode evidenciar nesses locais a concentração de sais decorrentes á evaporação da água tanta nas bacias de sedimentação quanto no açude. A correlação positiva com elevado valor de significância entre CE e o íon  $\text{Na}^+$  nos afirma isso nas áreas BRFD ( $r= 0,99^{**}$ ), BRFA ( $r= 0,99^{**}$ ) e AC ( $r= 0,99^{**}$ ). A necessidade da contenção das pilhas de rejeito e estéril é evidente, pois as mesmas são fontes contínuas de sais para outros componentes da bacia hidrográfica.



**Figura 3.** Atributos químicos do solo sob mata nativa e das áreas da Mina Brejuí, localizadas em Currais Novos-RN. MN= Mata nativa; PE1= Pilha estéril 1; PE2= Pilha de estéril 2; RVEG= Rejeito com revegetação espontânea; RG= Rejeito grosso; RGMF= Rejeito grosso misturado com rejeito ferroso; BRFD= Barragem de rejeito fino desativada; BRFA= Barragem de rejeito fino ativada; AC= Açude; PMF= Pilha de metal ferroso.



**Cont. Figura 3.** Atributos químicos do solo sob mata nativa e das áreas da Mina Brejuí, localizadas em Currais Novos-RN. MN= Mata nativa; PE1= Pilha esteril 1; PE2= Pilha de esteril 2; RVEG= Rejeito com revegetação espontânea; RG= Rejeito grosso; RGMF= Rejeito grosso misturado com rejeito ferroso; BRFD= Barragem de rejeito fino desativada; BRFA= Barragem de rejeito fino ativada; AC= Açude; PMF= Pilha de metal ferroso.

O cátion predominante no complexo de troca foi o  $\text{Ca}^{2+}$  (Figura 3c). O  $\text{Ca}^{2+}$  ultrapassou em todos os locais de influência de mineração o valor de referência de qualidade MN. A própria mineralogia da região pode explicar esses valores obtidos de  $\text{Ca}^{2+}$ . A calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) é um mineral predominante na região (PETTA *et al.*, 2014) e ao sofrer intemperismo estaria fornecendo os íons de  $\text{Ca}^{2+}$  para a solução do solo. Os teores de  $\text{Mg}^{2+}$  trocável foram reduzidos em RG e RGMF (Figura 3d). Na área RG encontrou-se correlação negativa entre os teores de areia e de  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r = -0,83^*$ ), reforçando a ideia que a textura arenosa do solo influencia na perda de nutrientes, ainda em relação redução do  $\text{Mg}^{2+}$  a mesma também pode ser explicada pela não reposição

advinda da matéria orgânica nessas áreas. Os teores de  $K^+$  trocável foram menores comparados a referência de qualidade MN em todas as áreas, com exceção de AC (Figura 3f). No que se refere ao íon  $Na^+$  houve um acréscimo nos teores nas áreas BRFD, BRFA e AC (Figura 3e), isso evidencia uma possível salinização desses locais, ocasionada pela evaporação da água, elevando a concentração de sais no solo.

O  $H^+Al^{3+}$  (Figura 3g) ficou abaixo dos valores de mata nativa, com valores chegando a zero, exceto na área PMF que é uma pilha de rejeito que contém valores elevados de metais pesados. Esses valores podem ser justificados pelo pH alcalino encontrado nesses pontos. O  $H^+Al^{3+}$  teve correlação negativa com pH nos pontos PE1 ( $r = -0,92^{**}$ ), PE2 ( $r = -0,92^{**}$ ), RVEG ( $r = -0,91^{**}$ ), RG ( $r = -0,91^{**}$ ), RGMF ( $r = -0,91^{**}$ ), BRFD ( $r = -0,92^{**}$ ), BRFA ( $r = -0,92^{**}$ ) e AC ( $r = -0,92^{**}$ ). Com esses resultados o  $H^+Al^{3+}$  mostrou-se um atributo sensível a degradação, que distingue bem as áreas de influência de mineração com os ambientes naturais. Podendo classificá-lo como um bom indicador da qualidade do solo. Em relação ao  $Al^{3+}$  (Figura 3h) com o aumento do pH ocorre a precipitação do hidróxido de alumínio, ficando o mesmo fora do complexo de troca.

O aumento dos valores de SB (Figura 3i) foi verificado em todas as áreas, decorrente principalmente do incremento de  $Ca^{2+}$  (Figura 3c). O  $Ca^{2+}$  apresentou correlação positiva em relação a SB em todos os pontos com valores de  $r = 0,99^{**}$ . Porém é necessário chamar atenção que esses valores elevados de SB não podem ocultar a diminuição dos íons  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  e  $K^+$  em alguns pontos (Figura 3d, 3e, 3f). Essas bases trocáveis estão sendo perdidas em solução, devido a textura arenosa apresentada nesse solo.

Os valores de CTCp (Figura 3j) não se diferenciam de SB pois os valores de  $H^+Al^{3+}$  e  $Al^{3+}$  (Figura 3g, 3h) foram zero. O atributo V (Figura 3k) também foi influenciado pelos valores de  $H^+Al^{3+}$ , onde o valor de CTCp é igual a SB resultando valores de  $V > 50\%$  nas áreas PE1, PE2, RVEG, RG, RGMF, BRFD, BRFA e AC os caracterizando como solos eutróficos. Os valores de saturação por alumínio (m) foram influenciados pelo atributo  $Al^{3+}$  (Figura 3h), resultando em valores igual a zero nas áreas PE1, PE2, RVEG, RG, RGMF, BRFD, BRFA e AC (Figura 3l), que são categorizados como solos não álicos.

O P disponível aumentou na área RVEG em relação a MN (Figura 3m), a pilha de rejeito desse ponto é antiga que remota da produção da década de 50, nesse local encontra-se vegetação que cresceu espontaneamente ao longo dos anos. O grande

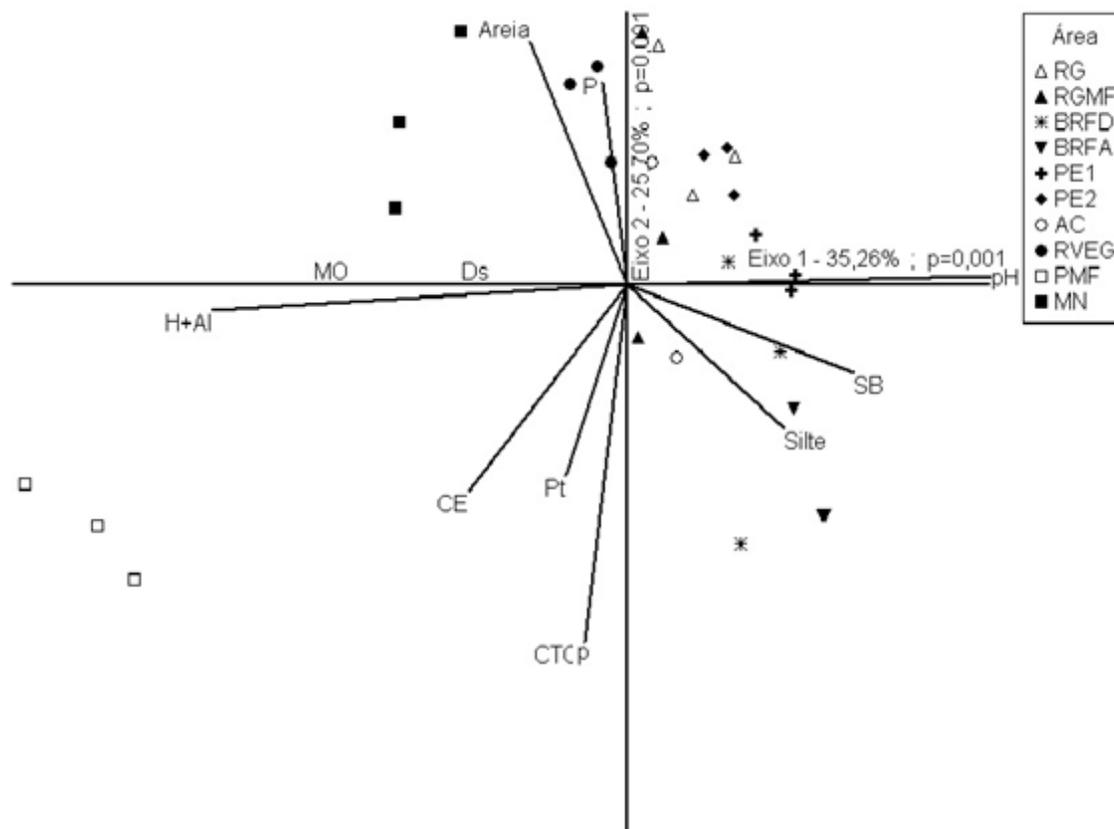
período de exposição desse rejeito ao intemperismo físico e químico pode explicar a disponibilização do P no solo. Nos demais pontos houve redução do P disponível, este baixo nível de P no solo pode prejudicar o desenvolvimento da vegetação, assim como o processo de recuperação do solo, pois a deficiência de P é fator limitante para a produção primária nas regiões tropicais e subtropicais (RAMAEKERS et al., 2010).

Houve redução nos valores de matéria orgânica (MO) (Figura 3n) em todas as áreas de mineração em comparação ao ponto de referência de qualidade MN, com exceção da área PMF pois o carbono presente nesse rejeito é de origem inorgânico. Esses valores são esperados em áreas de deposição de rejeito e estéril (NASCIMENTO, 2015). Essa diminuição acontece devido à falta ou pouca vegetação no local e, conseqüentemente a reposição de serrapilheira não acontece, a qual corresponde à principal fonte de MO para o solo. Essa queda dos teores de MO resultam na diminuição da qualidade do solo, como perda da sua estrutura, diminuição da retenção de água e nutrientes e em consequência disso, aumento da susceptibilidade do solo à erosão (FROUZ *et al.*, 2007).

A análise de componentes principais (PCA) dos atributos físicos e químicos dos solos de mata nativa e das áreas de mineração (Figura 4), utilizando 12 variáveis explicou 60,96% da variabilidade dos dados nos dois eixos analisados (eixo 1: 35,26%,  $p=0,001$  e eixo 2: 25,70%,  $p=0,001$ ). As variáveis mais importantes para a ordenação do primeiro eixo foram  $H^+ + Al^3$  (-0,94), pH (0,88), MO (-0,77), SB (0,69), e Silte (0,58). E para o segundo eixo as variáveis mais importantes foram CTCp (-0,85), Areia (0,70), CE (0,65), P (0,64) e Pt (-0,62).

Analisando o gráfico da PCA se percebe que algumas áreas se conglomeraram em relação aos atributos físicos e químicos: as áreas PE1, PE2, RVEG, RG e RGMF formam um grupo que está mais próximo da área de referência de qualidade MN, essa aproximação pode ser explicada pelo teor de areia que os locais apresentaram com texturas arenosas semelhantes, além dos teores de areia essas áreas também estão associadas com valores de P disponível. O outro grupo formado é das áreas BRFD, BRFA e AC essas áreas recebem materiais com características mais finas predominando a fração silte no solo, caracterizando um local de aporte desses atributos. Essas áreas estão relacionadas a maiores valores de SB. A área PMF mostrou que é composto de um material com potencial de degradação elevado, pois o mesmo está relacionado aos maiores valores de Ds, CE, e acidez potencial. Sendo a área que mais se distanciou dos

valores de referência de qualidade e das outras áreas no geral. O atributo MO com correlação ao primeiro eixo (-0,77) está mais próximo da área PMF, porém esse resultado é justificado pelo carbono inorgânico presente nesse rejeito.



**Figura 4.** Análise de Componentes Principais dos atributos físicos e químicos do solo de mata nativa e das áreas da Mina Brejuí em Currais Novos/RN. Legenda: áreas de estudo: MN= Mata nativa; PE1= Pilha esteril 1; PE2= Pilha de esteril 2; RVEG= Rejeito com revegetação espontânea; RG= Rejeito grosso; RGMF= Rejeito grosso misturado com rejeito ferroso; BRFD= Barragem de rejeito fino desativada; BRFA= Barragem de rejeito fino ativada; AC= Açude; PMF= Pilha de metal ferroso. Variáveis: Ds= Densidade do solo; Pt= porosidade total; pH= potencial hidrogeniônico; SB= Soma de Bases; P= fósforo disponível; CE= condutividade elétrica; CTCp=capacidade de troca catiônica potencial; MO= matéria orgânica; H+Al= acidez potencial  $H^+ + Al^{3+}$ .

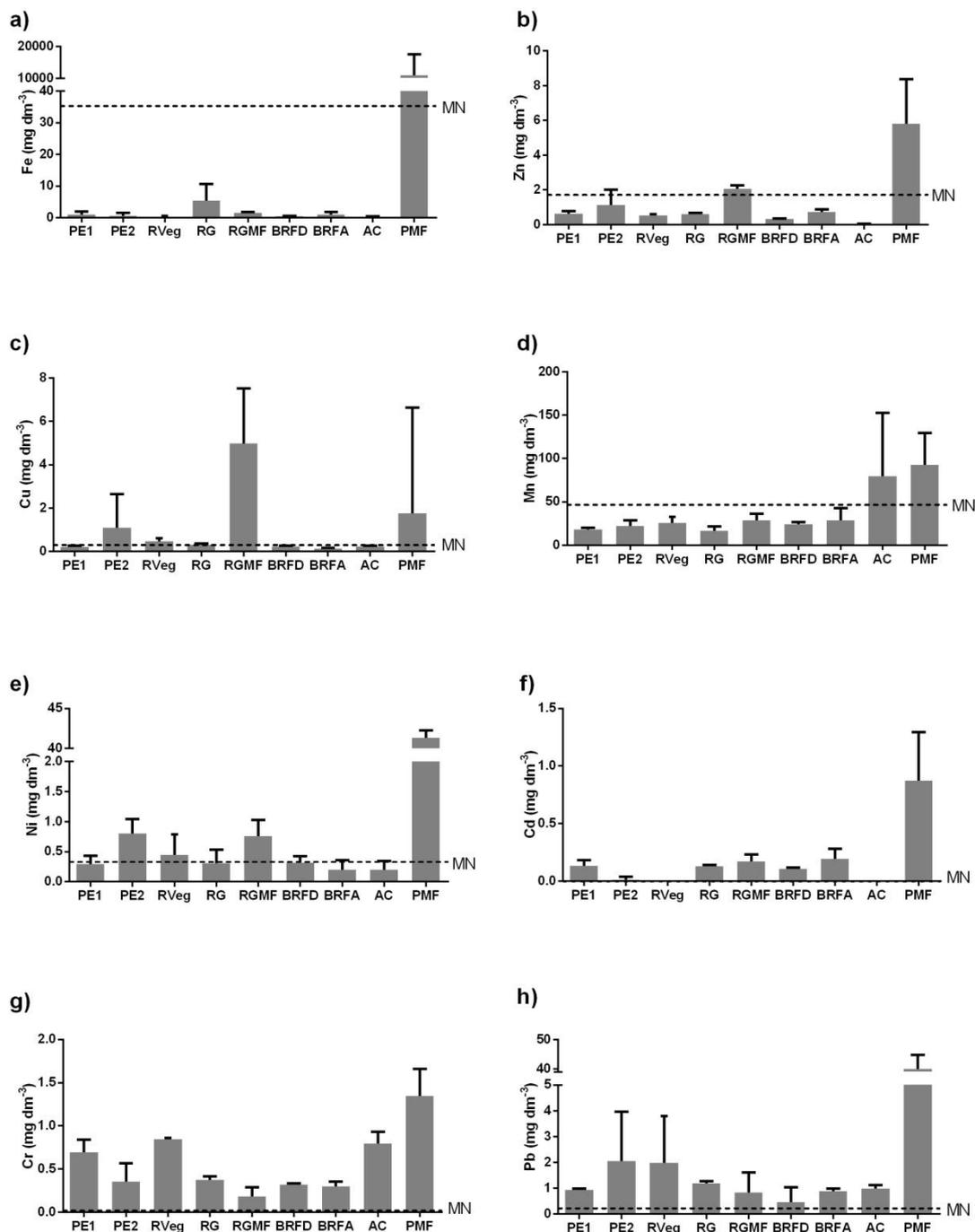
O pH alcalino com correlação no primeiro eixo (0,88) está relacionado a todas as áreas de mineração, sendo um atributo sensível a alterações, podendo ser utilizado em monitoramento das áreas degradadas em área de mineração.

Além do pH as alterações nos valores de Ds, Dp, CE, CTCp e o aporte de sais minerais na solução do solo e a redução de Pt e MO mostram a perda de qualidade do solo nas áreas mineradas em relação a área MN.

As áreas RVEG, RG, RGMF ficaram próximas a área MN o que pode passar a falsa impressão que essas áreas se aproximam dos valores de referência de qualidade. Isso acontece pelo motivo dos solos do semiárido serem jovens e naturalmente frágeis com pouca estrutura e susceptíveis a erosão, dando impressão que os solos dessas áreas de mineração tenham o mesmo grau de qualidade do solo de mata nativa. Isso pode ser um problema para detecção de ambientes degradados em solos da região semiárida, sendo necessária uma maior atenção com critérios mais rigorosos para o manejo e recuperação dessas áreas.

Com os solos estruturalmente frágeis e susceptíveis a erosão. Os contaminantes presentes nas pilhas de rejeito e estéril, como os metais pesados, podem ser levados a outros componentes da bacia hidrográfica. A mineração é a principal fonte de contaminação por metais pesados no ambiente entre as atividades antrópicas (ZHUANG *et al.*, 2009; LI *et al.*, 2014). A difusão dos contaminantes de metal pesado no ambiente é feito através de poeira, lixiviação em água subterrânea e escoamento superficial, podendo contaminar o abastecimento de água potável e também bioacumular no gado e culturas de subsistência (DONTALA *et al.*, 2015).

Em relação aos valores de metais disponíveis a área PMF obteve os maiores valores para todos os metais analisados (Figura 5), esse rejeito é obtido após a scheelita passar pelo eletroímã com objetivo de retirar as impurezas presentes no material minerado. Isso é preocupante, pois esse rejeito com altos teores de metais disponíveis principalmente o de Fe que chega a  $10000 \text{ mg dm}^{-3}$  está sendo misturado com outros rejeitos encontrados na área de mineração, assim aumentando a área de contaminação por esse material.



**Figura 5.** Teores disponíveis de metais pesados Fe (Ferro), Zn (Zinco), Cu (Cobre), Mn (Manganês), Ni (Níquel), Cd (Cádmio), Cr (Cromo), e Pb (Chumbo) do solo sob mata nativa e das áreas da Mina Brejuí, localizadas em Currais Novos-RN. MN= Mata nativa; PE1= Pilha estéril 1; PE2= Pilha de estéril 2; RVEG= Rejeito com revegetação espontânea; RG= Rejeito grosso; RGMF= Rejeito grosso misturado com rejeito ferroso; BRFD= Barragem de rejeito fino desativada; BRFA= Barragem de rejeito fino ativada; AC= Açude; PMF= Pilha de metal ferroso.

Os valores de Fe nas áreas de mineração estiveram abaixo dos valores de MN (Figura 5a), apenas na área PMF esse valor de referência foi superado, pois como já foi

apresentado é um rejeito com alto teor de ferro. O Zn ultrapassou os valores de referência de qualidade em PE2, RGMF e PMF (Figura 5b). O Cu nas áreas PE2, RVeg, RGMF e PMF foram maiores que na área MN (Figura 5c). Os teores de Mn só ultrapassaram os valores de referência nas áreas AC e PMF (Figura 5d). Já o Ni teve aumento nos seus teores em todas as áreas de mineração em comparação com MN (Figura 5e), mesmo esse aumento sendo sucinto em alguns pontos.

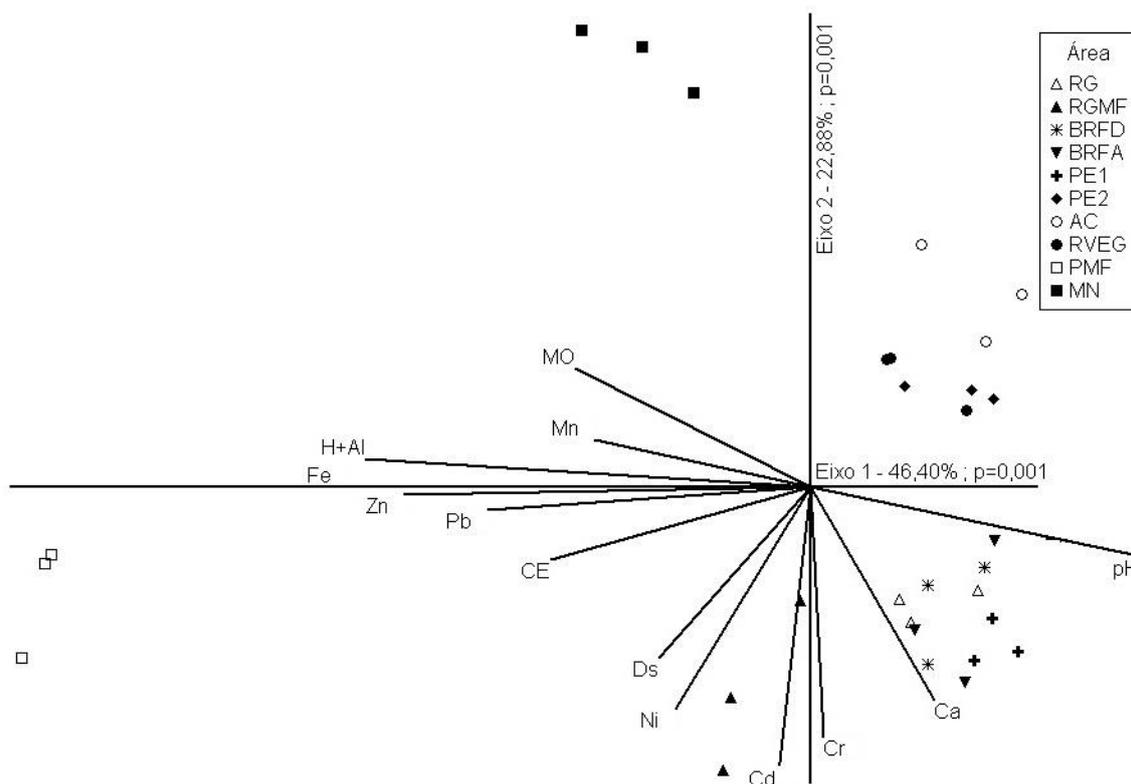
O valores de Cd nas áreas PE2, AC, RVeg e MN foram zero, diferente das áreas PE1, RG, RGMF, BRFD, BRFA e PMF que ultrapassaram os valores de referência de qualidade (Figura 5f). O Cd mesmo em baixas concentrações é tóxico, afetando o metabolismo das plantas (GUIMARÃES *et al.*, 2008). Os teores de Cr e Pb foram maiores do que MN em todos os pontos de coleta da mineração (Figura 5g e 5h). Alguns íons metálicos têm funções vitais no organismo humano, como Fe, Zn, Cu e etc. Outros em baixas concentrações já são tóxicos aos seres humanos. Esses metais pesados têm a capacidade de bioacumular ao longo da cadeia trófica causando malefícios aos seres vivos (MARENGONI *et al.*, 2013). Esses metais contaminam a fauna e flora da região, não sendo apenas um problema ambiental, mas também um problema de saúde pública. O consumo de alimentos presentes em solos contaminados é responsável pelo aumento dos níveis de metais no sangue da população que vive perto das minas (LIU *et al.*, 2010; JI *et al.*, 2013).

Os altos índices de metais pesados presente no solo, ultrapassando valores de referência de qualidade do estado do Rio Grande do Norte (VRQs) e os valores de referência de qualidade da região da área MN, mostram o impacto gerado pela mineração no local. Utilizando os VRQs do estado do RN (PRESTON *et al.*, 2014) (Anexo 1). As áreas RGMF, BRFA e PMF ultrapassaram os valores permitidos do metal Cd nos solos do RN. A área PMF ainda ultrapassou os VRQs de Ni e Pb. O chumbo e o Cádmio são considerados potenciais agentes causadores de câncer e estão associadas com a etiologia de várias doenças, especialmente cardiovascular, da bexiga, rins, fígado, sistema nervoso, sanguíneo, bem como doenças ósseas (JARUP, 2003). Vale ressaltar que os valores obtidos para a área da mineração Brejuí são apenas para metais disponíveis no solo e os VRQs são dados em valores de metais totais. Isso quer dizer que na área de mineração os teores de metais já conseguiram ultrapassar os valores de referência de qualidade apenas na parcela dos metais solúveis no solo, sem considerar a fonte potencial presente nos minerais primários.

O pH foi um atributo que teve correlação negativa com alguns dos metais disponíveis. Com o Fe ele apresentou correlação negativa em todos os pontos com alta significância com o coeficiente de correlação acima de  $r = -0,92^{**}$ . Em Zn as correlações foram: PE1 ( $r = -0,85^*$ ), RVEG ( $r = -0,88^*$ ), RG ( $r = -0,86^*$ ), BRFD ( $r = -0,91^{**}$ ), BRFA ( $r = -0,88^*$ ) e AC ( $r = -0,94^{**}$ ). O Cu apresentou correlação negativa com o pH apenas na área BRFA ( $r = -0,96^{**}$ ). Já metal Mn teve correlação negativa PE1 ( $r = -0,83^*$ ) e RG ( $r = -0,83^*$ ). Essa correlação é esperada já que as áreas mineradas apresentaram pH alcalino. Os valores de pH alcalinos afetam a disponibilidade dos metais e sua solubilidade na solução do solo (GRUBA *et al.*, 2013).

Mesmo com os valores de pH que não condizem com os valores de referência de qualidade em MN (Figura 3). Esses resultados são benéficos para o meio ambiente, pois o pH alcalino está afetando a disponibilidade dos metais pesados presentes no solo.

Em relação aos metais disponíveis e os atributos sensíveis do solo de mineração a análise de componentes principais (PCA) dos solos de mata nativa e das áreas de mineração, explicou 69,29% da variabilidade dos dados nos dois eixos analisados (eixo 1: 46,41%,  $p = 0,001$  e eixo 2: 22,88%,  $p = 0,001$ ) dessa vez utilizando 14 variáveis (Figura 6). Das variáveis analisadas que demonstraram maior importância para a ordenação do primeiro eixo foram Fe (-0,96),  $H^+ + Al^3$  (-0,94), Zn (-0,90), pH (0,86), Pb (-0,80), CE (-0,72), MO (-0,69) e Mn (-0,66). Já para o segundo eixo as variáveis mais importantes foram Cd (-0,79), Cr (-0,71), Ni (-0,67),  $Ca^{2+}$  (-0,66) e Ds (-0,59).



**Figura 6.** PCA dos metais disponíveis e atributos do solo de mata nativa e das áreas da Mina Brejuí em Currais Novos/RN. Legenda: MN= Mata nativa; PE1= Pilha estéril 1; PE2= Pilha de estéril 2; RVEG= Rejeito com revegetação espontânea; RG= Rejeito grosso; RGMF= Rejeito grosso misturado com rejeito ferroso; BRFD= Barragem de rejeito fino desativada; BRFA= Barragem de rejeito fino ativada; AC= Açude; PMF= Pilha de metal ferroso; Fe= Ferro; Zn= Zinco; Cu= Cobre; Mn= Manganês; Ni= Níquel; Cd= Cádmio; Cr= Cromo; Pb= Chumbo; Ds= Densidade do solo; pH= potencial hidrogeniônico; CE= condutividade elétrica; MO= matéria orgânica; Ca= cálcio trocável  $\text{Ca}^{2+}$ ; H+Al= acidez potencial  $\text{H}^{+}+\text{Al}^{3}$ .

A PCA dos metais disponíveis juntamente com os atributos sensíveis a degradação do solo na área de mineração mostrou como as áreas de mineração se diferenciam da área de referência de qualidade MN, evidenciando o enriquecimento das áreas mineradas por metais pesados, advindos do aporte desses elementos a partir das pilhas de rejeito e estéril. O único atributo que se aproxima da área de mata nativa é a MO, os outros atributos estão bem distantes e correlacionados com as áreas de mineração.

A PCA deixa bem evidente a formação de grupos das áreas de mineração. Pode se notar a formação de três grupos. O primeiro composto por PE2, RVEG e AC, o segundo por PE1, RG, RGMF, BRFD e BRFA e o último composto apenas por PMF. O primeiro grupamento de áreas é composto por PE2, RVEG e AC que está mais próximo da referência de qualidade MN. O ponto RVEG já possui vegetação que cresceu

espontaneamente no local, essa vegetação de alguma maneira está melhorando a qualidade do solo. Já a área PE2 que têm características semelhantes com o PE1 está à montante dos outros pontos, sofrendo menos erosão do que PE1 que se encontra na drenagem natural da mineração. A área AC mesmo estando à jusante da mineração não apresentou valores elevados de metais.

O segundo grupamento formado pelas áreas PE1, RG, RGMF, BRFD e BRFA estão próximos dos metais pesados e mais distantes da área de referência de qualidade MN. Entre essas áreas destaca-se RGMF que é um rejeito misturado com o mesmo material que compõe PMF, esse ponto apresenta correlação com os metais Ni, Cd e Cr. Isso mostra que a mistura desse material ferroso alterou os valores de metais pesados para a área RGMF. Ainda nas áreas PE1, RG, RGMF, BRFD e BRFA, estas estão próximas do  $\text{Ca}^{2+}$  que tem correlação com o pH um atributo que distingue bem todas as áreas de mineração em relação a área de referência de qualidade. O último grupamento formado apenas por PMF se afirma como o rejeito com maior potencial de degradação, com os valores de metais elevados, maior Ds e elevada CE.

Com o agrupamento de pontos pode-se criar uma gradiente de degradação considerando os valores de metais pesados disponíveis e os atributos do solo, ordenando da área com maior degradação a área menos degradada. Este gradiente de degradação fica da seguinte maneira  $\text{PMF} > \text{RGMF} > \text{RG} > \text{BRFD} > \text{BRFA} > \text{PE1} > \text{PE2} > \text{AC} > \text{RVEG}$ . Sendo o ponto PMF o que mais se diferencia dos valores de referência de qualidade em MN e sendo RVEG o que mais se aproxima, reforçando que a revegetação desses locais é uma boa opção para controlar e recuperar as áreas degradadas por mineração.

É notado que a má disposição das pilhas de rejeito e estéril na Mina Brejuí causou alterações nos atributos químicos e físicos e na disponibilidade de metais pesados nos solos das áreas de mineração. Esses ambientes não conseguiram se recuperar naturalmente, necessitando da intervenção humana. Minas com décadas de desativação ainda contêm em seus resíduos, grandes quantidades de metais, que ainda podem ser liberados ao ambiente (PERLATTI *et al.*, 2014), sendo um passivo ambiental até os dias de hoje. As medidas de recuperação requerem o conhecimento sobre a magnitude dos impactos gerados no solo, para que seja possível a tomada de decisões cabíveis para recuperação da área, sendo essas medidas voltadas para a reestruturação do solo e contenção da contaminação por metais no ambiente. A falta de medidas de controle da poluição e de recuperação na mina Brejuí, resultou em um cenário de degradação e redução da qualidade do solo presentes nesse estudo.

Os resultados apontam a necessidade intervenção na reestruturação do solo e na adição de MO no mesmo, para que os teores de matéria orgânica fiquem próximos aos valores de referência de MN. A ausência de medidas de contenção de erosão na mina pode ampliar as áreas de influência da mineração, causando impactos nos outros componentes da bacia hidrográfica. A revegetação dessas áreas é uma medida eficaz na recuperação dessas locais, pois a mesma minimiza a ação da erosão e traz o restabelecimento do ciclo da MO que também acidifica o solo. Além de reestruturar o solo deve-se buscar por espécies de vegetação que sejam capazes de impedir a disponibilização dos metais pesados, sendo capazes de remediar essas áreas. A fitoestabilização é um exemplo, sendo ela uma tecnologia de menor custo e menos impactante ao ambiente capazes de conter a contaminação dos metais pesados no solo (ANDRADE *et al.*, 2009).

Outras medidas cabíveis para impedir o aporte de metais na bacia hidrográfica é a criação de barragens ou diques que contenham o rejeito na área de mineração. É importante também buscar formas de reutilizar esse rejeito como forma de mitigar esse passivo ambiental. Quando não existir mais formas de reaproveitamento desses rejeitos e estéreis é aconselhável que esses materiais sejam dispostos em cavas impermeabilizadas. Essa disposição final conteria a contaminação e facilitaria na recuperação das áreas degradadas por mineração.

Pesquisas futuros são necessários devido a abrangência do estudo, recomenda-se o estudo da flora, teores de metais totais e perda de solo das áreas mineradas. O monitoramento contínuo da qualidade do solo após as ações de recuperação é de grande importância até que solo tenha condições de se manter sua qualidade pelos seus próprios meios.

#### 4. CONCLUSÃO

- A mineração de scheelita provoca alterações nos atributos físicos e químicos que concorrem para perdas de qualidade do solo, sendo a maior preocupação os teores de metais pesados;
- Os atributos Ds, MO,  $\text{Ca}^{2+}$ , CE, pH e acidez potencial são os mais sensíveis na distinção entre as áreas mineradas e a natural, e podem ser utilizados em programas de monitoramento ambiental. Os metais Cd, Ni e Pb estão sendo disponibilizados a partir das pilhas de rejeito ultrapassando os Valores de Referência de Qualidade do Solo do Estado do Rio Grande Norte;
- A compactação, salinização, redução dos teores de matéria orgânica e contaminação por metais pesados são os processos de degradação do solo mais
- É necessário a elaboração de um plano de gestão e recuperação da área minerada visando a disposição adequada dos resíduos, com ênfase á pilha de rejeitos ferrosos, e a mitigação dos processos de degradação evidenciados no presente estudo.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, M. G.; MELO, V. F.; GABARDO, J.; SOUZA, L. C. P.; REISSMANN, C. B. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo: I - fitoextração. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, v. 33, p. 1879-1888, 2009.

ASENSIO V.; VEGA F. A.; SINGH B. R.; COVELO E. F. Effects of tree vegetation and waste amendments on the fractionation of Cu, Cr, Ni, Pb and Zn in polluted mine soils. *Science of The Total Environment*, v. 443, p. 446–53, 2013.

BURGOS, P.; MADEJÓN, P.; MADEJÓN, E.; GIRÓN, I.; CABRERA, F.; MURILLO, J. M. Natural remediation of an unremediated soil twelve years after a mine accident: Trace element mobility and plant composition. *Journal of Environmental Management*, v.114, p.36-45, 2013.

CAI, L.M.; Xu, Z. C.; Qi, J.Y.; FENG, Z.Z.; XIANG, T. S. Assessment of exposure to heavy metals and health risks among residents near Tonglushan mine in Hubei, China. *Chemosphere*, v. 127, p. 127-135, 2015.

CARVALHO, E. B.; Lima, R. F. S.; Petta, R. A., Paulo, J. B. A., Souza, L. C. Caracterização de Rejeitos Provenientes da Usina de Beneficiamento do Minério da Mina Brejuí/RN. XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Recife, 2002, vol. 1, p.75.

CIMINELLI, V. S. T. Hidrometalurgia. In: FERNANDES, F. R. C; MATTOS, G. M. M.; CASTILHOS, Z. C.; LUZ, A. B. Tendências tecnológicas Brasil 2015 – *Geociências e tecnologia mineral*. CETEM/MCT, , p. 157, Rio de Janeiro, 2007.

DONTALA, S.; REDDY, T; VADDE, R. Environmental Aspects and Impacts its Mitigation Measures of Corporate Coal Mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, v.11, p. 2 – 7, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Rio de Janeiro, 2013. 353p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2ª ed. rev. ampl. – Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Levantamento Exploratório-Reconhecimento dos solos do Rio Grande do Norte. Recife: Convênio de Mapeamento de Solos MA/DNPEA-SUDENE/DRN, 1971. 536p.

FROUZ, J.; PRACH, K.; PIŽL, V.; HÁNĚL, L.; STARÝ, J.; TAJOVSKÝ, K.; MATERNA, J.; BALÍK, V.; KALČÍK, J.; ŘEHOUNKOVÁ, K. Interactions between soil development, vegetation and soil fauna during spontaneous succession in post mining sites. *European Journal of Soil Biology*, v.44, p.109-121, 2008.

FROUZ, J.; ELHOTTOVÁ, D.; PIŽL, V.; TAJOVSKÝ, K.; ŠOURKOVÁ, M.; PICEK, T.; MALÝ, S. The effect of litter quality and soil faunal composition on organic matter dynamics in post-mining soil: A laboratory study. *Applied Soil Ecology*, v.37, p.72-80, 2007.

GODEIRO, M. L. S.; BORGES, J. P.; FERNANDES, B. R., LEITE, J.Y. Caracterização do Pré-concentrado do rejeito da scheelita da mina Brejuí em concentrador centrífugo. *Holos*, Vol. 5, Ano 26, p. 81 – 90, 2010.

GRUBA, P.; MULDER, J.; BROZEK, S. Modelling the pH dependency of dissolved calcium and aluminium in O, A and B horizons of acid forest soils. *Geoderma*, v. 206, pag. 85-91, 2013.

GUEBERT, M.D. & GARDNER, T.W. Macropore flow on a reclaimed surface mine: Infiltration and hillslope hydrology. *Geomorphology*, v. 39, pag. 151-169, 2001.

GUIMARÃES, M.A. ; SANTANA, T. ; Silva, E.V. ; ZENZEN, I. L. ; LOUREIRO, M. E. . Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. *Revista Trópica - Ciências Agrárias e Biológicas*, v. 02, p. 56-66, 2008.

JARUP, L. Hazards of heavy metal contamination. *Brit. Med. Bull.* v. 68, pag. 167–182, 2003.

JI, K.; KIM, J.; LEE, M.J.; PARK, S.; KWON, H.J.; CHEONG, H.K.; JANG, J.Y.; SIM, D.S.; YU, S.; KIM, Y.W.; LEE, K.Y.; YANG, S.O.; JHUNG, W.H.; YANG, W.H.; PAK, D.H.; HONG, Y.C.; CHOI, K. Assessment of exposure to heavy metals and health risks among residents near abandoned metal mines in Goseong, Korea. *Environ. Pollut.* v. 178, pag. 322–328. 2013.

KÄMPF, N.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E. Propriedades, pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na Bacia Carbonífera do Baixo Jacuí. *Revista Bras. Ci. Solo*, v. 21, pag. 79-88, 1997.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, v.15, p.259-263, 2006.

KRÜMMELBEIN, J.; HORN, R.; RAAB, T.; BENS, O.; HÜTTL, R. F. Soil physical parameters of a recently established agricultural recultivation site after brown coal mining in Eastern Germany. *Soil e Tillage Research*, v.111, p.19–25, 2010.

LINHARES, A. S. ; SILVA, B. T. A. . APLICAÇÃO DO REJEITO DA SCHEELITA EM CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiania, 2014.

LI, Z.Y.; MA, Z.W.; KUIJP, T.J.; YUAN, Z.; HUANG, L. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment. *Sci. Total Environ.* v. 468– 469, pag. 843–853, 2014.

LIU, C.P.; LUO, C.L.; GAO, Y.; LI, F.L.; LIN, L.W.; WU, C.A.; LI, X. D. Arsenic contamination and potential health risk implications at an abandoned tungsten mine, southern China. *Environ. Pollut.* v.158, pag. 820–826, 2010.

MARENGONI, N. G.; KLOSOWSKI, E. S. ; OLIVEIRA, K. P. ; CHAMBO, A.P.S. ; GONÇALVES JUNIOR, A. C. Bioacumulação de metais pesados e nutrientes no mexilhão dourado do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional. *Química Nova* (Impresso), v. 36, p. 359-363, 2013.

MCCUNE, B.; MEFFORD, M. J. PC-ORD: Multivariate analysis of ecological data, version 6.0. MjM Software Design, Oregon, 2011.

NASCIMENTO, A.R.V.J. Atributos físicos e químicos de áreas degradadas pela mineração de scheelita na região tropical semiárida. 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária - PPGES, Natal. 2015.

NETO, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; ALMEIDA, J. A.; MAFRA, A. L.; MEDEIROS, J. C.; ALBERTON, A. Atributos físicos do solo em área de mineração de carvão influenciados pela correção da acidez, adubação orgânica e revegetação. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, p. 1379-1388, 2008.

PERLATTI, F.; OTERO, X. L.; MACIAS, F. FERREIRA, T.O. Geochemical speciation and dynamic of copper in tropical semi-arid soils exposed to metal-bearing mine wastes. *Science of the Total Environment*, v. 500-501, p. 91-102, 2014.

PETTA, R. A.; SINDERN, S.; SOUZA, R. F.; CAMPOS, T. F. C. Influence of mining activity on the downstream sediments of scheelite mines in Currais Novos (NE Brazil). *Environmental Earth Sciences*, v.72, p.1843:1852, 2014.

PRESTON, W. ; NASCIMENTO, C. W. A. ; BIONDI, C. M. ; SOUZA JUNIOR, V. S. ; SILVA, W. R. ; FERREIRA, H. A. . Valores de referência de qualidade para metais

pesados em solos do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 1028-1037, n. 2014.

RAMAEKERS, L.; REMANS, R.; RAO, I. M.; BLAIR, M. W.; VANDERLEYDEN, J. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. *Field Crops Research*, v.117, p.169–176, 2010.

SAS Institute. Statistical analysis system: Procedure guide for personal computer. Version8. Cary, 1999.

SEYBOLD, C.A., GROSSMAN, R.B., SINCLAIR, H.R., McWILLIAMS, K.M., STRUBEN, G.R., WADE, S.L., 2004. Evaluating soil quality on reclaimed coal mine soils in Indiana. Proceedings of the 2004 National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation and The 25th West Virginia Surface Mine Drainage Task Force, April 18 24, 2004. *American Society of Mining and Reclamation*, Lexington, KY, pp. 1644 1663.

SILVA, A. C.; TORRADO, P. V.; ABREU JUNIOR, J. S. Métodos de quantificação da matéria orgânica do solo. R. Universidade José do Rosário Vellano. *Alfenas*, v.5, p. 21-26, 1999.

SHRESTHA, R.; LAL, R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. *Geoderma*, v. 161, p. 168-176, 2011.

SOUSA, R. R. A. B. F; CAMELO, G. L. P. Influência da gestão de uma empresa na alavancagem das exportações: estudo de caso na Mina Brejuí. *Observatório de Monografias em Comércio Exterior*, v.1, p.135-142, 2008.

ZENG, X.; ZHANG, W.; CAO, J.; LIU, X.; SHEN, H.; ZHAO, X. Changes in soil organic carbon, nitrogen, phosphorus, and bulk density after afforestation of the “Beijing–Tianjin Sandstorm Source Control” program in China. *Catena*, v.118, p.186–194, 2014.

ZHOU, Q. X. Health Soil Science: Soil Health Quality and Safety of Agricultural Products (in Chinese). *Science Press*, Beijing, pag. 375, 2005.

ZHUANG, P.; ZOU, B.; LI, N.Y.; LI, ZA. Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in Guangdong, China: implication for human health. *Environ. Geochem. Health*. v. 31, pag. 707–715, 2009.

## 6. ANEXO

Anexo 1 – Valores de referência de qualidade (VRQs) estabelecidos por Preston *et al.* (2014) para o Estado do Rio Grande do Norte.

	Ag	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Sb	V	Zn
	————— mg kg <sup>-1</sup> —————										
VRQ	0,88	58,91	0,10	15,41	30,94	13,69	19,84	16,18	0,18	28,71	23,85

## 7. APÊNDICE



**Foto 1:** Pilhas de estéril com visíveis sinais de erosão encontrada na área de mineração de scheelita. Localizada na mina Brejuí Currais Novos-RN.



**Foto 2:** Pilhas de estéril, ao lado da entrada principal dos túneis da mina Brejuí em Currais Novos-RN.



**Foto 3:** Pilha de rejeito muito antiga, que está com clara evidência de revegetação espontânea. Localizada na mina Brejuí em Currais Novos-RN.



**Foto 4:** Solo próximo de uma pilha de rejeito antiga na mina Brejuí em Currais Novos-RN.



**Foto 5:** Solo próximo de uma pilha de rejeito que está misturada com resíduo de eletroimã na mina Brejuí em Currais Novos-RN.



**Foto 6:** Bacia de rejeito fino na mina Brejuí Currais Novos-RN. Que está desativada.



**Foto 7:** Bacia de rejeito fino ainda em atividade. Localizada na mina Brejuí Currais Novos-RN.



**Foto 8:** Açude seco que está a jusante de todos os outros pontos na mina Brejuí em Currais Novos-RN.



**Foto 9:** Pilha de ferroso, resíduo gerado após a utilização do eletroimã. Encontrada na mina Brejuí em Currais Novos-RN.



**Foto 10:** Área sob mata nativa, Currais Novos/RN (referência de qualidade do solo).