

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL –
MESTRADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL

Jéferson Dallemole

**AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE, APTIDÃO AGRÍCOLA E AMBIENTAL DO
SOLO NO MUNICÍPIO DE LAGOA BONITA DO SUL-RS/BRASIL COM A
UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS MULTIVARIADOS**

Santa Cruz do Sul
2018

Jéferson Dallemole

**AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE, APTIDÃO AGRÍCOLA E AMBIENTAL DO
SOLO NO MUNICÍPIO DE LAGOA BONITA DO SUL-RS/BRASIL COM A
UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS MULTIVARIADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado, Área de Concentração em Gestão e Tecnologia Ambiental – Linha de Pesquisa: Gestão e manejo de Recursos Naturais, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Orientador: Dionei Minuzzi
Delevati

Co-orientador: Prof. Dr. Adilson Ben da Costa

Santa Cruz do Sul

2018

Jéferson Dallemole

**AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE, APTIDÃO AGRÍCOLA E AMBIENTAL DO
SOLO NO MUNICÍPIO DE LAGOA BONITA DO SUL-RS/BRASIL COM A
UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS MULTIVARIADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado, Área de Concentração em Gestão e Tecnologia Ambiental – Linha de Pesquisa: Gestão e manejo de Recursos Naturais, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Prof. Dr. Jorge André Ribas Moraes
Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC

Prof. Dr^a. Saionara Eliane Salomoni
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul - UERGS

Prof. Dr. Dionei Minuzzi Delevati
Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC
Orientador

Prof. Dr. Adilson Ben da Costa
Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC
Co-orientador

Santa Cruz do Sul, fevereiro de 2018

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos aqueles, que de uma forma ou de outra, não mediram esforços no apoio e incentivo a conclusão do mestrado.

Agradecimento

- Aos meus pais pelo apoio sempre prestado, principalmente nos momentos mais difíceis e pelo incentivo a tudo que fiz;
- Aos meus irmãos pela ajuda proporcionada e pelos momentos que não pude estar presente, a minha irmã em especial pela força e pelo incentivo nos momentos difíceis;
- A minha querida e amada Caroline Redin, pelo incentivo, pela ajuda e por me apoiar sempre nas minhas decisões e por entender minha ausência em função do trabalho;
- Ao meu orientador Dionei Minuzzi Delevati e co-orientador Adilson Ben da Costa pelo apoio e dedicação oferecidos na elaboração e desenvolvimento da dissertação;
- As professoras Michele Hoeltz e Lisianne Brittes Benitez pelos ensinamentos e pela compreensão quando da mudança de orientação;
- A professora e coordenadora do curso, Lourdes Teresinha Kist pela dedicação e empenho;
- Aos colegas do mestrado pela parceria e ajuda nos momentos difíceis e pelas dicas recebidas;
- Ao supervisor regional da microrregião da EMATER/RS-ASCAR, Luis Fernando Rodrigues de Oliveira, pelo apoio prestado;
- Aos colegas de trabalho, Mauro Lançanova Bruno, Noeli Fantoni Priebe e Adriano Lazzari pela ajuda nas coletas de amostras e demais colegas da EMATER/RS-ASCAR;
- A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudo;
- Aos agricultores que permitiram a coleta das amostras em suas propriedades;
- Ao Núcleo de Gestão Pública, em especial ao Bruno Toniolo Deprá pela ajuda na elaboração dos mapas;
- Ao Polo UAB de Sobradinho pelo empréstimo dos livros.

“Por fim, é sempre bom lembrar que o solo é o compartimento ambiental primário que suporta a agricultura e, conseqüentemente, a sobrevivência do ser humano na face da terra” (Alfredo Scheid Lopes e Luiz Roberto Guimarães Guilherme, 2007 – SBCS, 2007).

RESUMO

A produção de alimentos nos agroecossistemas está intimamente ligada a disponibilidade de nutrientes existentes no meio de cultivo e na ausência de elementos tóxicos. Deste modo, é necessário que se faça uma avaliação da fertilidade existente nas áreas agrícolas, buscando a interpretação das necessidades nutricionais das plantações, visando a manutenção e aumento da produtividade, bem como a preservação dos recursos naturais. Sendo assim, esta dissertação foi desenvolvida em Lagoa Bonita do Sul, município do Estado do Rio Grande do Sul, tendo como objetivos, avaliar a fertilidade do solo do local de estudo, através da utilização de métodos estatísticos multivariados, com a utilização de técnica de análise de componentes principais (PCA) e análise de agrupamento hierárquico (HCA), buscando a identificação dos limitantes da produção agrícola. Além disso, o estudo visa a elaboração de mapa georreferenciado dos pontos de coleta das amostras, bem como a realização do mapeamento do tipo de uso atual do solo, comparando com a sua aptidão agrícola e ambiental, a fim de identificar possíveis áreas de conflito. Para isto, foi realizado a avaliação dos teores de matéria orgânica (MO), pH, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação da CTC por bases, saturação da CTC por alumínio (Al), enxofre (S), boro (B) e manganês (Mn) de quarenta e quatro laudos de análise de amostras de solo, as quais foram coletadas em sistemas de plantio convencional, plantio direto e cultivo mínimo. A aplicação de PCA e HCA identificou a presença de quatro grupos distintos de solos na região de estudo, os quais foram divididos conforme suas características químicas. Além disso, identificou-se valores baixos de pH, CTC, de P e MO, presentes em boa parte das amostras estudadas demonstrando que estes componentes são limitantes da fertilidade de alguns solos. A alta porcentagem da CTC saturada com Al, assim como o excesso de Mn presente em grande parte das amostras, causam toxicidade as plantas, podendo ocasionar a diminuição da produtividade. Teores de K, Ca, Mg, S e B, estão presentes em quantidades significativas na maioria dos solos, não sendo considerados limitantes de produção. O PCA e HCA podem ser utilizados como uma importante ferramenta de gestão para utilização de avaliação da fertilidade química dos solos.

Palavras-chave: Fertilidade do solo; Nutrientes; Métodos estatísticos multivariados (PCA e HCA); Elementos tóxicos.

ABSTRACT

Food production in agro ecosystems is closely linked to the availability of nutrients in the growing and to the absence of toxic elements. Therefore, it is necessary to make an evaluation of the fertility in the agricultural areas, seeking the interpretation of the nutritional needs of the plantations, aiming at maintaining and increasing of the productivity, as well as the preservation of natural resources. Thus, this dissertation was developed in Lagoa Bonita do Sul, a town in the State of Rio Grande do Sul, Brazil, with the objective of evaluating the soil fertility of the study site, using multivariate statistical methods, using the principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA), seeking to identify the constraints of agricultural production. In addition, the study aims at the elaboration of a geo referenced map of the collection points of the samples, as well as the mapping of the type of current use of the soil, comparing with its agricultural and environmental suitability, in order to identify possible areas of conflict. For this purpose, the evaluation of organic matter (OM), pH, phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), cation exchange capacity (CEC), CEC saturation by bases, CEC saturation by aluminum (Al), sulfur (S), boron (B) and manganese (Mn) of forty-four soil samples analysis, which were collected in conventional and direct planting systems and minimal cultivation systems. The application of PCA and HCA identified the presence of four distinct groups of soils in the study region, which were divided according to their chemical characteristics. In addition, low values of pH, CEC, P and OM, present in a good part of the studied samples were identified, demonstrating that these components are limiting the fertility of some soils. The high percentage of CEC saturated with Al, as well as the excess Mn present in a large part of the samples, cause toxicity to the plants, which can lead to a decrease in productivity. The values of K, Ca, Mg, S and B are present in significant quantities in most soils and are not considered production limitation. The PCA and HCA can be used as an important management tool for the use of chemical soil fertility evaluation.

Keywords: Soil fertility; Nutrients; Multivariate statistical methods (PCA and HCA); Toxic elements.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínio
ANDA	Associação Nacional para Difusão de Adubos
B	Boro
C	Carbono
Ca	Cálcio
Cl	Cloro
CM	Cultivo mínimo
Co	Cobalto
CTC	Capacidade de troca de cátions
Cu	Cobre
DNA	Ácido desoxirribonucleico
EMATER/RS – ASCAR	Empresa Associação Riograndense de Empreendimentos de Assistência Técnica e Extensão Rural/RS - Associação Sulina de Crédito e Assistência Rural
Fe	Ferro
H	Hidrogênio
HCA	Do inglês <i>Hierarchical Cluster Analysis</i> : Análise de agrupamentos hierárquicos
K	Potássio
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
MO	Matéria orgânica
Mo	Molibdênio
MOS	Matéria orgânica do solo
N	Nitrogênio
Na	Sódio
Ni	Níquel
NPK	Nitrogênio, fósforo e potássio
O	Oxigênio
P	Fósforo

PC	Plantio convencional
PC1	Componente principal 1
PC2	Componente principal 2
PCA	Do inglês <i>Principal Component Analysis</i> : Análise de Componentes Principais
PD	Plantio direto
pH	Potencial hidrogeniônico
RNA	Ácido ribonucleico
ROLAS	Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo e Tecido Vegetal
RS	Rio Grande do Sul
S	Enxofre
SC	Sistema de cultivo
Se	Selênio
Si	Silício
SMP	Shoemaker, McLean & Pratt (índice utilizado para determinação da quantidade de calcário)
UNISC	Universidade de Santa Cruz do Sul
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo geral	13
1.1.1 Objetivos específicos.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Formação e importância do solo	14
2.2 Situação dos solos do Brasil e do Rio Grande do Sul	15
2.3 Fatores que afetam a fertilidade e produtividade dos solos	16
2.3.1 Macro e micronutrientes no solo	17
a) Potássio (K).....	17
b) Fósforo (P)	18
c) Cálcio (Ca)	18
d) Magnésio (Mg)	18
e) Enxofre (S).....	19
f) Boro (B).....	19
2.3.2 pH e elementos tóxicos	20
2.3.3 Matéria orgânica (MO).....	20
2.3.4 Capacidade de troca de cátions: $CTC_{efetiva}$ e $CTC_{pH\ 7,0}$	21
2.4 Uso do solo e sustentabilidade ambiental	22
2.5 Métodos estatísticos multivariados: Técnica de Agrupamento Hierárquico (HCA) e a Análise de Componentes Principais (PCA)	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 Caracterização da pesquisa	27
3.2 Caracterização da área de estudo	28
3.3 Coleta das amostras	30
3.4 Aplicação dos Métodos estatísticos multivariados: Técnica de Agrupamento Hierárquico (HCA) e a Análise de Componentes Principais (PCA)	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
4.1 Valores de pH.....	38
4.2 Porcentagem de matéria orgânica	39
4.3 Teores de potássio (K)	42
4.4 Concentração de fósforo (P)	44
4.5 Valores da Capacidade de troca de cátions: $CTC_{efetiva}$	46
4.6 Saturação da CTC por Bases e Alumínio (Al)	47
4.7 Interpretação dos índices de macronutrientes (Ca, Mg e S)	49
4.8 Teores de boro (B)	50
4.9 Manganês (Mn)	51

4.10 Avaliação da fertilidade por Métodos Estatísticos Multivariados PCA e HCA ...	54
4.11 Aptidão agrícola dos quatro grupos de solos resultantes do HCA	66
5. CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS	72
APÊNDICE A – Gráfico com os teores de Potássio	80
APÊNDICE B - Gráfico com os teores de Fósforo	81
APÊNDICE C – Gráfico com teores de Ca.....	82
APÊNDICE D – Gráfico com teores de Mg	83
APÊNDICE E– Gráfico com teores de S	84
APÊNDICE F– Gráfico com teores de B	85
APÊNDICE G – Gráfico com altitudes e uso atual do solo.....	86

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional pode estar correlacionado a diversos problemas ambientais que estamos enfrentando atualmente. Este aumento populacional gera uma demanda muito maior de alimentos, bem como uma necessidade crescente em fibras vegetais, o que acaba provocando uma pressão excessiva sobre a produção agropecuária e sobre o uso do solo, o que pode ocasionar sua degradação ao longo do tempo (Schiefer *et al.*, 2016).

A produção de alimentos e a produtividade obtida nos agroecossistemas estão intimamente ligados a fertilidade e a disponibilidade de nutrientes existentes no meio de cultivo. Deste modo, o solo só poderá ser produtivo, se as plantas encontrarem condições favoráveis ao seu desenvolvimento, devendo assim, ocorrer um balanço e uma interação entre fatores químicos, físicos, biológicos e ambientais (Sbcs, 2007; Sbcs., 2016).

As terras agricultáveis estão cada dia mais escassas, uma vez que boa parte delas já estão sendo utilizadas para a produção agropecuária. Deste modo, a necessidade de preservação de ecossistemas naturais, praticamente impossibilita o avanço e abertura de novas áreas de cultivo, exigindo assim que a produtividade das lavouras já existentes seja aumentada (Ocde-Fao, 2015).

O diagnóstico da fertilidade de um solo é realizado através do resultado das análises de solo e/ou tecido vegetal, a qual baseia-se na probabilidade de resposta das culturas a aplicação de adubação e calagem. Estas recomendações sempre se utilizam de um valor de referência chamado de “teor crítico”, a partir do qual, a aplicação de um determinado nutriente, gera uma probabilidade de retorno econômico. Desta forma, as aplicações realizadas acima destas condições visam a manutenção da disponibilidade deste nutriente no solo, bem como, a reposição dos nutrientes perdidos durante o desenvolvimento das plantas ou exportados pela colheita (Sbcs., 2016).

A manutenção de níveis adequados de nutrientes no solo e o incremento da produtividade agrícola são fundamentais para o aumento da produção agropecuária. Porém, é necessário que se faça uma avaliação do manejo empregado no uso do solo, buscando a diminuição dos impactos ambientais e a manutenção da sustentabilidade dos ecossistemas (Zhen *et al.*, 2006). Aplicações de adubações inferiores a necessidade dos cultivos ocasionam uma diminuição no rendimento das

culturas (Sbcs, 2007; Sbcs., 2016) e aplicações em excesso podem diminuir a lucratividade dos sistemas agropecuários e ocasionar contaminações ambientais (Zhen *et al.*, 2006; Sbcs, 2007; Sbcs., 2016).

Os solos do Rio Grande do Sul apresentam uma enorme diversidade de perfis, determinadas pelos fatores de sua formação, dentre eles, o material de origem, o tipo de clima, a formação do relevo, a ação dos organismos vivos e o tempo de atuação destes fatores. Apesar deste processo de formação ser extremamente lento, a ação humana, no desenvolvimento da agricultura, pode influenciar, de maneira benéfica ou prejudicial, o solo em um curto período de tempo (Streck *et al.*, 2008).

O município de Lagoa Bonita do Sul, bem como a grande maioria dos municípios do Rio Grande do Sul, possui sua economia baseada no setor agropecuário, deste modo, sendo fundamentalmente dependentes das condições de solo para obterem a produtividade desejada. Estudos edáficos sobre esta região são bem restritos, dificultando estratégias de melhoria da fertilidade em âmbito regional.

1.1 Objetivo geral

Avaliar a fertilidade e a aptidão agrícola e ambiental do solo no município de Lagoa Bonita do Sul, localizado na região Centro-Serra do estado do Rio Grande do Sul, com a utilização de métodos estatísticos multivariados.

1.1.1 Objetivos específicos

- Identificar as principais atividades agrícolas da região estudada;
- Analisar através de ferramentas multivariáveis com utilização de técnica de agrupamento hierárquico (HCA) e a análise de componentes principais (PCA), a fertilidade do solo;
 - Analisar comparativamente a aptidão agrícola do solo com o seu uso atual;
 - Identificar fatores limitantes da produção agrícola do município analisado;
 - Elaborar mapa da aptidão agrícola e ambiental do município de Lagoa Bonita do Sul.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Formação e importância do solo

O solo pode apresentar diversas funções e deste modo, permite várias definições. O solo pode ser considerado um meio de desenvolvimento das plantas, funcionando como fonte de nutrientes e água. Além disso, funciona como um sistema natural de reciclagem de nutrientes e formação de húmus, servindo como habitat para diversos organismos vivos. Ainda, participa como regulador e filtrador da água no ciclo hidrológico, servindo também como um meio de descarte de rejeitos, resíduos e produtos tóxicos (Streck *et al.*, 2008; Pinheiro, 2015). Além disso, a função de um solo pode ser determinada pela sua capacidade em cumprir suas funções em estado natural, como a purificação e filtração da água e a degradação de contaminantes, buscando a manutenção do bem-estar humano (Volchko *et al.*, 2013). Outras funções importantes referidas ao solo é a regulação do clima e o armazenamento de carbono (C), sendo utilizado como meio de suporte para o restante dos recursos naturais (Pinheiro, 2015).

O solo é o principal meio para o desenvolvimento das plantas, sendo considerado uma camada biologicamente ativa de material, resultante das ações do intemperismo das rochas e dos minerais, da ciclagem de nutrientes e da produção e decomposição da biomassa existente (Sbcs, 2007). Apesar de ser um processo natural, a formação e as características de cada solo podem sofrer influências antrópicas, benéficas como a correção da acidez e reposição de nutrientes, ou prejudiciais, através do uso inadequado, como aplicações insuficientes ou demasiadas de adubação e calagem (Streck *et al.*, 2008) uma vez que a variabilidade das propriedades do solo são inerentes as características de formação e manejo empregado (Waswa *et al.*, 2013), sendo que o tipo de gestão utilizado afeta diretamente as suas funções (Pinheiro, 2015).

Apesar de sistemas de cultivo que não utilizam o solo como meio de fixação e reservatório de nutrientes, como a hidroponia, estarem aumentando sua contribuição na produção de alimentos, o solo é considerado o compartimento ambiental primário, o qual suporta o desenvolvimento da agricultura sendo um recurso vital não renovável o qual esta intimamente ligado a sobrevivência da espécie humana (Sbcs, 2007; Pérez *et al.*, 2016).

2.2 Situação dos solos do Brasil e do Rio Grande do Sul

Desde o início da agricultura brasileira, a utilização das terras ocorreu por meio da ampliação das fronteiras agrícolas, no qual a retirada da cobertura vegetal era o primeiro passo empregado, substituindo assim a vegetação nativa existente. Estas áreas continuavam a ser exploradas até que os aspectos econômicos e/ou a diminuição da fertilidade natural exigisse a abertura de novas áreas (Sbcs, 2007; Embrapa, 2010). Este tipo de exploração conduziu os solos e ecossistemas a uma diminuição da biodiversidade e conseqüentemente, ocasionou a degradação dos recursos naturais (Embrapa, 2010).

O Brasil é um dos países com maior capacidade produtiva, possuindo um vasto território e um clima favorável para a grande maioria dos cultivos agrícolas. Cerca de 65% do território nacional possui um potencial para o desenvolvimento da agropecuária, o que equivale a aproximadamente 5,5 milhões de km² de áreas agricultáveis (Embrapa, 2010). Mesmo assim, novas fronteiras agrícolas estão sendo abertas, o que ocasiona uma pressão sobre os remanescentes florestais, afetando todos os biomas brasileiros. Além disso, grande parte da utilização das terras agricultáveis estão ocupadas com lavouras temporárias, as quais exigem uma maior quantidade de manejo e conseqüentemente estão sujeitas a uma maior degradação (Embrapa, 2010).

O clima do Brasil é muito diversificado, possibilitando o desenvolvimento de uma agricultura variada. Nas regiões Sul e Centro-oeste, ocorrem maiores volumes pluviométricos o que favorece o desenvolvimento dos cultivos. Além disso, nestas duas regiões, os solos apresentam melhores condições de fertilidade, e as propriedades rurais apresentam melhor infraestrutura de produção, o que permite a utilização de insumos de forma muito mais intensiva. Estas características proporcionaram ao país, um aumento na produção agropecuária, sendo que a produção agrícola mais que dobrou em volume, e a produção pecuária quase triplicou, quando comparado ao ano de 1990 e 2015 (Ocde-Fao, 2015).

A grande maioria das áreas de produção agropecuária brasileira estão distribuídas em unidades pequenas, principalmente cultivadas por agricultores familiares. Conforme o Censo Agrícola de 2006, cerca de dois terços das propriedades agrícolas do Brasil são constituídas por unidades com áreas menores do que 20 hectares, representando cerca de 5% do total de áreas cultiváveis.

Diferentemente disto, as propriedades agrícolas com áreas superiores a 1000 hectares representam apenas 1% dos estabelecimentos agropecuários, ocupando 44% do total das terras agrícolas (Ocde-Fao, 2015).

Dentre as terras cultiváveis do Brasil, pode-se dar um destaque especial as lavouras comerciais dos estados do Rio Grande do Sul, Paraná e São Paulo, as quais fazem uso de grande quantidade de insumos agrícolas, principalmente com a aplicação de grande quantidade de fertilizantes, fator este que aumenta a produtividade dos cultivos, mas que acaba gerando uma grande preocupação sobre o impacto gerado sobre os recursos naturais, principalmente sobre os recursos hídricos (Ocde-Fao, 2015).

Mesmo que a produtividade das culturas tenha aumentado significativamente durante os últimos anos, a maioria dos solos brasileiros apresentam algum tipo de limitação ao desenvolvimento dos sistemas de produção, causados principalmente pela presença de elementos tóxicos, Al e Mn, os quais poderão restringir o crescimento das plantas, através da redução do sistema radicular e que conseqüentemente, limita a absorção de água e nutrientes. Além disso, as baixas concentrações de Ca e Mg nos solos do Brasil, também podem afetar negativamente o desenvolvimento das culturas (Sbcs, 2007).

2.3 Fatores que afetam a fertilidade e produtividade dos solos

As plantas necessitam de dezessete elementos químicos essenciais ao seu desenvolvimento, entre eles o carbono (C), o hidrogênio (H) e o oxigênio (O), os quais são considerados elementos não minerais. Do mesmo modo, os minerais são fundamentais para o desenvolvimento das plantas, dentre eles, os macronutrientes, nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), e dos micronutrientes, boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e zinco (Zn). Apesar de não serem considerados essenciais, o sódio (Na), cobalto (Co), selênio (Se) e silício (Si), também podem estar presentes nos tecidos vegetais (Sbcs, 2007).

Mesmo que um solo apresente todos os nutrientes essenciais em quantidades suficientes ao desenvolvimento das plantas, ele pode não ser produtivo, uma vez que a fertilidade é apenas um dos fatores envolvidos na produção agrícola. Além disso, condições físicas e biológicas devem ser favoráveis para o seu

desenvolvimento, assim como é importante que não existam elementos que possam causar toxicidade. Do mesmo modo, o clima pode influenciar diretamente a produção agrícola, sendo também parte do sistema (Sbcs, 2007). Apesar de todas estas condições estarem interligadas na produtividade de um agroecossistema, o agricultor é a peça fundamental na interação entre todos estes fatores, uma vez que é responsável por efetuar o manejo do solo (Paraná, 2003).

O consumo de fertilizantes, principalmente os químicos, vem apresentando um avanço crescente no Brasil. Dados da Associação Nacional para a Difusão de Adubos (ANDA), demonstram que 34.083.415 toneladas de fertilizantes foram entregues no país apenas no ano de 2016 (Anda, 2017).

A adubação é apenas um dos componentes capazes de influenciar nos sistemas agropecuários, e deste modo, não deve ser utilizado como uma prática isolada. Para que ocorra um manejo de adubação adequada, é necessário também um apropriado preparo de solo, com utilização de métodos de conservação que visem a proteção do solo contra agentes erosivos, bem como a utilização adequada das máquinas e equipamentos. O controle de pragas, doenças e plantas daninhas também deve ser levado em consideração, de modo que ocorra a construção e a manutenção da fertilidade do solo e a produtividade ao longo prazo (Sbcs, 2007).

2.3.1 Macro e micronutrientes no solo

a) Potássio (K)

O potássio apresenta várias funções nas plantas, sendo responsável pela ativação de vários sistemas enzimáticos. Além disso, atua tanto na respiração como na fotossíntese, sendo responsável pela síntese de proteínas e regulação osmótica. Este nutriente é responsável pela manutenção e regulação da água nas plantas através do controle da abertura e o fechamento dos estômatos (Sbcs, 2007).

O K está relacionado com a resistência das plantas às pragas e doenças devido o seu efeito sobre a manutenção da membrana plasmática. Quando em quantidades insuficientes, causa uma redução no crescimento das plantas, retardando a frutificação (Sbcs, 2007). As plantas absorvem o potássio na forma de K^+ (Sbcs, 2006).

b) Fósforo (P)

O P é indispensável na fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia e na divisão celular (Sbcs, 2007). Sua disponibilidade e formas de absorção pelas plantas é totalmente dependente do pH do solo, sendo que em solos muito ácidos, pode ocorrer sua precipitação, devido a presença de Fe e Al, o que pode provocar sua indisponibilidade as culturas (Sbcs, 2007).

Além de fazer parte das moléculas do DNA e RNA, o fósforo é indispensável para a realização da fotossíntese. A maior absorção de P pelas plantas ocorre na faixa de pH entre 4,5 e 6,0 sendo absorvido principalmente como H_2PO_4^- (Sbcs, 2006).

c) Cálcio (Ca)

O Ca desempenha um papel importante nas plantas, ajudando na formação de compostos antimicrobianos e na produção de enzimas envolvidas na defesa da planta contra infecções (Ngadze *et al.*, 2014). A deficiência deste mineral pode ocasionar a diminuição das taxas de crescimento das plantas (Atkinson, 2014).

O Ca é absorvido pelas plantas na forma de Ca^{2+} (Sbcs, 2006) sendo que as reservas deste nutriente no solo acabam diminuindo após vários cultivos consecutivos, devido a absorção pelas plantas e a lixiviação no perfil do solo (Zetterberg *et al.*, 2016).

d) Magnésio (Mg)

O Mg é o oitavo elemento mais abundante da crosta terrestre, sendo importante no metabolismo de plantas e animais. Sua deficiência está ligada diretamente a redução de produtividade, alternância de produção para espécies de plantas perenes, redução no tamanho dos frutos (Sbcs, 2007) e a perda de biomassa foliar em plantas (Farhat *et al.*, 2013).

O Mg está sujeito a vários mecanismos de ciclagem nos sistemas agrícolas, devendo ser considerado como essencial na nutrição das plantas e no desenvolvimento sustentável dos sistemas agrícolas. Apesar de ser um elemento muito importante, o Mg acabava passando despercebido aos olhares dos cientistas

de solo, devido ao fato de que sua deficiência não era reconhecida nos cultivos agrícolas (Gransee e Führs, 2013). Sua absorção pelas plantas ocorre na forma de Mg^{2+} (Sbcs, 2006).

e) Enxofre (S)

Este nutriente é essencial ao desenvolvimento das plantas e animais (Sbcs, 2007), devendo estar disponível em quantidades relativamente elevadas para que ocorra um bom desenvolvimento dos cultivos agrícolas, principalmente de culturas mais exigentes em S (Kost *et al.*, 2008), especialmente plantas leguminosas, brássicas e liliáceas (Sbcs, 2004; Sbcs., 2016). Sua absorção pelas plantas ocorre como forma de SO_4^{2-} (Sbcs, 2006).

Nas últimas décadas, a necessidade de adubação a base de S tem aumentado significativamente, resultado da diminuição da deposição atmosférica de S e da utilização de adubação fosfatada com menores quantidades de S comparada aos fertilizantes utilizados anteriormente (Boye *et al.*, 2010). A utilização da adubação com N-P-K mascarou por muito tempo a deficiência deste nutriente (Sbcs, 2007).

f) Boro (B)

O B possui a função de translocação de açúcares e no metabolismo dos carboidratos, ajudando no florescimento, na frutificação, no metabolismo do nitrogênio e na fabricação de hormônios. Além disso, interage na absorção e metabolismo de cátions, na absorção de água e no metabolismo de glicídios (Sbcs, 2006).

É absorvido pelos vegetais principalmente como ácido bórico $[(B(OH)_3)]$, mas pode ser absorvido também como $[(B(OH)_4^-)]$ em situações de valores de pH bastante alcalinos. Sua deficiência ocasiona redução no crescimento das plantas, diminuição do tecido foliar, crescimento reduzido do sistema radicular e abortamento de flores (Sbcs, 2006).

2.3.2 pH e elementos tóxicos

Solos naturais, sem ação antrópica, tendem a apresentarem pH mais ácido, devido a decomposição do material de origem e da intensidade dos agentes do intemperismo. As regiões com maiores precipitações pluviométricas apresentam uma maior acidificação devido a lixiviação de cátions básicos, e/ou pela absorção pelas plantas. Do mesmo modo, o uso inadequado do solo, aliado a utilização de adubações ácidas e a oxidação da matéria orgânica (MO) também influenciam e facilitam a acidificação do solo (Sbcs, 2007).

Quando o pH do solo atinge índices inferiores a 5,5, ocorre a liberação de alumínio trocável na forma de Al^{3+} podendo ocasionar intoxicação e deformação das raízes em plantas suscetíveis, inibindo o crescimento e o transporte de água e nutrientes (Sbcs, 2004; Sbcs, 2006; Sbcs, 2007; Sbcs., 2016). O Al é um elemento presente em todos os locais da crosta terrestre, porém não apresenta uma função biológica específica. Está presente nos solos minerais e em todos os organismos vivos, porém sua biodisponibilidade e sua toxicidade estão restritas aos ambientes ácidos (Poschenrieder *et al.*, 2008).

O manganês é essencial ao desenvolvimento das plantas, atuando na síntese da clorofila e na ativação de enzimas (Sbcs, 2006), porém altas concentrações em condições adversas de solo podem ocasionar toxicidade aos tecidos das culturas (Santos *et al.*, 2017). O principal problema relacionado a toxicidade deste nutriente está atrelado a acidez do solo (Sbcs, 2007). Concentrações superiores a $30 \text{ cmol}_c\text{L}^{-1}$ de Mg podem causar modificação no sistema radicular de plantas, reduzindo seu crescimento (Santos *et al.*, 2017).

2.3.3 Matéria orgânica (MO)

A matéria orgânica do solo, além de ser uma fonte de nutrientes, apresenta uma propriedade coloidal, atuando na agregação de partículas e favorecendo a formação de poros e a retenção de água no solo. Devido a sua propriedade coloidal, é a grande responsável pela capacidade de troca de cátions dos solos (Raij, 1981; Gruba e Mulder, 2015).

A quantidade de MO existente nos solos são decorrentes de séculos ou milênios de acumulação de material orgânico. Sua decomposição em sistemas

naturais ocorre de maneira lenta, porém a utilização do solo de maneira inadequada favorece e acelera o seu processo de decomposição (Raij, 1981).

A matéria orgânica do solo (MOS) é considerada um dos principais componentes utilizados para a determinação da qualidade de um determinado solo, uma vez que grande parte da capacidade de troca de cátions (CTC), principalmente em solos de textura leve, é proveniente da matéria orgânica (Embrapa, 2015).

Muito importante para a agricultura, a MOS é responsável por 95% do nitrogênio existente no solo, porém pode funcionar de duas maneiras distintas em relação a retenção e armazenamento de água. Em solos com textura mais arenosa, a matéria orgânica pode ser considerada como retentora de água, diferentemente de solos com textura mais argilosa, na qual pode ter o efeito contrário. Em relação ao fósforo, quanto maior o aporte orgânico, melhor será a ciclagem deste nutriente e consequentemente maior disponibilidade as plantas (Sbcs, 2007).

2.3.4 Capacidade de troca de cátions: $CTC_{efetiva}$ e $CTC_{pH\ 7,0}$

A CTC de um solo interfere diretamente na sua fertilidade. Em alguns tipos de solo, principalmente de florestas, a MO e a deposição de C são os principais responsáveis pela troca de cátions, podendo apresentar características diferentes dependendo da espécie que esta sendo cultivada (Gruba e Mulder, 2015).

A CTC efetiva de um solo é considerada a capacidade de troca de cátions de um solo em seu pH real, no qual são somados os cátions (Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e o K^+) em $cmol/dm^3$. Já a $CTC_{pH7,0}$ além da CTC efetiva, soma-se também a quantidade de H contido na solução, sendo utilizada para a interpretação da disponibilidade de K disponível no solo (Sbcs, 2004; Sbcs., 2016).

A produção de alimentos está atrelada aos cultivos agrícolas, sendo que os solos devem ser utilizados conforme sua capacidade de resiliência. Deste modo, é necessário um aumento da produtividade agrícola, aliado a uma redução dos impactos ambientais, utilizando para isto o conceito de “intensificação sustentável”. Para isto, a CTC de um solo é um dos itens que devem ser avaliados neste processo (Schiefer *et al.*, 2016).

A CTC é um importante indicador da qualidade e fertilidade de um solo, sendo influenciada pelo manejo aplicado ao uso da terra (Khaledian *et al.*, 2017). Além disso, estes mesmos autores encontraram uma relação positiva de maior CTC em

solos com maior quantidade de argila e valores menores em solos com maior quantidade de areia, sendo a textura um importante fator de determinação de adsorção de cátions.

2.4 Uso do solo e sustentabilidade ambiental

O solo é um recurso natural lentamente renovável (Streck *et al.*, 2008), que em condições naturais, sem o manejo antrópico, apresenta-se em equilíbrio dinâmico, entre organismos edáficos e ciclagem de nutrientes, apresentando assim, uma boa resistência a degradação. O manejo, ou a utilização de uma agricultura excessiva, acaba alterando este equilíbrio, podendo afetá-lo negativamente, ocasionando a deterioração ambiental (Sbcs, 2007).

Deste modo, é necessário que ocorra o desenvolvimento sustentável, com uso de tecnologia para elevação dos níveis de produtividade nas áreas que já estão inseridas no processo de produção, o que contribui para a preservação ambiental das demais áreas, uma vez que diminui a pressão sobre as regiões de floresta (Sbcs, 2007).

O uso excessivo de fertilizantes nitrogenados favorece a taxa de lixiviação de nitratos no perfil do solo, podendo ocasionar contaminação das águas subterrâneas. Além disso, o excesso de nitrogênio pode ficar acumulado nos tecidos vegetais, ocasionando também a contaminação dos alimentos (Zhen *et al.*, 2006). Em seu trabalho, estes mesmos autores encontraram contaminação das águas subsuperficiais por nitrato em 16 das 20 amostras de água coletadas e acumulação de nitrato nas plantas em 19 das 20 amostras analisadas, o que evidencia que o excesso de adubação nitrogenada pode comprometer a sustentabilidade dos agroecossistemas, causando a contaminação ambiental.

Em relação a um planejamento regional, é importante o reconhecimento que o uso e a ocupação do solo possuem relação direta com a qualidade e quantidade dos recursos hídricos (Petry e Silveira, 2017). O uso intensivo e irracional dos solos pode ocasionar a diminuição de sua qualidade e fertilidade, ocasionando consequências graves tanto no aspecto, social, como no econômico e ambiental (Sbcs, 2007).

A expansão da agricultura implica em uma série de fatores nas relações entre produção e meio ambiente. Para que ocorra uma diminuição dos impactos ambientais e aumento da produção de alimentos, é necessário que ocorra a

preservação da biodiversidade local, bem como ocorra uma transferência de tecnologia entre os países. Do mesmo modo, a melhoria da fertilidade dos solos está atrelada ao emprego mais eficiente do uso de nutrientes, o que favorece o aumento da produtividade e diminui os impactos ambientais do uso do solo (Tilman *et al.*, 2011).

A sustentabilidade de um agroecossistema pode ser medida utilizando-se diversos indicadores, dentre eles, indicadores ambientais, sociais e econômicos. Portanto, o uso sustentável do solo acaba implicando no aumento da intensificação dos cultivos agrícolas, aumentando assim a eficiência do uso da terra. Além disso, a sustentabilidade deste sistema requer a maximização de uso de recursos internos existentes nas propriedades rurais, com a diminuição de aportes de insumos externos. Da mesma maneira, a utilização de adubação deve ser realizada de acordo com a necessidade das culturas através da observação da quantidade de nutrientes existente no solo. Mesmo assim, busca-se a rentabilidade na produção agropecuária, buscando a sobrevivência e manutenção das necessidades dos agricultores envolvidos nos sistemas produtivos, bem como a manutenção da capacidade do solo em manter-se produtivo ao longo dos anos, através da utilização de novos conhecimentos e diferentes tecnologias, buscando a conservação dos recursos naturais (Zhen e Routray, 2003).

Para a avaliação sustentável de um sistema, a questão econômica deve receber uma atenção especial, uma vez que os recursos naturais que possuem valorização no mercado, não trazem consigo o custo energético e o tempo necessário para sua formação ou seu estabelecimento (Embrapa, 2003).

A qualidade dos recursos hídricos é afetada diretamente pelo manejo e utilização dos solos. A eutrofização dos cursos de água é reflexo da presença de P em solução, proveniente principalmente da ação antrópica na realização das atividades agrícolas, afetando negativamente a qualidade das águas (Buzelli e Cunha-Santino, 2013).

Vários problemas podem afetar a fertilidade dos solos. A erosão é uma das principais causas de perda de fertilidade, tendo consequências importantes para a agricultura, mas também afetando outros setores econômicos e atividades a jusante, tais como a geração de energia, prestação de serviços e o tratamento de água potável (Lovo, 2016).

O preparo intensivo do solo pode facilitar a erosão dos cultivos agrícolas. Deste modo, o P aplicado nas culturas pode ser carregado com partículas de solo para os recursos hídricos, causando a fertilização das águas. Este processo favorece a proliferação de algas e ocasiona a eutrofização dos corpos de água desequilibrando o ecossistema. Apesar de ser incomum, o fosfato também pode ser lixiviado para corpos hídricos subterrâneos, sendo necessário que o solo esteja sujeito a aplicações constantes de adubação fosfatada para que esta percolação aconteça (Griffin, 2017).

A sustentabilidade do sistema agrícola implica na utilização de um manejo que permita a produtividade e a lucratividade dos cultivos, que ao mesmo tempo, preservem o meio ambiente e as condições de vida do agricultor. Alguns nutrientes quando aplicados em excesso, principalmente N e P, podem ocasionar impactos ambientais negativos (Sbcs., 2016).

Assim como o excesso de adubação, a deficiência de nutrientes compromete a produtividade dos cultivos e a sustentabilidade do agroecossistema. Nutrientes, assim como, N, P e K devem ser repostos aos sistemas de cultivo, para a manutenção dos níveis de produtividade. Esta reposição deve ocorrer mediante uma criteriosa análise de solo, pois permite a elucidação da deficiência ou desequilíbrio de nutrientes, permitindo o monitoramento da fertilidade do agroecossistema (Peron e Evangelista, 2004) o que garante uma recomendação adequada de corretivos e fertilizantes, o que pode melhorar a produtividade, a qualidade dos produtos colhidos gerando retorno econômico (Natale *et al.*, 2012).

2.5 Métodos estatísticos multivariados: Técnica de Agrupamento Hierárquico (HCA) e a Análise de Componentes Principais (PCA)

A utilização de métodos estatísticos multivariados visa a identificação das semelhanças e das diferenças de vários tipos de amostras, buscando agrupá-las e classificá-las devendo para isto, que as amostras do mesmo tipo sejam semelhantes; que existam diferenças significativas entre diferentes tipos de amostras e que o conjunto de medidas disponíveis sejam capazes de detectar estas semelhanças e diferenças (Ferreira, 2015).

O método estatístico de Análise de Componentes Principais (PCA) é utilizado para projetar dados multivariados em um espaço de menor dimensão, reduzindo

assim a grandeza do espaço original do conjunto de dados sem que a relação entre as amostras seja afetada. Este método permite visualizar e interpretar as diferenças existentes entre as variáveis analisadas, bem como examinar as relações que possam existir entre as amostras (Ferreira, 2015). PCA é utilizado para analisar a inter-relação entre um grande número de variáveis, buscando a explicação destas variáveis pelos fatores que as amostras possuem em comum. O objetivo é concentrar as informações originais em um conjunto menor de fatores, sem que ocorra perda significativa de informação (Hair Jr *et al.*, 2009).

Os métodos estatísticos multivariados testam ou analisam um grupo de múltiplas variáveis ao mesmo tempo, apresentando como vantagem a elucidação de novas possibilidades, pelos quais, os dados subjacentes em comparações simples tem pouca possibilidade de revelar (Da Silva *et al.*, 2014).

Quando ocorre relação significativa entre as variáveis de um conjunto de dados, existe a possibilidade de se encontrar um número menor de novas variáveis que são capazes de descrever aproximadamente toda a informação contida nos dados originais. Isto é possível pelas combinações lineares das variáveis originais, de forma a agrupar as que fornecem informações semelhantes, gerando um novo conjunto e variáveis com propriedades específicas, conhecidas como PC ou autovetores (Ferreira, 2015).

Uma propriedade muito importante das componentes principais é que elas são “não” correlacionadas e apresentam-se ortogonais entre si, sendo que a informação contida em uma delas não está presente em outra (Ferreira, 2015). Deste modo PC1 descreve a máxima variância dos dados originais e PC2 tem a direção da máxima variância dos dados no subespaço ortogonal a PC1 (Ferreira, 2015).

HCA é utilizada para reduzir a dimensionalidade dos dados de grande porte, permitindo que uma quantidade enorme de dados possa ser representado por poucos grupos de dados semelhantes, permitindo também a observação de um conjunto de dados com comportamento diferenciado dos demais. Em outras palavras, HCA tem por finalidade a aglomeração de amostras pertencentes a um mesmo grupo que sejam mais parecidas entre si do que as amostras dos demais grupos, maximizando a homogeneização interna entre elas e a maximização de heterogeneidade entre os grupos (Hair Jr *et al.*, 2009; Ferreira, 2015).

O agrupamento hierárquico permite a representação gráfica de forma bidimensional, apresentando os resultados em forma de uma árvore hierárquica, o chamado dendrograma (Ferreira, 2015).

Dados analisados com variância muito grande, ou seja, variantes muito distintas entre si podem ocasionar elipses que afetarão o resultado da matriz. Deste modo, o PCA deve ser utilizado com cautela quando ao menos umas das variáveis dos pontos analisados apresente um valor muito diferente das demais (Filzmoser e Todorov, 2011).

PCA é largamente utilizado para a redução de dimensões ao se encontrar um número menor de combinações lineares. Este método é utilizado principalmente para uma visualização de dados multivariados através de um gráfico de dispersão; para a transformação de variáveis correlacionadas em um número menor de variáveis não correlacionadas e para a combinação de múltiplas variáveis com relação entre si em um único ou poucas variáveis e até mesmo indicadores característicos. Sua abordagem mede a variabilidade através da variância empírica e baseia-se em vetores próprios da covariância ou correlação da amostra matriz através de um software computacional (Filzmoser e Todorov, 2011).

O agrupamento hierárquico de determinadas variáveis, deve apresentar uma combinação e ligação apropriada de similaridade, devendo ser cuidadosamente analisadas, para que possa ser representativa e forme os grupos adequados (Voutsis *et al.*, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização da pesquisa

A pesquisa científica visa ampliar a fronteira de conhecimento, buscando estabelecer novas relações de causalidade para fatos e fenômenos já conhecidos, ou que apresente novas conquistas para o respectivo campo do conhecimento (Cervo *et al.*, 2010). Sendo assim, a classificação de uma pesquisa é muito importante, uma vez que permite reconhecer as semelhanças e diferenças entre as diversas modalidades existentes, permitindo ao pesquisador, um elemento a mais sobre sua aplicabilidade, e na resolução do problema proposto (Gil, 2010).

Este trabalho possui caráter exploratório, bibliográfico e documental, uma vez que, inicialmente, foram realizadas amplas pesquisas bibliográficas sobre a fertilidade do solo e limitantes da produção agropecuária em livros, meio eletrônico, e documentos impressos (laudos de análise de solo). Deste modo, a pesquisa exploratória tende a proporcionar uma maior familiaridade com o problema, buscando a construção de hipóteses, destacando-se como principal ferramenta a revisão da literatura (Gil, 2010). Neste tipo de pesquisas, são utilizados dados teóricos registrados, já trabalhados por outros pesquisadores (Severino, 2007). A diferença entre pesquisa bibliográfica e documental está basicamente no tipo de documentação explorada, uma vez que a primeira são encontrados documentos mais específicos do tema e a segunda vale-se de toda a documentação existente (Gil, 2010).

Do mesmo modo, a coleta de amostras de solo *in loco* para a pesquisa, permite também sua classificação como pesquisa de campo. Este tipo de pesquisa é realizado em condições naturais, no local de acontecimento dos fenômenos, sem intervenção do pesquisador (Severino, 2007).

Estudo de caso consiste no estudo profundo de um ou de poucos objetos, permitindo assim, um maior detalhamento. Deste modo, possui propósitos de formular hipóteses e desenvolver teorias a fim de explicar as variáveis causais de determinado fenômeno (Gil, 2010). O estudo de caso, não tem como finalidade proporcionar um conhecimento preciso, mas sim, proporcionar uma visão global do problema em questão ou a identificação de possíveis fatores que o influenciam ou são por ele influenciados (Gil, 2010), propósito este perseguido no presente estudo.

Esta pesquisa pode ser enquadrada também como pesquisa ação, a qual possui como característica a busca em diagnosticar um problema ou situação específica, visando alcançar um resultado prático (Gil, 2010), do mesmo modo que propõe mudanças que levem ao aprimoramento das práticas analisadas (Severino, 2007).

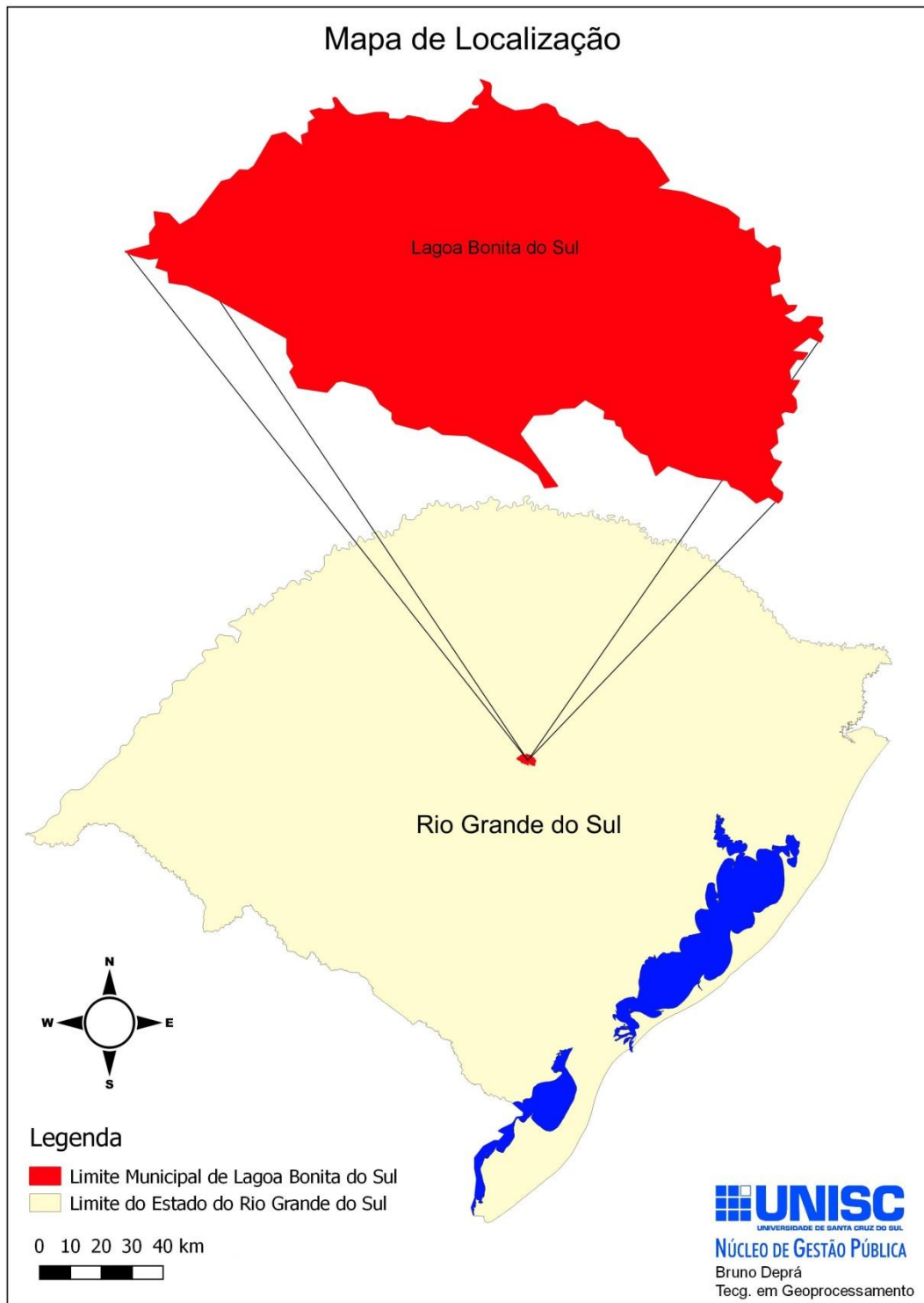
A pesquisa descritiva tem a finalidade de identificar possíveis relações entre as diferentes variáveis estudadas, podendo também, determinar a natureza da relação entre estas variáveis (Gil, 2010). Neste trabalho, foram utilizados os métodos estatísticos multivariados (PCA e HCA) para a determinação das relações entre as amostras.

3.2 Caracterização da área de estudo

Esta pesquisa foi desenvolvida em Lagoa Bonita do Sul, município da região central do Rio Grande do Sul, situado ao sul do Brasil (Figura 01). O município tem uma área territorial de 108,728 km² e a economia está baseada principalmente no setor agropecuário, que estão alicerçados principalmente nos cultivos de tabaco (2100 hectares), soja (1400 hectares) e milho (1100 hectares) (Ibge, 2016).

De acordo com o Censo agropecuário realizado em 2006, existem 589 propriedades rurais no município. Deste total de estabelecimentos agropecuários, 409 utilizam o plantio convencional para o preparo do solo, com utilização de aração e gradagem (Ibge, 2016). A maioria das propriedades rurais são unidades familiares, com áreas pequenas de terra, e dependentes da produção agropecuária (Petry e Silveira, 2017).

Figura 01: Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Núcleo de Gestão Pública – UNISC

Dados demonstram que a atividade da fumicultura é a principal fonte geradora de renda nas propriedades rurais deste município sendo o tabaco responsável por quase 80% do valor gerado pelas lavouras temporárias na comparação com o ano

de 2014 (Petry e Silveira, 2017), sendo que o tabaco gerou R\$ 25.200.000,00 para os agricultores do município no ano de 2016 (Ibge, 2016).

A soja também representa um cultivo importante para a região, gerando para a economia municipal, um valor de R\$ 4.253.000,00 no ano de 2016. Embora a cultura do milho, não represente um valor muito expressivo no valor da produção, totalizando um montante de R\$ 1.792.000,00 em 2016 (Ibge, 2016), deve-se levar em consideração que a grande maioria da produção deste grão, é destinada a alimentação animal, e que possui grande importância para a manutenção e segurança alimentar das propriedades rurais.

A economia da região é altamente dependente do resultado das safras agrícolas, sendo que as condições da fertilidade do solo tornam-se fundamentais para o processo de manutenção familiar e rentabilidade para as pequenas propriedades rurais.

3.3 Coleta das amostras

As amostras de solo foram coletadas no município de Lagoa Bonita do Sul, RS nos meses de maio e junho de 2017. Foram recolhidas 31 amostras de solo, distribuídas de forma a abranger toda a extensão territorial do município. Além das 31 amostras retiradas, foram utilizados mais 13 laudos de análise de solo existentes junto ao escritório municipal da EMATER/RS-ASCAR.

A porção de solo colhida para análise deve ser representativa, para que não ocorram erros de interpretação. Para que a mesma seja significativa, deve-se coletar um número adequado de subamostras, conforme o tamanho e homogeneidade da área (quinze subamostras em média). As porções de solo podem ser coletadas com diversas ferramentas, devendo-se ter o cuidado na escolha do instrumento correto, uma vez que alguns deles podem ocasionar perdas da camada superficial, a qual apresenta maior quantidade de nutrientes e MO em solos em sistema de plantio direto, o que pode ocasionar erros de interpretação de fertilidade (Sbcs, 2004; Sbcs., 2016).

Para lavouras com cultivo convencional e cultivo mínimo, o solo foi coletado com trado calador (Figura 02), na profundidade de 0-20 cm. Nas lavouras com plantio direto, a coleta também foi realizada com trado calador, mas na profundidade de 0-10 cm, conforme recomendações da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

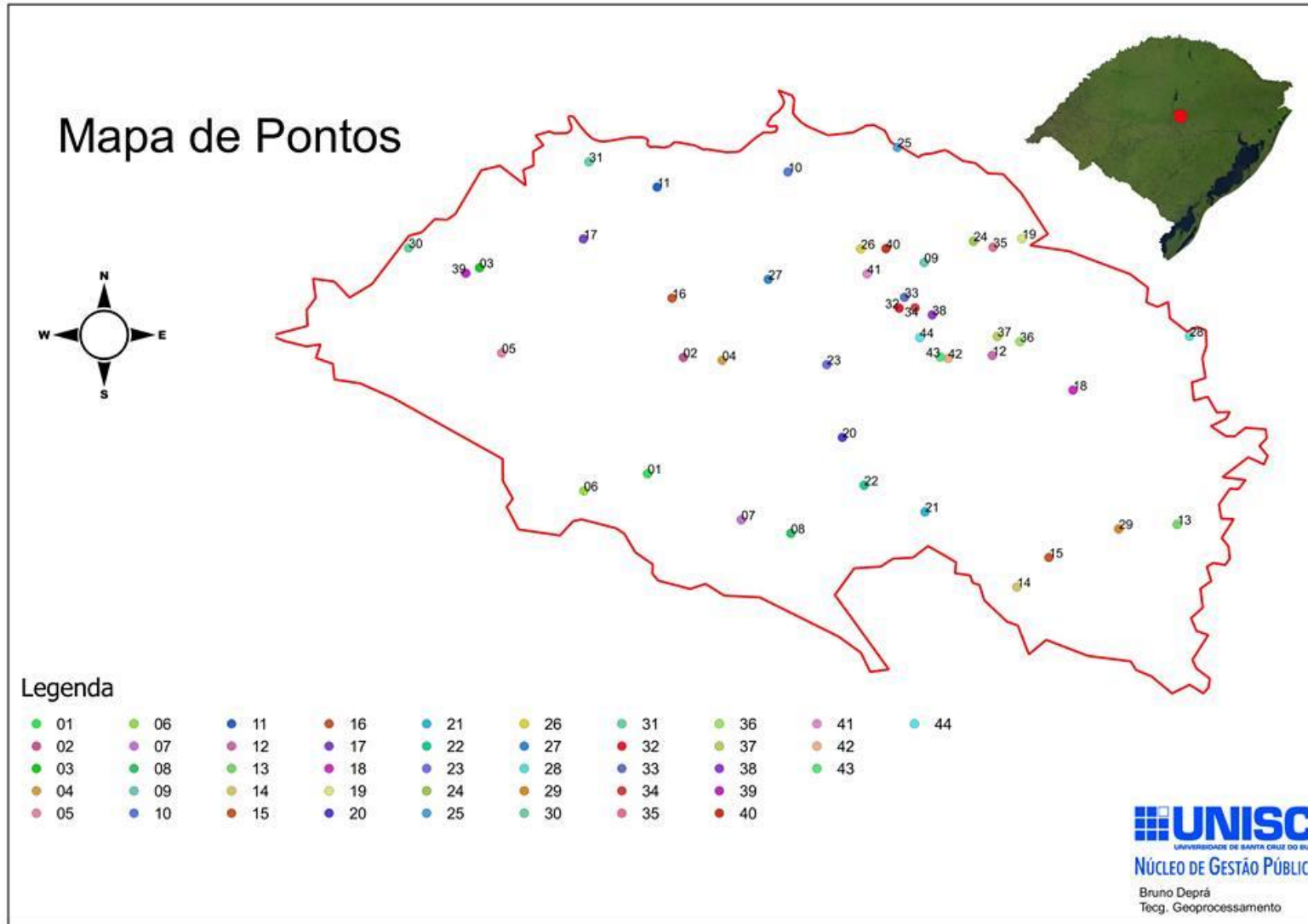
(Sbcs, 2004; Sbcs., 2016). Em sistema de plantio direto, é recomendado que se façam análises periódicas da camada 10-20 cm para fins de monitoramento e identificação de elementos tóxicos (Sbcs., 2016). Cada amostra foi composta por 15 a 20 subamostras, conforme o tamanho da área de coleta.

Figura 02: Trado calador utilizado na coleta das amostras.



As amostras foram condicionadas em embalagens próprias fornecidas pelo laboratório, sendo identificadas por numeração sequencial (A1 até A31) e georreferenciadas com a utilização do software Google Earth pro, e posteriormente alocadas no mapa da Figura 03. Os 13 laudos de análise utilizadas existentes no escritório local da EMATER/RS-ASCAR também foram identificados e inseridas no mapa e colocados na sequência (A32 até A44).

Figura 03: Mapa com identificação dos pontos de coleta.



Fonte: Núcleo de Gestão Pública – UNISC

As amostras de solo foram encaminhadas para a Central Analítica da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC) a qual faz parte da rede credenciada de laboratórios Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo e Tecido Vegetal (ROLAS), nas quais foram analisadas os seguintes parâmetros: porcentagem de argila, pH, índice SMP, teor de P, teor de K, porcentagem de MO, teor de Al, teor de Ca, teor de Mg, teor de H+Al, CTC efetiva, CTC a pH 7,0 saturação da CTC por Al, saturação por bases e saturação por K, relação Ca/Mg, relação Ca/K, relação Mg/K, relação (Ca+Mg)/K, soma de bases, teores de S, de Zn, Cu, de B e de Mn.

Para a pesquisa, foram analisadas 44 amostras no total, sendo 31 amostras com preparo de solo com cultivo convencional, no qual o manejo consiste em aração e gradagens, 12 amostras com cultivos em sistema de plantio direto, com revolvimento do solo apenas na linha de plantio e apenas uma amostra no sistema de cultivo mínimo, onde o preparo do solo não causa tanta desestruturação como no cultivo convencional.

Cabe ressaltar que os 13 laudos utilizados no trabalho, já existentes no escritório municipal da EMATER/RS-ASCAR, foram coletados seguindo as mesmas orientações dos manuais de adubação e calagem 2004 e 2016, com o mesmo trado calador e nas profundidades indicadas pelo manual, conforme o tipo de sistema de preparo do solo utilizado (Sbcs, 2004; Sbcs., 2016).

3.4 Aplicação dos Métodos estatísticos multivariados: Técnica de Agrupamento Hierárquico (HCA) e a Análise de Componentes Principais (PCA)

Para a utilização dos métodos estatísticos multivariados, foram utilizados o software Solo+Mia (<http://www.eigenvector.com>) e ChemoStat (www.quimiometria.com.br) para a comparação dos resultados analíticos com os padrões mínimos de qualidade determinados para as culturas regionais. De forma a identificar os principais pontos críticos da região.

Para este estudo, os resultados obtidos dos laudos dos relatórios de ensaio de solo coletados, foram analisados através de métodos estatísticos multivariados, os quais permitem extrair informações complementares as quais não conseguem ser analisadas quando realizamos uma análise univariada (Panero *et al.*, 2009). Segundo estes mesmos autores, existem duas técnicas de reconhecimento padrão: análise de agrupamento hierárquico (HCA) e a análise de componentes principais

(PCA) as quais buscam elucidar as diferenças e as similaridades entre as amostras analisadas.

A técnica de agrupamento hierárquico faz uma interligação das amostras por associações, produzindo assim um dendrograma, onde as amostras semelhantes são agrupadas gerando conjuntos amostrais que diferem entre si, o que facilita a visualização de semelhança entre as amostras de um mesmo grupo e as diferenciações entre os agrupamentos gerados (Neto e Moita, 1997; Ferreira *et al.*, 1999).

Para a determinação da fertilidade dos solos da área de estudo, foram utilizados os seguintes parâmetros:

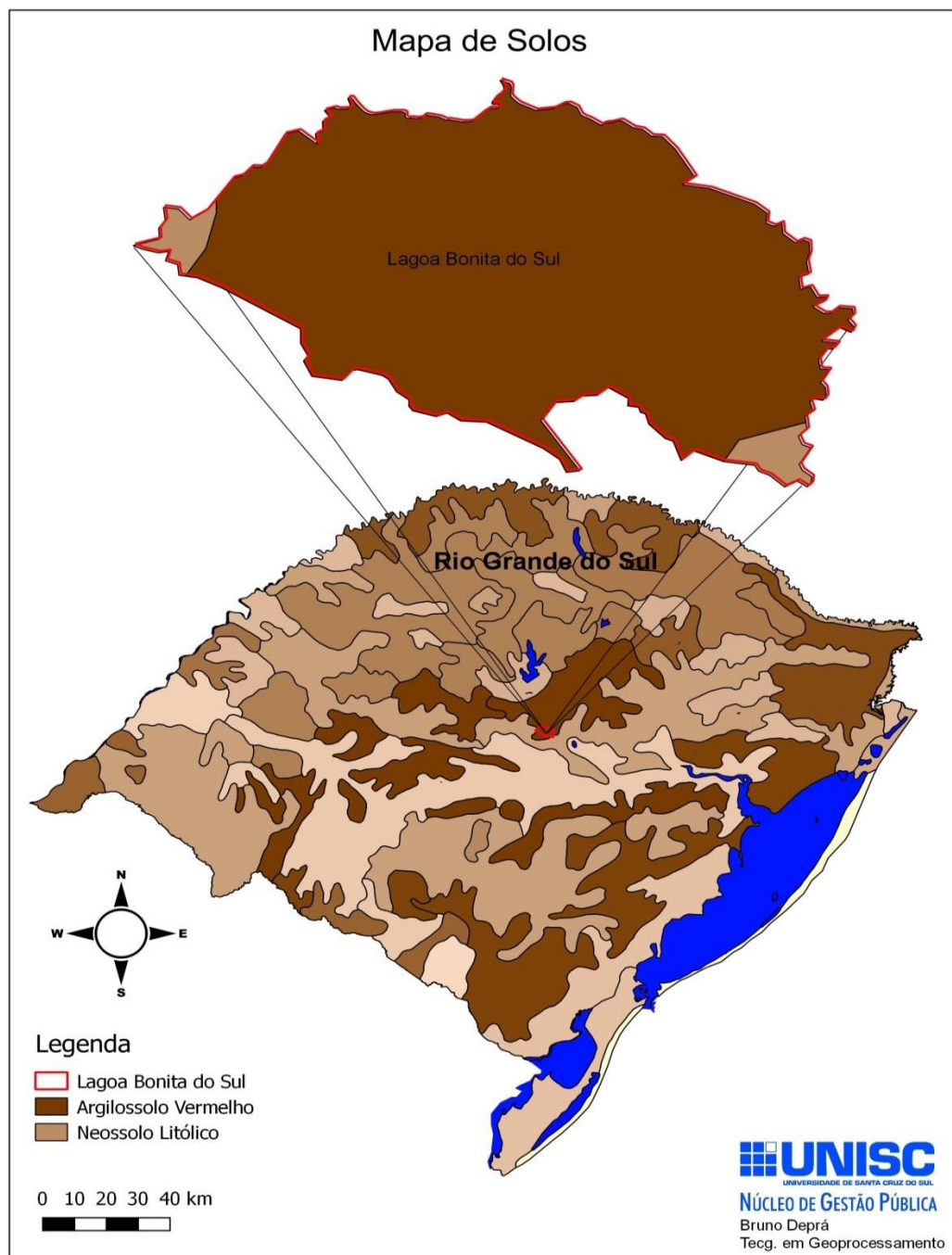
- pH em água;
- Fósforo (P) em mgL^{-1}
- Potássio (K) em mgL^{-1}
- Matéria orgânica (MO) em porcentagem;
- Cálcio (Ca) em $\text{cmol}_c\text{L}^{-1}$;
- Magnésio (Mg) em $\text{cmol}_c\text{L}^{-1}$;
- CTC efetiva em $\text{cmol}_c\text{L}^{-1}$;
- Saturação da CTC por bases em porcentagem;
- Saturação da CTC por alumínio (Al) em porcentagem;
- Enxofre (S) em mgL^{-1}
- Boro (B) em mgL^{-1}
- Manganês (Mn) em mgL^{-1}

Indicadores de fertilidade como pH, teor de MO, N, P e K são essenciais para o estudo de fertilidade de um solo, pois são elementos determinantes no rendimento das culturas e na determinação do nível de impacto ambiental dos agroecossistemas (Zhen *et al.*, 2006).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os solos da região de estudo são bem heterogêneos em relação as propriedades químicas (Tabela 01) e físicas. Dentre os tipos predominantes, podem-se destacar os argissolos vermelhos e neossolos litólicos (Figura 04).

Figura 04: Mapa de solos da região de estudo



Fonte: Núcleo de Gestão Pública – UNISC

Argissolos tendem a possuir perfis com boa profundidade, cuja principal característica é a presença de um horizonte B textural, com incremento de argila na camada subsuperficial. Como características químicas, o destaque é a baixa fertilidade natural, aliado a alta acidez e saturação da CTC por Al (Streck *et al.*, 2008). Já os neossolos litólicos, caracterizam-se pela baixa profundidade de perfil, com uma fina camada de solo diretamente sobre a rocha. Devido sua ocorrência de predomínio em locais mais montanhosos, tendem a apresentar maiores suscetibilidades a erosão. Estes dois tipos de solos podem apresentar grandes diferenças em relação as propriedades químicas e físicas (Tabela 01) (Streck *et al.*, 2008).

Os resultados dos laudos das amostras analisadas, com os parâmetros que foram utilizados no trabalho, bem como o sistema de manejo empregado no preparo do solo de cada área, estão compilados na Tabela 01. Estes dados foram utilizados como parâmetros para a realização da análise da fertilidade dos solos, uma vez que representam os principais fatores que contribuem para isso. O conhecimento da variabilidade da fertilidade é um importante subsídio para a utilização de corretivos e adubações de forma racional (Montezano *et al.*, 2006). Para a determinação de fertilidade e o nível de degradação química de um solo, é necessário que se faça a avaliação de C, N, pH, P, K, Ca, Mg e CTC, o que permite estabelecer o nível de deterioração do solo estudado (Waswa *et al.*, 2013).

Tabela 01: Compilação dos laudos das amostras e sistema de cultivo dos locais de coleta.

N°	SC	pH	P	K	MO	Ca	Mg	CTC	Saturação CTC		S	B	Mn
		H ₂ O	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	%	cmol _c L ⁻¹	cmol _c L ⁻¹	Efetiva	Al %	Bases %	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹	mgL ⁻¹
A1	PC	4,8	38,3	191	1,2	3,5	1,2	6,5	20,1	51,6	35,7	0,15	41
A2	PC	5,7	11,4	226	2,0	6,7	2,0	9,3	0	69,1	28,2	0,36	41
A3	PC	5,9	35,1	158	1,6	5,3	1,2	7,0	0	69,3	5,4	0,37	24
A4	PC	5,3	24,2	212	1,6	5,3	1,7	8,4	10,8	59,4	12,6	0,18	35
A5	CM	5,3	45,4	238	4,0	7,5	2,7	11,3	4,9	61,1	58,4	0,37	20
A6	PC	6,1	29,7	220	2,2	8,7	2,7	11,9	0	77,9	5,6	0,35	7
A7	PC	4,7	38,3	229	2,4	3,7	1,2	8,6	36,8	34,9	35	0,18	23
A8	PC	5,7	18,2	159	2,4	8,2	3,3	11,9	0	75,2	3,5	0,2	12
A9	PC	6,0	37,4	194	1,9	10	2,7	13,2	0	85,8	2,3	0,37	19
A10	PC	5,3	39,8	217	2,2	7,6	2,2	10,5	2,5	71,2	16,9	0,23	20
A11	PC	6,2	35,6	246	1,8	7,2	2,3	10,1	0	84,5	11,2	0,24	15
A12	PC	5,5	3,7	56	2,9	7,7	3,0	10,8	0	69,2	7,6	0,23	19
A13	PD	5,1	4,7	187	2,8	4,8	1,3	8,1	18,4	45,8	15,7	0,24	36
A14	PC	5,0	43,0	207	1,5	3,6	1,3	6,9	21,6	46,6	19,7	0,2	31
A15	PC	4,8	17,1	201	1,9	4,8	1,2	8,5	22,8	46,5	19,5	0,24	49
A16	PC	5,2	31,1	197	2,8	5,9	1,9	8,9	6,3	63,0	29,7	0,25	17
A17	PC	5,4	7,6	147	2,4	6,0	2,3	9,2	5,8	60,7	17,8	0,22	19
A18	PD	5,3	12,0	154	3,5	5,6	2,0	9,2	13,2	50,5	6,4	0,22	20
A19	PC	5,9	38,4	228	2,1	8,4	3,3	12,3	0	79,0	8,0	0,22	9
A20	PC	5,5	95,3	223	1,6	5,4	1,7	7,7	0	70,8	8,5	0,22	32
A21	PC	5,0	8,4	139	2,6	4,4	1,3	8,4	28,7	40,1	8,4	0,23	31
A22	PC	5,6	9,6	134	2,0	7,0	2,4	9,8	0	75,5	8,8	0,26	20
A23	PC	5,4	79,0	125	1,1	2,7	0,8	4,1	8,1	53,6	5,0	0,23	15
A24	PC	5,4	48,6	234	1,7	8,0	2,6	11,4	2,4	75,4	10,3	0,29	19
A25	PC	5,4	69,5	179	2,1	5,8	2,0	8,9	6,8	65,1	5,3	0,18	14
A26	PD	5,4	21,4	185	2,3	7,0	2,5	10,3	3,3	72,1	6,2	0,26	19
A27	PC	4,9	41,6	226	1,3	8,0	2,8	13,2	14	64,1	9,4	0,18	59
A28	PC	4,9	7,5	297	2,9	5,7	1,6	8,8	8,4	50,4	15,5	0,25	56
A29	PC	4,9	6,5	209	3,6	5,4	1,8	10,2	24,2	46,9	22,6	0,22	32
A30	PC	4,8	7,1	214	1,5	2,3	0,6	4,9	29,7	27,7	25,1	0,18	126
A31	PC	4,8	27,4	148	2,5	3,8	1,1	7,4	27,6	38,9	27,2	0,23	22
A32	PD	5,3	44,8	242	3,4	8,0	2,6	11,4	1,8	61,9	6,4	0,2	10
A33	PD	5,3	13,0	122	3,8	8,0	2,5	11,1	2,7	66,3	9,0	0,3	9
A34	PD	4,4	3,6	166	3,7	2,5	0,7	7,4	51,2	17,3	5,3	0,3	30
A35	PC	5,3	156,4	264	2,6	6,4	2,3	9,9	5,2	64,9	12,7	0,11	18
A36	PC	5,4	6,3	114	5,2	7,1	3,8	11,3	1,1	69,5	13,2	0,2	2
A37	PC	5,2	6,1	169	5,2	5,7	2,3	8,7	3,4	55,0	16,6	0,3	4
A38	PD	5,1	12,0	164	3,9	7,3	2,8	11,2	6,2	54,8	11,6	0,4	10
A39	PC	5,8	7,2	60	1,3	2,0	0,8	3,0	0	62,7	2,4	0,1	27
A40	PD	5,9	8,7	113	2,5	8,6	4,0	12,9	0	82,4	2,0	0,2	15
A41	PD	5,8	9,6	107	3,4	9,6	4,2	14,1	0	82,0	2,3	0,1	7
A42	PD	5,6	6,4	93	4,0	8,2	5,2	13,7	0	75,0	12,3	0,36	13
A43	PD	5,7	17,8	144	4,4	11	5,4	16,7	0	77,2	14,9	0,45	11
A44	PD	5,4	18,2	96	2,7	7,1	3,0	10,6	1,7	64,9	12,7	0,4	27

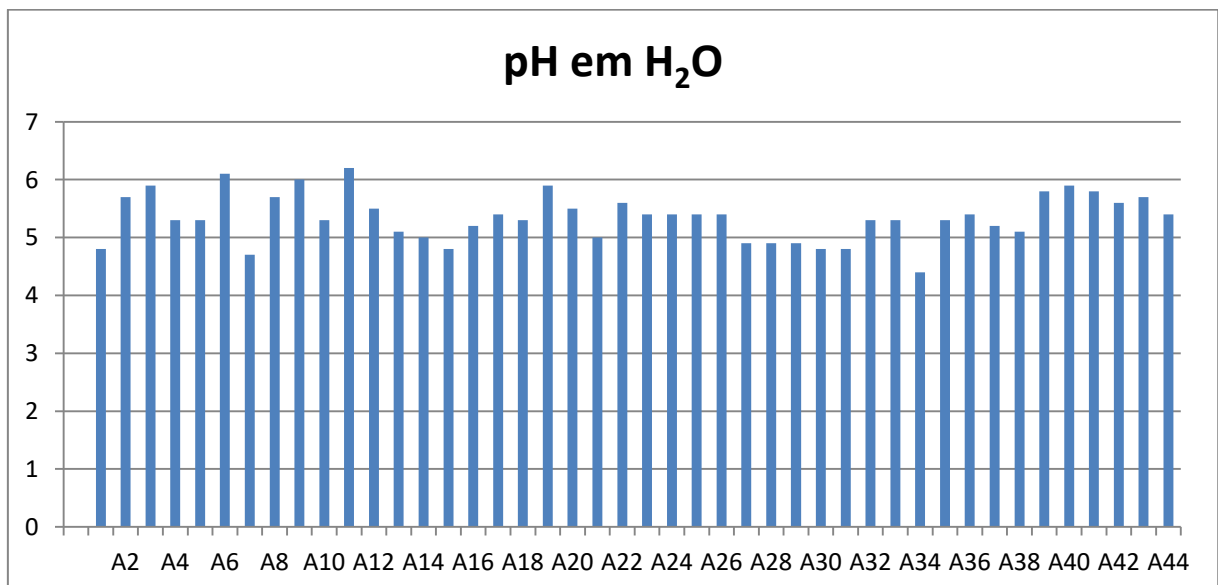
Elaborada com base nos laudos das amostras coletadas e observação nos pontos de coleta. SC: Sistema de cultivo; PC: Plantio convencional, PD: Plantio Direto, CM: Cultivo mínimo.

4.1 Valores de pH

Os solos do Rio Grande do Sul apresentam em seu estado natural, a tendência de acidez, o que pode afetar o desenvolvimento e produtividade da maioria dos cultivos agrícolas (Sbcs., 2016). A maior parte das plantações de grãos (milho e soja) e o tabaco, principais cultivos do município de Lagoa Bonita do Sul, possuem como pH de referência o valor de 6,0. Mesmo assim, com pH abaixo deste valor, as plantas podem apresentar um bom rendimento, sendo que a produtividade geralmente só será afetada pelo pH quando este valor for inferior a 5,5 e no qual ocorre a presença dos íons de Al^{3+} , que são prejudiciais a grande maioria dos cultivos (Sbcs., 2016).

A observação do pH das amostras indicou a predominância de solos ácidos na área estudo (Figura 05), com valores que variaram entre 4,4 e 6,2. Do total, 65,9% das amostras apresentaram pH em água abaixo de 5,5 no qual já existe a presença de Al tóxico, o que pode interferir no desenvolvimento das plantas suscetíveis a este elemento (Sbcs, 2004; Sade *et al.*, 2016; Sbcs., 2016). O íon de Al, assim, fica adsorvido nas cargas negativas do solo, saturando e diminuindo a CTC dos cultivos agrícolas (Sbcs., 2016). Apenas 6,8 % do total de amostras analisadas apresentou $pH \geq 6,0$, valor este usado como referência para o cultivo de grãos e tabaco (Sbcs, 2004; Sbcs., 2016).

Figura 05: Valor do pH em água das amostras analisadas.



O sistema de cultivo e preparo do solo não demonstrou influência sobre o valor do pH, uma vez que tanto sistema com plantio direto, como convencional e cultivo mínimo, apresentaram valores dispersos, sem nenhuma correlação com os sistemas de manejo. A coleta de amostra de 0-10 cm para o sistema de plantio direto pode ter influenciado o resultado do pH, uma vez que neste sistema, as aplicações de adubação e calagem são feitas na superfície do terreno. Ao longo do perfil, ocorre a tendência de diminuição do pH (Caires e Rosolem, 1998) e que poderia ter levado a resultados de maior acidez, mesmo que pouco representativa, na camada 0-20 cm. A acidez afeta diretamente a absorção de Mg, Ca e K pelas plantas, podendo influenciar na sua nutrição, sendo que as melhores faixas de absorção destes três nutrientes ocorre com valores de pH superiores a 6,0 – 6,0 – 5,0 respectivamente (Gransee e Führs, 2013).

4.2 Porcentagem de matéria orgânica

A MO é importante parâmetro a ser analisado na gestão e fertilidade do solo, principalmente naqueles com alta concentração de areia, nos quais, o aumento na concentração de MO, gera um benefício no aumento da capacidade de retenção de água, na formação da estabilidade das partículas e no sequestro de carbono (Teixeira *et al.*, 2011). Para estes mesmos autores, a adição de adubação, não influencia significativamente a porcentagem de MO no solo. A MO é classificada em três faixas, de acordo com sua porcentagem, conforme Tabela 02 (Sbcs., 2016).

Tabela 02: Interpretação dos teores de MO.

Matéria orgânica	
Faixa (%)	Classe
≤ 2,5	Baixo
2,6 – 5,0	Médio
>5,0	Alto

Fonte: SBCS, 2016.

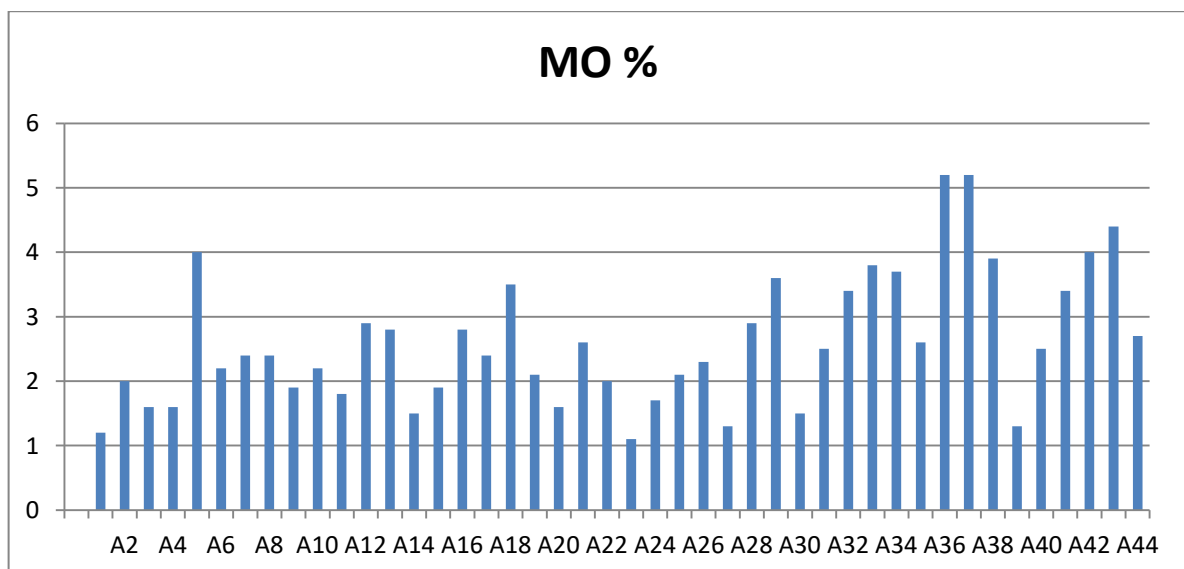
Deste modo, das 44 amostras analisadas, pode-se perceber uma grande variação quanto a porcentagem de MO, com uma amplitude entre 1,1% a 5,2%, conforme Figura 06. Deste total, 25 amostras (56,8%) apresentaram porcentagens

de MO $\leq 2,5\%$, sendo classificados como teores “baixo”, 17 apresentaram valores entre 2,6 e 5,0% e são considerados como “médio” e apenas duas amostras com índices superiores a 5,0% de MO e deste modo, destacadas como conteúdos “alto” (Tabela 02) (Sbcs., 2016), o que indica uma baixa concentração de MO nos solos analisados (Figura 06).

Grande parte do nitrogênio (N) do solo é proveniente da MO, sendo que isto, afeta diretamente a fertilidade dos cultivos, uma vez que as plantas exigem níveis consideráveis deste nutriente para um bom desenvolvimento (Sbcs, 2007). Para a cultura da soja, a inoculação de sementes com bactérias nitrificadoras (estirpes de rizóbio) suprem a demanda de N, porém, o cultivo das gramíneas exige uma grande demanda deste nutriente, exigindo aplicações de adubação nitrogenada (Sbcs., 2016).

A aplicação de N por adubação apesar de ser importante, pode consistir em um problema ambiental, uma vez as plantas absorvem este elemento na forma de nitrato (NO_3^-) ou amônio (NH_4^+) (Sbcs, 2006). Os íons de nitrato, não são adsorvidos pela cargas negativas dos coloides (CTC), estando sujeitos a contaminações ambientais por lixiviação no perfil, o que demonstra a importância da MO para os cultivos agrícolas (Sbcs, 2006).

Figura 06: Porcentagem de MO.



A baixa concentração de MO encontrados nos solos da região estudada pode ser consequência do manejo empregado aos cultivos. O plantio no sistema

convencional expõe a MO a oxidação e a ação dos microrganismos, facilitando a sua decomposição, resultado oposto do que ocorre em sistema de plantio direto, no qual ocorre a humificação dos compostos orgânicos (Bayer *et al.*, 2003) o que favorece o aporte de material orgânico ao sistema e permite sua acumulação ao longo do tempo, favorecendo para o aumento da reserva de MO no solo (Bertol *et al.*, 2004). Mesmo com a utilização de plantio direto, os níveis gerais de MO apresentaram uma preocupação para a fertilidade do solo da região, a qual apresentou uma média de apenas 2,6% nos solos analisados, o que pode afetar negativamente a qualidade do solo local, podendo representar um fator limitante na área de estudo.

Além do preparo convencional, a presença de baixo índice desta variável no município, pode ser em decorrência do sistema de plantio direto ainda ser uma prática recente, sendo que o sistema ainda não se encontra em equilíbrio. Existe a necessidade de acumulação de grande quantidade de material orgânico, que aumentará os estoques de carbono no solo e conseqüentemente ao longo de vários anos, proporcionar um aumento na MO (Canellas *et al.*, 2007).

Observou-se uma tendência de maior acumulação de MO nos sistemas de cultivo com plantio direto e sistema de cultivo mínimo, conforme Tabela 02. Porém, as amostras A36 e A37, mesmo em sistema de plantio convencional apresentaram os maiores índices de concentração, ambas com 5,2%. Este acúmulo possivelmente seja ocasionado pelo manejo do agroecossistema, uma vez que o agricultor busca deixar grande quantidade de material orgânico sobre a superfície (Figura 07). Outra hipótese é em relação as condições físicas do solo, que por sua vez, também influenciam diretamente nos estoques de MO existentes (Sbcs, 2007) e os quais não foram abordadas neste trabalho.

A MO ajuda a diminuir o escoamento de água superficial, diminuindo os índices de erosão, e conseqüentemente, atenuando o transporte de sedimentos, nutrientes e agrotóxicos para os cursos de água, reduzindo a contaminação e eutrofização das águas superficiais (Teixeira *et al.*, 2011) e deste modo, o nível de sua concentração em um solo, é um importante parâmetro para a determinação da sustentabilidade do sistema produtivo.

Figura 07: Área de coleta da amostra A37 – presença de grande quantidade de material orgânico.



Mesmo em manejo convencional, observa-se grande quantidade de material orgânico na superfície o que pode levar a acumulação de MO.

4.3 Teores de potássio (K)

O teor de K variou significativamente entre as amostras analisadas, representando valores entre 56 e 297 mgL⁻¹ (APÊNDICE A). As culturas de grãos como a soja e o milho, que são cultivados na região do estudo, são consideradas como culturas intermediárias em relação a necessidade de K (Sbcs., 2016).

Um estudo realizado com 168.220 laudos de análise de solo demonstrou que o Rio Grande do Sul possui em seu solo níveis consideráveis de K, sendo que 73,1% das análises consideradas no trabalho apresentavam níveis satisfatórios deste nutriente, o que permitiu a conclusão de que o K não é considerado um fator limitante da produtividade neste Estado (Rheinheimer *et al.*, 2001).

Deste modo, baseado na Tabela 03, as análises apresentaram a seguinte classificação: 38,6% das amostras com teores “muito alto”, 45,4% com índices “alto”, 13,6% com valores “médio” e apenas 2,2% amostra com teor “baixo”. Nenhuma amostra apresentou valores “muito baixo”, podendo destacar que o K não é um limitante da fertilidade dos solos estudados para a produção de milho e soja.

Tabela 03: Interpretação dos teores de K para culturas de grãos.

Teores de Potássio (K) mg de K/dm³ para soja e milho – CTC_{pH 7,0} do solo					
CTC_{pH 7,0}	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
≤ 7,5	≤ 20	21 – 40	41 – 60	61 – 120	> 120
7,6 – 15,0	≤ 30	31 – 60	61 – 90	91 – 180	> 180
15,1 – 30,0	≤ 40	41 – 80	81 – 120	121 – 240	> 240
> 30,0	≤ 45	46 – 90	91 – 135	136 – 270	> 270

Fonte: SBCS, 2016.

O cultivo do tabaco apresenta uma menor exigência de K em comparação com o plantio de grãos (Sbcs., 2016). Comparando os dados com a Tabela 04, 68,2% das amostras apresentaram teores de K considerados como “muito alto”, 29,6% com valores “alto” e apenas 2,2% com valor considerado “baixo”. Cabe salientar que nenhuma amostra apresentou valores “médio” e “muito baixo” deste modo, a quantidade deste nutriente requerida pode ser facilmente suprida pelo estoque existente no solo e aplicação de adubações de reposição.

Tabela 04: Interpretação dos teores de K para o tabaco de estufa.

Teores de Potássio (K) mg de K/dm³ para tabaco – CTC_{pH 7,0} do solo					
CTC_{pH 7,0}	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
≤ 7,5	≤ 15	16 – 30	30 – 45	46 – 90	> 90
7,6 – 15,0	≤ 20	21 – 40	41 – 60	61 – 120	> 120
15,1 – 30,0	≤ 30	31 – 60	61 – 90	90 – 180	> 180
> 30,0	≤ 35	36 – 70	71 – 105	106 – 210	> 210

Fonte: SBCS, 2016.

As interpretações dos teores de K e a recomendação de aplicação deste elemento no solo depende de vários fatores, variando conforme a capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0 e pelo tipo de cultura a ser implantada na área (Sbcs., 2016).

Como as principais culturas do município de Lagoa Bonita do Sul não apresentam muita exigência de K para o seu desenvolvimento, a aplicação de nutrientes potássicos podem não apresentar efeitos benéficos ao sistema produtivo, pelo contrário, podendo levar a contaminação das águas superficiais. Do mesmo modo, a utilização excessiva de K leva a planta a uma diminuição de absorção de Ca, Mg e B, podendo provocar deficiência destes nutrientes (Sousa *et al.*, 2008).

Assim como a deficiência de nutrientes podem ocasionar distúrbios nos cultivos, o excesso da disponibilidade de K provocou a diminuição na concentração

de Ca em plantas de cártamo (*Carthamus tinctorius*) no caule, nas raízes, nas folhas, além de prejudicar o crescimento das raízes desta planta (Farhat *et al.*, 2013).

A amostragem de solo na profundidade 0-20 cm talvez não seja suficiente para a determinação da necessidade de aplicação de K, uma vez que grande parte das plantas desenvolve suas raízes com profundidade de até 100 cm no solo, podendo este nutriente estar insuficientemente disponível nos horizontes subsuperficiais (Rosolem e Steiner, 2017).

Culturas que receberam aplicações maiores de K apresentaram maior absorção deste nutriente que as plantas sem tratamento. Além disso, a complexidade do ciclo deste macronutriente no solo é muito variável tendo pouca influência da rotação de culturas, da aplicação de fertilizantes e da disponibilidade contida no solo (Tan *et al.*, 2012). Deste modo, a eficiência do uso de fertilizantes a base de K nos sistemas de cultivo, estão diretamente ligados a mineralogia do solo e as condições climáticas do local (Tan *et al.*, 2012).

4.4 Concentração de fósforo (P)

Laudos de amostras de solos do Rio Grande do Sul, demonstram que os níveis de P existentes nos solos desta região, vêm aumentando gradativamente ao longo dos anos (entre 1981 – 2000), mas que apesar destes aumentos, a disponibilidade deste nutriente ainda é um dos fatores limitantes de fertilidade e produtividade do Estado (Rheinheimer *et al.*, 2001).

A interpretação dos teores de P é realizada pelo teor de argila existente no solo, sendo que para questões de classificação, os solos dividem-se em classes de 1 a 4 conforme a porcentagem de argila existente, conforme tabelas 05 e 06 (Sbcs., 2016).

Cada tipo de cultivo apresenta uma resposta diferente a adubação fosfatada, e deste modo, existem culturas com maior ou menor grau de exigência deste nutriente. Grande parte das culturas de grão (exceto arroz irrigado por inundação) são exigentes em P para seu desenvolvimento, exigindo valores bem consideráveis deste nutriente. Já culturas como o tabaco de estufa são consideradas menos exigentes neste elemento (Sbcs., 2016).

Tabela 05: Interpretação dos teores de P para culturas de grãos.

Teores de Fósforo (P) para soja e milho – teor de argila					
Classe - % argila	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
2 (60 – 41)	≤ 4,0	4,1 – 8,0	8,1 – 12,0	12,1 – 24,0	> 24,0
3 (40 – 21)	≤ 6,0	6,1 – 12,0	12,1 – 18,0	18,1 – 36,0	> 36,00
4 (≤ 20)	≤ 10,0	10,1 – 20,0	20,1 – 30,0	30,1 – 60,0	> 60,0

Fonte: SBCS, 2016.

Tabela 06: Interpretação dos teores de P para o cultivo do tabaco.

Teores de Fósforo (P) para tabaco – teor de argila					
Classe - % argila	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
2 (60 – 41)	≤ 2,0	2,1 – 4,0	4,1 – 6,0	6,1 – 12,0	> 12,0
3 (40 – 21)	≤ 3,0	3,1 – 6,0	6,1 – 9,0	9,1 – 18,0	> 18,0
4 (≤ 20)	≤ 5,0	5,1 – 10,0	10,1 – 15,0	15,1 – 30,0	> 30,0

Fonte: SBCS, 2016.

Em relação ao P, com base no Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (2016), a classificação é determinada com base na porcentagem de argila. Sendo assim, para a cultura da soja e do milho, 31,8% das amostras apresentaram teores classificados como “muito alto”, 20,5% como “alto”, 4,5% como “médio”, 31,8% como “baixo” e 11,4% amostras na classificação “muito baixo” (APÊNDICE B).

Quando se compara estes resultados ao cultivo do tabaco, temos a classificação: 52,2% amostras classificadas com teores “muito alto”, 18,2% como “alto”, 18,2% como “médio”, 11,4% como “baixo” e nenhuma amostra classificada como “muito baixo”, uma vez que a cultura é menos exigente em P que o cultivo de grãos (Sbcs., 2016).

Percebe-se uma grande variação em relação aos teores de P do solo (3,6 a 156,4 mgL⁻¹), mas pode-se citar como posição positiva em relação a fertilidade, uma vez que mais da metade delas encontra-se nas faixas “alto” e “muito alto”. Mesmo assim, grande quantidade de amostras apresentam valores bem baixos deste nutriente, podendo ser considerado como um limitante de fertilidade destes sistemas.

A amostra A35 apresentou índices bem acima dos demais solos analisados (Tabela 01) este resultado pode ser fruto de uma adubação recente com altas concentrações de P, uma vez que as demais coletas realizadas próximas a este ponto, não apresentaram índices semelhantes. O excesso de P pode ser prejudicial

ao meio ambiente, pois pode ser carregado aos recursos hídricos, podendo ocasionar a eutrofização das águas (Bai *et al.*, 2013).

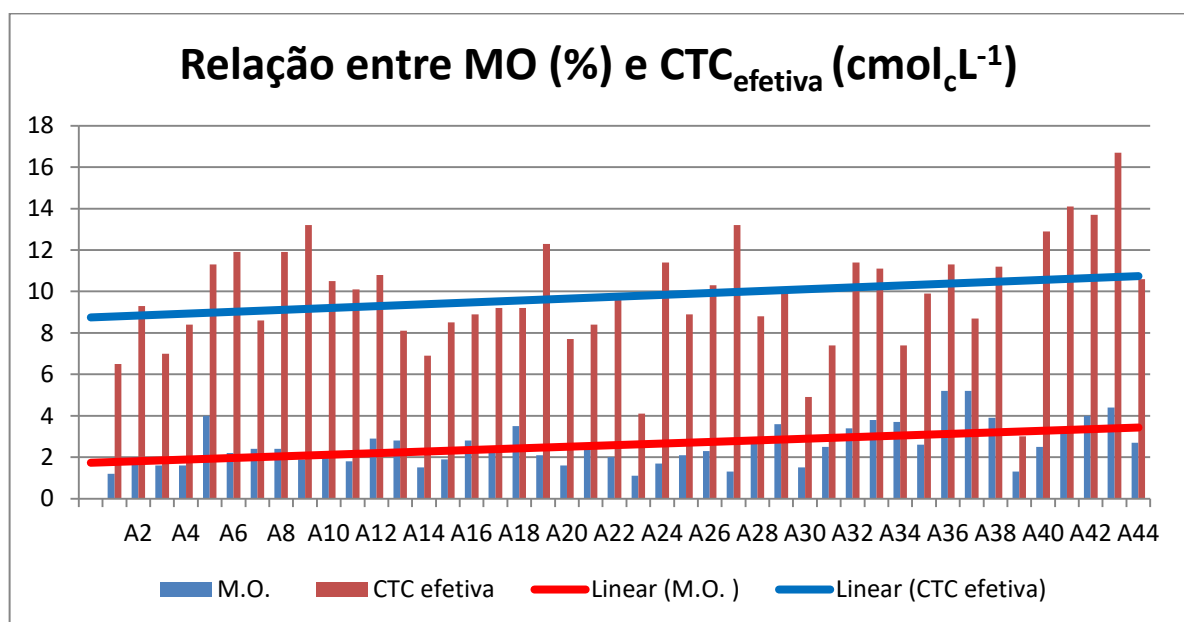
4.5 Valores da Capacidade de troca de cátions: $CTC_{efetiva}$

A CTC de um solo está ligada diretamente ao teor de MO (Gruba e Mulder, 2015), sendo considerada um fator importante na resiliência e na capacidade de manutenção das características funcionais. Solos altamente resilientes, ao receberem adição de adubação e agrotóxicos, podem transformá-los em produtividade, enquanto que em solos pouco resilientes, pode ocorrer contaminação ambiental (Schiefer *et al.*, 2016).

A CTC dos solos da área de estudo, apresentou bastante amplitude, variando entre de 3,0 a 16,7 $cmol_cL^{-1}$, apresentando uma correlação positiva com a concentração de MO (Figura 08). A MO é fundamental para o aumento da CTC de um solo (Gruba e Mulder, 2015; Ulery *et al.*, 2017).

O teor de argila contribui para o aumento da CTC de um solo, enquanto que os valores de pH baixo afetam negativamente estes índices (Khaledian *et al.*, 2017), embora não tenham sido encontradas evidências dos valores de pH com a CTC neste estudo.

Figura 08: Relação entre porcentagem de MO e $CTC_{efetiva}$ com linha de tendência.



4.6 Saturação da CTC por Bases e Alumínio (Al)

A saturação da CTC por bases, é um indicador de fertilidade do solo, sendo também utilizada para a recomendação da dose de corretivos de pH (Sbcs., 2016). Deste modo, é desejável que sua porcentagem esteja com valores \geq a 65%. Ao todo, 54,5% das amostras apresentaram valores inferiores aos 65%, o que afeta negativamente a fertilidade e produtividade do sistema agrícola. A fertilidade aumenta proporcionalmente com o acréscimo da saturação de bases do solo (Volpe *et al.*, 2008). Por outro lado, a elevação da saturação por bases está relacionada a elevação do pH, o que pode ocasionar deficiência de micronutrientes quando os valores de pH atinjam o valor de 6,3 (Sbcs, 2007).

Cabe destacar, que não foram observadas relações entre saturação de bases e sistema de preparo do solo neste estudo, diferentemente da relação com o pH, o qual influenciou diretamente sobre este parâmetro, conforme Tabela 01.

A relação entre saturação por bases e saturação por Al é inversamente proporcional quando trata-se de fertilidade do solo. A adsorção de íons de Al aos colóides do solo interfere diretamente na saturação de bases da CTC, favorecendo a formação de fosfatos de alumínio, com baixa solubilidade, podendo ocasionar deficiência de P. Além disso, pode favorecer a lixiviação de Ca e Mg no perfil, causando insuficiência nutricional as plantas (Sbcs, 2007).

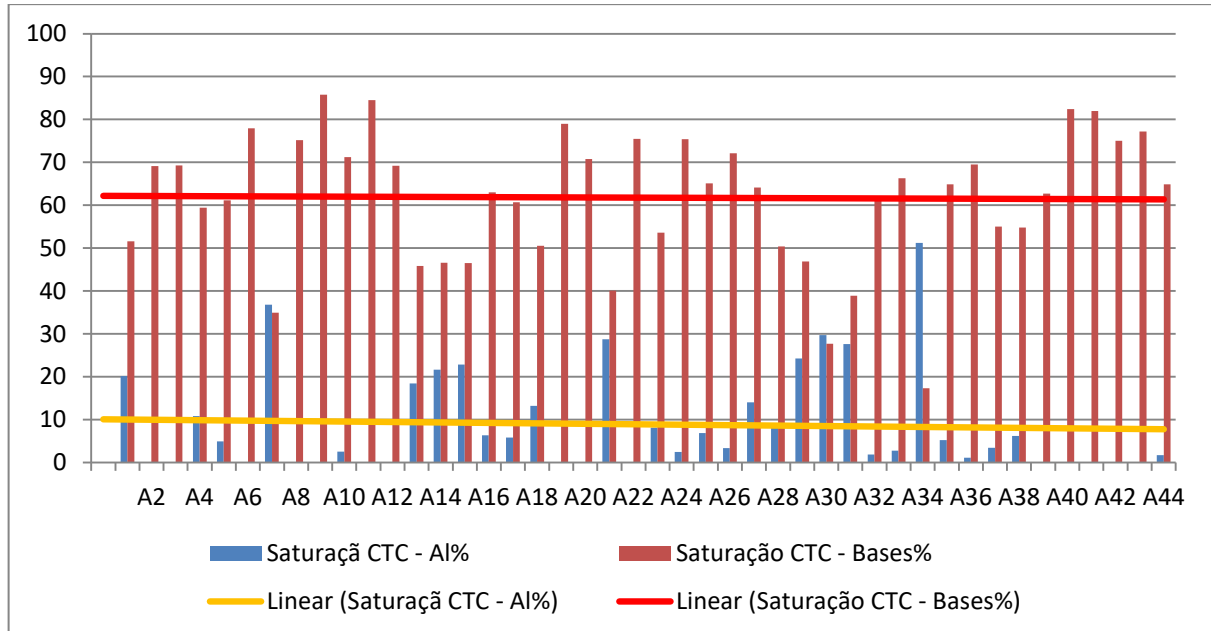
Ao total, 29,5% das amostras apresentaram índices de saturação da CTC por Al acima de 10% (Figura 09), um índice considerado alto e prejudicial para a maioria dos cultivos agrícolas do estado do Rio Grande do Sul (Sbcs., 2016). Além disso, nove laudos de análise apresentaram saturação da CTC acima de 20%, dois com saturação maior que 30% e um com 51,2% da CTC comprometida com íons de Al.

Diversos fatores podem influenciar a suscetibilidade ou resistência das plantas ao Al. Dentre estes fatores, estão a concentração e a forma iônica do Al que a planta esta exposta; o pH e sua estabilidade no substrato; o tempo de exposição da planta ao Al; a força iônica do meio de cultura; o tipo de solo do cultivo; a disponibilidade de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas e a idade e o tipo de cultivar da planta utilizada (Poschenrieder *et al.*, 2008).

A aplicação de calcário em solos com pH baixo apresenta grandes impactos sobre a produtividade das culturas, sendo necessário realizar avaliações periódicas

da acidez, uma vez que grande parte das terras agrícolas apresentam-se em estado ácido (Atkinson, 2014).

Figura 09: Saturação da CTC por Al e por bases em porcentagem com linhas de tendências.



O Al é proveniente dos processos naturais de intemperização do solo, porém, alguns tipos de manejos agrícolas podem influenciar e desencadear a toxicidade deste elemento. A remoção dos produtos agrícolas (grãos, folhas, frutos), a lixiviação de N, o uso excessivo de fertilizantes e a acumulação de MO, acidificam o solo e podem promover a liberação dos íons de Al tóxico (Sade *et al.*, 2016).

A toxicidade do Al está associada a deformações no sistema radicular das plantas suscetíveis, interferindo na divisão, no aumento e rigidez das paredes celulares, modificando a estrutura e a função da membrana plasmática. O Al afeta o desenvolvimento das raízes, ocasionando a deficiência de P, o que leva a diminuição do crescimento das plantas (Sade *et al.*, 2016).

As culturas predominantes da área estudada possuem suscetibilidade ao Al, podendo ocorrer intoxicação e queda na produtividade. Apesar disto, os íons de Mg^{2+} tem funções químicas e fisiológicas nas plantas, principalmente na alocação de carboidratos dos brotos para as raízes e na exsudação de ácidos orgânicos, podendo ser elemento que proporciona um aumento da resistência das plantas a ação do Al^{3+} (Bose *et al.*, 2011).

4.7 Interpretação dos índices de macronutrientes (Ca, Mg e S)

De acordo com (Sbcs., 2016) os teores de Ca e Mg e S de um solo são enquadrados em três faixas de acordo com sua concentração, conforme tabela 07:

Tabela 07: Interpretação dos teores de Ca, Mg e S.

Classe de disponibilidade	Cálciocmol _c /dm ³	Magnésio	Enxofre mg/dm ³
Baixo	< 2,0	< 0,5	< 2,0
Médio	2,0 – 4,0	05 – 1,0	2,0 – 5,0
Alto	> 4,0	> 1,0	> 5,0 ⁽¹⁾

Fonte: SBSC, 2016. ⁽¹⁾ Para arroz irrigado, leguminosas, brássicas e liliáceas o teor deve ser maior que 10mg/dm³, devendo considerar que a camada 10-20 cm pode apresentar teores mais elevados de S que a camada 0-10 cm.

Para o bom rendimento dos cultivos agrícolas, os índices satisfatórios destes nutrientes devem estar na classe “alto”, porém, algumas culturas menos exigentes, atingem rendimento satisfatório com classificação de Ca e Mg na classe “médio”. Para o S, mesmo com valores “altos”, algumas culturas necessitam de um aporte maior deste nutriente (Sbcs., 2016).

Quantidades expressivas de Ca estão presentes nos solos da região de estudo. Com valores considerados “médio” encontram-se 18,2% das amostras analisadas, sendo que 81,8% estão na classificação “alto” (APÊNDICE C), sendo que a aplicação de calcário dolomítico ajuda a aumentar os índices de Ca e Mg do solo (Sbcs., 2016).

A fertilidade de um solo, geralmente não é afetada pelas proporções entre Ca, Mg e K, sendo que as plantas não necessitam uma proporção específica de cátions para atingirem seu potencial produtivo, uma vez que o sistema de transporte de íons de um planta é altamente sofisticado, a na maioria das vezes consegue se adaptar as condições de mudança na disponibilidade dos nutrientes (Gransee e Führs, 2013).

A disponibilidade do Mg aos cultivos agrícolas depende de diversos fatores, dentre eles, as condições ambientais favoráveis (precipitação, clima); as condições do solo (tipo de solo, estrutura e teor de nutrientes) e da exigência nutricional por Mg das espécies que estão sendo cultivadas (Gransee e Führs, 2013). Os resultados das amostras demonstram que apenas 9,1% dos solos apresentam valores de Mg

classificados como “médio”, sendo que 90,9% apresentam concentrações “alto” (APÊNDICE D) (Sbcs., 2016).

Nas últimas décadas, aumentou-se a necessidade de adubação a base de S. Esta necessidade está diretamente ligada ao resultado da diminuição da deposição atmosférica de S e pela utilização de adubação com maiores teores de P, os quais possuem menores quantidades de S que os fertilizantes utilizados anteriormente (Boye *et al.*, 2010). A utilização da adubação com N-P-K mascarou por muito tempo a deficiência deste nutriente (Sbcs, 2007).

Todos os resultados apontaram para valores significativos de S nos solos da região. Grande parte, 86,4% estão caracterizados com índices “alto” e apenas 13,6% como “médio” (Sbcs., 2016) (APÊNDICE E). Embora a quantidade seja considerada alta, a resposta da planta a aplicação de S será variável, dependendo das condições de cada cultura (Kost *et al.*, 2008). Culturas como arroz irrigado, leguminosas, brássicas e liliáceas, necessitam de grande quantidade deste nutriente exigindo concentrações superiores a 10 mg/dm³ (Sbcs., 2016).

Para o cultivo da soja, deste modo, 45,4% das amostras apresentaram teores menores que 10 mg/dm³, devendo haver complementação de S durante o plantio. Cabe destacar que as principais saídas deste nutriente ocorrem pela remoção ocasionada pelas culturas no momento da colheita e pela lixiviação no perfil (Kost *et al.*, 2008).

4.8 Teores de boro (B)

A representação das amostras em relação ao B, identificou uma grande variância em seus teores, com amplitudes dentre 0,10 a 0,45 mg/L⁻¹ (APÊNDICE F). Embora esta diferença pareça pouca significativa, os teores deste nutriente são importantes para o desenvolvimento de flores e frutos, afetando diretamente a produtividade (Sbcs, 2007). Valores acima de 0,3 mg/L⁻¹ já são considerados “altos”, dificilmente apresentando problemas de deficiência nos cultivos. Apesar disso, plantios de videira são altamente dependentes de B, necessitando que sua concentração no solo esteja entre 0,6 e 1,0 mg/L⁻¹ (Sbcs., 2016). Apenas 20,5% das amostras analisadas apresentam valores de B considerados “alto”, sendo que a grande maioria das amostras, 79,5%, demonstraram teores “médio” (Sbcs., 2016). A deficiência de B nas plantas inicia apresentando sintomas no início do estágio

reprodutivo, diminuindo o rendimento de grãos e o número de grãos por espiga, em plantas de milho (Lordkaew *et al.*, 2011).

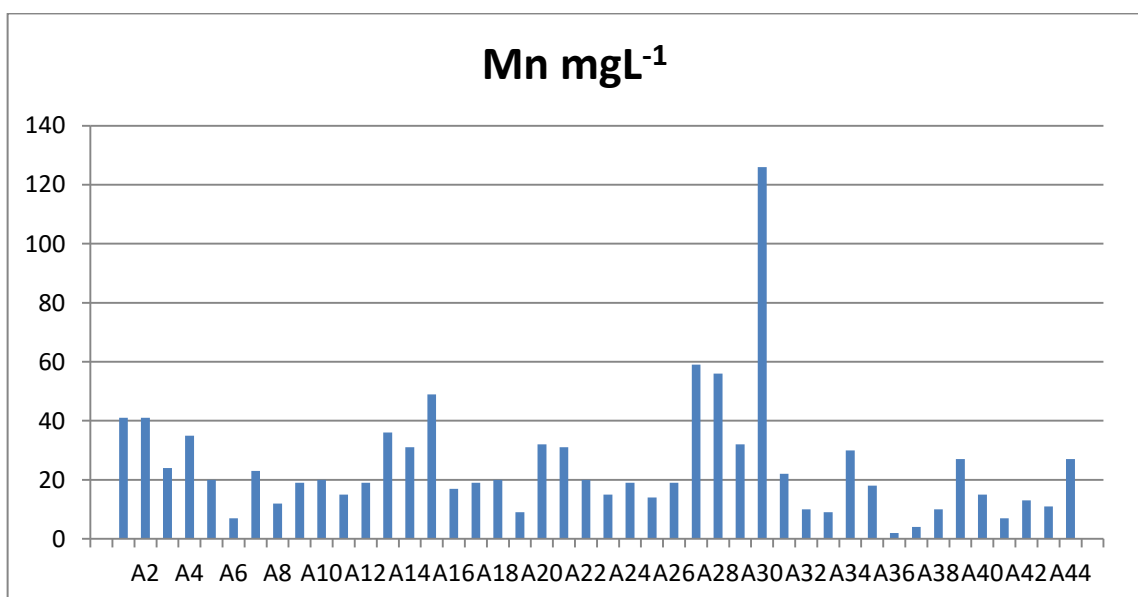
Valores de B presentes no solo são altamente dependentes da quantidade de MO existente (Sbcs, 2007), porém neste trabalho, não foram encontrados evidências de que maiores teores de MO representariam uma maior disponibilidade de B. Contudo, seguindo este raciocínio, valores medianos deste micronutriente podem estar associados ao baixo valor encontrado nos níveis de MO.

4.9 Manganês (Mn)

.O aumento de pH de um solo afeta diretamente a presença de Mn, diminuindo sua quantidade na solução e na CTC, sendo que altos teores e toxicidade podem ocorrer em solos ácidos e com baixa concentração de MO. Sua absorção ocorre metabolicamente, mas podem ocorrer entradas passivas na planta, geralmente, quando encontra-se em concentrações tóxicas na solução (Sbcs, 2007).

Este nutriente encontra-se em grande quantidade na área de estudo, sendo que apenas uma amostra apresentou valor “médio”, uma amostra apresentou valor “baixo”, sendo que o restante apresentou níveis “alto” com valores bem significativos (Figura 10).

Figura 10: Concentração de Mn nas amostras.



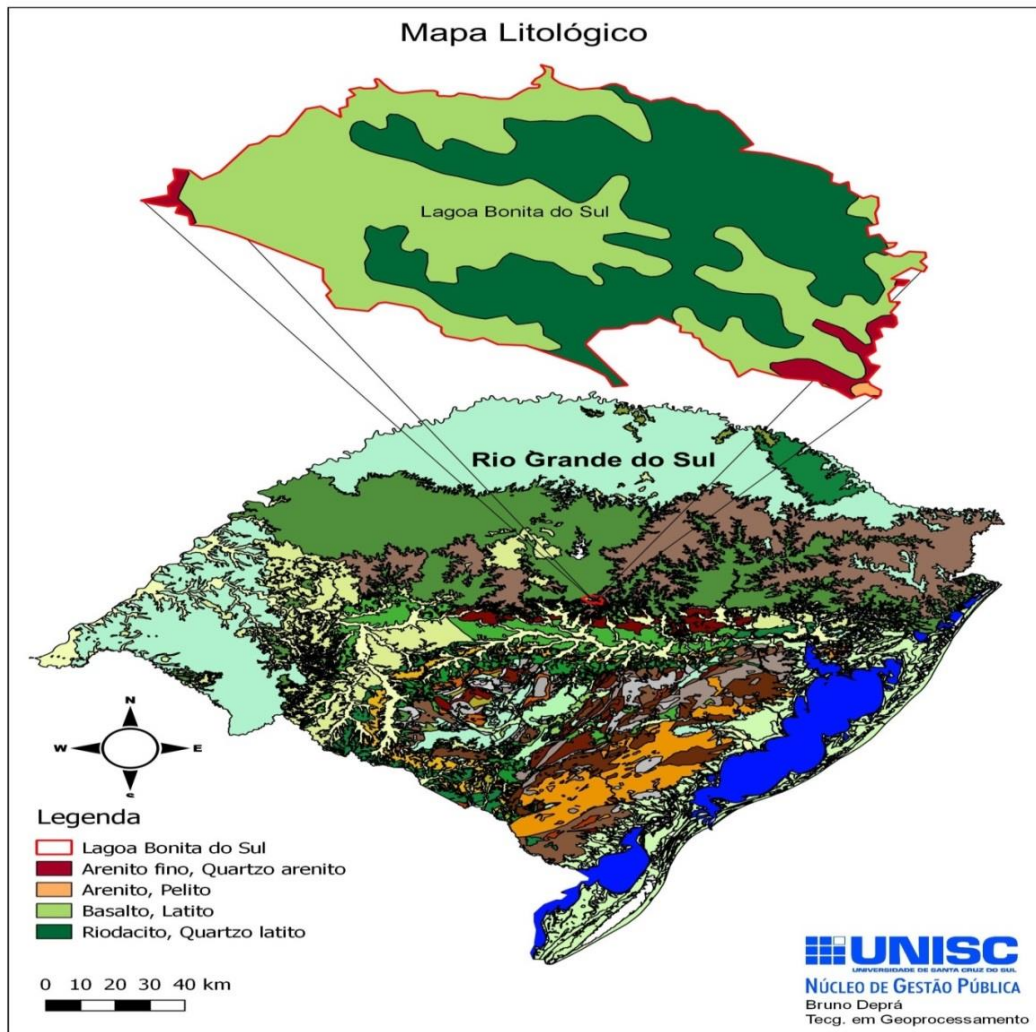
A toxicidade de Mn em solos está relacionada diretamente a quantidade deste elemento presente no solo, bem como pela sua relação com o Mg. Solos com proporções de Mg e Mn abaixo de 20:1 aliado a uma maior saturação de água no perfil tendem a reduzir significativamente o crescimento das plantas (Carvalho *et al.*, 2015). A magnitude do efeito prejudicial as plantas é bem difícil de ser mensurada, uma vez que são necessários o entendimento dos processos pedogenéticos, aliado ao conhecimento do material de origem (Carvalho *et al.*, 2015).

A acumulação de Mn é tóxica para a grande maioria das plantas com interesse econômico, porém a toxicidade, geralmente está atrelada a condições de solos ricos em húmus, com pH abaixo de 5,5 e elevadas condições redutoras (Sbcs, 2007). Doses de Mn superiores a 20 mgL^{-1} causaram sintomas de toxidez em plantas de pimenta do reino (*Piper nigrum*, L.), sendo que na concentração de 30 mgL^{-1} ocorreu a redução do crescimento e absorção de outros nutrientes (Veloso *et al.*, 1995).

Embora o Mn esteja presente em grande quantidade nos solos da região de estudo, relatos de fitotoxicidade são desconhecidos, talvez pela falta de informações a respeito da sua concentração ou por falta de estudos mais detalhados. Cabe ressaltar também que a cultura do tabaco, muito frequente na região e com maior área de plantio, é uma das plantas que mais necessitam Mn para a produção, cerca de 249 g/t^{-1} , seguido pela soja $166,7 \text{ g/t}^{-1}$ e milho $48,9 \text{ g/t}^{-1}$ (Sbcs, 2007).

A origem do Mn em Lagoa Bonita do Sul, possivelmente seja de ordem natural, decorrente da decomposição das rochas de origem (Figura 11). Em estudos de dois tipos de basalto, foram encontrados concentrações entre 1,8 e 2,2 g/kg de óxido de manganês (Mn) nas rochas estudadas (Escosteguy e Klamt, 1998). A maior abundância deste elemento está associado a presença de rochas máficas o que pode relacioná-lo a composição dos minerais ferromagnesianos (Biondi *et al.*, 2011).

Figura 11: Mapa litológico da área de estudo.



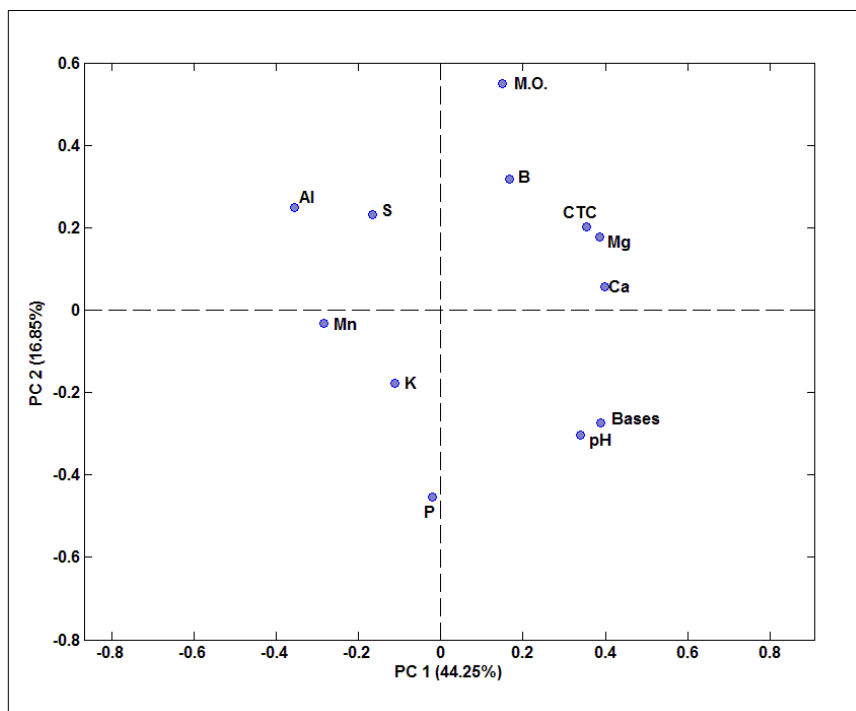
Fonte: Núcleo de Gestão Pública – UNISC.

Apesar das legislações ambientais não referenciar teores naturais de Mn, sua quantificação deve ser conhecida, pois representa importância em estudos de geoquímica, referendando indiretamente, níveis de outros metais pesados (Biondi *et al.*, 2011). A grande concentração de Mn na área de estudo pode levar a contaminação das águas subterrâneas, devido a percolação no perfil do solo. Deste modo, remete-se a indicação de estudos mais detalhados que possam verificar a possibilidade de níveis fora do padrão de potabilidade das águas. (Uechi *et al.*, 2017), encontraram em seu trabalho, níveis superiores aos permitidos de Mn em cinco poços dos 32 analisados em Mato Grosso do Sul.

4.10 Avaliação da fertilidade por Métodos Estatísticos Multivariados PCA e HCA

Valores de pH, MO, P, K, Ca, Mg, S, B, Mn, CTC, saturação da CTC por bases e por Al, formaram as duas primeiras componentes principais, PC1 e PC2, somando juntas 61,1% da variância, sendo que PC1 apresentou 44,25% e PC 2, 16,85% de variância, respectivamente (Figura 12).

Figura 12: PCA com distribuição das variáveis e eixos PC1 e PC2.



A distribuição dos resultados das amostras apresentou a distribuição ao longo do PCA (Figura 13), aglomeradas conforme suas características químicas e posteriormente separadas em quatro grupos distintos (HCA) (Figura 14).

Para o eixo da PC1, as variáveis de maior importância que apresentaram a maior variância foram a CTC efetiva, Mg, Ca, saturação da CTC por bases, pH, saturação da CTC por Al e Mn. Já no eixo da PC2, o destaque ocorre para MO, S, K, P, B, saturação da CTC por bases e pH.

Figura 13: Distribuição das amostras em relação às variáveis.

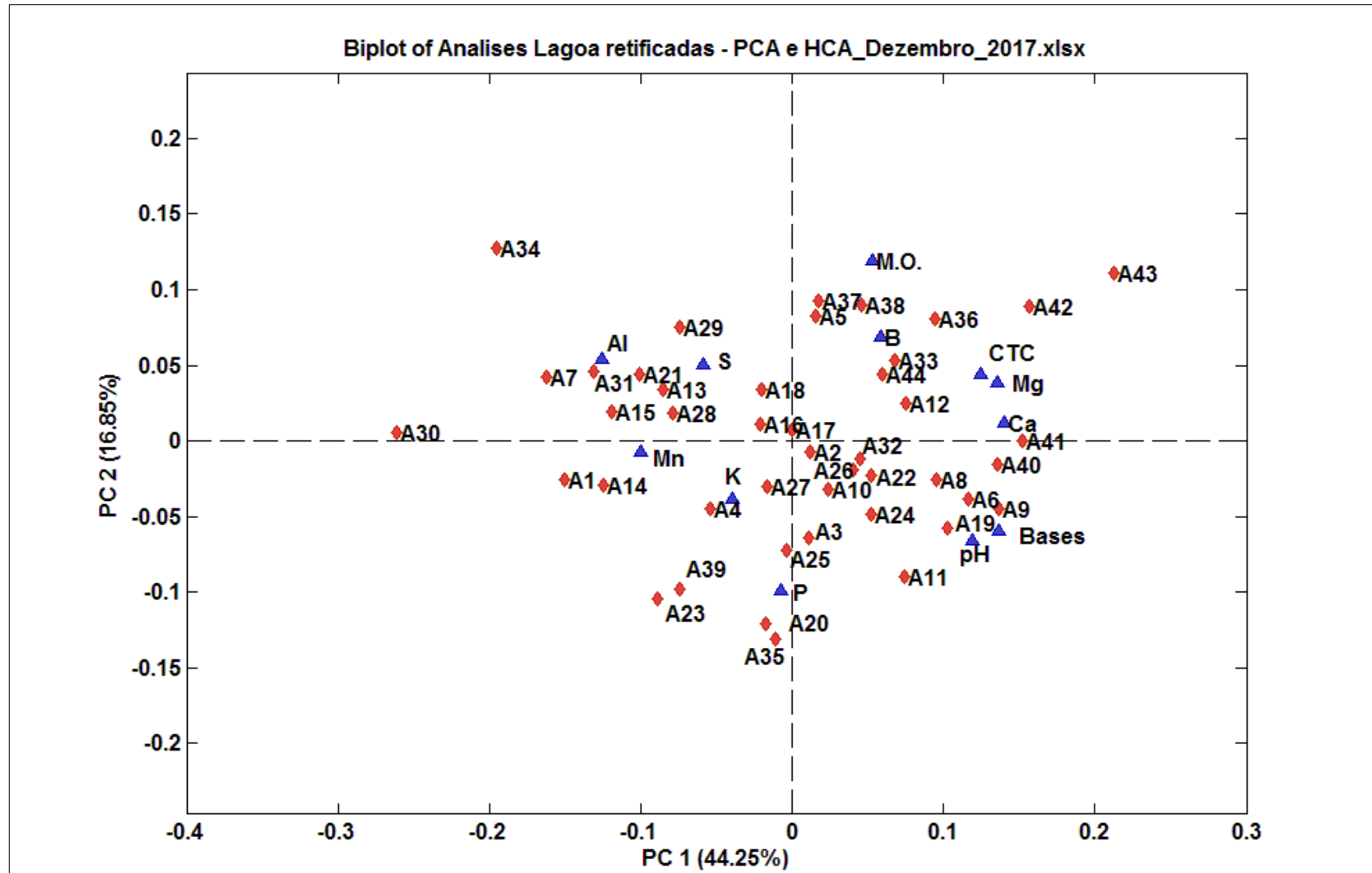
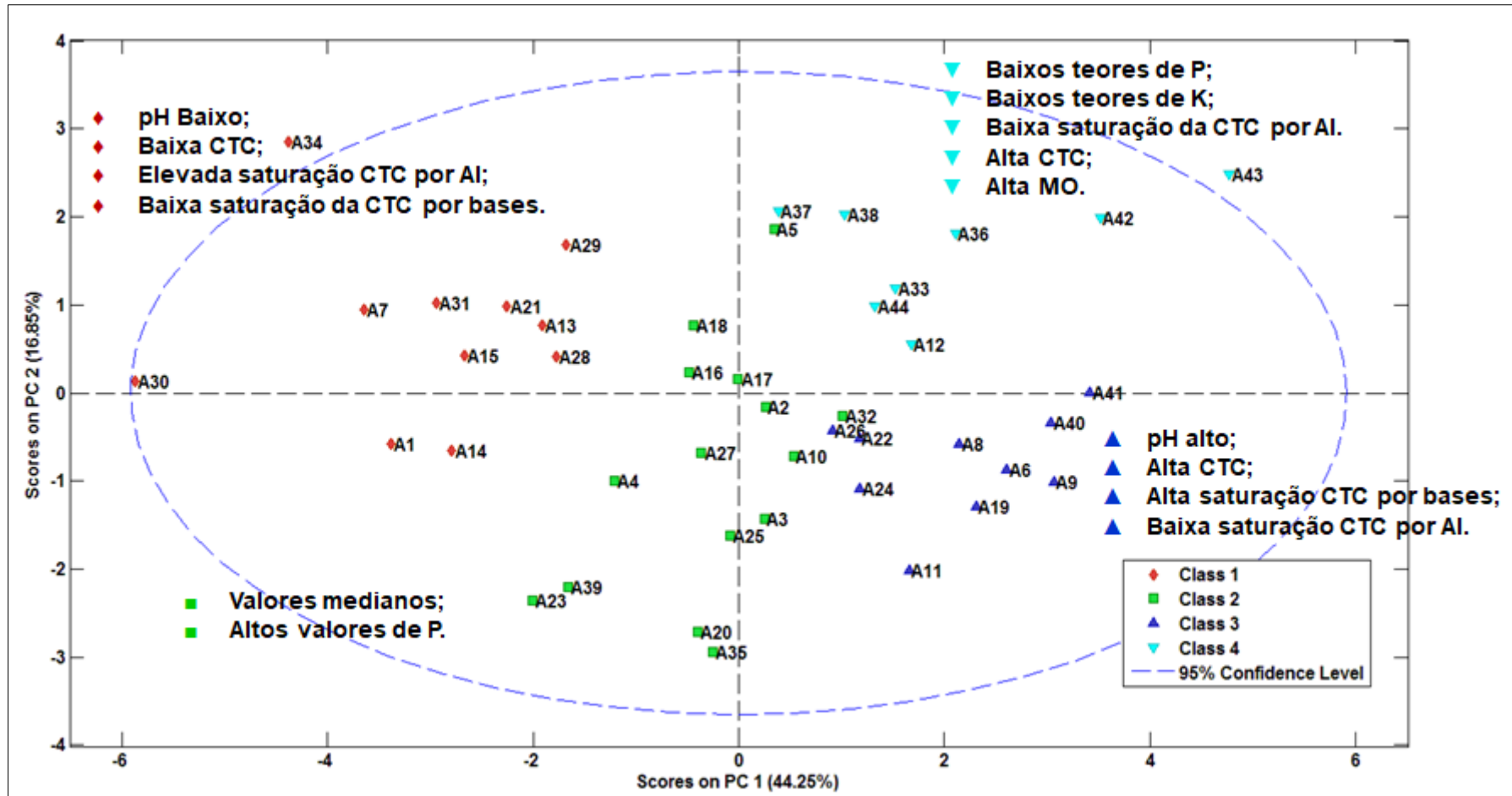


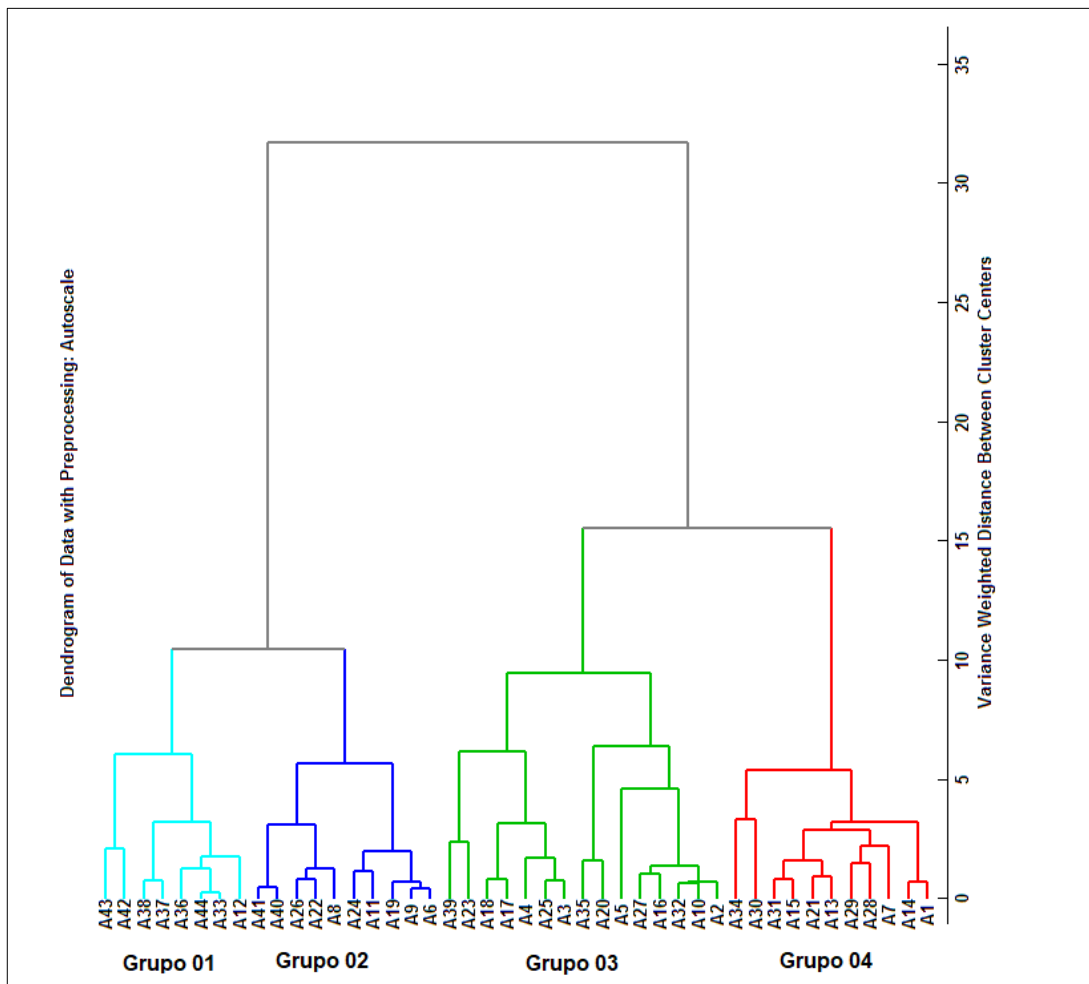
Figura 14: Distribuição, formação e caracterização dos grupos.



Os grupos gerados foram distribuídos da seguinte maneira, possibilitando a formação de um dendrograma, no qual é possível a observação dos grupos (Figura 15):

- Grupo 01: A43, A42, A38, A37, A36, A44, A33, e A12;
- Grupo 02: A41, A40, A26, A22, A8, A24, A11, A19, A9 e A6;
- Grupo 03: A39, A23, A18, A17, A4, A25, A3, A35, A20, A5, A27, A16, A32, A10 e A2;
- Grupo 04: A34, A30, A31, A15, A21, A13, A29, A28, A7, A14 e A1.

Figura 15: Dendrograma com separação dos grupos formados



Da esquerda para a direita: Grupo 01; Grupo 02; Grupo 03 e Grupo 04.

A fim de permitir uma melhor visualização e interpretação dos dados para a formação dos grupos, a Tabela 08 foi construída a partir da utilização das variáveis analisadas no trabalho, sendo que para cada grupo específico, foram determinados

os valores máximos, mínimos, média, desvio padrão, quartil 25%, quartil 50% e quartil 75%, para cada variável em cada grupo formado.

Tabela 08: Valores máximos, mínimos, desvio padrão, quartil 1, quartil 2 e quartil 3 dos grupos e de todas as amostras.

Valores	pH H ₂ O	P mgL ⁻¹	K mgL ⁻¹	M.O. %	Ca cmol _c L ⁻¹	Mg cmol _c L ⁻¹	CTC efetiva cmol _c L ⁻¹	Sat. CTC Al %	Sat. CTC bases %	S mgL ⁻¹	B mgL ⁻¹	Mn mgL ⁻¹
Grupo 01												
Máximo	5,70	18,20	169,00	5,20	11,00	5,40	16,70	6,20	77,20	16,60	0,45	27,00
Mínimo	5,10	3,70	56,00	2,70	5,70	2,30	8,70	0,00	54,80	7,60	0,20	2,00
Média	5,40	10,44	119,75	4,01	7,76	3,50	11,76	1,89	66,49	12,24	0,33	11,88
D. padrão	0,20	5,62	38,46	0,92	1,52	1,20	2,41	2,17	8,24	2,92	0,09	8,04
Q1	5,28	6,25	95,25	3,58	7,10	2,73	10,75	0,00	62,43	10,95	0,28	7,75
Q2	5,40	9,20	118,00	3,95	7,50	3,00	11,15	1,40	67,75	12,50	0,33	10,50
Q3	5,53	14,20	149,00	4,60	8,05	4,15	11,90	2,88	70,88	13,63	0,40	14,50
Grupo 02												
Máximo	6,20	48,60	246,00	3,40	10,00	4,20	14,10	3,30	85,80	11,20	0,37	20,00
Mínimo	5,40	8,70	107,00	1,70	7,00	2,30	9,80	0,00	72,10	2,00	0,10	7,00
Média	5,80	25,72	182,00	2,23	8,27	3,00	11,79	0,57	78,98	6,02	0,25	14,20
D. padrão	0,27	14,22	51,35	0,49	1,03	0,67	1,42	1,22	4,54	3,45	0,08	5,16
Q1	5,63	11,75	140,25	1,93	7,40	2,53	10,58	0,00	75,43	2,60	0,21	9,75
Q2	5,85	25,55	189,50	2,15	8,30	2,70	11,90	0,00	78,45	5,90	0,25	15,00
Q3	5,98	36,95	226,00	2,38	8,68	3,30	12,75	0,00	82,30	8,60	0,28	19,00
Grupo 03												
Máximo	5,90	156,40	264,00	4,00	8,00	2,80	13,20	14,00	71,20	58,40	0,37	59,00
Mínimo	4,90	7,20	60,00	1,10	2,00	0,80	3,00	0,00	50,50	2,40	0,10	10,00
Média	5,40	46,69	191,20	2,23	5,88	1,93	8,80	5,29	63,16	15,01	0,23	24,73
D. padrão	0,25	40,05	54,00	0,88	1,73	0,62	2,64	4,72	5,87	14,55	0,08	12,63
Q1	5,30	18,10	156,00	1,60	5,35	1,70	8,05	0,90	60,90	5,90	0,18	17,50
Q2	5,30	39,80	212,00	2,10	5,90	2,00	9,20	5,20	63,00	9,40	0,22	20,00
Q3	5,45	57,45	226,00	2,70	7,10	2,30	10,20	7,45	67,10	17,35	0,24	29,50
Grupo 04												
Máximo	5,10	43,00	297,00	3,70	5,70	1,80	10,20	51,20	51,60	35,70	0,30	126,00
Mínimo	4,40	3,60	139,00	1,20	2,30	0,60	4,90	8,40	17,30	5,30	0,15	22,00
Média	4,84	18,35	198,91	2,42	4,05	1,21	7,79	26,32	40,61	20,88	0,22	43,36
D. padrão	0,19	15,41	42,89	0,83	1,09	0,34	1,40	11,00	10,49	9,68	0,04	29,27
Q1	4,80	6,80	176,50	1,70	3,55	1,15	7,15	20,85	36,90	15,60	0,19	30,50
Q2	4,80	8,40	201,00	2,50	3,80	1,20	8,10	24,20	45,80	19,70	0,23	32,00
Q3	4,95	32,85	211,50	2,85	4,80	1,30	8,55	29,20	46,75	26,15	0,24	45,00
Grupos 01 - 02 - 03 - 04												
Máximo	6,20	156,40	297,00	5,20	11,00	5,40	16,70	51,20	85,80	58,40	0,45	126,00
Mínimo	4,40	3,60	56,00	1,10	2,00	0,60	3,00	0,00	17,30	2,00	0,10	2,00
Média	5,35	28,25	178,05	2,60	6,31	2,28	9,77	8,86	61,72	13,93	0,25	24,66
D. padrão	0,41	28,80	54,57	1,03	2,12	1,10	2,67	12,00	15,50	11,06	0,08	20,31
Q1	5,08	8,20	142,75	1,88	5,18	1,30	8,40	0,00	51,33	6,35	0,20	13,75
Q2	5,35	18,20	186,00	2,40	6,55	2,30	9,85	3,35	64,50	11,40	0,23	19,50
Q3	5,63	38,33	220,75	3,40	8,00	2,73	11,33	13,40	72,83	17,13	0,30	31,00

D. padrão: Desvio padrão; Sat.: Saturação; Q1: quartil 1; Q2: quartil 2, Q3: quartil 3.

Os solos do grupo 01 apresentam níveis relativamente altos de MO, variando de 2,7 a 5,2%, com 75% das amostras com níveis de até 4,6%, apesar de possuírem valores da CTC e saturação de bases com valores intermediários. O S e o B também se apresentam com valores medianos. O pH varia entre 5,1 e 5,7, sendo que a saturação da CTC por Al é muito baixa, dificilmente prejudicando os cultivos agrícolas. Comparado aos demais grupos, apresenta níveis baixos de Mn, não ultrapassando 27 mgL^{-1} , mas sem necessariamente serem deficientes neste nutriente. Ca e Mg encontram-se em quantidades significativas. Os níveis de K apresentam-se medianos a baixos, sendo que 75% dos solos a concentração deste nutriente não ultrapassa 149 mgL^{-1} .

Como principais características que descrevem este agrupamento, podemos destacar os baixos valores de P, sendo que 50% destes solos apresenta níveis inferiores a 10 mgL^{-1} e 75% das amostras, os índices deste nutriente, não ultrapassa $14,2 \text{ mgL}^{-1}$. O tipo de uso da terra tem pouca influência sobre a concentração de P no solo, sendo que este nutriente pode limitar a produção de frutos (Alfaia *et al.*, 2004).

Estudos de fertilidade dos solos realizados no estado do Rio Grande do Sul, nos anos de 1997, 1998 e 1999, demonstraram um ligeiro aumento na quantidade de P durante este período. No entanto, 79,3% das amostras encontravam-se com valores abaixo do nível crítico, sendo que este nutriente é considerado um dos principais limitantes de produtividade e fertilidade deste Estado (Rheinheimer *et al.*, 2001).

Estes solos podem apresentar baixa fertilidade devido as baixas concentrações de P presentes. Deste modo, uma produtividade satisfatória dependerá da quantidade de adubação fosfatada aplicada. Cabe ressaltar que os adubos com elevados teores deste nutriente possuem alto valor de mercado, podendo limitar financeiramente a produção (Oliveira *et al.*, 2014), aumentando os custos de produção e consequentemente afetando a sustentabilidade econômica dos agricultores.

O tabaco por possuir menor necessidade de P (Sbcs., 2016), poderia ser utilizado para cultivo nestas áreas, o que permitiria uma menor necessidade deste nutriente, gerando um menor custo de produção quando comparado aos cultivos de milho e soja, culturas mais exigentes em P (Sbcs., 2016). Mesmo assim, os agricultores que produzem esta cultura, utilizam grande quantidade de fertilizantes,

recomendados pelas empresas fumageiras, as quais chegam atingir aplicações de 1.250 kg durante o período de safra, sendo que na maioria das vezes a recomendação não leva em consideração as condições de solo e meio ambiente, aumentando as chances de contaminação dos recursos hídricos (Kaiser *et al.*, 2010).

Elevados índices de MO existentes nos solos deste grupo, permitem uma maior disponibilidade de N para as plantas (Sbcs, 2007). Deste modo, permite aos usuários do solo a aplicação de menores quantidades de adubação nitrogenada, o que diminui os riscos de contaminação ambiental por nitrato.

No agrupamento 02, os valores de P e K são bastante variados, com solos contendo 8,7 a 48,6 mgL⁻¹ e 107 a 246 mgL⁻¹, respectivamente. Os níveis de MO relativamente baixos, sendo que 75% das amostras possuem valores inferiores a 2,38% de concentração. Ca, Mg, S e B encontram-se em quantidades consideráveis. Cabe ressaltar que estes tipos de solo, assim como os do Grupo 01, possuem uma baixa concentração de Mn, quando comparado aos demais, e que dificilmente apresentarão toxicidade em relação a este elemento.

O grande destaque deste grupo são em relação aos níveis de pH que apresentam-se relativamente altos quando comparado aos demais grupos, variando entre 5,4 e 6,2, não possuindo restrições quanto a saturação da CTC com Al tóxico. Além disso, possuem uma elevada CTC, sendo que nenhuma amostra apresentou valores inferiores a 9,8 cmol_cL⁻¹, a qual apresenta elevada saturação por bases, com valores que superam os 72%.

A CTC é um importante indicador da qualidade de um solo, representando a habilidade em manter íons de cargas positivas adsorvidos e posteriormente liberá-los para a solução (Khaledian *et al.*, 2017). A quantidade de cargas negativas, responsáveis pela dinâmica e fluxo de grande parte dos nutrientes essenciais as plantas, é influenciada diretamente pela quantidade de MO existente, sendo esta responsável por 20 a 90% da CTC das camadas superficiais do solo. As cargas negativas estão presentes na MO e na fração argila existente no solo, sendo que a MO possui cerca de 157 vezes mais cargas negativas que a argila (Sbcs, 2007).

Solos com pH acima de 5,5 tendem a apresentar predominância de cargas negativas em seus coloides, favorecendo a adsorção de cátions, onde a troca de elementos e entre fases são contínuas (Wiethölter, 2007). Este grupo apresenta uma fertilidade bem alta, quando comparado aos demais grupos, pela sua alta saturação

da CTC por bases, uma vez que este parâmetro é considerado importante como indicador da qualidade do solo (Khaledian *et al.*, 2017).

Solos do grupo 03 são os predominantes na área de estudo, e os valores são relativamente medianos em todos os aspectos analisados, quando comparados aos demais grupos. O pH apresenta uma grande amplitude, variando entre 4,9 a 5,9, mesma situação observada com os níveis de MO que variaram significativamente entre 1,1 a 4,0%. No geral, apresentam valores bem altos de K, com exceção da amostra A39, a qual apresentou apenas 60 mgL^{-1} deste nutriente. Ca, Mg, S e B apresentam-se na maioria como suficientes não apresentando restrições nutricionais aos cultivos agrícolas. Algumas amostras possuem concentrações grandes de Mn, o que pode causar toxicidade. A CTC é bem variável, entre 3,0 a $13,2 \text{ cmol}_c\text{L}^{-1}$, assim como a saturação da CTC por bases onde 75% das amostras apresentou valores inferiores a 68%, sendo que a saturação por Al apresentaram-se inferiores a 14%.

Os teores de P variaram entre 7,2 e $156,4 \text{ mgL}^{-1}$, porém ocorre o predomínio de altas concentrações deste nutriente na grande maioria das amostras, sendo que apenas 25% das amostras apresentou valores inferiores a $18,1 \text{ mgL}^{-1}$, sendo que os resultados de PCA confirmam a grande importância da concentração de P para a determinação da fertilidade de um solo (Waswa *et al.*, 2013).

Estes solos no geral não apresentam grandes problemas de fertilidade e produtividade, sendo considerados intermediários. Comumente, não apresentam grandes restrições a fertilidade e produtividade dos cultivos, necessitando de doses medianas de adubação. Altos valores de Mn em algumas análises podem causar preocupações perante a toxicidade deste elemento quando da presença de pH baixo em associação (Sbcs, 2007).

Os solos do grupo 04 possuem níveis de P com bastante variabilidade, com valores entre 3,6 a $43,0 \text{ mgL}^{-1}$ porém elevados valores de K, sendo que mais de 50% destes apresentam concentrações de K superiores a 201 mgL^{-1} . Em geral apresentam baixos valores de MO, não ultrapassando os 3,7%. Os níveis de Ca são relativamente altos, sem apresentar restrições. O teor de S apresenta-se bem elevado, sendo que os níveis de B e da CTC são medianos.

Cabe destaque a este grupo, um baixo valor de pH comparado aos demais, onde 75% das amostras encontram-se com pH abaixo de 4,95, o que conseqüentemente, acarreta em níveis elevados de saturação da CTC por Al sendo que a porcentagem pode se apresentar níveis bem elevados, contrariamente quando

comparado aos baixos valores de saturação de bases que não ultrapassam os 52%, o que pode afetar negativamente os cultivos agrícolas. Outro destaque é em relação a quantidade de Mn sendo que todos os solos presentes neste grupo apresentam concentrações \geq a 22 mgL^{-1} , índices altos que podem causar toxicidade (Sbcs, 2007).

O teor de Al nos solos pode ser um fator limitante da produtividade dos cultivos agrícolas, sendo que o estresse causado pela toxicidade deste elemento, nos solos ácidos, pode ocasionar uma redução da produtividade dos cultivos agrícolas na faixa de 25 a 80%, em plantas, dependendo da espécie e do seu nível de tolerância (Sade *et al.*, 2016). Além disso, as concentrações tóxicas de Mn acima de $30 \text{ cmol}_c\text{L}^{-1}$ podem reduzir a quantidade de matéria seca dos cultivos, devido a modificação prejudicial do sistema radicular (Santos *et al.*, 2017).

Estas amostras devem receber uma atenção especial para a minimização dos efeitos adversos dos baixos valores de pH, uma vez que a maioria das culturas comerciais possuem faixa ideal de pH entre 5,7 e 6,0 (Sbcs, 2007).

A presença de Al tóxico nos solos pode ocasionar danos graves ao sistema radicular, aumentando sua rigidez, dificultando a absorção de P, a respiração radicular, o que pode reduzir a captação de água e nutrientes pelas plantas, podendo afetar também negativamente a composição do DNA. A toxicidade do Al afeta o desenvolvimento das raízes, resultando em deficiência de absorção de P, o que pode inibir o desenvolvimento das plantas (Sbcs, 2007; Sade *et al.*, 2016), sendo assim, um problema que deve ser considerado quando da utilização destes tipos de solo é com relação a adubação empregada nos cultivos, pois o excesso de nutrientes podem ocasionar danos ambientais, uma vez que grande parte dos coloides encontra-se saturada por Al, facilitando a lixiviação e podendo ocasionar a contaminação das águas subterrâneas.

A utilização de calcário dolomítico torna-se uma prática recomendada para aumento da fertilidade dos solos, uma vez que sua utilização tende a aumentar os níveis de pH e conseqüentemente diminuição da concentração de Al^{+3} . Além disso este tipo de calcário incrementa os níveis de Ca e Mg (Sbcs, 2004; Sbcs., 2016) uma vez que Mg pode aliviar também a toxicidade causada pelo alumínio (Sade *et al.*, 2016).

A ocupação do local de estudo é compreendido em sua maioria pelos cultivos temporários (figuras 16 e 17). Percebe-se na Figura 17, que a área urbana é muito

pequena, e que a vegetação nativa ocupa grande parte das áreas que apresentam maior declividade.

Figura 16: Pontos de coleta de uma das amostras dos quatro grupos formados



A12 – Grupo 01



A19 – Grupo 02

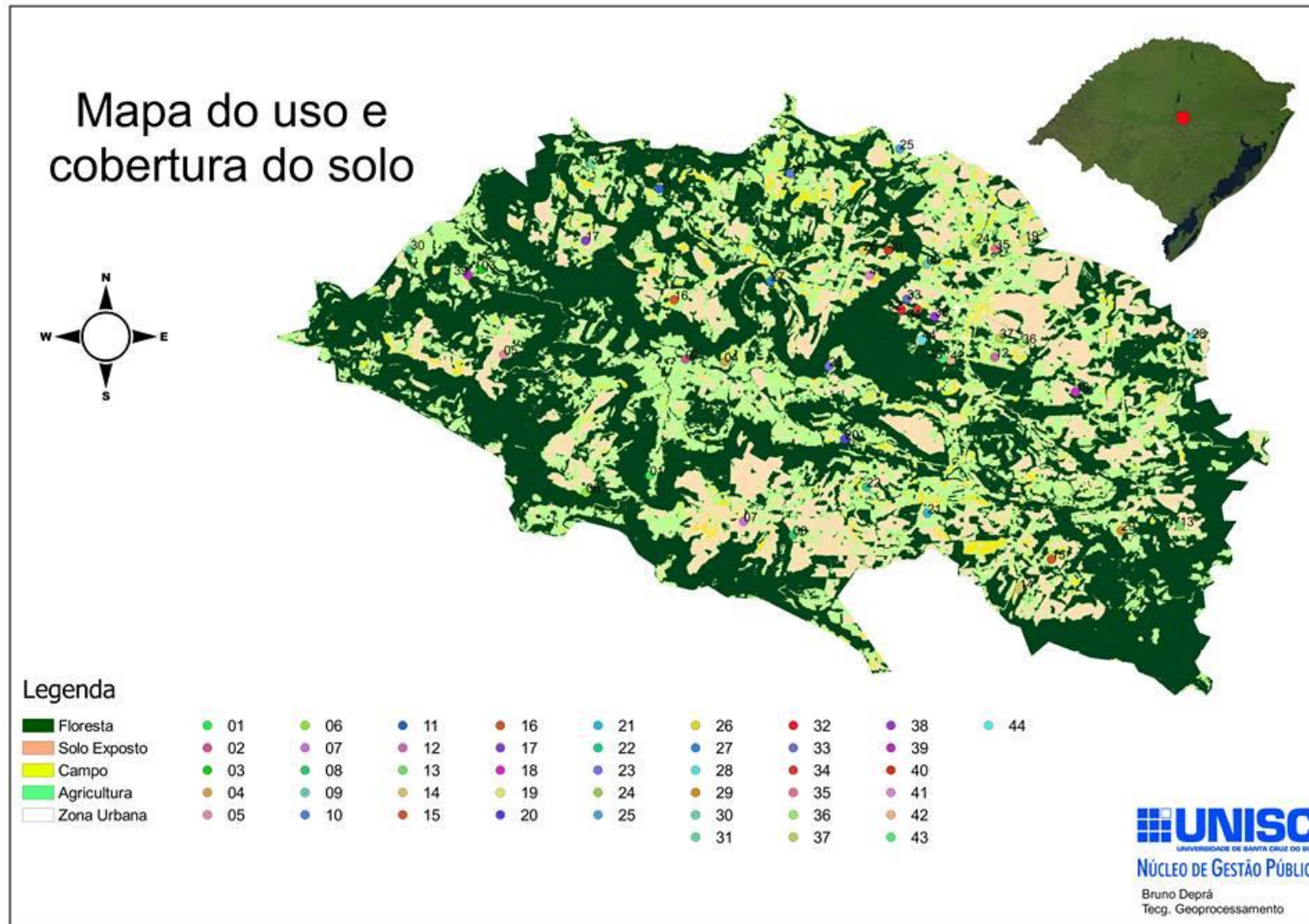


A20 – Grupo 03



A21 – Grupo 04

Figura 17: Mapa de uso e ocupação do solo com distribuição dos locais de amostras coletadas.



Fonte: Núcleo de Gestão Pública – UNISC.

4.11 Aptidão agrícola dos quatro grupos de solos resultantes do HCA

Os levantamentos de solos são a base principal para a elaboração de mapas que auxiliem no planejamento de uso das terras, mas a escassez destes levantamentos acaba dificultando a obtenção de informações (Poelking *et al.*, 2015). Em relação a aptidão química, a deficiência de nutrientes, a presença de Al tóxico e a fixação de P são fatores essenciais para esta determinação (Pereira e Neto, 2004).

Deste modo, solos do grupo 01 possuem pouca quantidade de P e K, podendo apresentar restrições ao desenvolvimento das plantas. Para a produção, existe a necessidade de aplicação de maior quantidade de adubação, o que aumenta os custos de produção e riscos de contaminação ambiental. Mesmo assim, estes solos apresentam quantidade de MO mais elevadas, os quais tendem a possuir maior estabilidade.

Apesar da grande variação no comportamento da MO, nos diferentes tipos de solo, pesquisadores consideram que 3,4% é um limite crítico, valor este abaixo do qual determina um retrocesso na qualidade do solo, uma vez que desempenha função fundamental na fertilidade (Waswa *et al.*, 2013). O valor de pH deste grupo é relativamente alto, não apresentando problemas de toxicidade por Al, podendo ser utilizado para as culturas de grãos e tabaco, porém, o tabaco por ser menos exigente em P e K (Sbcs., 2016) é o mais indicado para estes tipos de solo.

Solos do grupo 02 possuem menos restrições que o grupo 01, uma vez que apresentam também valores altos de pH, CTC e saturação da CTC por bases. Além disso, possuem maiores quantidades de P e K, sendo indicados para as culturas de milho, soja e tabaco, principais atividades agrícolas da região (Apêndice G).

Os valores medianos dos solos do grupo 03, também permitem o desenvolvimento das culturas anuais, porém, a elevada quantidade de P presente neste agrupamento permite que se faça um menor aporte de insumos, diminuindo os custos de produção. Porém, o excesso de P também pode se tornar prejudicial, uma vez que pode aumentar os riscos de carreamento deste nutriente para os cursos de água, podendo ocasionar eutrofização e desequilíbrio ambiental (Vidal e Capelo Neto, 2014). As principais culturas da região, como soja, milho e tabaco podem ser cultivadas nestes tipos de solo.

No grupo 04, são notadas algumas peculiaridades. Estes solos apresentam várias restrições ao desenvolvimento das plantas, uma vez que apresentam pH

baixo e conseqüentemente a presença de Al tóxico. Deste modo, além da toxicidade, o excesso de Al provoca a saturação da CTC, diminuindo a saturação de bases, sendo que este processo afeta negativamente a fertilidade do solo.

Além disso, nestas amostras, observou-se a presença de grande quantidade de Mn, sendo que, associado ao baixo valor de pH, pode causar intoxicação das plantas (Santos *et al.*, 2017). Devido as restrições causadas pela alta concentração de elementos tóxicos, estes solos deveriam ser utilizados com cautela para as culturas do tabaco, milho e soja, uma vez que pode ocorrer baixa produtividade, exigindo elevação de pH. As características químicas, no entanto, permitiriam o plantio de aipim e erva-mate, uma vez que estas plantas são mais resistentes aos baixos valores de pH e altas concentrações de Al (Sbcs., 2016)

A divisão dos quatro grupos hierárquicos separou os grupos de acordo com suas similaridades, em relação as suas características químicas. Um fato importante é que a divisão espacial dos grupos teve uma tendência de agrupamento entre si (Figura 18), o que remete que as condições de fertilidade possam ter influência do local, do material de origem e do intemperismo. Do mesmo modo, pela descrição das características químicas e pela separação dos grupos, percebe-se que a área central do município tende a possuir menos limitantes de fertilidade, podendo ser consideradas aptas aos cultivos agrícolas. Já nos bordos da cidade, a tendência é de maiores limitações de uso, devendo ocorrer uma utilização de forma menos intensiva, procurando diminuir os impactos negativos ao meio ambiente.

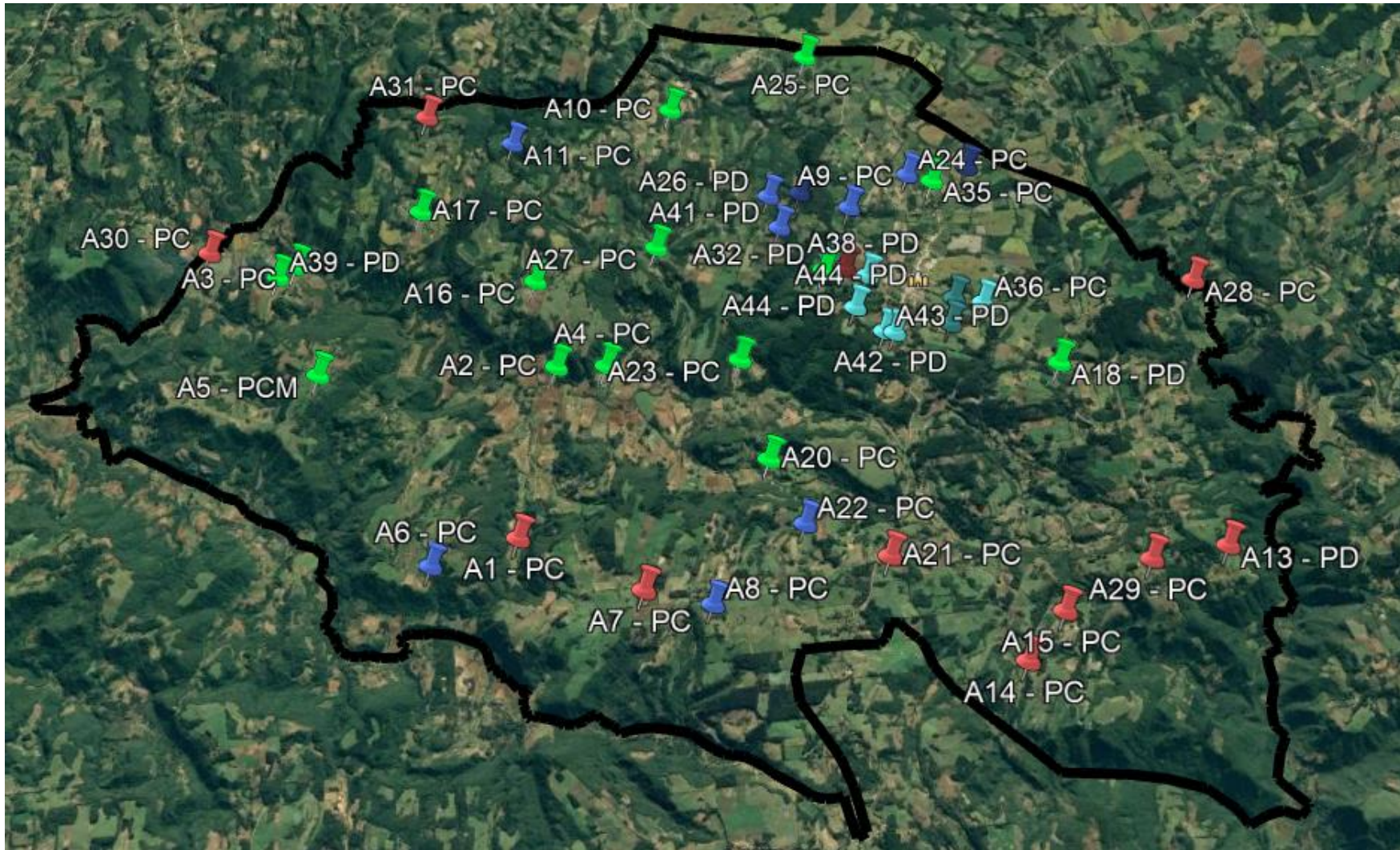
A utilização de PCA permite o agrupamento de inúmeros parâmetros tanto químicos, quanto físicos, em grupos funcionais, o que facilita a interpretação dos resultados e a segmentação de intervenções que podem ser utilizadas para a gestão do uso das terras (Waswa *et al.*, 2013). A dificuldade em reproduzir e interpretar os indicadores de degradação do solo é um desafio, uma vez que não existem protocolos padronizados que orientem estes estudos, deste modo, a escolha de indicadores deve levar em conta o conhecimento e o objetivo da avaliação, assim como o tempo disponível, a experiência do pesquisador e a quantidade de recursos disponíveis (Waswa *et al.*, 2013).

Na camada superficial do solo, a quantidade de C, de N, K, Ca, Mg e os valores de pH e CTC apresentam grande relação com a MO, possuindo enorme relevância no potencial de fertilidade de um solo, podendo representar o eixo principal PC1 (Waswa *et al.*, 2013).

O grau de fertilidade ou degradação de um agroecossistema é bastante complexo, exigindo a visualização por vários ângulos e exigindo a necessidade de observação de vários atributos ou fatores de interesse do ecossistema (Waswa *et al.*, 2013). A PCA dos atributos físicos e químicos do solo é uma estratégia eficiente capaz de explicar a variabilidade espacial e temporal da produtividade das culturas (Santi *et al.*, 2012).

Desta forma, a utilização do *software* ChemoStat, permite a realização de métodos estatísticos multivariados PCA e HCA de forma gratuita, com fácil instalação e manuseio, apresentando menus autoexplicativos e múltiplas saídas de dados (Helfer *et al.*, 2015), sendo que este tipo de análise pode ser utilizada como uma importante ferramenta de gestão para utilização de avaliação da fertilidade química dos solos, uma vez que permite o agrupamento dos diferentes tipos de solo por semelhanças.

Figura 18: Distribuição dos grupos na área de estudo, conforme as coletas.



5. CONCLUSÕES

O município de Lagoa Bonita do Sul é extremamente dependente da atividade agrícola desenvolvida pelos agricultores familiares, sendo que a economia está baseada, principalmente, na produção de tabaco, soja e milho, além dos cultivos de subsistência. Desta maneira, a fertilidade do solo é uma importante ferramenta de trabalho, para a manutenção da unidade familiar, uma vez que ela irá refletir, mesmo que indefinida e indiretamente, no resultado da produtividade final e no retorno econômico, social e ambiental destes agricultores.

A coleta de solo georreferenciada permite, posteriormente, uma comparação com os laudos de análises químicas do solo, favorecendo assim, a identificação das áreas com maior fertilidade ou limitações mais acentuadas, podendo ser realizada uma comparação entre as diversas áreas. Deste modo sugere-se que os laboratórios credenciados exijam as coordenadas geográficas dos locais de coleta, o que facilitaria trabalhos futuros sobre os solos da região, com criação até mesmo de um mapa de fertilidade, com um número muito maior de variáveis e áreas de coleta mais amplas.

O uso de métodos estatísticos multivariados PCA e HCA permitiram a identificação da fertilidade química existente nos diferentes grupos de solo na região de estudo, possibilitando e significando um importante meio para a gestão dos recursos naturais, podendo ser utilizados no manejo sustentável dos agroecossistemas. Estes métodos permitiram a formação de um dendrograma com quatro grupos distintos de solo, diferenciados entre si pelas suas características químicas, os quais após alocados no mapa permitiram a identificação de uma certa similaridade da formação dos grupos com a distribuição espacial. Assim, PCA e HCA funcionam como uma ferramenta de administração dos recursos naturais, principalmente dos agroecossistemas.

Cabe destacar, que valores de pH, ainda são um fator importante e limitante do aumento da fertilidade da área de estudo, bem como a baixa saturação de bases da CTC, principalmente nos solos do grupo 04. Embora não presente em todas as amostras analisadas, a saturação da CTC por Al na forma trocável, também consiste em um importante entrave de fertilidade podendo ocasionar toxicidade a grande maioria das culturas, o que pode remeter a uma baixa produtividade dos cultivos.

A baixa concentração de MO, presente nos grupos 02, 03 e 04, também tem influências diretas sobre a limitação da fertilidade dos solos, decorrentes possivelmente do tipo de preparo do solo predominante com manejo convencional, no qual favorece a sua decomposição, afetando diretamente na CTC.

A presença de quantidades significativas de Mn encontradas em quase todas as amostras tendem a possuir origem natural da decomposição das rochas primárias, mas que podem influenciar negativamente a fertilidade do sistema agrícola, uma vez que podem apresentar-se em quantidades que causam toxicidade as culturas, principalmente quando ocorrem em conjunto com baixas faixas de pH, condição frequente na maioria dos solos estudados.

Teores de Ca, Mg, S e B são significantes na região, não representando limitações à fertilidade, sendo que o conhecimento da fertilidade dos solos permite fomentar formas de racionalização de adubação, levando a resultados econômicos. Além disso, adubações dirigidas para a manutenção da fertilidade, correção de níveis nutricionais de baixas concentrações e a eliminação de elementos tóxicos, favorecem o aumento da fertilidade do solo e a produtividade das culturas, e conseqüentemente, diminuem os impactos ambientais gerados ao agroecossistema.

A exigência mediana em K das principais culturas do município, aliado a presença de concentrações relativamente altas deste nutriente nas reservas do solo, permitem que seja realizado uma adubação menos intensiva sobre os cultivos, gerando além de economia ao agricultor, uma diminuição da utilização de insumos químicos, diminuindo os riscos de contaminação ambiental e os impactos negativos causados ao agroecossistema. Diferentemente disso, boa parte dos solos analisados demonstraram limitações referentes aos valores de P, devendo-se dar uma maior importância a este nutriente na área de estudo.

Apesar da análise química ser considerada muito importante no julgamento da fertilidade de um solo, ela consiste em apenas uma etapa do processo de avaliação, sendo necessários estudos mais aprofundados nesta região, buscando também a identificação de limitantes físicos e biológicos.

REFERÊNCIAS

- ALFAIA, S. S. et al. Evaluation of soil fertility in smallholder agroforestry systems and pastures in western Amazonia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 102, n. 3, p. 409-414, 5// 2004. ISSN 0167-8809. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880903003153> >.
- ANDA, A. N. P. D. D. A. Principais indicadores do setor de fertilizantes: Fertilizantes entregue ao mercado., 2017. Disponível em: < <http://anda.org.br/index.php?mpg=03.00.00&ver=por> >. Acesso em: 08 set. 2017.
- ATKINSON, C. J. Is xylem sap calcium responsible for reducing stomatal conductance after soil liming? **Plant and Soil**, v. 382, n. 1, p. 349-356, September 01 2014. ISSN 1573-5036. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2180-z> >.
- BAI, Z. et al. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types. **Plant and Soil**, v. 372, n. 1, p. 27-37, November 01 2013. ISSN 1573-5036. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1696-y> >.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; SAAB, S. C. Diminuição da humificação da matéria orgânica de um Cambissolo Húmico em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 537-544, 2003. ISSN 0100-0683. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832003000300015&nrm=iso >.
- BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 155-163, 2004. ISSN 0100-0683. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832004000100015&nrm=iso >.
- BIONDI, C. M. et al. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni E Co em solos de referência de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1057-1066, 2011. ISSN 0100-0683. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832011000300039&nrm=iso >.
- BOSE, J.; BABOURINA, O.; RENGEL, Z. Role of magnesium in alleviation of aluminium toxicity in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 7, p. 2251-2264, 2011. ISSN 0022-0957. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erq456> >.
- BOYE, K. et al. Sulfur flow in a soil-plant system—effects of long-term treatment history and soil properties. **Plant and Soil**, v. 334, n. 1, p. 323-334, September 01 2010. ISSN 1573-5036. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0385-3> >.

BUZELLI, G. M.; CUNHA-SANTINO, M. B. D. Análise e diagnóstico da qualidade da água e estado trófico do reservatório de Barra Bonita, SP. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, p. 186-205, 2013. ISSN 1980-993X. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-993X2013000100014&nrm=iso >.

CAIRES, E. F.; ROSOLEM, C. A. CORREÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA RADICULAR DO AMENDOIM EM FUNÇÃO DA CALAGEM. **Bragantia**, v. 57, 1998. ISSN 0006-8705. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87051998000100020&nrm=iso >.

CANELLAS, L. P. et al. Estoque e qualidade da matéria orgânica de um solo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 331-340, 2007. ISSN 0100-0683. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832007000200015&nrm=iso >.

CARVALHO, M.; GOSS, M. J.; TEIXEIRA, D. Manganese toxicity in Portuguese Cambisols derived from granitic rocks: causes, limitations of soil analyses and possible solutions. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 38, p. 518-527, 2015. ISSN 0871-018X. Disponível em: < http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-018X2015000400004&nrm=iso >.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. D. **Metodologia científica**. 6ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 162p.

DA SILVA, D.; LOPES, E. L.; JUNIOR, S. S. B. Pesquisa Quantitativa: Elementos, Paradigmas e Definições. **2014**, v. 5, n. 1, p. 18, 2014-04-01 2014. ISSN 2178-9010. Disponível em: < <https://www.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/297> >.

EMBRAPA. **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. SOLOS, E. Rio de Janeiro - RJ: 486 p. p. 2010.

_____. **Solos frágeis : Caracterização, manejo e sustentabilidade**. CASTRO, S. S. D. e HERNANI, L. C. Brasília - DF: Embrapa solos: 367 p. p. 2015.

EMBRAPA, M. A. **Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas**. Jaguariúna, SP: 2003.

ESCOSTEGUY, P. A. V.; KLAMT, E. Basalto moído como fonte de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 11-20, 1998. ISSN 0100-0683. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06831998000100002&nrm=iso >.

FARHAT, N. et al. Interactive effects of excessive potassium and Mg deficiency on safflower. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, n. 9, p. 2737-2745, September 01

2013. ISSN 1861-1664. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1306-x> >.

FERREIRA, M. M. C. **Quimiometria - Conceitos, métodos e aplicações**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2015. 496p.

FERREIRA, M. M. C.; FARIA, C. G.; PAES, E. T. Oceanographic characterization of northern São Paulo Coast: a chemometric study. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 47, n. 2, p. 289-297, 5/17/ 1999. ISSN 0169-7439. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169743998002160> >.

FILZMOSER, P.; TODOROV, V. Review of robust multivariate statistical methods in high dimension. **Analytica Chimica Acta**, v. 705, n. 1–2, p. 2-14, 10/31/ 2011. ISSN 0003-2670. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003267011004570> >.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5^a ed. São Paulo: Atlas, 2010. 184p.

GRANSEE, A.; FÜHRS, H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. **Plant and Soil**, v. 368, n. 1, p. 5-21, July 01 2013. ISSN 1573-5036. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1567-y> >.

GRIFFIN, N. J. The rise and fall of dissolved phosphate in South African rivers. **South African Journal of Science**, v. 113, n. 11/12, p. 57-63, 2017. ISSN 00382353. Disponível em: < <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fsr&AN=126538450> (=pt-br&site=ehost-live >.

GRUBA, P.; MULDER, J. Tree species affect cation exchange capacity (CEC) and cation binding properties of organic matter in acid forest soils. **Science of The Total Environment**, v. 511, n. Supplement C, p. 655-662, 2015/04/01/ 2015. ISSN 0048-9697. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715000169> >.

HAIR JR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688p.

HELPER, G. A. et al. CHEMOSTAT, UM SOFTWARE GRATUITO PARA ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS MULTIVARIADOS. **Química Nova**, v. 38, p. 575-579, 2015. ISSN 0100-4042. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422015000400575&nrm=iso >.

IBGE. Cidades. 2016. Acesso em: 02 jan.

KAISER, D. R. et al. Nitrate and ammonium in soil solution in tobacco management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 379-388, 2010. ISSN

0100-0683. Disponível em: <
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832010000200011&nrm=iso >.

KHALEDIAN, Y. et al. Modeling soil cation exchange capacity in multiple countries. **CATENA**, v. 158, n. Supplement C, p. 194-200, 2017/11/01/ 2017. ISSN 0341-8162. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816217302254> >.

KOST, D.; CHEN, L.; DICK, W. A. Predicting plant sulfur deficiency in soils: results from Ohio. **Biology and Fertility of Soils**, v. 44, n. 8, p. 1091-1098, September 01 2008. ISSN 1432-0789. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0298-y> >.

LORDKAEW, S. et al. Boron deficiency in maize. **Plant and Soil**, v. 342, n. 1, p. 207-220, May 01 2011. ISSN 1573-5036. Disponível em: <
<https://doi.org/10.1007/s11104-010-0685-7> >.

LOVO, S. Tenure Insecurity and Investment in Soil Conservation. Evidence from Malawi. **World Development**, v. 78, p. 219-229, 2// 2016. ISSN 0305-750X. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305750X15002454> >.

MONTEZANO, Z. F.; CORAZZA, E. J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homoganeamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 839-847, 2006. ISSN 0100-0683. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832006000500010&nrm=iso >.

NATALE, W. et al. Acidez do solo e calagem em pomares de frutíferas tropicais. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, p. 1294-1306, 2012. ISSN 0100-2945. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-29452012000400041&nrm=iso >.

NETO, J. M. M.; MOITA, G. C. **Uma introdução à análise exploratória de dados multivariados** 1997.

NGADZE, E. et al. Effect of calcium soil amendments on phenolic compounds and soft rot resistance in potato tubers. **Crop Protection**, v. 62, n. Supplement C, p. 40-45, 2014/08/01/ 2014. ISSN 0261-2194. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219414001276> >.

OCDE-FAO. **Perspectivas Agrícolas 2015-2024**. Perspectivas Agrícolas 2015-2024. OCDE-FAO 2015.

OLIVEIRA, L. B. D. et al. Formas de fósforo no solo sob pastagens naturais submetidas à adição de fosfatos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 867-878, 2014. ISSN 0100-0683. Disponível em: <
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832014000300018&nrm=iso >.

PANERO, F. D. S. et al. **Aplicação da análise exploratória de dados na discriminação geográfica do quiabo do Rio Grande do Norte e Pernambuco** 2009.

PARANÁ, U. F. D. **Manual de diagnóstico da fertilidade e manejo dos solos agrícolas**. 2. ed. Curitiba: 2003. 143 p.

PEREIRA, L. C.; NETO, F. L. **Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras: proposta metodológica**. Jaguariuna, SP.: EMBRAPA Meio Ambiente: 36p. p. 2004.

PERON, A. J.; EVANGELISTA, A. R. Degradação de pastagens em regiões de cerrado. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, p. 655-661, 2004. ISSN 1413-7054. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542004000300023&nrm=iso >.

PETRY, H. Á.; SILVEIRA, R. L. L. D. **Plano estratégico de desenvolvimento regional do Vale do Rio Pardo (2015 - 2030)**. Santa Cruz do Sul: Heitor Álvaro Petry Rogério Leandro Lima da Silveira: 408p. p. 2017.

PINHEIRO, A. C. A. Valor económico do solo: perspectivas pública e privada. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 38, p. 612-620, 2015. ISSN 0871-018X. Disponível em: < http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-018X2015000400012&nrm=iso >.

POELKING, E. L. et al. SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA APLICADO AO LEVANTAMENTO DE SOLOS E APTIDÃO AGRÍCOLA DAS TERRAS COMO SUBSÍDIOS PARA O PLANEJAMENTO AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE ITAARA, RS. **Revista Árvore**, v. 39, p. 215-223, 2015. ISSN 0100-6762. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622015000200215&nrm=iso >.

POSCHENRIEDER, C. et al. A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. **Science of The Total Environment**, v. 400, n. 1, p. 356-368, 2008/08/01/ 2008. ISSN 0048-9697. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969708006542> >.

PÉREZ, D. V.; BREFIN, M. D. L. M.; POLIDORO, J. C. Solo, da origem da vida ao alicerce das civilizações: uso, manejo e gestão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. i-iv, 2016. ISSN 0100-204X. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2016000900001&nrm=iso >.

RAIJ, B. V. **Avaliação da Fertilidade do Solo**. YAMADA, T. Piracicaba - SP: 142 p. p. 1981.

RHEINHEIMER, D. S. et al. **Situação da fertilidade dos solos no estado do Rio Grande do Sul**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p.41 p. 2001

ROSOLEM, C. A.; STEINER, F. Effects of soil texture and rates of K input on potassium balance in tropical soil. **European Journal of Soil Science**, v. 68, n. 5, p. 658-666, 2017. ISSN 1365-2389. Disponível em: < <http://https://doi.org/10.1111/ejss.12460> >.

SADE, H. et al. Toxicity and tolerance of aluminum in plants: tailoring plants to suit to acid soils. **BioMetals**, v. 29, n. 2, p. 187-210, 2016. ISSN 1572-8773. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s10534-016-9910-z> >.

SANTI, A. L. et al. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1346-1357, 2012. ISSN 0100-204X. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2012000900020&nrm=iso >.

SANTOS, E. F. et al. Physiological highlights of manganese toxicity symptoms in soybean plants: Mn toxicity responses. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 113, p. 6-19, 2017/04/01/ 2017. ISSN 0981-9428. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0981942817300347> >.

SBCS. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10^o ed. Porto Alegre: 2004. 400 p.

_____. **Fertilidade do solo**. Viçosa - Minas Gerais: 2007. 1017p.

SBCS, S. B. D. C. D. S. **Nutrição mineral de plantas**. VIII. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 432p.

SBCS. **Manual de calagem e adubação e para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11^a edição. 2016. 376 p.

SCHIEFER, J.; LAIR, G. J.; BLUM, W. E. H. Potential and limits of land and soil for sustainable intensification of European agriculture. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 230, n. Supplement C, p. 283-293, 2016/08/16/ 2016. ISSN 0167-8809. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880916303358> >.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 23^a ed. São Paulo: Editora Cortez, 2007. 304p.

SOUSA, V. F. D. et al. Níveis de irrigação e doses de potássio sobre os teores foliares de nutrientes do maracujazeiro amarelo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 41-46, 2008. ISSN 1415-4366. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662008000100006&nrm=iso >.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. Porto Alegre: 2008. 222 p.

TAN, D. et al. Potassium assessment of grain producing soils in North China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 148, n. Supplement C, p. 65-71, 2012/02/15/ 2012. ISSN 0167-8809. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880911003963> >.

TEIXEIRA, R. F. M. et al. Soil organic matter dynamics in Portuguese natural and sown rainfed grasslands. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 4, p. 993-1001, 2011/02/24/ 2011. ISSN 0304-3800. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380010006186> >.

TILMAN, D. et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 50, p. 20260-20264, December 13, 2011 2011. Disponível em: < <http://www.pnas.org/content/108/50/20260.abstract> >.

UECHI, D. A.; GABAS, S. G.; LASTORIA, G. Análise de metais pesados no Sistema Aquífero Bauru em Mato Grosso do Sul. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, p. 155-167, 2017. ISSN 1413-4152. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522017000100155&nrm=iso >.

ULERY, A. L. et al. Fire effects on cation exchange capacity of California forest and woodland soils. **Geoderma**, v. 286, n. Supplement C, p. 125-130, 2017/01/15/ 2017. ISSN 0016-7061. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706116306759> >.

VELOSO, C. A. C. et al. Influência do manganês sobre a nutrição mineral e crescimento da pimenteira do reino (*Piper nigrum*, L.). **Scientia Agricola**, v. 52, p. 376-383, 1995. ISSN 0103-9016. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90161995000200028&nrm=iso >.

VIDAL, T. F.; CAPELO NETO, J. Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatório na região semiárida utilizando balanço de massa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 402-407, 2014. ISSN 1415-4366. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662014000400007&nrm=iso >.

VOLCHKO, Y. et al. Incorporating the soil function concept into sustainability appraisal of remediation alternatives. **Journal of Environmental Management**, v. 129, p. 367-376, 2013/11/15/ 2013. ISSN 0301-4797. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479713005045> >.

VOLPE, E. et al. Acúmulo de forragem e características do solo e da planta no estabelecimento de capim-massai com diferentes níveis de saturação por bases, fósforo e nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, p. 228-237, 2008. ISSN 1516-3598. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982008000200008&nrm=iso >.

VOUTSIS, N. et al. Assessing the hydrogeochemistry of groundwaters in ophiolite areas of Euboea Island, Greece, using multivariate statistical methods. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 159, n. Supplement C, p. 79-92, 2015/12/01/ 2015. ISSN 0375-6742. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674215300522> >.

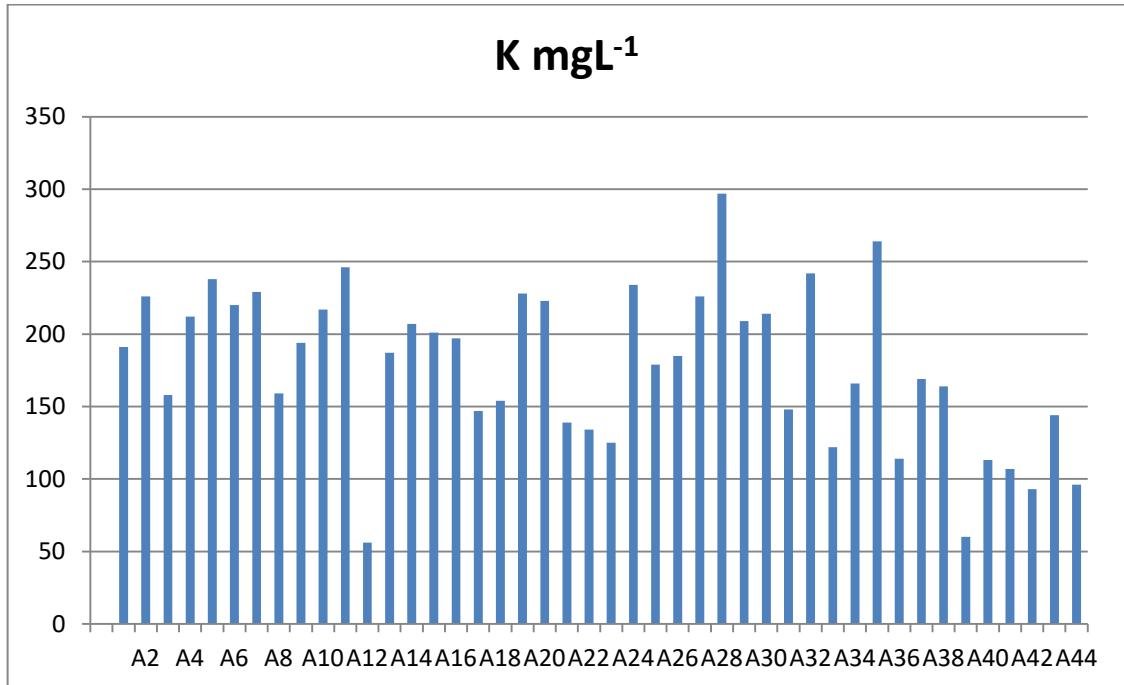
WASWA, B. S. et al. Evaluating indicators of land degradation in smallholder farming systems of western Kenya. **Geoderma**, v. 195-196, p. 192-200, 2013/03/01/ 2013. ISSN 0016-7061. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706112004028> >.

WIETHÖLTER, S. Bases teóricas e experimentais de fatores relacionados com a disponibilidade de potássio do solo às plantas usando trigo como referência. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1011-1021, 2007. ISSN 0100-0683. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832007000500018&nrm=iso >.

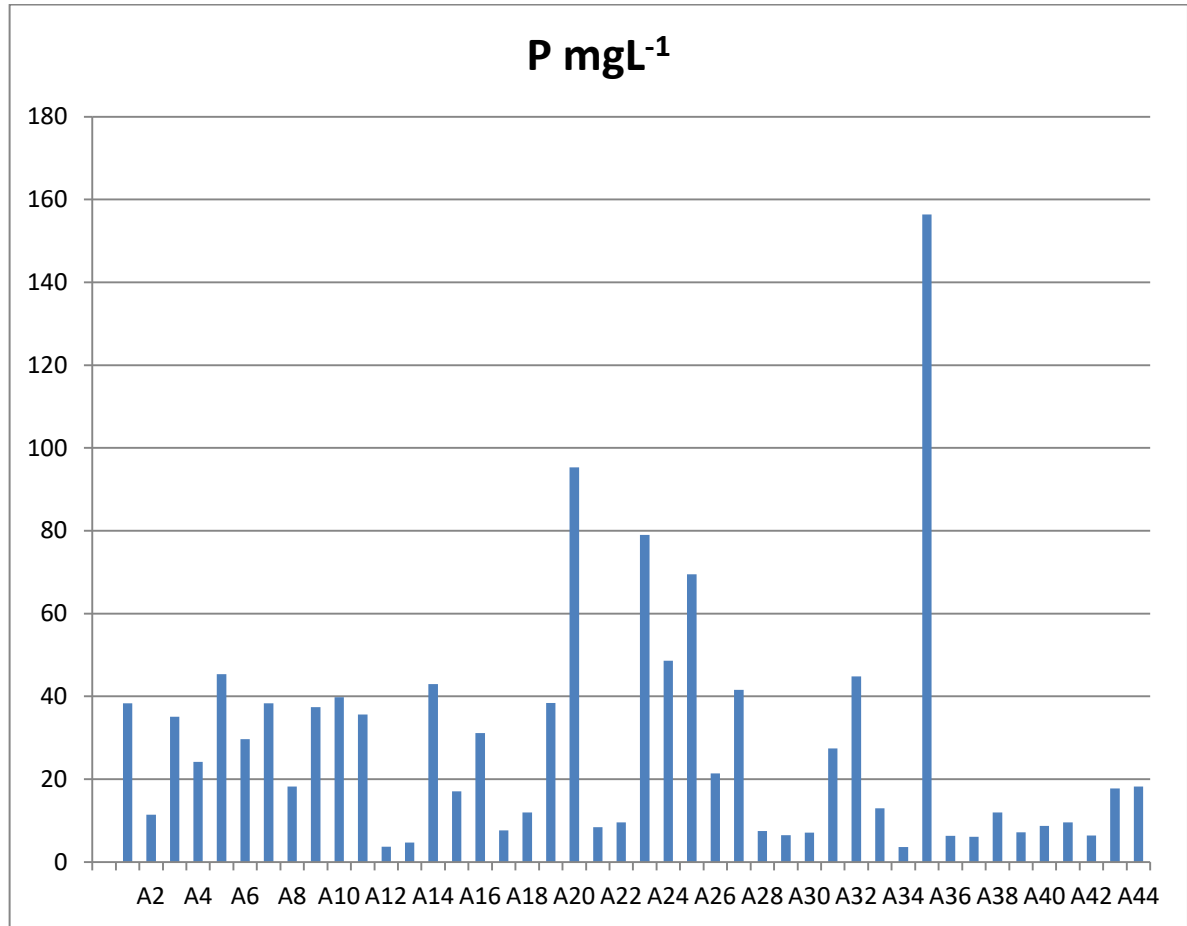
ZETTERBERG, T. et al. Long-term soil calcium depletion after conventional and whole-tree harvest. **Forest Ecology and Management**, v. 369, n. Supplement C, p. 102-115, 2016/06/01/ 2016. ISSN 0378-1127. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112716301037> >.

ZHEN, L.; ROUTRAY, J. K. Operational Indicators for Measuring Agricultural Sustainability in Developing Countries. **Environmental Management**, v. 32, n. 1, p. 34-46, July 01 2003. ISSN 1432-1009. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s00267-003-2881-1> >.

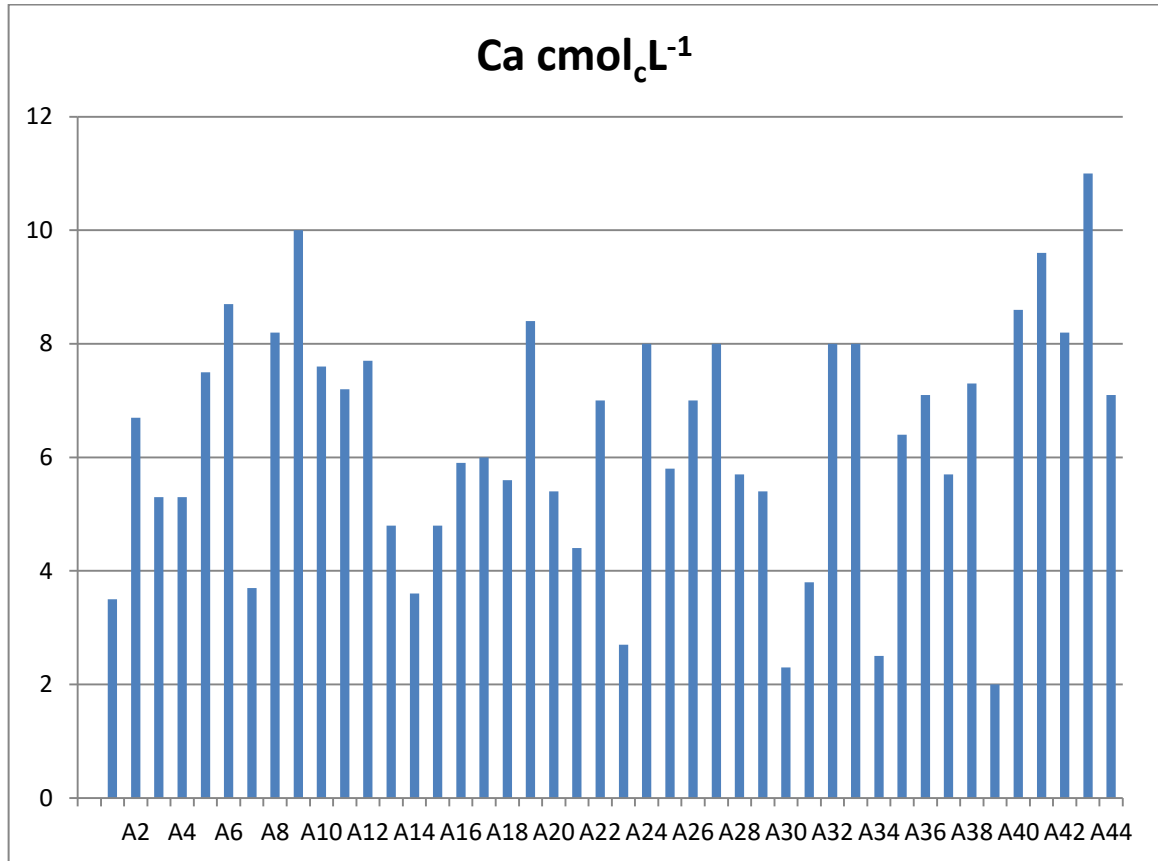
ZHEN, L. et al. Sustainability of farmers' soil fertility management practices: A case study in the North China Plain. **Journal of Environmental Management**, v. 79, n. 4, p. 409-419, 2006/06/01/ 2006. ISSN 0301-4797. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479705002598> >.

APÊNDICE A – Gráfico com os teores de Potássio

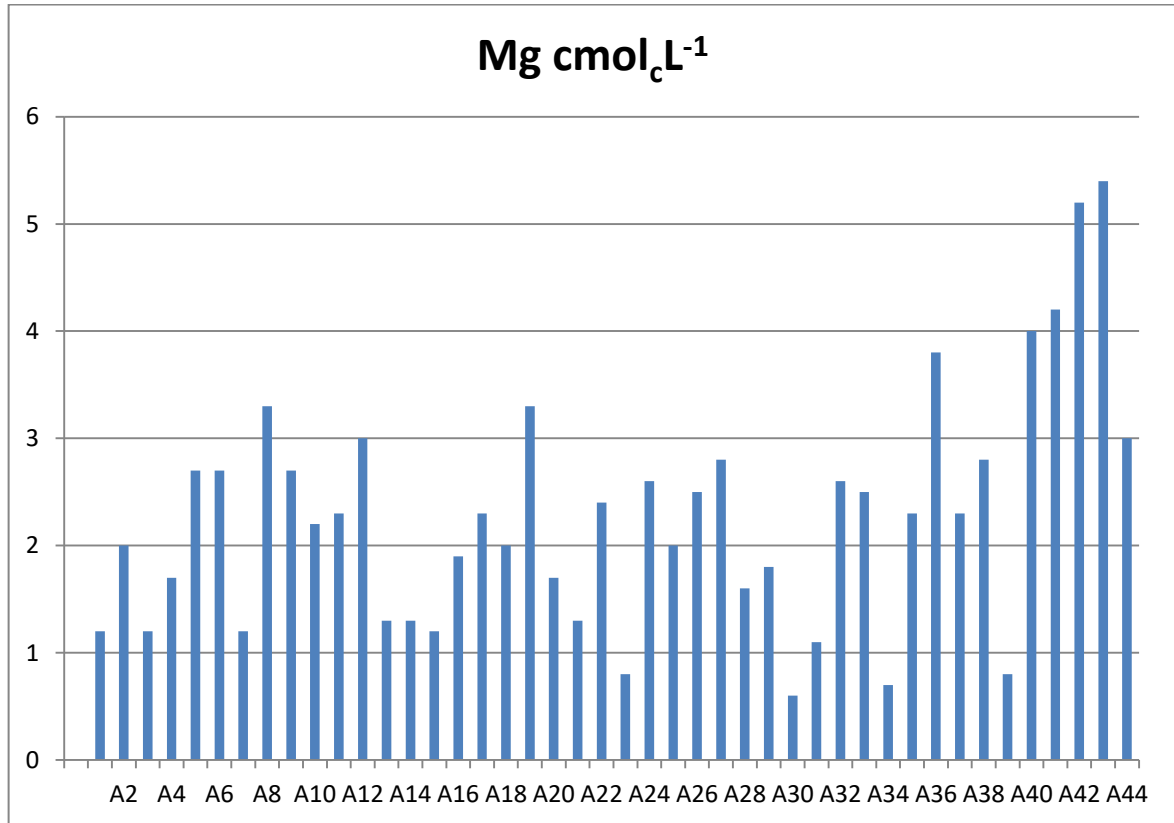
APÊNDICE B - Gráfico com os teores de Fósforo



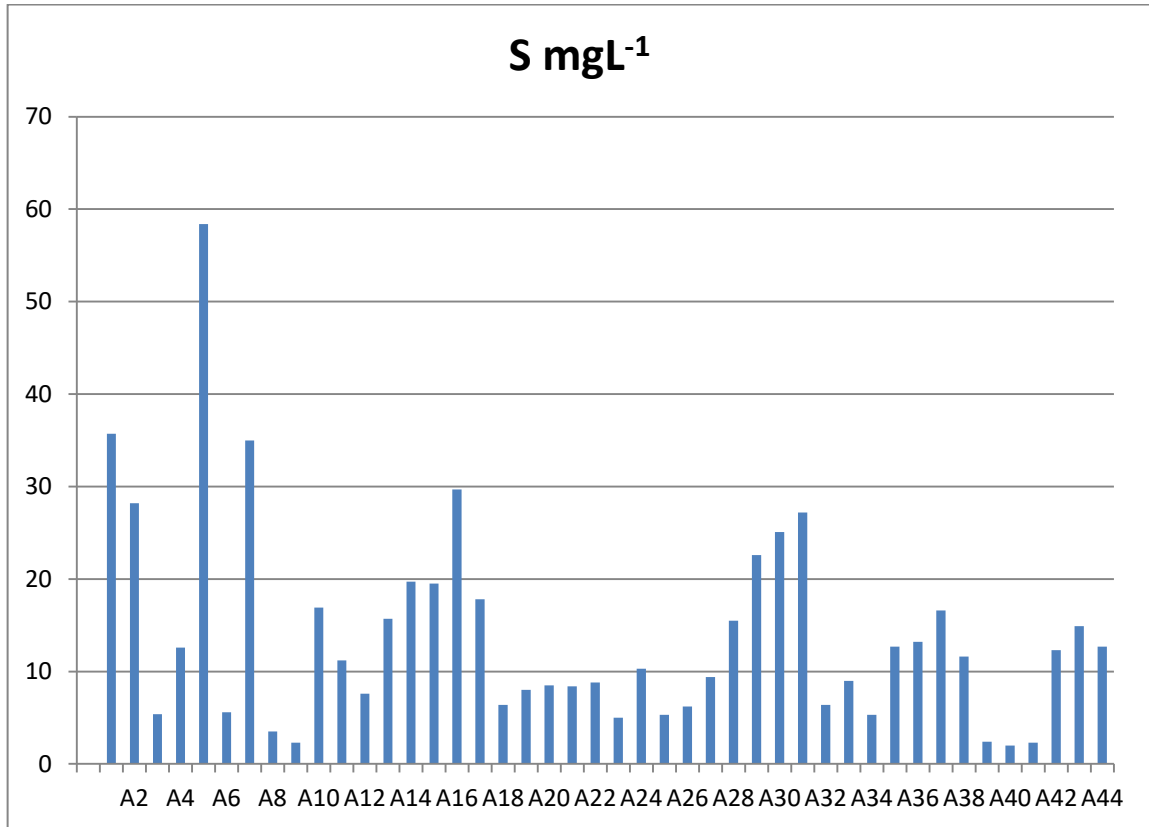
APÊNDICE C – Gráfico com teores de Ca



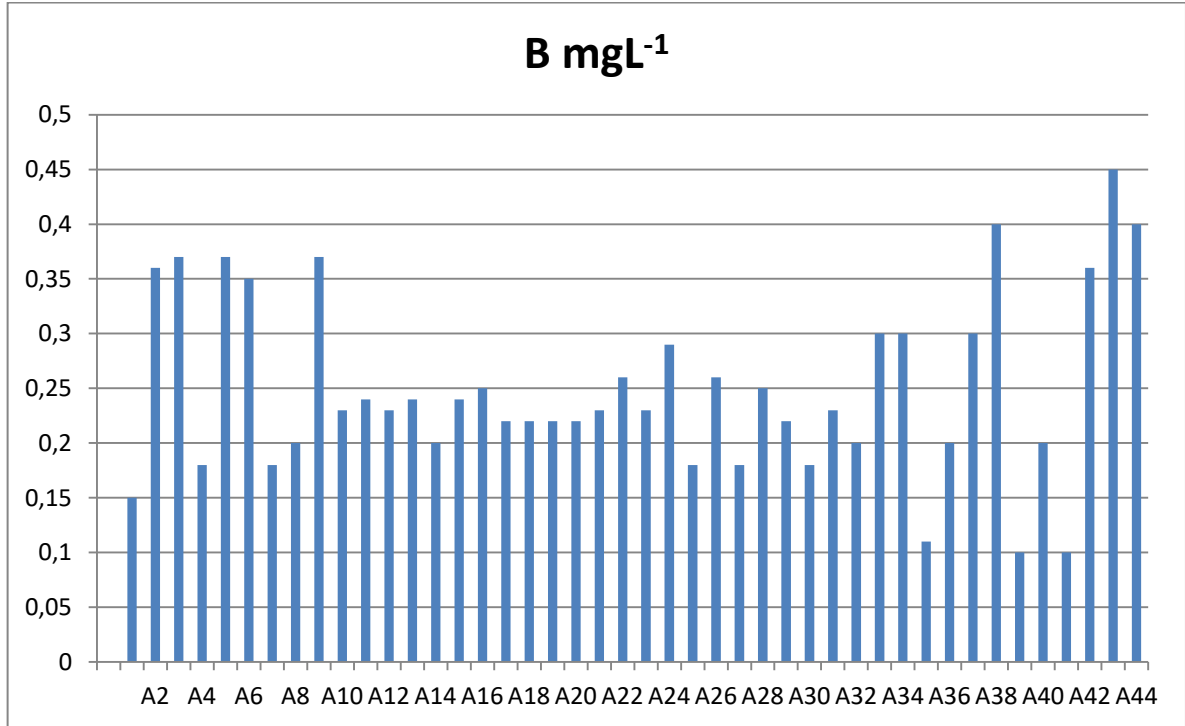
APÊNDICE D – Gráfico com teores de Mg



APÊNDICE E– Gráfico com teores de S



APÊNDICE F– Gráfico com teores de B



APÊNDICE G – Gráfico com altitudes e uso atual do solo

Amostra	Altitude m	Cultivo atual
A1	409	Tabaco
A2	356	Tabaco
A3	351	Hortaliças
A4	366	Tabaco
A5	570	Tabaco
A6	528	Tabaco
A7	583	Tabaco
A8	574	Milho
A9	564	Hortaliças
A10	468	Tabaco
A11	426	Tabaco
A12	588	Pastagem
A13	547	Soja
A14	501	Tabaco
A15	526	Tabaco
A16	567	Tabaco
A17	557	Tabaco
A18	591	Soja
A19	557	Tabaco/fruticultura
A20	415	Tabaco
A21	564	Milho
A22	545	Soja
A23	393	Tabaco
A24	566	Tabaco
A25	545	Tabaco
A26	576	Soja
A27	516	Milho
A28	464	Tabaco
A29	551	Aveia
A30	244	Milho
A31	492	Tabaco
A32	583	Soja
A33	584	Soja
A34	579	Soja
A35	566	Tabaco
A36	559	Milho
A37	577	Tabaco
A38	570	Soja
A39	355	Hortaliças
A40	579	Soja
A41	589	Soja
A42	584	Soja
A43	592	Soja
A44	579	Soja