



**UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA**

PEDRO RODOLFO SIQUEIRA VENDRAME

**RELAÇÕES ENTRE A MINERALOGIA, FERTILIDADE,
ACIDEZ E MACROFAUNA EM LATOSSOLOS DO CERRADO
SOB PASTAGEM**

Londrina
2008

PEDRO RODOLFO SIQUEIRA VENDRAME

**RELAÇÕES ENTRE A MINERALOGIA, FERTILIDADE,
ACIDEZ E MACROFAUNA EM LATOSSOLOS DO CERRADO
SOB PASTAGEM**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Osmar Rodrigues Brito

Co-Orientador: Dr. Thierry Becquer

Londrina
2008

Catálogo na publicação elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da Universidade Estadual de Londrina.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

V453r Vendrame, Pedro Rodolfo Siqueira.

Relações entre a mineralogia, fertilidade, acidez e macrofauna em latossolos do cerrado sob pastagem / Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame. – Londrina, 2008.
103f. : il.

Orientador: Osmar Rodrigues Brito.

Co-orientador: Thierry Becquer.

Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2008.

Bibliografia: f. 91-103.

1. Solos – Teor de alumínio – Teses. 2. Solos – Mineralogia – Teses. 3. Fauna do solo – Teses. I. Brito, Osmar Rodrigues. II. Becquer, Thierry. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU 631.41

PEDRO RODOLFO SIQUEIRA VENDRAME

**RELAÇÕES ENTRE A MINERALOGIA, FERTILIDADE,
ACIDEZ E MACROFAUNA EM LATOSSOLOS DO CERRADO
SOB PASTAGEM**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Maria de Fátima Guimarães – UEL

Profa. Dra. Sonia Gimenez – UEL

Profa. Dra. Maria do Carmo Lana – UNIOESTE

Dr. Robélio Leandro Marchão – EMBRAPA
CERRADOS

Dr. Osmar Rodrigues Brito
Orientador
Universidade Estadual de Londrina

Londrina, 17 de março de 2003.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Dagmar e Edson, que além de me proporcionar a oportunidade de estudar, me deram confiança, amor e carinho neste importante passo de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por abençoar mais esta etapa de minha vida e que esteve e estará sempre ao meu lado

Ao meu orientador professor Osmar Rodrigues Brito pela oportunidade de aprendizado, ensinamentos e amizade construída no decorrer dos trabalhos

Ao meu co-orientador Thierry Becquer que esteve sempre de prontidão e que muito admiro pela maneira de conduzir a pesquisa e as coisas da vida

Aos Professores do Curso de Pós Graduação em Agronomia da UEL, em especial, à professora Maria de Fátima Guimarães

A professora Cécile Quantin, que me orientou durante o período de estágio na Université Paris XI, possibilitando a realização de diversas etapas deste trabalho

À Universidade Estadual de Londrina, pela oportunidade de realizar mais um curso de pós-graduação *strictu sensu*

Ao Institut de Recherche Pour le Développement (IRD), pelo apoio em todas etapas desta pesquisa

À Embrapa Cerrados, por disponibilizar boa parte de suas instalações

À minha namorada Grazieli Lopes Matta, pelo constante apoio, carinho, amor e compreensão, principalmente durante minhas ausências, necessárias para a realização deste trabalho

Às minhas irmãs Juliana e Paula e meu cunhado Maicon que sempre me incentivaram durante a vida acadêmica

Ao pequeno João Pedro, meu sobrinho, por me proporcionar momentos de descontração e alegria

Ao meu avó João Barbosa Siqueira (*In memorium*), que sempre me incentivou na continuação dos estudos e que me ensinou a nunca fugir da luta, mesmo nos momentos turbulentos da vida

Gostaria de agradecer ao amigo e compadre Robélio L. Marchão pelo companheirismo nos tempos em Paris e pelas importantes sugestões e auxílio durante a elaboração desta tese

Ao Diogo N. Eberhardt, pelo apoio em todas as etapas e pela amizade compartilhada

A todos os colegas de Pós-graduação, especialmente ao Alfredo Richart, Nagib Jorge Melén Júnior e Maria Inês L. de Oliveira

Obrigado aos colegas Jérémie Garnier e Alban Duriez da Université Paris XI, com os quais pude compartilhar conhecimentos técnicos e científicos

Epígrafe

“Um homem de valor, mesmo através da mais obscura aspiração, tem sempre consciência do verdadeiro caminho (von Goethe)”.

VENDRAME, Pedro Rodolfo Siqueira. **Relações entre a mineralogia, fertilidade, acidez e macrofauna em Latossolos do Cerrado sob pastagem**. 2008. 116f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

RESUMO

A região do Cerrado ocupa aproximadamente 24% do território nacional correspondendo ao segundo maior bioma da América do Sul, superado apenas pela floresta amazônica. A maioria dos solos da região do Cerrado foram descritos como sendo ácidos, com baixa capacidade de troca de cátions e alta saturação por alumínio. As pastagens ocupam 117 milhões de hectares, dos quais 54 milhões são de pastagens cultivadas. Os efeitos mais drásticos e típicos da toxicidade do alumínio sobre as plantas já foram demonstrados por vários pesquisadores, por outro lado, na maioria destes trabalhos há indicações de que o alumínio trocável ou o teor total de Al das soluções não são indicadores suficientes da toxicidade do alumínio, ressaltando a importância de se avaliar as espécies realmente tóxicas. Outro ponto importante é o efeito do alumínio tóxico sobre os organismos do solo pois, os principais processos de reciclagem de nutrientes, manutenção da estrutura física e das propriedades hidráulicas, são regulados pelos organismos do solo. O objetivo deste trabalho foi analisar o papel da biodiversidade sobre o funcionamento de solos sob pastagens na região do Cerrado caracterizando as relações existentes entre as características do solo (mineralogia, constituintes, fertilidade química, especiação do alumínio) e sua fauna (diversidade e abundância). Coletou-se amostras de solos de diferentes localidades da região do Cerrado para caracterização química e mineralógica. Instalou-se experimento em vasos, em casa de vegetação, com o intuito de se estudar as soluções de solos sob pastagens e determinar a especiação do alumínio. Avaliou-se a macrofauna dos solos em diferentes condições de fertilidade química e diferentes níveis de caulinita e gibbsita. Os resultados permitiram concluir que a maioria das pastagens da região do Cerrado apresentam níveis de macronutrientes insatisfatórios para o seu bom desenvolvimento. O Zn é o micronutriente mais frequentemente limitante ao desenvolvimento das pastagens da região do Cerrado. Os solos cauliniticos apresentam maior potencial de acidificação que os gibbsíticos, onde os níveis de Al trocável são sempre muito baixos. A maior concentração da macrofauna em solos sob pastagens da região do Cerrado ocorre na camada superficial de 0-10cm de profundidade. A predominância de Isoptera é mais acentuada nos solos de baixa fertilidade química. Há maior densidade de Oligochateas nos solos cauliniticos.

Palavras-chave: Especiação química. Degradação dos solos. Fauna edáfica. Análise de componentes principais.

VENDRAME, Pedro Rodolfo Siqueira. **Relationship between mineralogy, fertility, acidity and macrofauna in latossolos (oxisols) of the cerrado under pasture.** 2008. 116f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

ABSTRACT

The Cerrado region occupies approximately 24% of Brazilian territory, making it the second biggest biome in South América, exceeded only by the Amazon Rainforest. The majority of the soils of the region were described as being acid, with a low capacity for cation exchange and high saturation by aluminium. Pastures cover 117 million hectares, of which 54 million are cultivated pastures. The most dramatic and typical effects of aluminum toxicity on plants have already been demonstrated by various researchers. However, in most of these studies there are indications that the exchangeable aluminum or the total level of Al of the solutions are not sufficient indicators of the toxicity of the aluminium, highlighting the importance of evaluating the truly toxic species. Another important point is the effect of toxic aluminum on organisms within the soil since the principal processes of nutrient recycling, maintenance of physical structure and hydraulic properties, are regulated by the organisms within the soil. The objective of this work was to analyse the role of biodiversity on the functioning of the soils under pasture in the Cerrado region characterizing the relationships between the characteristics of the soil (minerology, constituents, chemical fertility, aluminium speciation) and its fauna (diversity and abundance). Samples of soil were collected from different locations of the Cerrado region for chemical and minerological characterization. The experiment was carried out in test-tubes, with the aim of studying the solutions of soils under pasture and determining aluminum speciation. The soil macrofauna in different conditions of chemical fertility and different levels of kaolinite and gibbsite was evaluated. The results allowed us to conclude that the majority of the pasture of the Cerrado region presents unsatisfactory levels of macronutrients for good development. Zn is the micronutrient most frequently limiting the development of the pasture of the Cerrado region. The kaolinitic soils present greater acidification potential than the gibbsites, where the levels of exchangeable Al are always very low. The greatest concentration of soil macrofauna under pasture of the Cerrado region occurs in the superficial layer of 0–10 cm of depth. The predominance of Isoptera (termites) is more accentuated in soils of low chemical fertility. There is greater density of Oligochaetas in the kaolinitic soils.

Keywords: Chemical speciation. Soil degradation. Soil invertebrates. Principal component analysis.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 DISTRIBUIÇÃO E MINERALOGIA DOS SOLOS DA REGIÃO DO CERRADO..	15
2.2 ALUMÍNIO NOS SOLOS DA REGIÃO DO CERRADO.....	17
2.3 ESPECIAÇÃO DO ALUMÍNIO	19
2.4 MACROFAUNA DO SOLO	21
3 ARTIGO A: A SURVEY OF THE FERTILITY AND ACIDITY STATUS OF SOILS UNDER PASTURES IN THE BRAZILIAN CERRADO	24
3.1 ABSTRACT AND RESUMO.....	24
3.2 INTRODUCTION.....	26
3.3 MATERIAL AND METHODS	28
3.4 RESULTS AND DISCUSSIONS	31
3.5 CONCLUSIONS...	36
4 ARTIGO B: DISPONIBILIDADE DE COBRE, FERRO, MANGANÊS E ZINCO EM SOLOS SOB PASTAGENS NA REGIÃO DO CERRADO	37
4.1 RESUMO E ABSTRACT.....	37
4.2 INTRODUÇÃO.....	39
4.3 MATERIAL E MÉTODOS	41
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.5 CONCLUSÕES...	48
5 ARTIGO C: ACIDITY OF THE LATOSSOLOS (OXISOLS) UNDER LONG-TERM PASTURES FROM THE CERRADO REGION, BRAZIL	49
5.1 ABSTRACT AND RESUMO.....	49
5.2 INTRODUCTION.....	51
5.3 MATERIAL AND METHODS	53
5.4 RESULTS	57
5.5 DISCUSSIONS	62
5.6 CONCLUSIONS	68

6 ARTIGO D: ESPECIAÇÃO DO ALUMÍNIO EM SOLOS SOB PASTAGENS DA REGIÃO DO CERRADO	69
6.1 RESUMO E ABSTRACT.....	69
6.2 INTRODUÇÃO.....	71
6.3 MATERIAL E MÉTODOS	73
6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
6.5 CONCLUSÕES.....	83
7 ARTIGO E: INFLUÊNCIA DA MINERALOGIA E FERTILIDADE QUÍMICA SOBRE A MACROFAUNA EM SOLOS SOB PASTAGENS NA REGIÃO DO CERRADO	84
7.1 RESUMO E ABSTRACT.....	84
7.2 INTRODUÇÃO.....	86
7.3 MATERIAL E MÉTODOS	88
7.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
7.5 CONCLUSÕES.....	98
8 CONCLUSÕES GERAIS	99
REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

A região do Cerrado ocupa uma área de 204,7 milhões de hectares na porção central do Brasil e engloba parte dos estados da Bahia, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Piauí, São Paulo e Tocantins, além do Distrito Federal (IBGE, 2004) (Figura 1.1). Corresponde ao segundo maior bioma da América do Sul, superado apenas pela floresta amazônica (SANO et al., 2008).

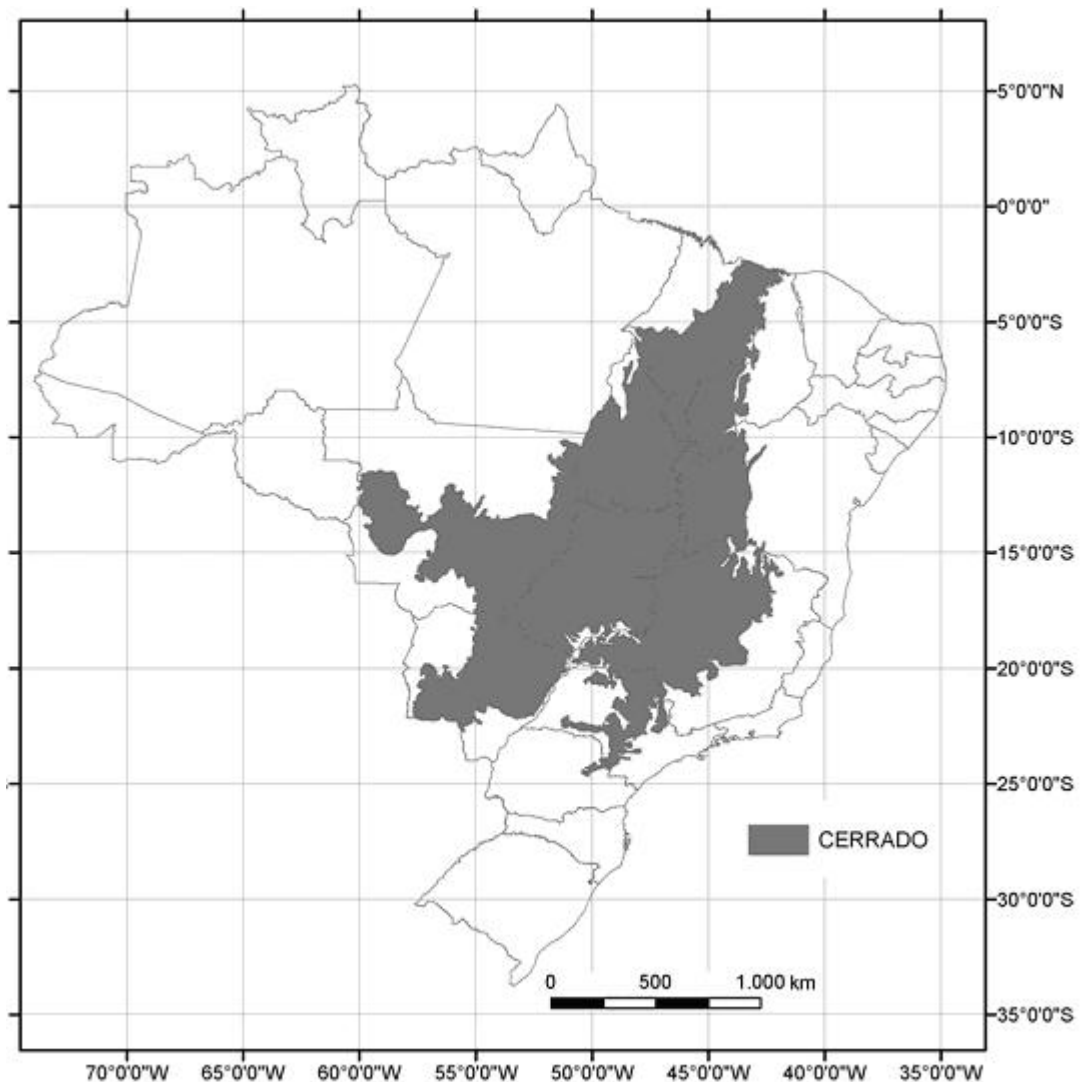


Figura 1.1 – Mapa de vegetação mostrando a área central do Bioma Cerrado, encraves em outros biomas e áreas de transição. Fonte: IBGE (2004).

A maioria dos solos da região do Cerrado foram descritos como sendo ácidos, com baixa capacidade de troca de cátions (CTC) e alta saturação por alumínio. Estas características são válidas principalmente para os latossolos que representam quase a metade de sua área total (ADAMOLI et al., 1985; REATTO e MARTINS, 2005). A baixa CTC presente nestes solos se deve à predominância de argilas de pouca atividade, aliada ao baixo teor de carbono (SOUZA e LOBATO, 2004). A acidez pode ser explicada pelo fato de serem solos muito intemperizados, onde a atividade, principalmente dos agentes químicos e biológicos, vêm atuando a milhares de anos, contribuindo com o intemperismo e conseqüentemente com a perda de bases.

As pastagens ocupam, aproximadamente 117 milhões de hectares da região do Cerrado, das quais, 54 milhões são de pastagens cultivadas (SANO et al., 2008). Estima-se que entre 70% e 80% dos solos sob pastagens apresentam algum grau de degradação.

A degradação das pastagens pode ser definida como um processo evolutivo de perda do vigor, produtividade e capacidade de recuperação natural para sustentar os níveis de produção e a qualidade exigida pelos animais, como o de superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e invasoras, culminando com a degradação dos solos (MACEDO, 1993 e MACEDO e ZIMMER, 1993). A degradação dos solos é um tema de primordial importância, pois o desenvolvimento agrícola não pode mais contar com o desbravamento de novas áreas para aumentar a produção.

O efeito drástico da toxicidade do alumínio sobre as plantas já foi bem demonstrado por vários pesquisadores (FOY et al., 1978; PAVAN et al., 1982; NOBLE et al., 1988; RAIJ, 1991). Por outro lado, na maioria destes trabalhos há indicações de que o alumínio trocável ou o teor total de Al das soluções não são indicadores suficientes da toxicidade do alumínio, ressaltando a importância de se avaliar as espécies realmente tóxicas. Assim, a especiação do Al tem sido considerada um pré requisito para se conhecer a real toxicidade deste elemento às plantas e de aumentar o conhecimento sobre os efeitos danosos que ele tem causado.

Outro ponto importante é o efeito do alumínio tóxico sobre os organismos do solo. Fischer e Molnár, (1997); Rundgren e Nilsson, (1997); Phillips e Bolger, (1998) e Gestel et al., (2001) relacionaram acidez do solo e alumínio trocável

com os organismos dos solos, no entanto, estes pesquisadores realizaram seus trabalhos em laboratório com solos enriquecidos de matéria orgânica e não levaram em conta seu efeito sobre a especiação do alumínio, comprometendo assim as suas conclusões.

Os principais processos de reciclagem de nutrientes, manutenção da estrutura física e das propriedades hidráulicas, são regulados pelos organismos do solo (CHAUVEL et al., 1999; LAVELLE e SPAIN, 2001). A acumulação de estruturas biogênicas diversas fornece os materiais básicos para a formação de agregados, mas esse processo é também muito dinâmico (BLANCHART et al., 1999), sendo que qualquer mudança na composição da macrofauna pode se traduzir em uma modificação rápida do estado de agregação do solo. Apesar de sua importância, a fauna do solo ainda não é levada em conta na definição de práticas de manejo dos solos.

A proposta de estudo desenvolvida nesta tese baseia-se na convicção de que a conservação da diversidade dos solos, particularmente a da fauna, e o aperfeiçoamento de métodos de manejo sustentável estão intimamente ligados e não podem ser atingidos separadamente. O objetivo global deste trabalho foi analisar o papel da biodiversidade sobre o funcionamento dos solos sob pastagens na região do Cerrado caracterizando as relações existentes entre as características do solo (mineralogia, constituintes, fertilidade química, especiação do alumínio) e sua fauna (diversidade e abundância).

Para a condução do trabalho, o objetivo geral foi subdividido nos seguintes objetivos específicos:

- Identificar os fatores pedogenéticos que influenciam a mobilização do alumínio,

- Avaliar a especiação do alumínio em diversas condições de solo,

- Analisar o efeito das características químicas e mineralógicas sobre os macroinvertebrados do solo.

A tese está dividida em cinco capítulos apresentados na forma de artigos científicos, da seguinte forma: No primeiro é apresentada uma caracterização química e mineralógica das áreas de estudo, com enfoque para as condições atuais de acidez e fertilidade química dos solos sob pastagens da região do Cerrado. No segundo capítulo é apresentado um levantamento sobre os teores totais e

disponíveis de Cu, Fe, Mn e Zn e suas relações com a acidez, fertilidade, textura e mineralogia nas áreas de estudo.

No terceiro capítulo é abordado o impacto das características químicas, granulométricas e mineralógicas no potencial de acidificação dos solos, considerando-se que a identificação das áreas problema pode ser uma ferramenta para propor manejos adequados que possam diminuir o processo de degradação dos solos. No quarto capítulo é abordada a especiação química do alumínio e apresentado um estudo detalhado sobre a composição das soluções dos solos nas áreas de estudo. Finalmente, no quinto capítulo, aborda-se a influência das características químicas e mineralógicas sobre a densidade e distribuição da macrofauna dos solos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DISTRIBUIÇÃO E MINERALOGIA DOS SOLOS DA REGIÃO DO CERRADO

Os levantamentos de solos realizados pela Embrapa Solos e pelo projeto RADAMBRASIL ainda na década de 70, permitiram concluir que apesar na monotonia da paisagem, os solos da região do Cerrado são bastante variáveis (KER, 1996). Entre as classes mais expressivas encontram-se os Latossolos (45,7%); Neossolos quartzarênicos (15,2%); Argissolos (15,1%); Plintossolos (9,0%); Gleissolos (2,5%), Nitossolos (1,7%), além de outras classes com menor expressão geográfica (ADÂMOLI et al., 1985; REATTO e MARTINS, 2005).

A composição mineralógica dos solos depende principalmente do material de origem que fornece o grupo inicial de minerais e do grau de intemperismo, que faz variar principalmente os teores de caulinita e gibbsita. Nos latossolos, a fração argila é composta, principalmente, de caulinita, gibbsita, matérias amorfas, óxidos de ferro (hematita e goethita) e quartzo. Os latossolos desenvolvidos nas superfícies mais antigas e estáveis (topo superior da chapada) são os mais alterados enquanto, os encontrados nas superfícies erosionais (encosta superior) ou deposicionais recentes (calha aluvial) são menos desenvolvidos. Os encontrados na segunda superfície geomórfica estável (encosta inferior), apresentam estágio intermediário de alteração (Figura 2.1). Tendo como base a seqüência de intemperismo mica > caulinita > gibbsita, há tendência de os solos do topo superior da chapada serem mais gibbsíticos (RODRIGUES, 1978; MUGGLER et al., 2007). Para Gualberto et al. (1987), a menor quantidade de caulinita nas chapadas deve-se à baixa disponibilidade de sílica em solução nestas condições. Marques et al., (1992) verificaram que em solos com menor eficiência de drenagem, há predominância de goethita em relação a hematita. Este processo é explicado pelo fato da hematita se formar a partir da desidratação da ferriidrita. Em ambientes mais úmidos, compostos orgânicos podem complexar o ferro e impedir a formação de ferriidrita, o que explicaria o favorecimento na formação da goethita (KAMPF e SCHWERTMANN, 1983).



Figura 2.1 – Seqüência de solos em distintas superfícies geomórficas (Rodrigues, 1977).

A homogeneidade granulométrica dos solos da chapada, com perfis geralmente muito argilosos, depende mais do regime hídrico ao longo da topossequência do que do material de origem. Assim, a ocorrência de Latossolo vermelho em local mais elevado, no centro das chapadas, está relacionada a condições de melhor drenagem interna. Já para os solos da segunda superfície geomórfica e das áreas de dissecação mais recente, a contribuição do material de origem mostra grande influência. Desta forma, solos de textura argilosa predominam onde essa superfície corta xistos pré-cambrianos, muito argilosos quando a rocha subjacente é o granulito máfico ou é grande a contribuição de sedimentos terciários da primeira superfície, e de textura média quando a rocha subjacente é o quartzito (MOTTA et al., 2002).

Ker (1996) quando avaliou a fração argila de 26 horizontes diagnósticos de latossolos localizados em diferentes estados brasileiros concluiu que nos latossolos vermelhos férricos predominam caulinita, gibbsita e hematita; nos latossolos vermelhos, caulinita e hematita; nos latossolos vermelho-amarelos, caulinita e goethita; e nos latossolos amarelo caulinita, gibbsita e goethita.

Uma característica importante dos solos da região do Cerrado são os baixos valores de K_i (SiO_2/Al_2O_3), que indicam dessilicação e portanto, elevado período de atuação dos processos pedogenéticos, o que confirma serem as superfícies desta região, as mais estáveis e antigas do país (ADAMOLI et al., 1985).

2.2 ALUMÍNIO NOS SOLOS DA REGIÃO DO CERRADO

O alumínio compreende 7,1% do peso da crosta terrestre e é o terceiro elemento mais abundante depois do oxigênio e do silício. Para os solos da região do Cerrado é o segundo elemento em quantidade, superando o silício (MALAVOLTA, 1980). Ele faz parte de minerais primários, como feldspatos e micas, de minerais secundários alumino-silicatados, como a caulinita, haloisita e imogolita, e de óxidos de alumínio, como a gibbsita (WRIGHT, 1989). Estes diferentes minerais e formas de Al presentes no solo participam na retenção de ânions e cátions, provocam a fitotoxidez em solos ácidos, reduzem a CTC do solo, além de influenciar alguns atributos físicos (PEDROTTI et al., 2003).

A acidificação é um processo natural na evolução dos solos tropicais e subtropicais úmidos, com altas precipitações pluviométricas (BONNEAU et al., 1987). Sob estas condições, nutrientes solúveis como cálcio, magnésio, potássio e outros elementos básicos são lixiviados. Quando a remoção de cátions básicos é maior que sua taxa de liberação pelas intempéries, o pH do solo diminui. Outro fator que ocasiona a diminuição do pH é a decomposição da matéria orgânica por microorganismos do solo, que resulta em liberação de nitrato e hidrogênio (RAO et al, 1993).

Todavia, a acidificação dos solos é significativamente acelerada pelas ações antrópicas. As poluições atmosféricas, notadamente os aportes atmosféricos ácidos (ULRICH, 1983), desempenham papel importante na acidificação de solos próximos aos centros industriais e urbanos. A exportação de nutrientes pelas atividades agropecuárias contribui para o empobrecimento e a acidificação dos solos. A adição de fertilizantes, principalmente os nitrogenados, são igualmente uma causa importante de acidificação (VAN BREEMEN et al., 1983). Em pH baixo, o hidrogênio (H^+) atua sobre os minerais liberando íons alumínio (Al^{3+}) que ficam predominantemente retidos pelas cargas negativas das partículas de argila do solo, em equilíbrio com o Al^{3+} em solução. Assim, a quantidade de Al^{3+} em solução aumenta com a acidez do solo (BOHNEN, 1995).

Os primeiros trabalhos sobre fertilidade química nos solos da região do Cerrado destacaram a acidez, toxidez por alumínio, baixos teores de cátions

básicos e de fósforo como sendo os principais fatores limitantes ao desenvolvimento agropecuário da região (LOPES e COX, 1977; MACEDO e MADEIRA NETO, 1981; RITCHEY et al., 1982). Os problemas de toxidez por alumínio e baixos teores de cátions básicos foram, em parte, solucionados mediante adoção de técnicas de melhoramento vegetal e manejo do solo (LOPES, 1984). Dentre as práticas de manejo, a principal e mais utilizada é a calagem, que promove aumento do pH e da saturação por bases, torna os nutrientes mais disponíveis, promove precipitação do Al e fornece Ca e Mg (SOUZA e LOBATO, 2004). Entretanto, devido ao custo relativamente elevado dessa prática, ela é pouco utilizada em sistemas de exploração extensivos, como as pastagens (SCOTT et al., 2000). Na região do Cerrado, as superfícies cobertas por pastagens são estimadas em $117 \cdot 10^6$ ha, das quais, $54,2 \cdot 10^6$ ha são cultivadas (SANO et al. 2008). O princípio extrativista, característico desta atividade, pode ser confirmado pela irrisória quantia de 4 kg ha^{-1} de NPK que as pastagens brasileiras receberam, em média, no período de 1994 a 2002 (VILELA et al., 2004). Este dado reforça as estimativas de Brossard e Barcellos (2005) de que entre 70% e 80% das pastagens do Cerrado apresentam algum grau de degradação.

O efeito negativo da acidez do solo e da toxidez por Al na produção agrícola não tem sido detectado em alguns trabalhos realizados sob sistema de plantio direto (SPD). Caires et al., (1999) não observaram efeito da aplicação de calcário na produção de milho, trigo e soja, mesmo em condições de elevada acidez. Alleoni et al. (2003) não verificaram efeito de calagem na produtividade de soja e milho. Caires et al., (2003) verificou que a aplicação de gesso agrícola, associada ou não à calagem (superficial ou incorporada), não foi uma estratégia interessante para o estabelecimento da soja no sistema plantio direto, por não ocasionar melhoria na produção de grãos. Uma das explicações pode ser a maior quantidade de ânions orgânicos complexantes em áreas sob SPD, o que diminui as formas tóxicas do Al na solução do solo (MIYAZAWA et al., 1992). Outra explicação pode ser a disponibilidade suficiente de Ca e Mg trocáveis, dada a maior capacidade de troca de cátions decorrente do alto teor de matéria orgânica (CAIRES et al., 1998).

Abreu et al. (2003) avaliando a solução de solos de diferentes regiões do Brasil verificaram que alguns solos, mesmo apresentando alta acidez, não continham Al^{+3} , e atribuíram isto aos diferentes materiais de origem dos solos.

Muitos estudos foram feitos levando-se em consideração a toxidez do alumínio e suas influências na reação do solo, entretanto os métodos utilizados em laboratório para fins de avaliação de sua fertilidade, identifica apenas o conteúdo do elemento disponível no solo, extraído com KCl 1 mol L⁻¹, e não seleciona as formas tóxicas às plantas (AMEDEE e PEECH, 1976).

2.3 ESPECIAÇÃO DO ALUMÍNIO

A especiação química refere-se às formas com que uma molécula ou íon está presente na solução do solo. O Al, devido sua alta carga, baixo raio iônico e eletronegatividade relativamente alta, tem tendência de estar sempre ligado a um ânion na solução do solo.

O pH e o tipo de solo são os principais fatores que alteram as formas de alumínio na solução do solo (ALVA et al., 1986). A distribuição das espécies de Al em função do pH em solução na ausência de ligantes, exceto OH⁻, demonstra que o Al³⁺ predomina em valores menores que 4,9. Em pH 5,0, ocorre um equilíbrio entre as espécies Al³⁺, Al(OH)²⁺, Al(OH)₂⁺. Acima de pH 6,0, praticamente não se constata a presença de Al³⁺, passando a predominar Al(OH)₄⁻ (Figura 2.2).

Em pastagens da região do Cerrado, Vendrame et al. (2007) verificaram que a maior parte do Al contido na solução dos solos estava complexado à matéria orgânica. Em um Latossolo Vermelho, sob dois sistemas de manejo, Salet (1999) verificou que o Al³⁺ representou somente de 0,1 a 4% do total solúvel, ou seja, praticamente todo o Al da solução do solo estava complexado com ligantes.

A solução neutra de KCl 1mol L⁻¹ é frequentemente empregada na extração do alumínio trocável dos solos (EMBRAPA, 1997). Formas adicionais de alumínio, incluindo a fração mais reativa dos polímeros de Al inorgânicos e o Al complexado pela matéria orgânica, podem ser determinadas com o uso da solução de NH₄OAc tamponada a pH 4,8 (MC LEAN, 1976). Outros extratores também são utilizados para quantificar o Al do solo, tais como LaCl₂ (BLOOM et al., 1979) e CuCl₂ (JUO e KAMPRATH, 1979). O Al não trocável pode ser determinado pela diferença entre os valores extraídos pelo CuCl₂ ou NH₄OAc (trocável + não trocável) e aqueles extraídos pelo KCl (trocável) (PAVAN, 1983). Entretanto, não existe uma

linha divisória clara entre a fração trocável e a não trocável, sendo estas formas normalmente diferenciadas em função do método usado na determinação (FIGUEIREDO et al., 1991).

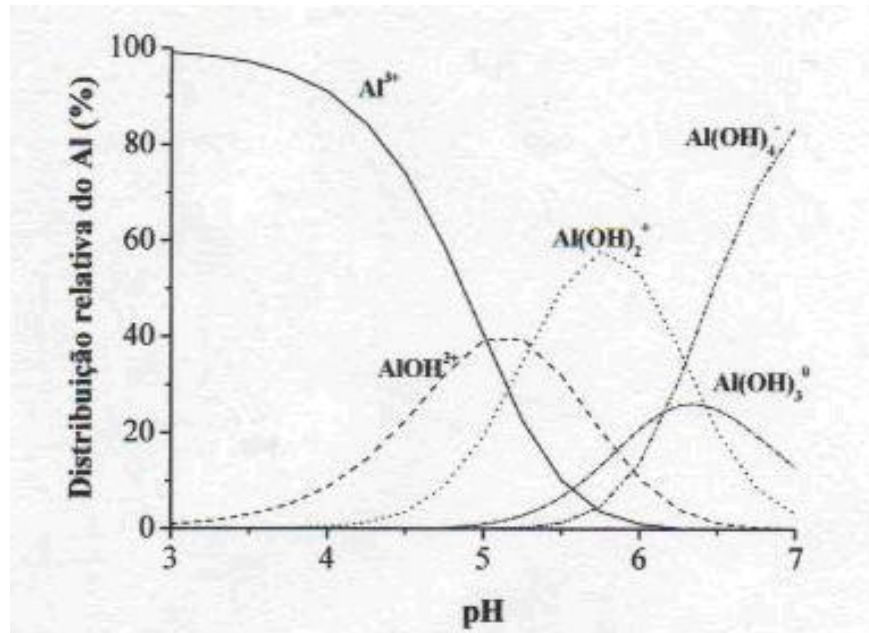


Figura 2.2 – Distribuição das espécies de Al em função do pH do solo (BERTSCH e PARKER, 1995).

As formas consideradas tóxicas para as plantas correspondem essencialmente às espécies monoméricas [Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, AlSO_4^+] (Al lábil) enquanto certas espécies, tais como os complexos do alumínio com o flúor (AlF^{2+} , AlF_2^+ , AlF_3) ou com compostos orgânicos, não são tóxicos (BOUDOT et al., 1994, 1995). Algumas metodologias já foram utilizadas na tentativa de se separar as formas tóxicas das não tóxicas. O método químico do aluminon (GINTHING et al., 2000) permite quantificar as espécies de alumínio lábil (principalmente Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ e $\text{Al}(\text{OH})_2^+$), e tem sido frequentemente empregado em razão da simplicidade e da rapidez na obtenção de resultados. Miyazawa et al., (1993) utilizaram o método potenciométrico com eletrodo seletivo de fluoreto (ESIF) e verificaram que este método foi eficaz na determinação das espécies tóxicas de alumínio às raízes do trigo. O método mais difundido para avaliação das espécies tóxicas de alumínio é o proposto por Driscoll (1984) que utiliza como reagente uma solução de 8-hydroxyquinolina a pH 8.3 numa reação de 15 segundos. Este método

é criticado por extrair boa parte do Al orgânico, causando superestimativa nos valores de Al realmente tóxico às plantas. Boudot et al. (1994) utilizaram a 8-hydroxyquinolina a pH 5 e diminuíram o tempo de reação de 15 para 5 segundos. Com esta adaptação, estes autores verificaram diminuição da quantidade de Al orgânico, antes extraída pelo tempo de reação de 15 segundos.

Todos estes resultados são indicativos de que a especiação do Al é um pré requisito para se conhecer a real toxicidade deste elemento às plantas e aumentar o conhecimento sobre os efeitos danosos que o Al tem causado à agricultura de modo geral.

2.4 MACROFAUNA DO SOLO

A fauna do solo pode ser dividida, de acordo com o diâmetro corporal de seus indivíduos, em micro, meso e macrofauna. A microfauna do solo é composta por protozoários, nematóides, rotíferos, pequenos indivíduos do grupo Collembola, Acari e outros, cujo diâmetro varia de 4 a 100 μm . Atuam, de maneira indireta, na ciclagem de nutrientes, regulando as populações de bactérias e fungos (WARDLE e LAVELLE, 1997). Já a mesofauna, animais de diâmetro corporal entre 100 μm e 2 mm, é constituída pelos grupos Araneida, Acari, Collembola, Hymenoptera, Diptera, Protura, Diplura, Symphyla, Enchytraeidae, Isoptera, Chilopoda, Diplopoda e Mollusca, podendo incluir pequenos indivíduos do grupo Coleoptera. Estes animais, extremamente dependentes de umidade, movimentam-se nos poros do solo e na interface entre a serapilheira e o solo. Dentre as atividades tróficas deste grupo, destaca-se sua contribuição significativa na regulação da população microbiana, mas sua contribuição é insignificante quando relacionada à fragmentação dos resíduos vegetais (SWIFT et al., 1979).

Os animais da macrofauna do solo apresentam diâmetro corporal entre 2 e 20 mm e podem pertencer a quase todas as ordens encontradas na mesofauna, excetuando-se Acari, Collembola, Protura e Diplura e incluindo Annelida e Coleoptera (SWIFT et al., 1979). Dentre os organismos do solo, a macrofauna desempenha importante papel no desenvolvimento da fertilidade do solo. Esses macroinvertebrados modificam o ambiente por meio de vários mecanismos, tais

como: movimentação de material sobre o solo e dentro dele; enterro ativo de restos vegetais depositados na superfície do solo; movimentação de quantidades variáveis de partículas de diferentes tamanhos; construção de montículos, cavidades e ninhos; ingestão, digestão e excreção de restos orgânicos e de partículas minerais; participação nos ciclos biogeoquímicos, tornando disponíveis vários elementos, e contribuindo para o desenvolvimento estrutural do solo (ASSAD, 1997; BARROS et al., 2003). Alguns organismos da macrofauna, principalmente os térmitas, as formigas, as minhocas e as larvas de coleópteros são ainda, denominados “engenheiros do ecossistema” (JONES et al., 1994), pois suas atividades levam à criação de estruturas biogênicas (galerias, ninhos, câmaras e bolotas fecais), que modificam as propriedades físicas dos solos onde vivem e fornecem recursos para outros organismos (WOLTERS, 2000).

Os principais fatores que determinam a composição da macrofauna dos solos são o clima, o solo e a vegetação de cada região, no entanto, diversos processos de intervenção antrópica (aração, adubação, irrigação, aplicação de agrotóxicos, sistema de cultivo adotado, etc.) também exercem influência sobre a densidade e a diversidade de indivíduos nos solos (CARDOSO, 1992). O aporte de resíduos orgânicos em diferentes sistemas de cultivo é um fator importante que influencia a biota do solo, principalmente pelo fornecimento de alimento para os organismos (FRASER, 1994).

Nos solos sob vegetação natural de Cerrado, os indivíduos mais frequentemente encontrados pertencem aos grupos Isoptera, Formicidae, Coleóptera e outros grupos menos representativos (DIAS et al., 1997). Santos et al., (2008) avaliaram a influência das plantas de cobertura sobre a macrofauna dos solos na região do Cerrado e verificaram que as leguminosas estimularam a presença de maior densidade relativa de invertebrados, enquanto as gramíneas estimularam os grupos da serapilheira.

Os impactos da conversão do Cerrado natural em pastagens foram descritos por vários pesquisadores, entre eles, Balbino et al. (2002) que verificaram diminuição dos microagregados em Latossolos, resultando em maior compactação. Apesar de alguns resultados conflitantes, a conversão do Cerrado natural em pastagens geralmente induz a um decréscimo da densidade e da biodiversidade da macrofauna logo após a conversão, seguido de uma recuperação da densidade e da

biodiversidade até um nível comparável aquele do Cerrado natural (DECAËNS et al., 1994; BENITO et al., 2004).

A avaliação do comportamento biológico do solo auxilia no entendimento do funcionamento dos sistemas de produção, pois a biota do solo está intimamente associada a processos de decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (LAVELLE et al., 2006). No que se refere mais particularmente ao manejo da toxicidade do alumínio, a macrofauna do solo atua de forma direta ou indireta. Ela pode agir diretamente sobre o ciclo do carbono e na mineralização da matéria orgânica, favorecendo a liberação dos elementos minerais e na produção de ácidos orgânicos (CHAQUI et al., 2003). Os elementos minerais ou orgânicos produzidos vão contribuir para diminuir a atividade iônica do alumínio ou favorecer sua complexação e assim, limitar sua toxicidade. Além disso, a macrofauna do solo favorece a incorporação e a solubilização dos corretivos calcários, como demonstrado por Baker et al. (1995, 1999).

3 ARTIGO A: A SURVEY OF THE FERTILITY AND ACIDITY STATUS OF SOILS UNDER PASTURES IN THE BRAZILIAN CERRADO

3.1 Abstract

The Cerrado region with over 50 million hectares of pastures is responsible for 55% of the national production of bovine meat. Previous investigations show that between 50 and 80% of these pastures are affected by some kind of degradation, leading to low productivity. However, at the present-moment few surveys have been carried out at a regional scale. The aim of the present work is both to assess the fertility status and acidity levels of Cerrado soils under pasture and to compare the variability of the soils characteristics at a regional scale. Two soil horizons have been systematically sampled in different places within the studied area: (1) a superficial soil (0.0 – 0.2m) in order to evaluate its fertility status for pasture, and (2) a subsuperficial soil used for classification. Results show that the majority of soils under pastures in the Brazilian Cerrado have levels of nutrients below the reference values determined for a good pasture development indicating some kind of chemical fertility decline. Compared to those reference values, 90% of soils analysed are depleted in phosphorus, 70% in potassium, 40% in calcium and 15% in magnesium. However, only 10% of soils present high Al saturation above critical level of acidity. Clayey and very clayey soils present greater levels of C, Ca and Mg and, therefore, greater CEC_{pH7} , ECEC, SB and V, while they have smaller m than coarse-loamy soils.

Key-words: Soil degradation, cation exchange capacity, total carbon, Brazilian Soil Classification System.

ESTUDO DA FERTILIDADE E ACIDEZ DE SOLOS SOB PASTAGENS NA REGIÃO DO CERRADO

3.1 Resumo

A região do Cerrado com 50 milhões de hectares de pastagens responde hoje por 55% da carne bovina produzida no país. Há estimativas indicando que entre 50 e 80 % destas pastagens apresentam algum grau de degradação, o que leva a baixa produtividade. No entanto, poucos levantamentos foram realizados em escala regional. O objetivo deste trabalho foi avaliar a fertilidade e a acidez de latossolos sob pastagens na região do Cerrado e comparar com a sua variabilidade regional. A amostragem foi realizada em dois horizontes, o superficial (0,0-0,2 m) para avaliação da fertilidade e o sub-superficial (0,6-0,8 m), que foi utilizado para classificar os solos. Os resultados obtidos permitem concluir que a maioria dos solos sob pastagens do Cerrado apresenta teores de nutrientes abaixo do recomendado e algum grau de degradação da fertilidade química. Assim, 90% dos solos apresentam teores de fósforo, 70 % teores de potássio, 40% teores de cálcio e 15% teores de magnésio abaixo do valor recomendado para o bom desenvolvimento das pastagens no Cerrado. No entanto, apenas 10 % dos solos apresentam alta saturação de Al e acidez acima do nível crítico. Os solos de textura argilosa e muito argilosa apresentam maiores valores de Ca, Mg, CTC_{pH7} , CTCe, SB e V, e menores valores de saturação por Al que os de textura média.

Palavras-chave: Degradação dos solos, capacidade de troca de cátions, carbono total, Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

3.2 Introduction

The Cerrado soils were described by Lopes and Cox (1977) as being highly acid, containing small quantities of nutrients essential to the growing of plants. These descriptions correspond well to Latossolos (Oxisols), according Brazilian Soil Classification System (EMBRAPA, 2006), which cover half the total Cerrado area (REATTO e MARTINS, 2005).

In a study about Latossolos (Oxisols) of the Cerrado region, Carmo et al. (1984) showed that kaolinite, gibbsite and iron oxides (hematite and goethite) are the principals minerals of the clay fraction; while quartz, anatase and magnetite are the main elements of the sand fraction of these soils. This mineralogical composition depends mainly on the parent material and extent of weathering in which they are found, and has fundamental influence on the activity of clays (CARVALHO JR., 2000). Along with the low levels of organic carbon commonly found in these soils, this low clay activity induces a low cation exchange capacity, another important characteristic of these soils (GOMES et al., 2004).

Despite the fact that Cerrado soils were considered as of low productivity for a long time, the region has been the focus of intense agricultural expansion since the 1970s. It led to cattle raising development, allowing the Cerrado to be responsible for 55% of the national production of bovine meat nowadays (MACEDO, 2000).

Pastures cover approximately 50 million hectares of the Cerrado region (35% natural and 65% cultivated) (SANO et. al, 2000). There are estimates showing that between 50 and 80% of these pastures present soils with varied levels of degradation, which results in the low productivity of these areas as highlighted by Lilienfein et al. (2003) and Brossard and Barcellos (2005). This condition is mainly caused by low biological activity and by lack of essential chemical elements such as nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium. The extractive system characteristic of this activity might be confirmed by the insignificant NPK quantity of 4 Kg ha⁻¹ that Brazilian pastures received on average from 1994 to 2002 (VILELA et al., 2004).

Low levels of exchangeable bases lead to acidify the soil and increase the levels of exchangeable aluminum. The aluminum phytotoxicity in these

areas has already been demonstrated by different researchers (ABREU et al., 2003, WENZL et al., 2003 and MENDONÇA et al., 2006), mainly in Oxisols. Lime and fertilizer inputs might minimize and even eliminate such problems, though, many times, technical recommendations are not implemented by the farmers of the region.

Since the creation of Embrapa Solos and the establishment of the Radambrasil project, the characteristics of the Cerrado soil have been intensively studied. However, most of the completed works have taken into account only the soils under unexploited Cerrado vegetation. Then, the aims of the present work are i) to assay the fertility status and acidity levels of Latossolos (Oxisols) under pastures in the Brazilian Cerrado; ii) to tie up the variability of the fertility with soil characteristics as classified by the Brazilian Soil Classification System.

3.3 Material and Methods

3.3.1 Study subregions and samplings

Soils were collected from the Brazilian Cerrado region. Samplings were carried out in two sub-regions situated near highways GO-060 and BR-154, between the towns of Goiânia, GO and Barra do Garças, MT, and northwest of Minas Gerais, including the towns of Unaí and Paracatu (Figure 3.1).

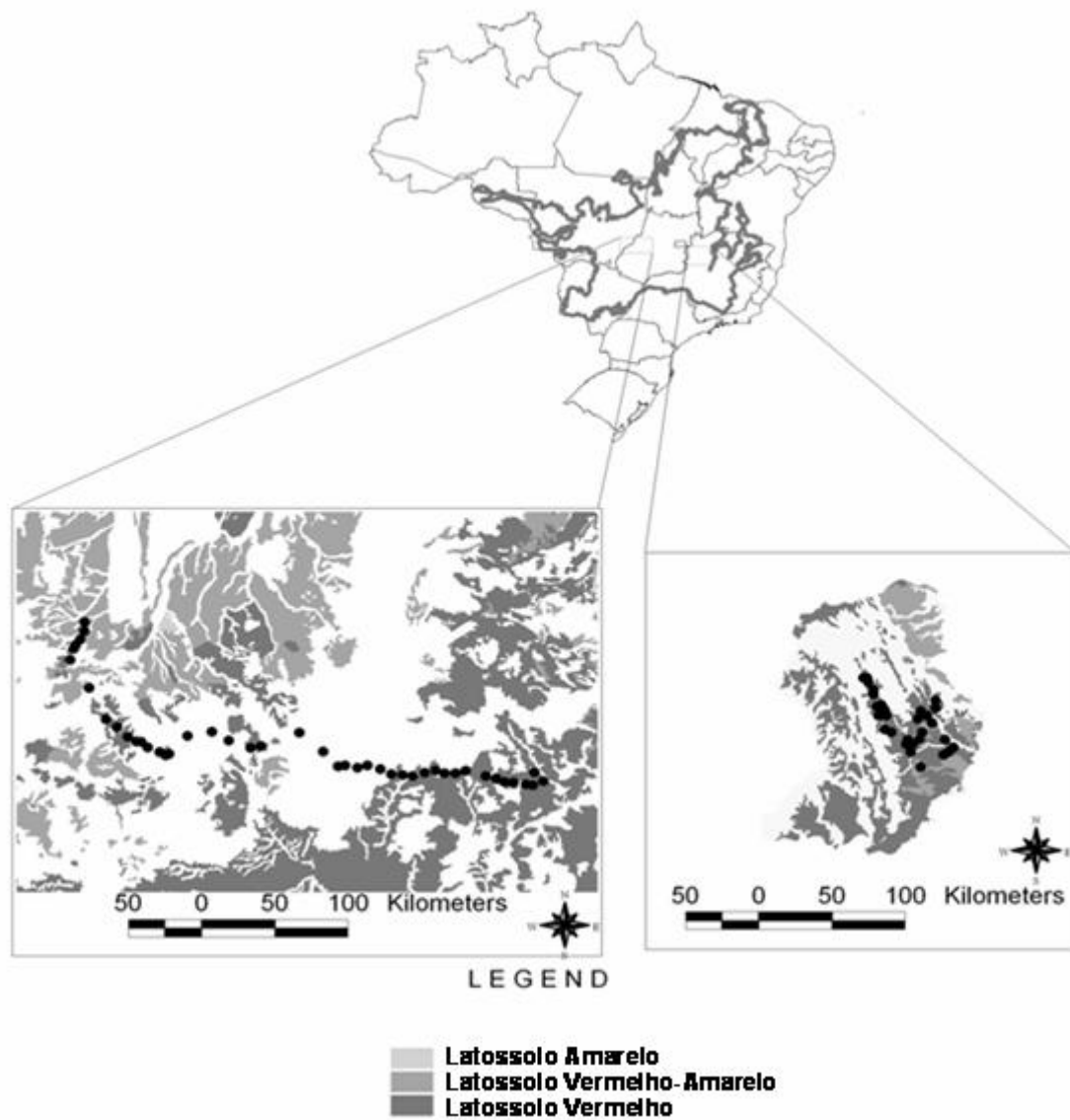


Figure 3.1 The Cerrado region and pedological maps of Latossolos (Oxisols) of the two subregions of sampling (BRAZIL, 1981, 1983; NAIME, 1998).

Geological and pedological maps were used in an attempt to select sampling sites with large soil variability. The sampling was carried out taking local topography into account. Then, the soil samples were collected only from flat or quite even landscape with the purpose of sampling only Latossolos (Oxisols). All the points selected were covered with pasture. Sampling sites were georeferenced with GPS (Global Positioning System) equipment.

Samples were taken from two depths (0.0 – 0.2m and 0.6 – 0.8m). The ones from the 0.0 – 0.2m layer represent the superficial horizon from where soils fertility status were analyzed, while the ones from the 0.6 – 0.8m layers represent the subsuperficial horizon of diagnosis from where soil classification was determined. An auger (Edelman auger) was used to collect samples and two augerings were carried out at each sampling site.

After collection, packaging and identification, soils were sent to Embrapa Cerrados soils laboratory in Planaltina, DF, where they were dried, and screened through a 2mm stainless steel sieve.

3.3.2 Soils analysis

Physical and chemical analysis were conducted at Embrapa Cerrados soils laboratory, following methodology established by Embrapa (1997). The following characteristics were determined: granulometry; pH in water and KCl (ratio 1:2.5); available P and K, extracted with Mehlich-1 solutions (0.0125 mol L⁻¹ of H₂SO₄ and 0.050 mol L⁻¹ of HCl); exchangeable Al, Ca and Mg, extracted with KCl 1 mol L⁻¹; H + Al, extracted with calcium acetate solution 0.5 mol L⁻¹ at pH 7.0 and titrated with NaOH 0.0606 mol L⁻¹. With the results obtained from the analyses of the exchangeable charges of the soils, the sum of exchangeable bases (EB), the cationic exchange capacity at pH 7.0 (CEC_{pH7}), the effective cationic exchange capacity (ECEC), the base saturation (V) and the aluminum saturation (m) were calculated. The total carbon levels (C) were determined using a Perkin Elmer 2400 Series II CNHS Analyzer.

The data were submitted to descriptive statistical analyses (Statistica 5.5, Statsoft, Inc.) aiming at obtaining the mean, the amplitude of the variations (minimum and maximum), and frequency distribution for each one of the chemical characteristics analysed. As the precondition of normality was not fulfilled, the data were transformed by ranking before being subjected to ANOVA to test the effects of soil characteristics (soil type, texture). Differences between group means were tested using the Fisher LSD test.

3.4 Results and Discussions

3.4.1 Soils Fertility Status

The results of the statistical analyses for each one of the chemical characteristics of the soils studied are presented in Figure 3.2.

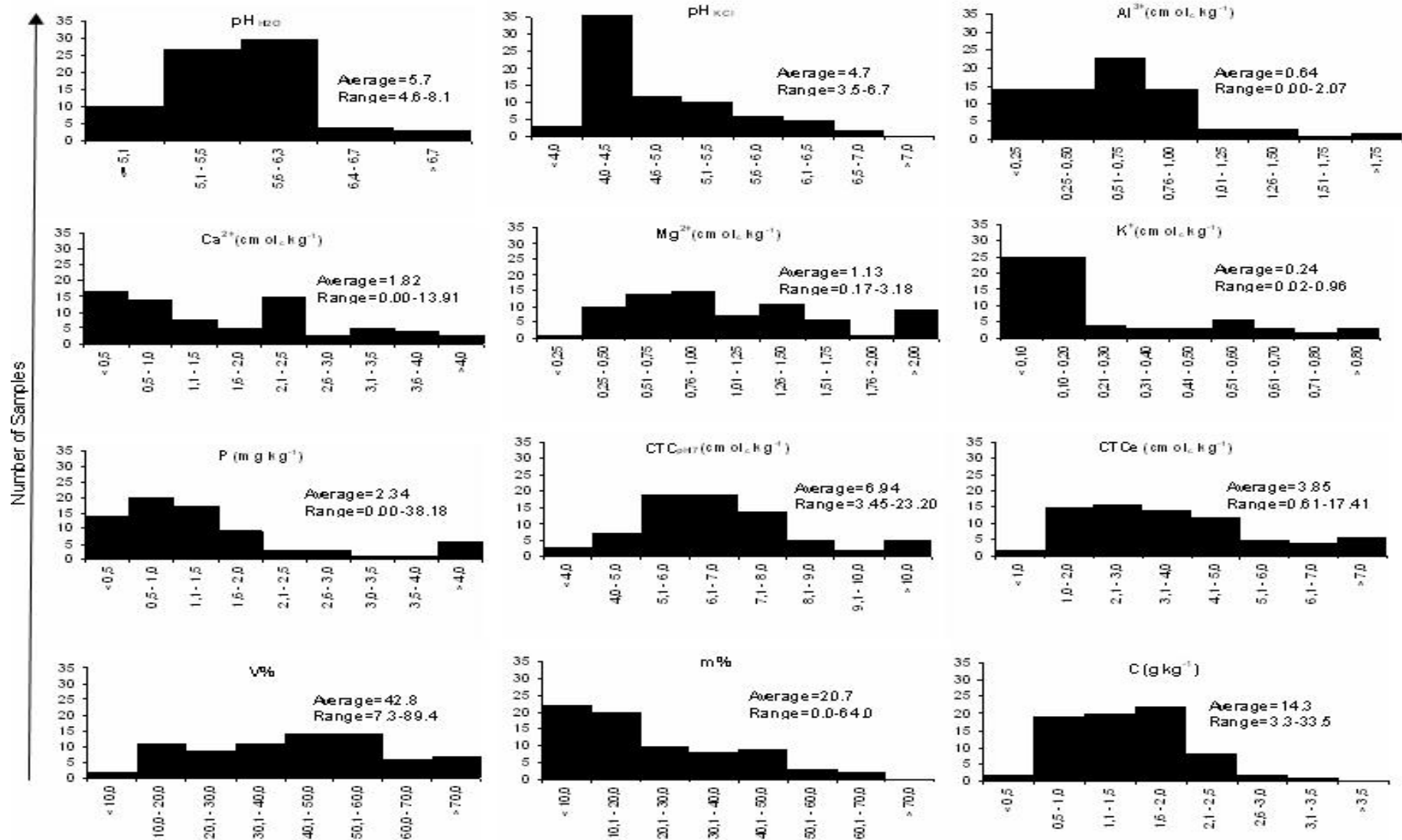
The $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ values range from 4.6 to 8.1 with an average value of 5.6 (Figure 3.2). These values are higher than those reported by Lopes and Cox (1977), for unexploited soils from Cerrado, among which 48% present low $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ values ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} < 5.1$). Most of the soils sampled for this study (57 samples) present values between 5.2 and 6.3, still within a medium or adequate levels. Only 10 samples present values considered low ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} < 5.1$) according to the classification presented by Souza and Lobato (2004). However, the distribution frequency of pH_{KCl} values is similar to the one presented by Lopes and Cox (1977), despite the occurrence of higher values in soils under pasture than in those under unexploited Cerrado vegetation.

The average level of exchangeable Al is $0.65 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ with amplitude between 0.00 and $2.07 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Only 9 samples are above the critical level of $1.00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-1}$ proposed by Luz et al. (2004). These values are close to the ones observed by Lopes and Cox (1977) in the 0 - 15cm layer of soil under unexploited Cerrado, who registered an average value of $0.56 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-1}$.

The quantity of P available varied from 0.02 to 38.20 mg kg^{-1} with an average of 2.30 mg kg^{-1} . Despite the occurrence of high values in some samples, most samples (66) present values below 3 mg kg^{-1} , which is considered restrictive for a good pastures development (Figure 3.2; Macedo, 2004). The low availability of P in these soils is one of the strongest factors limiting pastures development in the region. This low P availability in the soils from Cerrado region is due to lack of regular application of phosphate fertilizers as well as to strong negative phosphorus interaction with iron and aluminum oxides present in the soils (Silva et al., 1997).

The average content of exchangeable K levels is $0.24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ with amplitude between 0.02 and $0.96 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Considering that values below 0.25

Figure 3.2 Classes and frequency distribution of the chemical characteristics evaluated in the 0.0 – 0.2m horizon of soil under pasture in the Brazilian Cerrado region.



$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-1}$ are low for pastures (Macedo, 2004), 53 samples were included in this category. These values are mainly due to both the lack of replacement of renewal of the K extracted during cattle raising activity and the low rates of recycling of nutrients in pastures under inadequate conservation conditions (Vilela et al., 2004).

Regarding the exchangeable Ca levels, an average value of $1.82 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ is verified with amplitude between 0.00 and $13.91 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Only 31 samples present Ca levels below $1.00 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, which is considered as a limit for Cerrado pastures. In relation to the exchangeable Mg levels, it was verified an average value of $1.13 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ and amplitude between 0.17 and $3.18 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Considering that the limiting value for exchangeable Mg is $0.5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-1}$, only 11 samples are within this category (Macedo, 2004). The great amplitudes observed for Ca and Mg levels may be linked to the fact that samplings were conducted on soils under pasture of various landowners, and thus subject or not to the application of fertilizers and lime. Samples having very high levels of Ca and Mg and, in some cases, with Mg/Ca ratio above 1, demonstrates the inadequate liming management of soils from Brazilian Cerrado, what might affects the availability of other macro and micro-nutrients.

The $\text{CEC}_{\text{pH}7}$ average value of the soils is $6.94 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ with amplitude between 3.45 and $23.55 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Regarding ECEC values, an average value of $3.85 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ with amplitude between 0.61 and $17.41 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ is measured. Due to high Ca and Mg contents, the ECEC values are higher than those presented by Lopes and Cox (1977), (average ECEC value = $1.1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-1}$). The high content of exchangeable base does not directly influence the levels of exchangeable Al. However, it has a pronounced effect on Al saturation level (m). The mean value of 59% founded by Lopes and Cox (1977) during their investigations is far from the 24% calculated in the present study. Only 5 soils present Al saturation above the critical level of 50% (Luz et al., 2004).

The total C contained in the soils varies from 3.3 g kg^{-1} to 33.5 g kg^{-1} with average values of 14.3 g kg^{-1} . These values are similar to those presented by Marques et al. (2004a) under unexploited Cerrado, but far below the average values of 22.0 g kg^{-1} measured by Lilienfein et al. (2003) on Cerrado soils under degraded pastures in the Triângulo Mineiro region. These authors verified that in the same region, pastures in good condition presented average total C levels of 27.0 g kg^{-1} .

3.4.2 Effect of the Class on Soil Fertility Status Level

Soil classification was determined following the Brazilian Soil Classification System (Embrapa, 2006). According to this classification, all soils samples are Latossolos (Oxisols). Taking into account the matrix munsell color measured in the sub-superficial horizons, soils are divided into two sub-classes: Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) and Latossolos Vermelhos (LV). Within these sub-classes, three texture groups can be defined: very clayey (clay > 60%), clayey (35% < clay < 60%) and coarse-loamy (15% < clay < 35%). The number of samples of each class, as well as the results of matrix munsell color determinations and granulometric analyses are presented in Table 3.1.

Table 3.1 Class, texture, wet color and soils granulometry, considering the first two categorical levels of the Brazilian Soil Classification System (Embrapa, 2006).

Class	Texture	n	Matrix Munsell color	Clay ¹	Silt ¹	Fine sand ¹	Coarsy-sand ¹
				%			
LVA	Very clayey	5	<i>5YR 4/6 - 7.5 YR 5/8</i>	70,2 <i>67-72</i>	11,0 <i>5-16</i>	4,2 <i>2-10</i>	14,6 <i>8-21</i>
	Clayey	28	<i>5YR 4/4 - 7.5YR 5/8</i>	48,6 <i>36-63</i>	6,4 <i>1-17</i>	12,9 <i>2-32</i>	32,1 <i>18-45</i>
	Coarse-loamy	11	<i>5YR 4/6 - 7.5 YR 6/8</i>	29,0 <i>21-35</i>	4,5 <i>0-13</i>	22,8 <i>7-42</i>	43,7 <i>36-55</i>
LV	Very clayey	13	<i>2.5YR 3/6 - 5YR 3/4</i>	71,5 <i>65-82</i>	10,5 <i>7-19</i>	3,8 <i>2-9</i>	14,2 <i>6-20</i>
	Clayey	14	<i>2.5YR 2.5/4 - 2.5YR 4/8</i>	50,9 <i>43-60</i>	8,9 <i>1-15</i>	12,2 <i>3-28</i>	28,1 <i>15-37</i>
	Coarse-loamy	3	<i>2.5YR 4/6 - 5YR 3/2</i>	24,0 <i>19-34</i>	2,3 <i>0-5</i>	20,0 <i>7-29</i>	53,7 <i>52-57</i>

n = number of samples per group. ¹ Average values (**bold**), minimum and maximum (*italics*)

Clayey Latossolos present darker color than coarse-loamy and very clayey soils (Table 3.1). The maximum Red coloration measured does not exceed 2.5YR in LV leading to small variations between the color of LV and LVA. However, the clay levels vary widely, between 15 and 82% taking into account soils with coarse-loamy and very clayey texture (Table 3.1) (Motta et al., 2002). Table 3.2 shows the mean chemical composition measured in LV and LVA and the different texture groups defined above. No significant difference ($p < 0.05$) is found between

Table 3.2 Comparison of topsoil (0.0 – 0.2 m) chemical properties (mean \pm standard deviation) according to their classification in the Brazilian Soil Classification System (Embrapa, 2006).

Variants	Color		Texture		
	RL	RYL	Very clayey	Clayey	Sligly clayed
pH_{H2O}	5.73 \pm 0.65 (A)	5.64 \pm 0.55 (A)	5.60 \pm 0.74 (a)	5.76 \pm 0.53 (a)	5.51 \pm 0.52 (a)
pH_{KCl}	4.79 \pm 0.74 (A)	4.73 \pm 0.70 (A)	4.54 \pm 0.71 (b)	4.91 \pm 0.73 (a)	4.55 \pm 0.56 (b)
Al (cmol_c kg⁻¹)	0.69 \pm 0.37 (A)	0.60 \pm 0.46 (A)	0.89 \pm 0.47 (a)	0.52 \pm 0.41 (b)	0.64 \pm 0.21 (ab)
K (cmol_c kg⁻¹)	0.26 \pm 0.26 (A)	0.23 \pm 0.21 (A)	0.29 \pm 0.27 (a)	0.25 \pm 0.23 (a)	0.16 \pm 0.18 (a)
Ca (cmol_c kg⁻¹)	2.18 \pm 2.63 (A)	1.58 \pm 1.35 (A)	1.82 \pm 1.59 (a)	2.16 \pm 2.25 (a)	0.74 \pm 1.01 (b)
Mg (cmol_c kg⁻¹)	1.17 \pm 0.74 (A)	1.10 \pm 0.65 (A)	1.18 \pm 0.61 (a)	1.26 \pm 0.73 (a)	0.66 \pm 0.37 (b)
P (mg kg⁻¹)	3.05 \pm 7.14 (A)	1.86 \pm 3.32 (A)	3.01 \pm 8.54 (a)	2.29 \pm 3.94 (a)	1.52 \pm 0.89 (a)
CEC (cmol_c kg⁻¹)	7.47 \pm 3.34 (A)	6.58 \pm 2.14 (A)	7.08 \pm 1.58 (a)	7.30 \pm 3.26 (a)	5.54 \pm 1.35 (b)
ECEC (cmol_c kg⁻¹)	4.33 \pm 3.11 (A)	3.35 \pm 2.10 (A)	4.20 \pm 1.98 (a)	4.20 \pm 2.91 (a)	2.20 \pm 1.30 (b)
EB (cmol_c kg⁻¹)	3.64 \pm 3.20 (A)	2.92 \pm 2.01 (A)	3.30 \pm 2.04 (a)	3.68 \pm 2.86 (a)	1.56 \pm 1.43 (b)
V (%)	44.4 \pm 20.8 (A)	41.7 \pm 19.7 (A)	44.3 \pm 18.3 (a)	46.9 \pm 18.9 (a)	27.4 \pm 20.1 (b)
m (%)	22.7 \pm 17.3 (A)	21.0 \pm 17.0 (A)	24.9 \pm 15.1 (a)	15.5 \pm 13.8 (b)	37.2 \pm 19.0 (a)
C (g kg⁻¹)	15.8 \pm 5.7 (A)	13.3 \pm 6.2 (A)	15.5 \pm 5.0 (a)	15.3 \pm 6.4 (a)	9.6 \pm 4.4 (b)
N (g kg⁻¹)	1.8 \pm 1.9 (A)	1.3 \pm 1.3 (B)	2.1 \pm 0.5 (a)	1.5 \pm 1.3 (a)	0.9 \pm 0.3 (b)

Comparison of means by the Fisher LSD test. Elements with the same letter are not significantly different at $p < 0.05$ – capital letters are for comparison at the first level of classification (= color); small letters are for comparison at the second level of classification (= texture).

LV and LVA, except for N, in spite of great variability of results. Such variability is certainly linked to management of the pastures. In relation to texture classification, differences between the groups studied are observed. Levels of exchangeable bases, along with its related variable (CEC_{pH7}, ECEC, SB and V) are significantly higher in clayey and very clayey soils. These result can be attributed to the well known contribution of organic matter to the cation exchange capacity of soil, and to the higher C content found in the clayey and very clayey soils of the Cerrado (Zinn et al., 2005), due to the protective effect of clay minerals on organic compound mineralization (Zech et al., 1997). As the Al saturation seems to be little affected by the texture of the soil, the decrease in the content of exchangeable bases in coarse-loamy texture soils, led to an increase in aluminum saturation (m) in these soils.

3.5 Conclusions

1. In the soils studied, it is observed that 90% of phosphorus levels and 70% of potassium levels are below reference values considered adequate for good Cerrado pastures development;
2. The encountered values of calcium and magnesium levels are higher than those normally observed in unexploited Cerrado soils. However, 40% of calcium levels and 15% of magnesium levels are below reference;
3. The average levels of exchangeable aluminium are similar to those verified in soils under unexploited Cerrado vegetation. Nevertheless, only 10% of soils present Al saturation above critical level of 50%;
4. The higher levels of calcium and magnesium observed in some samples exert greater influence on saturation than on exchangeable aluminium levels;
5. Clayed and heavy clayed texture soils present higher levels of CEC_{pH7} , ECEC, EB and V than slightly texture soils.

4. ARTIGO B: DISPONIBILIDADE DE COBRE, FERRO, MANGANÊS E ZINCO EM SOLOS SOB PASTAGENS NA REGIÃO DO CERRADO¹

4.1 Resumo

Este trabalho teve como objetivo descrever os teores totais e disponíveis de Cu, Fe, Mn e Zn e suas relações com a acidez, fertilidade, textura e mineralogia de latossolos sob pastagens na região do Cerrado. Os solos estudados foram amostrados em três regiões: às margens das rodovias GO-060 e BR-154, entre os municípios de Goiânia, GO e Barra do Garças, MT, no Distrito Federal, e nos municípios de Unaí e Paracatú, noroeste de Minas Gerais. Coletou-se um total de 54 amostras da camada 0 - 20 cm. Relacionaram-se as quantidades disponíveis de Cu, Fe, Mn e Zn com: seus teores totais, textura, mineralogia e variáveis químicas dos solos, por meio da análise de componentes principais. Os teores totais e disponíveis de Cu, Fe, Mn e Zn foram extremamente variáveis. A disponibilidade de Fe, Cu e Mn se relacionou principalmente com os teores de ferro cristalino e com o pH em água. A disponibilidade de Zn se relacionou principalmente com a capacidade de troca catiônica do solo. O Zn pode ser considerado, entre os micronutrientes avaliados, aquele com maior probabilidade de ocorrer em teores limitantes ao desenvolvimento das pastagens na região do Cerrado.

Palavras-chave: Análise de componentes principais, latossolos, pH, ferro cristalino, DTPA.

¹ Artigo publicado na revista PAB (Pesquisa Agropecuária Brasileira), v.42, n.6, p.859-864, jun. 2007.

AVAILABILITY OF COPPER, IRON, MANGANESE AND ZINC IN SOILS UNDER PASTURES IN THE BRAZILIAN CERRADO

4.1 Abstract

The objective of this work was to describe the total and available Cu, Fe, Mn and Zn contents, and their relation with the oxisols acidity, fertility, texture and mineralogy under Cerrado pastures. The soil samples were taken from three regions: along highways GO-060 and BR-154, between the towns of Goiânia, GO, and Barra do Garças, MT, northeast of the State of Minas Gerais, in the towns of Unaí and Paracatú, MG, and in the Federal District. Fifty four soil samples were collected from the 0-20 cm layer. Available quantities of Cu, Fe, Mn and Zn were related to: total contents, chemical variables, soils texture and mineralogy, through the analysis of the principal components. The available and total Cu, Fe, Mn and Zn content varied greatly. The availability of Fe, Cu and Mn related mainly to the variables crystalline iron and pH in water. The availability of Zn was mainly related to the soil exchange capacity. Zn was, among the other micronutrients studied, the only one considered to be a limiting factor for Cerrado pasture development.

Key-words: Principal component analysis, oxisols, pH, crystalline iron, DTPA.

4.2 Introdução

Os solos do Cerrado em geral são altamente intemperizados e ácidos, contendo pequenas quantidades de nutrientes essenciais para o crescimento das plantas (LOPES e COX, 1977). Estas descrições se aplicam principalmente aos Latossolos, que cobrem metade da área do bioma Cerrado (REATTO e MARTINS, 2005).

As pastagens cultivadas ocupam aproximadamente 50 milhões de hectares da região do Cerrado. Há estimativas que indicam que entre 70 a 80 % destas pastagens apresentam solos com variados graus de degradação, o que resulta em baixas produtividades (BROSSARD e BARCELLOS, 2005). Esta condição é causada principalmente pela baixa atividade biológica e pela deficiência de macro e micronutrientes nos solos (LILIENFEIN et al., 2003).

Marques et al. (2004b) relataram que os solos do Cerrado apresentam teores totais de Cu, Zn e Mn equivalente à metade do valor da média mundial. Eles atribuem este fato ao longo e intenso processo de intemperismo sofrido pelos solos desta região. Singh e Gilkes (1992) deram suporte a esta opinião demonstrando que apenas 30 % da quantidade total de Mn e 50 % das de Cu e Zn estão retidas nos óxidos de Fe e assim, protegidos da lixiviação.

Vários trabalhos mostraram diminuição da produtividade das culturas em consequência da carência de micronutrientes (FAGERIA e BALIGAR, 1997, LIMA et al., 2000 e MAGALHÃES et al., 2002), destacando-se principalmente a deficiência de zinco. A calagem, quando eleva o pH em água ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) para valores superiores a 6,0, ou, a saturação por bases para mais de 50%, contribui para o aparecimento de deficiências de micronutrientes (LIMA et al., 2000), em consequência do aumento da adsorção dos micronutrientes catiônicos na matéria orgânica, nos óxidos de ferro amorfos e nos óxidos de manganês (NASCIMENTO et al., 2002). Segundo Harter (1991), as reações de adsorção-dessorção tendem a ser mais rápidas que os processos de precipitação-dissolução, de modo que a adsorção na interface sólido-solução pode ser o fator dominante para regular a concentração de micronutrientes em solução.

Muitas das informações sobre os micronutrientes em condições brasileiras são oriundas de trabalhos conduzidos no estado de São Paulo e na

região sul do Brasil, o que não reflete a realidade da região do Cerrado. Poucos trabalhos foram realizados com levantamento dos teores de micronutrientes nesta região (LOPES e COX, 1977, MARQUES et al., 2004b e WILCKE e LILIENFEIN, 2004) e, menos ainda, sobre sua disponibilidade em pastagens.

Este trabalho teve como objetivo determinar os teores totais e disponíveis de Cu, Fe, Mn e Zn e suas relações com a acidez, fertilidade, textura e mineralogia de Latossolos sob pastagens no Cerrado brasileiro.

4.3 Material e Métodos

Os solos estudados foram coletados nos anos de 2004 e 2005, em três regiões: às margens das rodovias GO-060 e BR-154, entre os municípios de Goiânia, GO e Barra do Garças, MT ($15^{\circ}34'40''\text{S}$ a $16^{\circ}39'34''\text{S}$ e $49^{\circ}20'48''\text{W}$ a $52^{\circ}17'52''\text{W}$), no Distrito Federal ($15^{\circ}30'0,9''\text{S}$ a $16^{\circ}01'11''\text{S}$ e $47^{\circ}22'0,9''\text{W}$ a $48^{\circ}11'58''\text{W}$), e nos municípios de Unaí e Paracatú, noroeste de Minas Gerais ($16^{\circ}35'24''\text{S}$ a $16^{\circ}52'48''\text{S}$ e $46^{\circ}27'36''\text{W}$ a $46^{\circ}48'36''\text{W}$). No total foram coletadas 54 amostras distribuídas nas três regiões.

Para a definição e localização dos pontos de amostragem foram consultados mapas geológicos e pedológicos, sendo selecionados apenas locais compostos pela classe dos Latossolos. As amostras foram coletadas apenas em relevos planos ou suavemente ondulados. Todas as áreas selecionadas estavam ocupadas por pastagens. Os pontos amostrados foram georreferenciados com auxílio de equipamento GPS.

Em cada ponto de amostragem foram coletadas amostras da camada superficial do solo (0 - 20 cm) com auxílio de trado tipo holandês (material inoxidável). Foram realizadas três tradagens (distanciadas $\pm 1,0$ m) visando obter maior quantidade e homogeneidade das amostras.

As análises químicas, granulométricas e mineralógicas das amostras foram realizadas seguindo métodos da Embrapa (1997). Foram determinados: pH em água (relação 1:2,5); K disponível, extraído com a solução Mehlich-1 ($0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ de H_2SO_4 e $0,050 \text{ mol L}^{-1}$ de HCl); Al, Ca e Mg trocáveis, extraídos com KCl 1 mol L^{-1} ; H + Al extraídos com solução de acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0 e titulado com NaOH $0,0606 \text{ mol L}^{-1}$. Com os resultados obtidos nas análises do complexo sortivo foram calculados a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica a pH 7,0 ($\text{CTC}_{\text{pH}7}$) e a saturação por bases (V). Para avaliação do carbono orgânico (C), empregou-se o método da oxidação por dicromato de potássio e titulação com sulfato ferroso (método WALKLEY e BLACK).

Para quantificar os óxidos de Fe cristalinos (Fe_{CDB}), empregou-se o método ditionito/citrato/bicarbonato de sódio (CBD) (MEHRA e JACKSON, 1960). Também se realizou a análise termogravimétrica (ATG), utilizando-se aparelho TGA-

50 Shimadzu, para avaliar as quantidades percentuais de caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) (MELO et al., 2001).

Os teores totais de Cu, Fe, Mn e Zn foram quantificados em espectrômetro de emissão atômica por plasma, após a extração com as seguintes soluções: HF + HClO₄ + HCl + HNO₃ (SUN et al., 2001). Avaliou-se também os teores disponíveis desses micronutrientes em espectrofotômetro de absorção atômica, após a extração com DTPA (LINDSAY e NORVELL, 1978).

Os dados obtidos das quantidades totais e disponíveis dos micronutrientes foram submetidos a análises estatísticas descritivas visando obter média, amplitude de variação e distribuição de frequência. Utilizou-se a análise de componentes principais (ACP) com o uso do programa ADE-4 (THIOULOUSE et al., 1997) com o intuito de comparar e relacionar a disponibilidade dos micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn aos seus teores totais, e às variáveis V, SB, pH, CTC_{pH7}, Al³⁺, C, textura, teor de caulinita, gibbsita e óxidos de Fe cristalinos dos solos.

4.4 Resultados e Discussão

Os resultados de média, mínimo, máximo e desvio-padrão dos teores totais e disponíveis dos micronutrientes estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Valores médios, mínimos, máximos e desvio-padrão dos teores totais e disponíveis de cobre, ferro, manganês e zinco de solos sob pastagens no Cerrado

Micronutriente	Média	Min	Máx	Desvio-padrão
-----(mg kg^{-1})-----				
-----teores totais-----				
Cu	28,76	nd**	187,50	29,41
Fe*	66,69	9,15	327,59	49,94
Mn	151,00	19,43	1.030,00	162,00
Zn	36,01	7,39	195,28	27,52
-----teores disponíveis (DTPA) -----				
Cu	0,97	0,11	3,21	0,81
Fe	29,67	0,19	101,59	19,43
Mn	5,47	nd**	33,07	6,03
Zn	0,83	nd**	3,74	0,58

* Valores em g kg^{-1}

** Não detectado

Exceto para o Mn que apresentou valores maiores, as médias dos teores totais de micronutrientes são similares às encontradas por Marques et al. (2004b) e Wilcke e Lilienfein (2004) em solos da região do Cerrado. A amplitude observada pode ser explicada pela grande extensão da área de amostragem, onde há influência de diferentes materiais de origem ou pela eventual fertilização das pastagens com adubos que continham micronutrientes.

A distribuição de frequências dos teores de micronutrientes disponíveis está apresentada na Figura 4.1.

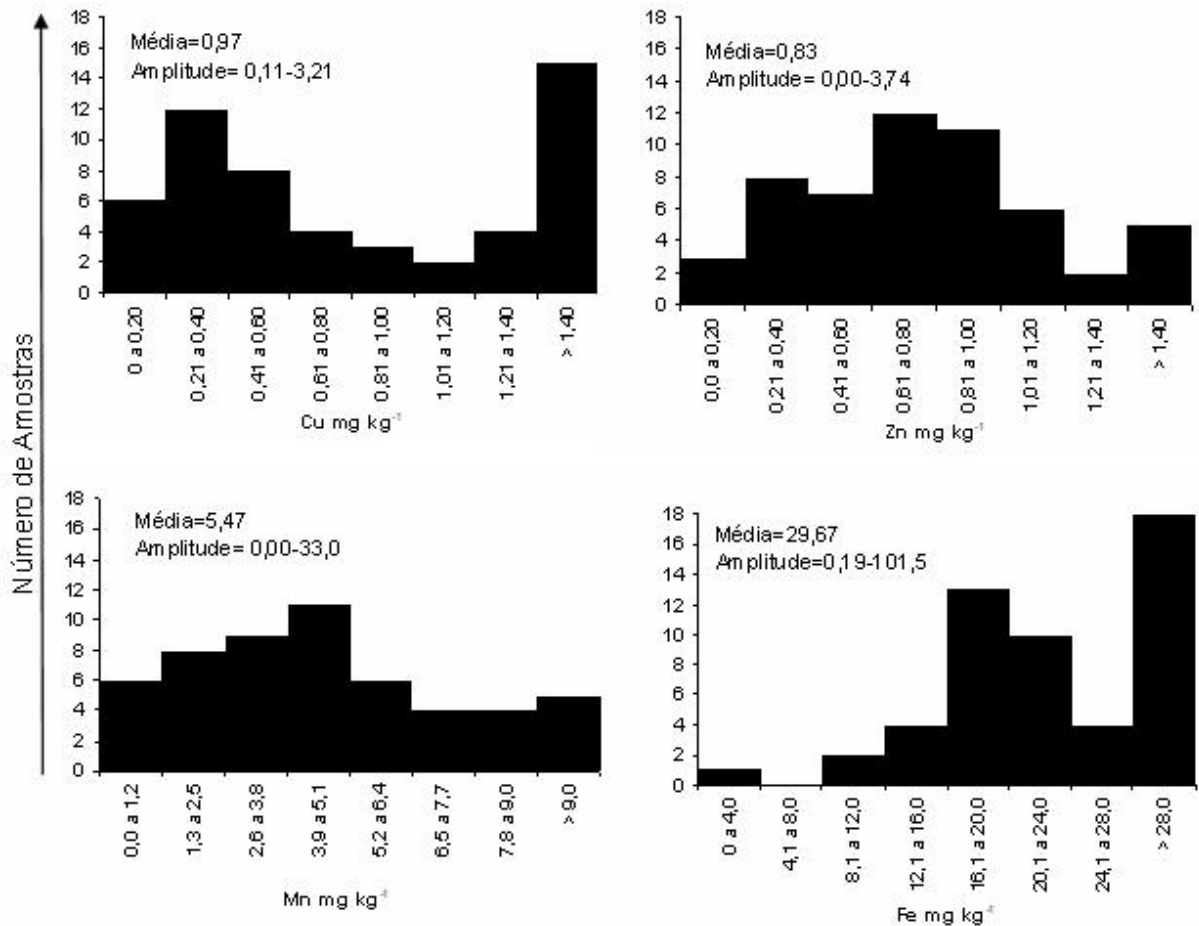


Figura 4.1 Distribuição de freqüência, média e amplitude dos teores de cobre, zinco, manganês e ferro extraídos com DTPA de solos sob pastagens no Cerrado.

Considerando-se baixo valores de Cu disponível abaixo de 0,20 mg kg⁻¹ (RAIJ et al., 1996), apenas 6 solos foram incluídos nesta categoria, 24 solos apresentaram teores classificados como alto. Para os teores disponíveis de Zn, verifica-se média de 0,83 mg kg⁻¹ e amplitude de 0,00 a 3,74 mg kg⁻¹. Considerando-se baixo valores de Zn disponível abaixo de 0,50 mg kg⁻¹ (RAIJ et al., 1996), 18 solos (33%) se incluem nesta categoria. Avaliando a disponibilidade de Zn para a cultura do milho na região do Cerrado, Galvão (1996) encontrou o valor de 0,6 mg kg⁻¹ como sendo o nível crítico de Zn extraído pelo DTPA. Quando utilizou o extrator Mehlich-1, Kliemann et al. (2003) sugeriram o valor de 1,7 mg kg⁻¹ como sendo o nível crítico de Zn para *B. Brizantha* na região do Cerrado.

Com relação ao Mn disponível, considerando-se baixo, valores abaixo de 1,2 mg kg⁻¹ (RAIJ et al., 1996), apenas 6 solos se enquadram nesta

categoria. No entanto, Kliemann et al (2003) informaram não existir ainda, indicativos seguros para a recomendação de Mn em pastagens no Cerrado, já que, encontraram o valor de 78 mg kg^{-1} como sendo o nível crítico de Mn extraído por Mehlich-1 para *B. Brizantha*, valor bem acima do nível crítico de $5,0 \text{ mg kg}^{-1}$ sugerido por Lopes (1977). Com exceção de 2 solos, todos apresentaram teores de Fe disponível considerado alto (RAIJ et al., 1996). Deficiências de ferro não vem sendo constatadas, sugerindo que sua disponibilidade na região do Cerrado é adequada.

Considerando os resultados apresentados anteriormente, pode-se inferir que os teores disponíveis de Cu, Mn e Fe são considerados satisfatórios para o desenvolvimento das pastagens no Cerrado. Com relação ao Zn, verifica-se teores abaixo do nível crítico em 33% dos solos avaliados, o que reforça a idéia de ser o Zn, um dos micronutrientes mais limitantes para o aproveitamento agrícola dos solos do Cerrado (LOPES e COX, 1977 e MAGALHÃES et al., 2002).

A análise de componentes principais (ACP) é um método estatístico essencialmente descritivo que tem como objetivo apresentar sob a forma gráfica, o máximo de informação contida em uma tabela de dados quantitativos. A ACP realizada utilizando-se o conjunto dos resultados químicos, granulométricos e mineralógicos dos solos revelou que os dois primeiros eixos explicaram 43,6% da variabilidade total dos dados, sendo 27,2% e 16,4% pelo 1° e 2° eixos, respectivamente (Figura 4.2). O eixo 1 foi influenciado especialmente pela textura do solo, onde, a fração grosseira (areia grossa e areia fina) apresentou autovetores negativos, e a fração mais fina (silte e argila) apresentou autovetores positivos. A fração mais fina, principalmente a argila, é influenciada pela mineralogia, assim demonstrada pela aproximação dos autovetores da fração argila com os de caulinita (Ct), gibsita (Gb) e Fe extraído pelo CBD (Fe_{CBD}).

O eixo 2 foi influenciado por Al^{3+} e, de uma forma mais limitada pelo C orgânico do solo (C), com autovetores positivos, e V%, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ e SB com autovetores negativos. A posição intermediária do autovetor da $\text{CTC}_{\text{pH}7}$ entre os da argila e do $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ se justifica devido às cargas variáveis dos óxidos de Fe e Al do solo, que aumentam com a elevação do $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ (RANST et al., 1998). O carbono orgânico (C) teve fraca influência sobre a $\text{CTC}_{\text{pH}7}$, provavelmente devido à baixa variabilidade observada para os teores deste elemento nas amostras estudadas.

Há grande proximidade entre os autovetores dos metais totais com os da fração fina do solo, principalmente Fe_{CBD} , corroborando dados apresentados

por Singh e Gilkes (1992) que constataram que a maior parte dos microelementos avaliados por eles (Cd, Co, Cu, Mn, Ni e Zn) estavam associados aos óxidos de Fe, sendo isso, resultado de uma específica adsorção com a hematita e a goethita.

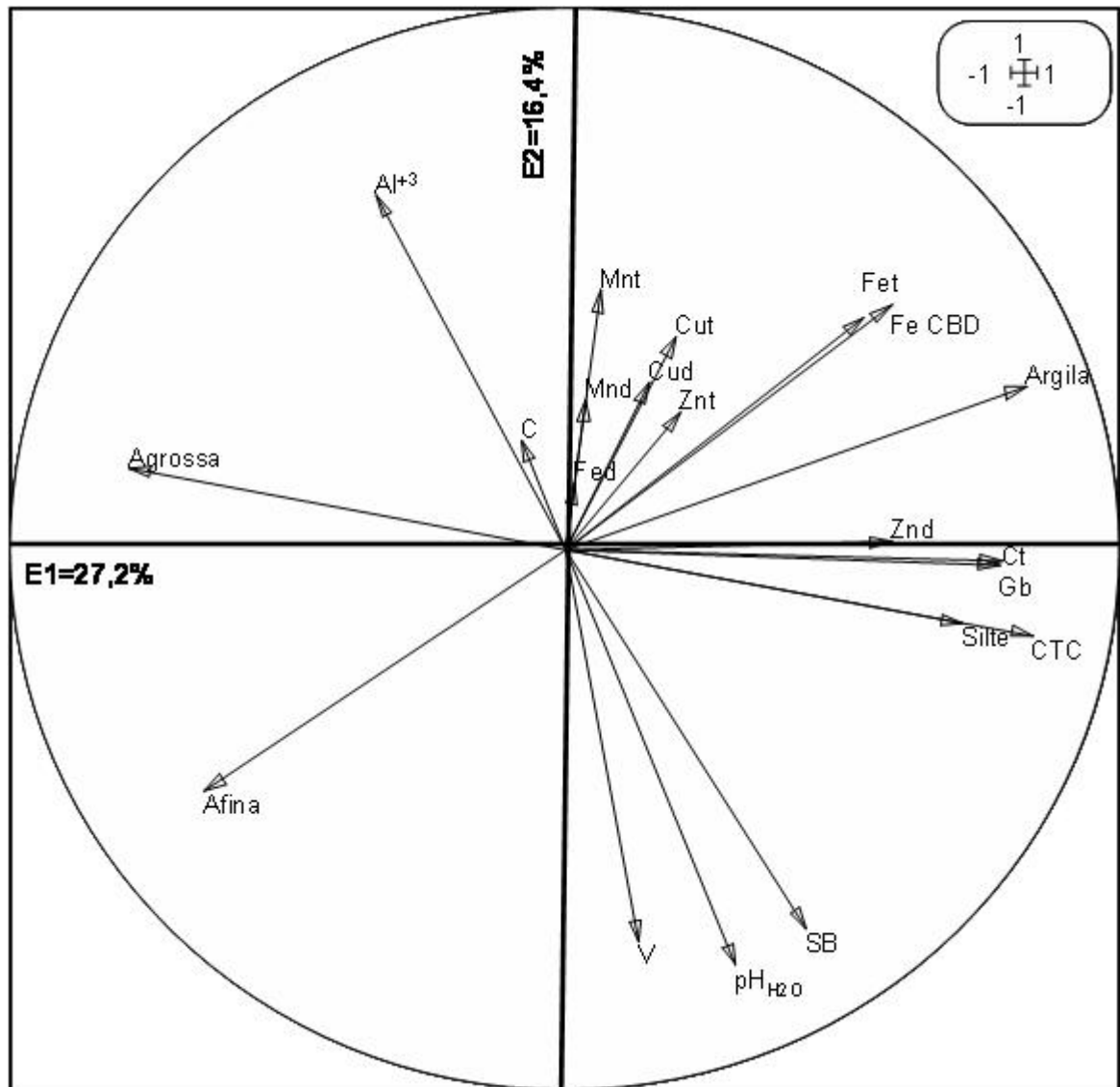


Figura 4.2 Círculo de correlações entre as variáveis V%, SB, pH, CTC, Al³⁺, C, argila, silte, areia grossa, areia fina, caulinita (Ct), gibbsita (Gb), Fe_{CBD}, Cu, Zn, Mn e Fe totais(t) e disponíveis(d) de solos sob pastagens do Cerrado.

Com exceção do Zn, os autovetores dos micronutrientes disponíveis estão próximos aos autovetores dos teores totais. Eles seguem direção oposta ao pH_{H2O} do solo, confirmando a maior disponibilidade desses micronutrientes nos solos mais ácidos, devido a menor retenção pelos constituintes do solo com cargas variáveis (BARROW, 1985). O fato de o autovetor do Mn disponível ser o mais influenciado pelo pH_{H2O} pode estar associado à fraca retenção do Mn nos óxidos de

Fe ou na matéria orgânica, quando comparado aos outros micronutrientes avaliados (NASCIMENTO et al., 2002). Portanto, com a acidificação do solo, pode-se esperar que o Mn será o micronutriente disponibilizado em primeiro lugar e, em maiores quantidades (LOPES e COX, 1977).

No caso do Zn, não se verifica proximidade entre os autovetores de Zn total e disponível. A ampla integração entre o autovetor de Zn disponível com o da CTC_{pH7} indica que a fonte provável de Zn disponível do solo seja o Zn trocável, representado pela quantidade de Zn adsorvido aos colóides de carga variável, o que corrobora os dados de Oliveira et al. (1999), que concluíram que a maior parte do Zn obtido pelo extrator DTPA era oriunda da forma trocável de Zn do solo.

4.5 Conclusões

- 1 - Os teores disponíveis de Cu, Mn e Fe são considerados satisfatórios para o desenvolvimento das pastagens no Cerrado;
- 2 - O Zn apresenta teores abaixo do nível crítico em 33% das amostras;
- 3 - A disponibilidade de Fe, Cu e Mn é explicada principalmente pelas variáveis Fe_{CBD} e pH_{H2O} ;
- 4 - A variável que mais se relacionou com os teores de Zn disponível do solo foi a CTC_{pH7} , indicando que a fonte provável de Zn disponível seja o Zn trocável do solo.

5. ARTIGO C: ACIDITY OF THE LATOSSOLOS (OXISOLS) UNDER LONG-TERM PASTURES FROM THE CERRADO REGION, BRAZIL

5.1 Abstract

High acidity and aluminium saturation are among the main limiting factors of the crop production in the tropical soils. The aim of this work was to evaluate the acidity levels of Latossolos (Oxisols) under pastures in the Brazilian Cerrado and understand the effect of the variations of the chemical, texture and mineralogical characteristics in the soil acidity. Samplings were carried out in two subregions situated near highways GO-060 and BR-154, between the towns of Goiânia, GO and Barra do Garças, MT, and northwest of Minas Gerais, including the towns of Unaí and Paracatu. General chemical characterization was by standard procedures and total major elemental contents were extracted with H_2SO_4 and analysed by ICP-AES. Kaolinite and gibbsite contents were determined by thermogravimetric analyses (TGA). Results show that the exchangeable values of Ca, Mg and K varied considerably among samples with respective values ranging from 0.0 to 13.9 $\text{cmol}_c \text{ Kg}^{-1}$ for Ca, 0.2 to 3.2 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ for Mg and 0.0 to 1.0 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ for K. The average level of exchangeable Al is 0.6 $\text{cmol}_c \text{ Kg}^{-1}$ with amplitude between 0.0 and 2.1 $\text{cmol}_c \text{ Kg}^{-1}$. The percentages of kaolinite (28.7%) are much higher than the percentages of gibbsite (10.8%). The results obtained in this study indicate that the effect of Al can vary according to the mineralogy of the clay fraction of the soils. It was found that when gibbsite was the predominant mineral, the contents of Al^{3+} were low.

Key-words: Exchangeable Al, clay fraction, thermogravimetric analyses.

POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO DOS LATOSSOLOS SOB PASTAGENS NA REGIÃO DO CERRADO

5.1 Resumo

Acidez e alta saturação por alumínio estão entre os principais limitantes ao desenvolvimento agropecuário das regiões tropicais. O objetivo deste trabalho foi avaliar os níveis de acidez de Latossolos sob pastagens na região do Cerrado e compreender o efeito das características químicas, granulométricas e mineralógicas no potencial de acidificação desses solos. Os solos estudados foram amostrados em duas sub-regiões: às margens das rodovias GO-060 e BR-154, entre os municípios de Goiânia, GO e Barra do Garças, MT e nos municípios de Unaí e Paracatú, noroeste de Minas Gerais. As análises químicas e granulométricas foram as de rotina e para a determinação dos teores de caulinita e gibbsita utilizou-se a análise termogravimétrica (ATG). Determinou-se também os teores totais de Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 extraídos com H_2SO_4 e quantificados em ICP-AES. Os resultados permitiram concluir que os teores de Ca, Mg e K variaram consideravelmente entre as amostras, com valores oscilando entre 0,0 e 13,9 $\text{cmol}_c \text{ Kg}^{-1}$ para o Ca, 0,2 e 3,2 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para o Mg e 0,0 e 1,0 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para o K. O teor médio de Al trocável é de 0,6 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ com amplitude entre 0,0 e 2,1 $\text{cmol}_c \text{ Kg}^{-1}$. As porcentagens de caulinita (27.19%) foram bastante superiores às porcentagens de gibbsita (10.10%) e a quantidade de Al_2O_3 foi sempre superior as quantidades de SiO_2 e Fe_2O_3 . Foi possível verificar ainda que os solos cauliniticos apresentam maior potencial de acidificação que os gibbsíticos indicando o papel chave da mineralogia na definição de estratégias de manejo, principalmente nas relacionadas à correção da acidez dos solos.

Palavras-chave: Alumínio trocável, fração argila, análise termogravimétrica.

5.2 Introduction

High acidity and aluminium saturation are among the main limiting factors of the crop production in the tropical soils (SANCHEZ et al., 1982; ABREU et al., 2003). Soil acidification is a naturally occurring phenomenon (VAN BREEMEN et al., 1983) that results in the loss of large amounts of basic cations by leaching that will be substituted by acid elements as Al^{3+} and H^+ (ECHART and MOLINA, 2001).

Despite the fact that Cerrado soils were considered as of low productivity for a long time, the region has been the focus of intense agricultural expansion since the 1970s. It led to cattle raising development, allowing the Cerrado to be responsible for 55% of the Brazil national production of bovine meat (MACEDO, 2000). Cultivated pastures cover approximately 50 million hectares of the Cerrado region (35% natural and 65% cultivated) (SANO et al., 2008).

Most of the cattle production is based on extensive pasture system (BARCELLOS, 1996). The value of the production and the cost of lime and fertilizers are relatively high. The extractive system characteristic of this activity might be confirmed by the insignificant NPK quantity of 4 kg ha^{-1} that Brazilian pastures received on average from 1994 to 2002 (VILELA et al., 2004). Then, estimates shows that 80% of the pastures present soils with varied levels of degradation, which results in the low productivity of these areas as highlighted by Brossard and Barcellos (2005). This condition is mainly caused by low biological activity (LAVELLE et al., 2006) and by lack of essential chemical elements such as nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium (LILIENFEIN et al., 2003).

Although the exportation of bases by the pastures is rather low ($40\text{-}90 \text{ kg CaCO}_3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) in comparison with the cereal-legume rotation ($135\text{-}169 \text{ kg CaCO}_3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) (SLATTERY et al., 1991), the poor adoption of liming in this grazing systems lead to the decrease of base cation content and the increase in the acidity of the soil. Moreover, the surface addition of lime is not without problems in pastures. This lead mostly to the stratification of the profile, with a 1-2 cm of soil that is generally less acidic than the soil below (SCOTT et al., 2000) leading to the decrease of the availability of P and micronutrients due to their higher retention by the soil with variables changes (RANST et al., 1998).

Soil pasture acidification has emerged as a large degradation problem. However we lack a clear understanding of the extension of the problem in the Cerrado region, and on the type of soils that are the most sensitive to soil acidification in order to improve the management strategies. The aim of this work was

- i) to evaluate the acidity levels of Latossolos under pastures in the Brazilian Cerrado;
- ii) understand the effect of the variations of the chemical, texture and mineralogical characteristics in the soil acidity.

5.3 Material and Methods

5.3.1 Study Area and Soils Characteristics

The dominant climate in the Cerrado region is Aw in the Köppen classification, characterized by temperatures in the coldest month above 22°C and precipitation in the driest month less than 60mm (ADÂMOLI et al., 1985; RESENDE et al., 1996). For the two sampled subregions, the months of drought are May to September (ADÂMOLI et al., 1985; FREITAS e BLANCANEUX, 1998). The geology and geomorphology of the Cerrado Region on the Central Plateau of Brazil has been reviewed by Motta et al, (2002) and Marques et al. (2004b).

The area between the towns of Goiânia, GO and Barra do Garças, MT (sub-region A; Figure 5.1), is included in the page SE. 22 Goiânia (BRASIL, 1975), which is composed of various formations, being the largest as well as the oldest, dated in the pre-Cambrian era, known as the “Complexo Goiano”. Due to the large distribution area of this unit, various petrographic types are present, nevertheless, the most common ones are classified as being hornblend gneisses, blastomilonites, migmatites, granulites, granites, amphiboles, and quartzites.

Another formation considered significant in this subregion is named the Paraná Sedimentary Basin, principally near the district of Iporá, GO, where it covers more than 50% of the total area (BRASIL, 1983). In the region of the “Triangulo Mineiro”, it stretches northeast and enters the page SE. 22- Goiânia, where it meets the Araxá group, which is composed of two distinct units: an undivided basal sequence, represented by politic, psamitic and chemical metasediments; and an upper unit, composed of calcoschists. Four other formations have also been verified, including the Amarinópolis, Dois Irmãos, Bom Jardim de Goiás, and Piranhas groups, which represent regional events.

The classes of soils more presents in this subregion are Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos, Latossolos Vermelhos distróficos, Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos e eutróficos, Neossolos Quartzarênicos, Cambissolos e Nitossolos Vermelhos, in this order (BRASIL, 1983; EMBRAPA, 2006).

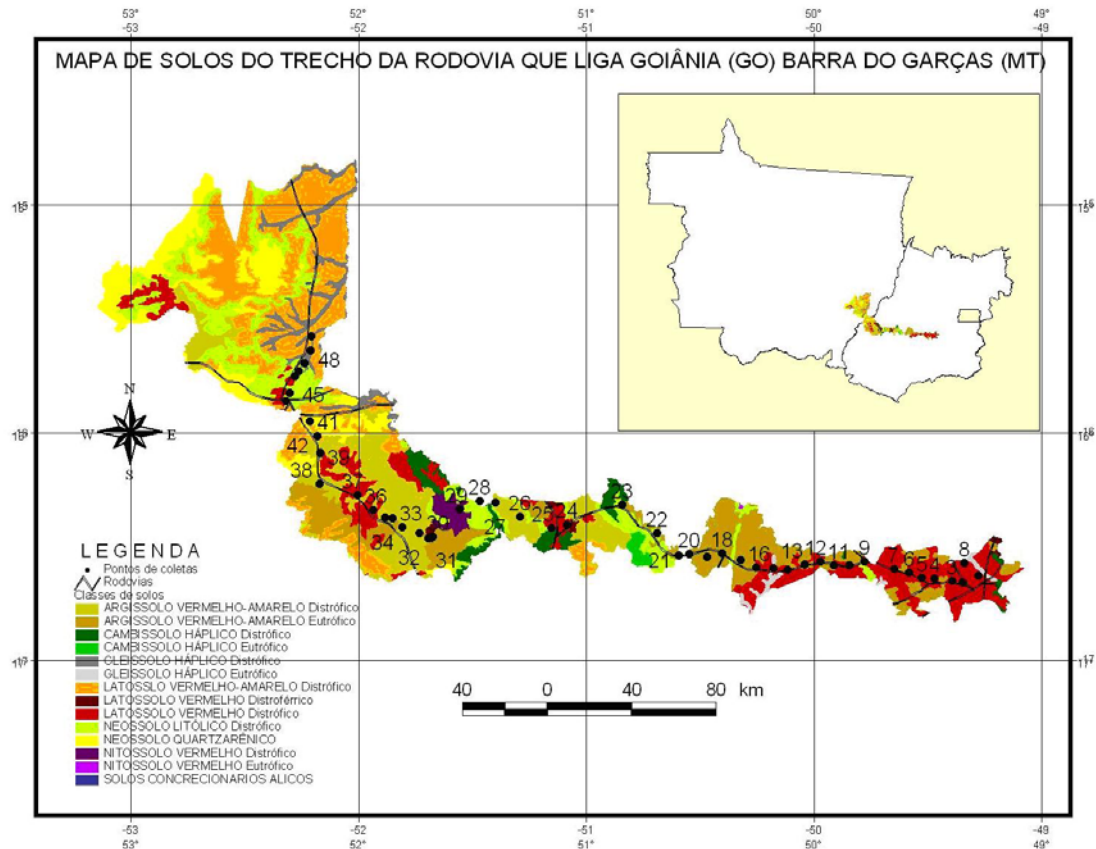


Figure 5.1 Pedological map of the subregion A, situated between the towns of Goiânia, GO and Barra do Garças, MT (ANEEL, 1999).

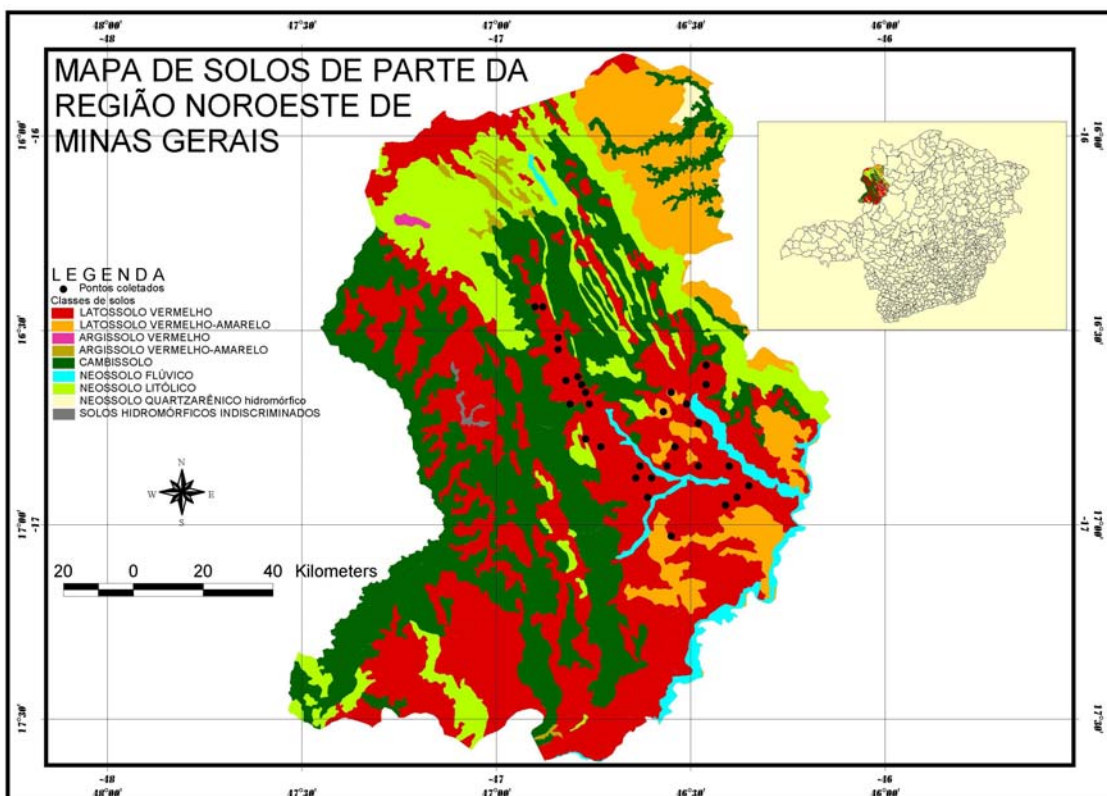


Figure 5.2 Pedological map of the subregion B, situated in the northwest of Minas Gerais, including the towns of Unaí and Paracatu (ANEEL, 1999).

The northwest Minas region, comprising the districts of Unaí and Paracatú, is situated over the Vazante and Paracatu formations (subregion B; Figure 5.2) (DARDENNE, 1979). This region is in the Tocantins Structural Province on the eastern edge of the Brasília Fold Belt (BFB) running north-south, parallel to the western edge of the São Francisco Crater. In the eastern part of this sub-region, the Bambuí group and the Paraopebas subgroup stand out, composed of siltites, calcariums, pelites, dolomites and verdites. In the western central part, the Vazante formation is notable with dolomites and metasiltites, as well as the Paracatu formation which is composed of slates, phosphorites, quartzites, dolomites, cherts, conglomerated and related carbons. In the eastern part, the Canastra group stands out, which is composed of quartzites, schists and related rocks.

The classes of soils more presents in this subregion are Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo e Neossolo Litólico, in this order (BRASIL, 1983; EMBRAPA, 2006).

5.3.2 Soil Sampling and Analysis

The sampling was carried out taking local topography into account. Then, the soil samples were collected only from flat or quite even landscape with the purpose of sampling only Latossolos (Oxisols). All the points selected were covered with pasture. Sampling sites were georeferentiated with GPS equipment.

Samples were taken from 0.0 - 0.2m soil depth. An auger (Edelman auger) was used to collect samples and two augerings were carried out at each sampling site. After collection, packaging and identification, soils were dried, and screened through a 2mm stainless steel sieve.

Physical and chemical analyses of soils were conducted on the air-dried < 2 mm material following Embrapa (1997). The particle size distribution was determined using the pipette method after dispersing with 1 N NaOH. The pH was measured in water and in 1 mol L⁻¹ KCl suspensions using 1:2.5 soil:solution ratio. The total carbon levels (C) were determined using a total C analyzer (model PE Series II CHNS/O, Perkim Elmer Norwalk, CT, USA). Exchangeable Ca²⁺, Mg²⁺ and

Al^{3+} were extracted with 1 mol L⁻¹ KCl, and available K^+ with Mehlich-1 solution (0.0125 mol L⁻¹ of H_2SO_4 and 0.050 mol L⁻¹ of HCl). H^+ and Al^{3+} were also extracted with calcium acetate solution 0.5 mol L⁻¹ at pH 7.0 and titrated with NaOH 0.0606 mol L⁻¹. Then, the cation exchange capacity ($\text{CEC}_{\text{pH}7}$) was determined as being the sum of Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , and H^+ and Al^{3+} ; the exchangeable bases (EB) as the sum of Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^+ ; the effective cation exchange capacity (ECEC) as the sum of Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ and Al^{3+} ; the base saturation (V) as $\text{EB}/\text{CEC}_{\text{pH}7} \times 100$, and the aluminum saturation (m) as $\text{Al}^{3+}/\text{EB} + \text{Al}^{3+} \times 100$.

Total content of Fe_2O_3 , Al_2O_3 and SiO_2 were extracted with H_2SO_4 and analysed by ICP-AES. Kaolinite and gibbsite contents were determined by thermogravimetric analyses (TGA) with a TGA-50 Shimadzu using 10 mg of finely crushed soil. From the results of the gibbsite and kaolinite percentages, the ratio kaolinite / kaolinite + gibbsite (R_{KGB}) were calculated (MELO et al., 2001).

The data were submitted to descriptive statistical analyses (Statistica 5.5, Statsoft, Inc.) aiming to obtaining the mean, the amplitude of the variations (minimum and maximum), and frequency distribution for the chemical properties analysed.

A principal component analysis (PCA) was performed using the ADE-4 software (THIOULOUSE et al., 1997) to compare and to relate the constituent of the acidity of soils with the pH, Ca, Mg, K, EB, V, $\text{CEC}_{\text{pH}7}$, total carbon, values of kaolinite, gibbsite, iron and aluminum oxides.

5.4 Results

5.4.1 Chemical characteristics

The main chemical properties of the soils are presented in Table 5.1.

Soils were medium acidic with the $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ and pH_{KCl} values ranging from 4.6 to 8.1 and 3.5 to 6.7, with respectively average values of 5.7 and 4.8 (Table 5.1). Most of the soils sampled present $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ values between 5.2 and 6.3 (Figure 5.3) that corresponds to a quite low acidity. Only 10 samples present values considered low ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} < 5.2$).

The exchangeable values of Ca, Mg and K varied considerably among samples with respective values ranging from 0.0 to 13.9 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ for Ca, 0.2 to 3.2 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ for Mg and 0.0 to 1.0 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ for K. The average exchangeable values for Ca, Mg and K are 1.8, 1.1 and 0.2 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectively (Table 5.1). Apart a few samples with values for Ca above 4.0 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, most of the samples had very low values of exchangeable Ca (Figure 5.3). The great amplitudes observed for Ca and Mg levels may be linked to the fact that samplings were conducted on soils under pasture of various landowners, and thus subject or not to the application of lime (and probably to inadequate liming in some cases). The EB levels varied in the same way, with an average value of 3.2 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ and an amplitude between 0.6 and 16.9 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

The $\text{CEC}_{\text{pH}7}$ average value of the soils is 6.9 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ with amplitude between 3.5 and 23.5 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Regarding ECEC values, an average value of 3.9 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ with amplitude between 0.6 and 17.1 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ is measured. The C contained in the soils varies from 3.3 to 33.5 g kg^{-1} with average values of 14.4 g kg^{-1} .

The average level of exchangeable Al is 0.6 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ with amplitude between 0.0 and 2.1 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Figure 5.3). The $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ values range from 0.8 to 7.0 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ with an average value of 3.7 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. The levels of $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ were quite higher than those of Al^{3+} , and so are the ECEC and the $\text{CEC}_{\text{pH}7}$ values (Table 5.1), highlighting the importance of the variable charges in these soils.

Table 5.1 Chemical and mineralogical properties of the Latossolos (Oxisols) under pastures in the Brazilian Cerrado region.

Soils	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	C _{total} (g kg ⁻¹)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	EB	CEC _{pH7}	ECEC	V	m	ARG	Fe ₂ O ₃	Gb	Ka	R _{KGb}
	pH	(g kg ⁻¹)																
S1	5.6	4.8	6.2	0.4	0.7	0.0	0.2	3.0	1.1	1.3	4.1	27.2	12.6	430	186	13.7	25.7	0.65
S2	5.5	5.1	6.4	1.6	0.9	0.1	0.0	3.4	2.5	2.5	5.9	42.0	1.1	320	92	9.6	23.6	0.71
S3	5.7	6.1	9.0	0.3	0.2	0.1	0.0	5.2	0.6	0.6	5.9	10.4	0.0	350	91	23.9	22.0	0.48
S4	5.6	4.9	9.4	2.1	0.5	0.1	0.1	3.7	2.6	2.7	6.3	41.0	3.6	420	80	19.2	23.7	0.55
S5	6.1	6.3	8.5	3.0	0.6	0.1	0.1	3.9	3.7	3.8	7.6	48.5	3.8	430	108	23.9	25.6	0.52
S6	6.3	5.9	20.9	2.5	1.3	0.1	0.3	2.9	3.8	4.1	6.8	56.8	6.6	440	140	33.0	27.0	0.45
S7	5.7	5.7	16.0	1.1	0.4	0.1	0.3	4.0	1.6	1.8	5.6	28.0	15.3	340	72	12.3	20.8	0.63
S8	6.3	6.0	22.8	3.0	1.1	0.1	0.2	3.5	4.1	4.3	7.6	54.2	5.0	560	111	32.9	30.7	0.48
S9	5.9	5.5	13.6	1.3	0.9	0.1	0.3	2.8	2.2	2.5	5.1	44.3	10.1	260	36	10.7	16.6	0.61
S10	6.1	6.0	19.6	2.4	1.3	0.1	0.2	3.6	3.7	3.9	7.3	50.9	5.1	350	79	15.6	20.5	0.57
S11	6.2	6.1	17.6	2.9	1.4	0.2	0.2	3.3	4.4	4.6	7.7	57.5	3.8	460	97	27.4	24.1	0.47
S12	6.3	6.0	19.0	1.7	0.9	0.8	0.3	4.1	3.4	3.6	7.4	45.3	7.4	440	92	19.8	31.4	0.61
S13	5.3	5.3	15.5	0.9	0.3	0.1	0.3	4.4	1.2	1.5	5.6	21.4	21.7	430	83	16.2	30.3	0.65
S14	5.7	4.6	18.1	2.2	0.9	0.1	0.0	3.9	3.2	3.2	7.1	45.1	0.0	510	79	13.7	41.2	0.75
S15	5.6	4.4	12.1	0.9	0.9	0.1	0.0	3.4	1.9	1.9	5.3	35.2	0.0	390	47	8.4	26.8	0.76
S16	7.0	6.0	27.0	6.3	2.5	0.7	0.2	3.1	9.6	9.8	12.7	75.6	2.4	300	69	8.2	25.4	0.76
S17	5.6	4.7	14.9	1.0	1.6	0.2	0.1	3.1	2.8	2.9	5.9	47.0	4.7	450	63	13.2	35.6	0.73
S18	5.6	4.4	13.2	0.8	1.4	0.2	0.4	4.6	2.4	2.8	7.0	34.1	14.3	420	66	20.8	27.2	0.57
S19	7.3	6.7	16.3	3.9	2.5	0.2	0.3	0.8	6.6	6.9	7.4	89.4	4.4	320	77	10.5	20.7	0.66
S20	6.2	5.0	25.1	3.3	2.5	0.1	0.6	4.3	5.9	6.5	10.2	58.2	9.2	420	78	12.7	31.7	0.71
S21	6.0	4.7	21.0	1.8	1.5	0.1	0.3	3.2	3.4	3.8	6.6	51.7	9.1	310	91	6.3	23.0	0.78
S22	5.7	4.5	11.9	1.4	1.3	0.1	0.5	3.1	2.8	3.3	5.9	47.1	15.6	260	92	3.3	24.5	0.88
S23	6.0	4.4	7.1	0.5	0.9	0.5	0.2	2.2	1.9	2.1	4.1	46.2	10.6	250	54	2.6	18.6	0.88
S24	5.1	4.5	19.4	0.1	0.5	0.0	0.4	6.1	0.6	1.0	6.7	8.3	43.7	440	27	19.6	19.3	0.50
S25	5.4	4.4	12.2	0.4	1.0	0.1	0.6	3.8	1.6	2.2	5.4	29.5	27.1	460	56	12.2	29.0	0.70
S26	5.5	4.3	17.3	0.8	0.8	0.1	0.6	4.3	1.7	2.3	6.0	28.7	26.6	650	69	21.7	39.6	0.65
S27	5.1	4.4	10.9	0.6	1.0	0.2	0.5	3.1	1.7	2.2	4.9	35.6	21.8	320	64	3.1	25.1	0.89
S28	6.2	5.1	33.5	13.9	2.4	0.6	0.2	6.6	16.9	17.1	23.5	71.9	1.4	390	325	9.5	28.0	0.75
S29	6.5	5.4	17.7	3.7	1.7	0.3	0.2	2.9	5.8	6.0	8.7	66.5	4.1	300	80	3.7	25.8	0.88
S30	5.3	4.3	15.4	0.0	0.7	0.1	0.8	5.4	0.8	1.6	6.1	12.7	51.4	480	134	20.0	26.8	0.57
S31	6.1	5.0	25.5	2.5	1.5	0.5	0.4	5.1	4.5	4.9	9.6	47.1	8.1	430	110	13.4	28.1	0.68
S32	5.2	4.2	9.1	0.1	0.7	0.1	0.7	3.4	0.9	1.6	4.3	20.3	46.1	270	42	4.6	23.1	0.83
S33	4.9	4.1	10.8	0.1	0.4	0.1	1.0	3.2	0.6	1.6	3.8	14.5	64.9	310	24	4.6	25.5	0.85
S34	5.2	5.0	14.1	2.1	1.3	0.1	0.6	2.6	3.5	4.1	6.2	57.5	13.5	340	30	8.3	27.2	0.77
S35	5.0	4.4	13.5	0.9	0.8	0.1	0.7	3.4	1.9	2.6	5.3	35.7	25.9	410	60	7.6	25.2	0.77
S36	5.5	4.2	7.3	0.2	0.4	0.1	0.7	2.7	0.7	1.5	3.5	21.2	50.2	200	27	2.0	18.4	0.90

S37	5.3	4.3	13.2	0.6	0.6	0.1	0.6	5.3	1.3	2.0	6.6	20.2	32.4	170	30	1.3	14.3	0.92
S38	6.5	5.6	5.6	1.4	0.5	0.1	0.4	3.6	1.9	2.4	5.5	35.1	17.7	200	43	4.7	10.7	0.69
S39	5.5	4.5	14.2	0.7	0.6	0.1	0.6	5.2	1.4	2.0	6.6	21.1	29.6	300	35	8.9	15.6	0.64
S40	5.2	4.2	8.7	0.3	0.5	0.1	0.7	5.2	0.8	1.6	6.1	13.8	46.8	200	23	3.2	13.9	0.81
S41	4.9	4.2	5.8	0.0	0.4	0.3	0.8	5.1	0.7	1.6	5.8	12.7	53.3	230	25	2.6	15.8	0.86
S42	5.1	4.2	3.3	0.2	0.5	0.1	0.7	4.7	0.7	1.4	5.4	13.5	48.5	180	17	1.0	12.0	0.93
S43	5.3	4.3	13.6	0.1	0.6	0.1	0.8	5.2	0.8	1.5	6.0	13.2	48.9	280	61	8.4	17.1	0.67
S44	5.3	4.2	15.7	1.5	0.7	0.6	0.7	3.6	2.9	3.6	6.5	44.9	19.9	620	90	11.3	33.3	0.75
S45	5.2	4.6	10.2	0.8	0.7	0.1	0.7	2.8	1.5	2.2	4.3	35.7	30.8	730	113	19.6	36.9	0.65
S46	5.4	3.9	13.1	1.2	1.4	0.4	1.5	4.8	3.1	4.6	7.9	39.1	32.9	520	75	2.8	29.4	0.91
S47	5.8	4.5	12.8	1.8	1.0	0.1	0.8	3.1	2.9	3.7	6.0	48.5	22.3	430	71	3.2	19.2	0.86
S48	5.3	4.0	14.6	1.2	1.0	0.2	1.4	4.3	2.4	3.8	6.7	35.6	37.5	700	103	5.8	37.4	0.87
S49	5.3	4.2	14.5	0.6	1.3	0.1	0.9	3.4	2.1	3.0	5.4	38.2	30.6	770	120	18.9	36.2	0.66
S50	5.2	3.9	15.9	2.1	1.5	0.2	2.1	6.0	3.8	5.8	9.7	38.8	35.3	660	56	3.3	40.6	0.92
S51	5.3	4.3	23.2	2.4	1.2	0.3	0.8	5.0	3.9	4.7	8.9	43.5	17.3	490	68	4.0	28.9	0.88
S52	6.0	4.7	16.7	2.3	1.7	0.2	0.8	2.7	4.3	5.0	7.0	61.4	14.9	450	75	4.0	26.1	0.87
S53	5.3	4.1	16.4	0.6	0.7	0.1	1.4	5.8	1.5	2.9	7.3	20.2	49.6	690	97	13.5	37.0	0.73
S54	5.7	4.1	20.3	0.4	0.7	0.1	1.0	6.4	1.2	2.2	7.7	16.3	44.3	720	122	19.5	38.8	0.67
S55	6.6	5.5	16.9	3.5	3.2	0.1	0.5	1.8	6.8	7.2	8.6	79.1	6.4	410	64	4.1	29.9	0.88
S56	4.6	3.5	17.2	3.9	3.1	0.3	2.1	7.0	7.4	9.4	14.3	51.5	21.9	550	57	3.4	42.5	0.93
S57	5.6	4.5	17.3	2.3	1.3	0.5	0.6	3.5	4.2	4.8	7.7	54.9	13.1	660	78	8.0	55.3	0.87
S58	5.2	4.2	19.0	3.2	0.6	0.0	0.6	3.7	3.8	4.4	7.5	51.1	14.3	670	66	12.6	48.6	0.79
S59	5.2	4.4	15.9	2.4	2.6	0.1	0.7	3.3	5.1	5.8	8.4	60.6	12.2	710	83	11.3	49.3	0.81
S60	6.6	5.1	10.7	3.6	2.5	1.0	0.7	1.7	7.1	7.8	8.8	80.5	8.8	670	81	11.4	41.5	0.78
S61	5.0	4.1	17.2	0.3	0.8	0.7	1.4	4.3	1.8	3.2	6.1	30.3	42.9	610	75	9.6	39.6	0.81
S62	5.2	4.1	15.2	0.0	0.6	0.6	1.0	3.7	1.2	2.2	4.9	24.8	44.5	590	82	10.0	35.0	0.78
S63	5.7	4.4	21.0	2.3	0.9	0.8	0.8	3.0	4.0	4.8	7.0	57.0	17.1	490	98	8.0	32.4	0.80
S64	6.2	4.7	22.9	2.1	1.2	0.6	0.8	2.8	3.8	4.6	6.6	57.8	17.3	270	34	1.5	20.7	0.93
S65	5.5	4.3	6.0	1.3	0.9	0.2	1.1	4.2	2.4	3.4	6.6	36.0	30.9	680	92	17.5	45.7	0.72
S66	5.3	4.1	9.4	1.4	1.0	0.1	1.1	3.3	2.5	3.6	5.8	43.2	30.6	640	71	7.5	39.6	0.84
S67	5.8	4.6	6.5	2.4	1.0	0.7	0.6	2.5	4.2	4.7	6.7	62.5	12.7	490	65	5.2	31.3	0.86
S68	5.7	4.5	7.0	2.8	1.4	0.2	0.7	2.1	4.5	5.1	6.6	67.8	13.1	390	48	6.5	28.3	0.81
S69	5.7	4.7	21.3	2.4	1.7	0.2	0.9	3.0	4.3	5.2	7.4	58.7	17.3	680	102	20.4	40.9	0.67
S70	5.5	4.5	9.2	1.8	0.9	0.1	0.8	2.3	2.8	3.6	5.1	55.5	22.4	510	68	8.9	26.7	0.75
S71	6.3	5.0	5.6	3.3	2.1	0.5	0.9	1.5	6.0	6.8	7.5	79.7	12.9	570	72	7.4	40.4	0.84
S72	5.9	4.5	6.0	0.9	0.9	0.7	0.9	1.3	2.6	3.5	3.8	67.1	26.3	260	52	1.0	15.4	0.94
S73	5.1	4.1	3.3	1.0	1.1	0.4	1.2	3.4	2.5	3.7	6.0	42.4	32.0	670	86	1.3	18.5	0.93
S74	8.1	6.6	20.4	6.8	1.8	0.2	0.7	1.7	8.8	9.4	10.5	84.0	6.9	520	98	21.7	40.7	0.65

EB=exchange bases ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$); CEC_{pH7} =cation exchange capacity ($\text{SB} + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$); ECEC = effective cation exchange capacity ($\text{SB} + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$); V =bases saturation: $(\text{SB}/\text{CEC}_{\text{pH7}}) \times 100$; m = aluminium saturation : $(\text{Al}/(\text{Al} + \text{SB})) \times 100$

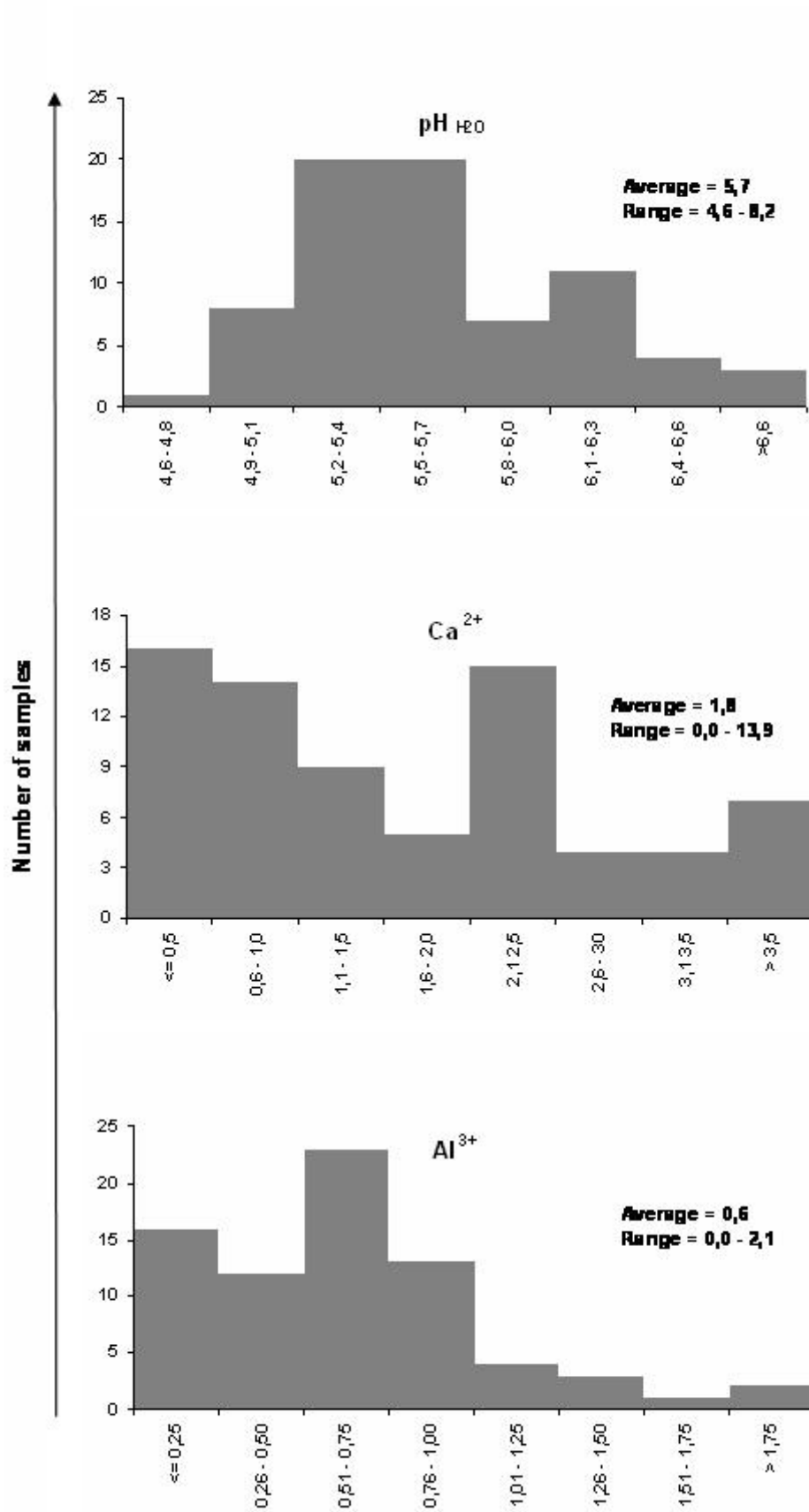


Figure 5.3 Classes and frequency distribution of the pH_{H2O}, Ca²⁺ and Al³⁺ in the 0.0 – 0.2m horizon of soil under pasture in the Brazilian Cerrado region.

Regarding the V values, an average value of 43.3% is verified with amplitude between 8.3 and 89.44%. The m values range from 0.00 to 64.9% with an average value of 21.2% (Table 5.1).

5.4.2 Mineralogy

The clay content varies from 170 to 770g kg⁻¹, therefore, the textural classification falls between sandy and very clayey (Table 5.1)

With respect to mineralogy, the TGA revealed percentages of kaolinite (28.7%) much higher than the percentage of gibbsite (10.8%), which indicates caution in generalizations about the richness of gibbsite in the soils of the Cerrado region (GOMES et al, 2004).

The total values of Al₂O₃ and SiO₂ varied considerably among samples with respective values ranging from 17 to 239 g Kg⁻¹ for Al₂O₃ and 22 to 200 g Kg⁻¹ for SiO₂. The average total values for Al₂O₃ and SiO₂ are 147.6 and 104.6 g Kg⁻¹, respectively (Table 5.1). These results underscore the importance of aluminum oxides in the mineral constitution of the Cerrado soils, because it is the third most abundant element in the lithosphere, after oxygen and silicon, and in the Cerrado soils, it is the second most abundant, surpassing silicon. As for Fe₂O₃, it occurs at an average of 77.4g Kg⁻¹ and an amplitude between 2 and 325 g.Kg⁻¹, that is, hypoferric and ferric soils (EMBRAPA, 2006).

5.5 Discussion

5.5.1. Control of the Soil Acidity by the Mineralogy

The narrow relation between $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ and exchangeable aluminum content of soils has been demonstrated already for some time. In the case of Latossolos (Oxisols) in the Cerrado region, this relation presents a low correlation coefficient ($r = 0.57$), accounting for only 32% of the variations in the contents of Al^{3+} (Figure 5.4). This value differs from that observed by Nachtigall and Vahl (1989) which verified, in various classes of soils in Rio Grande do Sul, that 47% of the variation in the contents of Al^{3+} of the soils were a function of the pH.

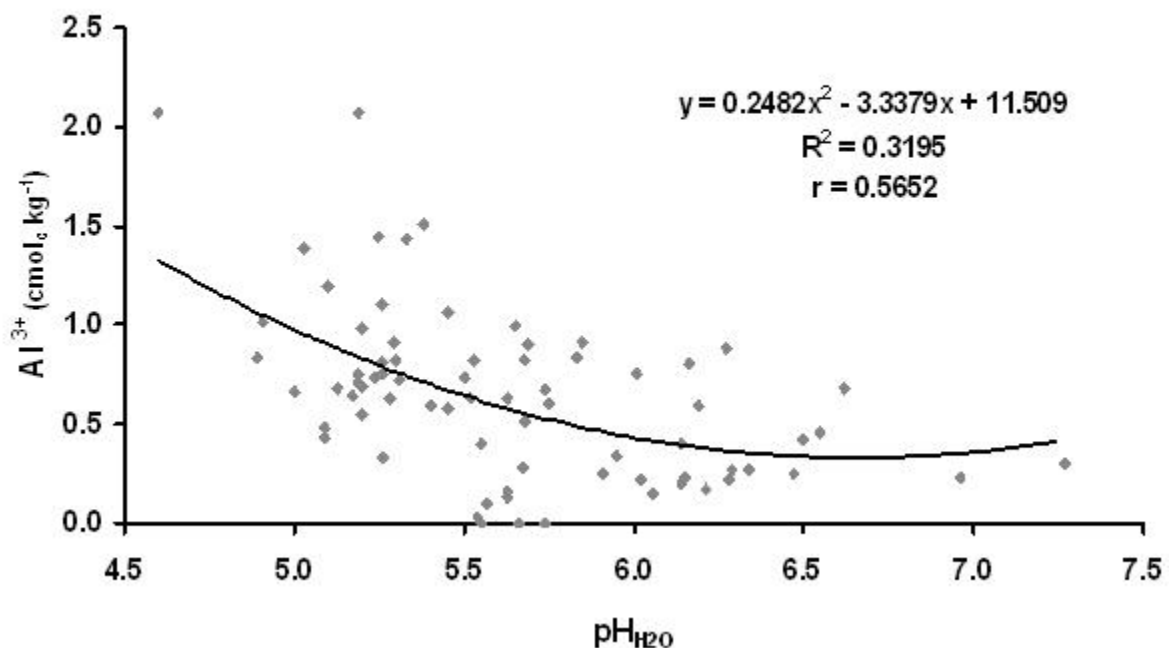


Figure 5.4 Exchangeable aluminum as a function of $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ in the Latossolos (Oxisols) under pasture in the Brazilian Cerrado region.

Multivariate analysis was performed in the relation of the chemical and mineralogical variables with parameters related to soil acidity. The PCA revealed

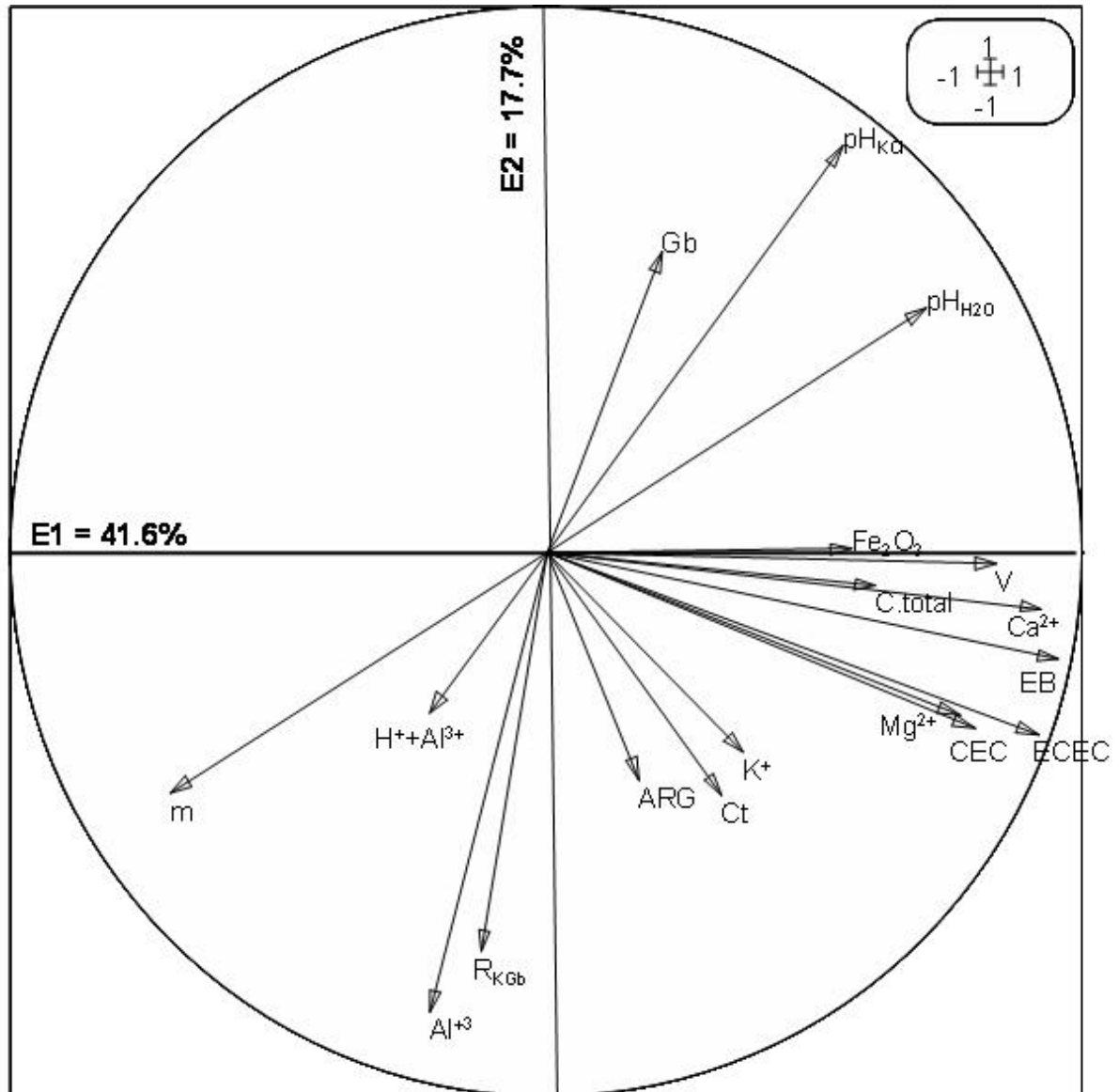


Figure 5.5 Correlation circle between chemical and mineralogical soils characteristics of the Latossolos (Oxisols) under pasture in the Brazilian Cerrado region.

that the two primary axes explained 59.3% of the total variability of the data, being 41.6% and 17.7% by the 1° and 2° axes, respectively (Figure 5.5). Axis 1 was influenced especially by C, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, $\text{CEC}_{\text{pH}7}$, Ca, V and EB with positive autovectors and m with a negative autovector.

The opposition between the autovectors of the basic elements and that of the Al saturation demonstrates that in soils deficient in bases, the m is higher, which was expected. On the other hand, the same direction was not verified in the autovectors of exchangeable Al in the m, indicating that the principal cause of the high m values in the soils of the Cerrado could be the lack of basic elements and not,

high content of exchangeable Al. Axis 2 was influenced by Gb with a positive autovector and $R_{K_{Gb}}$ e Al^{3+} with negative autovectors. The same direction between the autovectors of the $R_{K_{Gb}}$ and exchangeable Al means that the contents of exchangeable Al are less in the soils with higher percentages of gibbsite.

To evaluate the extent correlation between Al^{3+} and the $R_{K_{Gb}}$, the empirical polynomial model of the 2rd degree was used (Figure 5.6). It was found that when gibbsite was the predominant mineral ($R_{K_{Gb}} < 0,6$), the contents of Al^{3+} were low. This result confirms those obtained by PCA (Figure 5.5), where the autovector of Al^{3+} was opposite of that of the % of gibbsite.

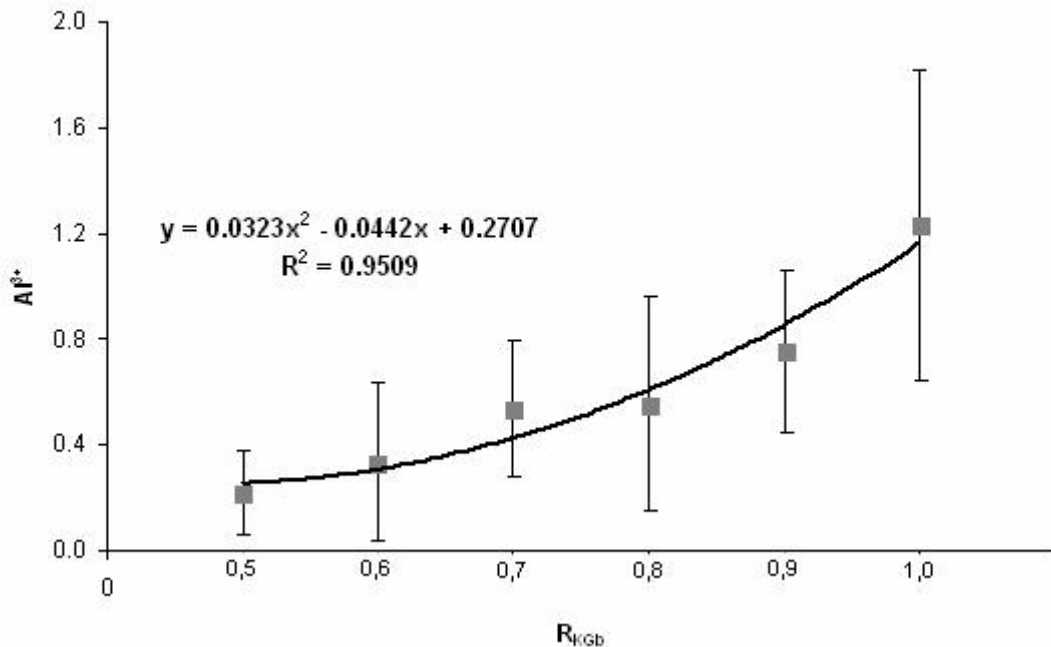


Figure 5.6 Relationship between $R_{K_{Gb}}$ and the exchangeable aluminum values of the Latossolos (Oxisols) under pastures in the Brazilian Cerrado region.

These results highlight the different responses of the soils against soil acidification. It has been proposed that the two main consequences of H^+ ion inputs in soil are: (i) an increase in positive surface charge through protonation, and (ii) the dissolution of minerals, particularly Al hydroxides and Al-bearing clays (ZHU et al, 2005). The first process occurred mainly in variable charge soils, rich in organic matter and iron and aluminium oxides. On kaolinite-rich soils, this process is only of minor importance, whereas the protonation of the edges of the clay particles could not be excluded (ZHU et al, 2005). The H^+ ion consumption through mineral dissolution is mainly associated to the dissolution of Al containing minerals, i.e.

kaolinite and gibbsite, and results in the release of Al. The minerals involved are related to their solubility. The Al–pH relationships for the main Al-containing minerals present in the soils studied, calculated using equilibrium equations given by Lindsay (1979), showed that, amorphous $\text{Al}(\text{OH})_3$ is the most soluble among the Al-bearing minerals over the pH ranges of the studied soils (> 4.6), followed by kaolinite, whereas gibbsite is the least soluble. Moreover, various studies have shown that kaolinite formed in the upper horizons of Latossolos (Oxisols) is submicron-sized, poorly crystalline, and usually accommodate some iron within its structure, that factors favoring their weathering (MUGGLER et al., 2007). Then, in gibbsite-rich (or Al and Fe oxide-rich) Latossolos (Oxisols), the consumption of H^+ ions is though to be mainly related to the protonation of variable charge minerals, whereas in kaolinite-rich Latossolos (Oxisols), the dissolution of kaolinite and the release of Al is though to be the most important process. Then, in the latter, the acidification buffering through mineral dissolution lead to the increase in Al release.

5.5.2 Relationships with Landscape

Kaolinite, gibbsite, goethite and hematite were recognized in different proportions in the clay fraction of Latossolos (Oxisols). Curi and Franzmeier (1984) analyzed the mineralogy of the clay fraction in a toposequence of Latossolos (Oxisols) developed in the weathered basalt in Southern Goiás state. They showed that gibbsite was the main mineral in Red Latossolos (Oxisols) located upslope when it was kaolinite and goethite in Yellow Latossolos (Oxisols) located downslope. Ferreira et al. (1999) studied seven diagnostic horizons (horizon Bw) of Latossolos (Oxisols) from the Minas Gerais and Espírito Santo states. They showed that kaolinite and goethite were the main minerals in the clay fraction of Latossolos Amarelos when it was gibbsite, hematite and goethite in different proportions in the b2 fraction of Latossolos Vermelhos Férricos and Latossolos Vermelhos. Ker (1996) evaluated the clay fraction of the 26 diagnostic horizons of the Latossolos (Oxisols) located in different Brazilian states and concluded that in Latossolos Vermelhos Férricos kaolinite, gibbsite, and hematite predominated; in Latossolos Vermelhos,

kaolinite and hematite; in Latossolos Vermelho-Amarelos, kaolinite and goethite; and in Latossolos Amarelos, kaolinite, gibbsite and goethite.

The granulometric homogeneity of the soils of the “chapada” (plateaus), with generally very clayey profiles, depended very little on the rocky substrate, but instead on the hydric regimen along the toposequence. Thus, the occurrence of red latosols at higher elevations, in the center of the “chapadas”, is related to the better internal drainage conditions which also favor the formation of gibbsite, due to the lixiviation of silicon necessary for the formation of kaolinite. Already, for the soils of the second geomorphic surface and the areas of most recent dissection, the contribution of the rocky substrate shows great influence. In this manner, soils of clayey texture predominate where this surface cuts precambrian schists, highly argillaceous when the subadjacent rock is mafic granulite or was greatly contributed to by tertiary sediments of the first surface, and the slightly clayed of the subadjacent rock is quartzite (MOTTA et al., 2002). In these conditions, the alterations favor the formation of kaolinite, due to the greater availability of the matrices.

5.5.3 Al Excess Versus Base Deficiencies: Agronomic Implications

The first studies on chemical fertility of the soils of the Cerrado region highlight principally the heightened acidity and high exchangeable Al content as being principal restrictions on farming and cattle raising development of that region (LOPES e COX, 1977, ADAMOLI et al., 1986, SOUZA et al., 1989). To assuage the effect of acidity, the principal method of correction proposed was the addition of calcium, achieved principally on the basis of the content of replaceable Al, a method which does not elevate the content of basic elements to adequate levels. Ritchey et al. (1982) considered the deficiency of basic elements, principally of calcium, as the main limitation on plant growth in the Cerrado region.

The results obtained in this study indicate that the disastrous effect of Al can vary according to the mineralogy of the clay fraction of the soils. Soils with predominance of kaolinite in their clay fraction tend to present higher quantities of exchangeable Al (Figure 5.6), in these conditions, the utilization of lime can be an

excellent tool, because it will promote the both the raising of the pH and the precipitation of Al, making the nutrients more available, as well as furnishing Ca and Mg (QUAGGIO, 2000, SOUZA and LOBATO, 2004). In soils where gibbsite is the principal mineral in the clay fraction, the effects of lime can be prejudicial, because with low exchangeable Al content or in its absence, lime will promote an increase in surface charges (in these soils there is a predominance of pH-dependent charges), causing an increase in the retention of Ca, Mg, and micronutrients, which would be damaging to the development of pastures and other cultures. An alternative for gibbsitic soils could be the use of agricultural gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), because in these soils, the major problem becomes the deficiency of Ca and Mg, not the excess of exchangeable Al.

5.6 Conclusions

1. The percentages of kaolinite (28.7%) are much higher than the percentages of gibbsite (10.8%);
2. The results obtained in this study indicate that the effect of Al can vary according to the mineralogy of the clay fraction of the soils;
3. It was found that when gibbsite was the predominant mineral, the contents of Al³⁺ were low.

6. ARTIGO D: INFLUÊNCIA DA MINERALOGIA E FERTILIDADE QUÍMICA NA ACIDEZ E ESPECIAÇÃO DO ALUMÍNIO EM SOLUÇÕES DE SOLOS SOB PASTAGENS NA REGIÃO DO CERRADO

6.1 Resumo

Este trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar a influência da mineralogia e fertilidade química na acidez e na variação das espécies de alumínio em soluções de solos sob pastagens, localizados na região do Cerrado. Os solos estudados foram coletados na região do Cerrado, sendo as amostragens realizadas em duas sub-regiões, situadas às margens das rodovias GO-060 e BR-154, entre os municípios de Goiânia, GO e Barra do Garças, MT, e no Distrito Federal. As soluções dos solos foram extraídas e determinaram-se os teores totais de Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Si e Mn em aparelho ICP-AES; ânions (NO_3^- , Cl^- e SO_4^-) em cromatógrafo, C orgânico solúvel em Total Organic Carbon Analyzer (Shimadzu, TOC-V) e pH em potenciômetro. Os resultados permitiram concluir que valores de Ca+Mg trocáveis de até $1,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ tem efeito positivo sobre o pH e sobre as concentrações de Ca, Mg e Al das soluções do solo; acima deste valor, minimiza-se este efeito. A espécie de Al monomérico predominante nas soluções de solos sob pastagens da região do Cerrado é Al^{3+} , seguida pelos hidróxidos de Al.

Palavras-chave: Análise da solução de solos, caulinita, gibbsita, especiação química.

ACIDITY AND ALUMINIUM SPECIATION IN SOLUTIONS OF SOIL UNDER PASTURE IN THE CERRADO REGION: INFLUENCE OF MINERALOGY AND CHEMICAL FERTILITY OF THE SOIL

6.1 Abstract

This study was carried out with the aim of evaluating the influence of mineralogy and chemical fertility on the acidity and variation of species of aluminium in solutions of soil under pasture, located in the Cerrado region. The samples were taken in two regions, located at the margins of the GO-060 and BR-154 highways, between the towns of Goiânia, GO and Barra do Garças, MT, and in the Federal District. For the collection of the soil solutions, a PVC tube with the inferior extremity coupled to a porous tip of special ceramic was used. The total levels in the solution of Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Si and Mn were determined in an ICP-AES device; NO_3^- , Cl^- e SO_4^- in a chromatograph; organic soluble C in a Total Organic Carbon Analyzer (Shimadzu, TOC-V); and pH in a potentiometer. The results allowed us to conclude that values of exchangeable Ca + Mg of up to $1.5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ have a positive effect on the pH and on concentrations of the Ca and Mg of the soil solutions; above this value, this effects is minimized. The species of monomeric Al predominant in the solutions of the soils under pasture of the Cerrado region is Al^{3+} , followed by Al hydroxydes.

Key-words: Analysis of soil solutions, kaolinite, gibbsite, chemical speciation.

6.2 Introdução

A acidificação é um processo natural na evolução dos solos tropicais e subtropicais úmidos, com altas precipitações pluviométricas (BONNEAU et al., 1987). Sob estas condições, nutrientes solúveis como cálcio, magnésio, potássio e outros elementos básicos são lixiviados (SCOTT et al., 2000). Quando a remoção de cátions básicos é maior que sua taxa de liberação pelas intempéries, o pH do solo diminui. Outro fator que ocasiona a diminuição do pH é a decomposição da matéria orgânica por microorganismos do solo, que resulta em liberação de amônio e hidrogênio (RAO et al., 1993).

O processo natural de acidificação do solo é muitas vezes intensificado por práticas agrícolas, pela mineração e pelo descarte de resíduos (FOY et al., 1978; RAO et al., 1993). No que se refere aos efeitos da agricultura, pode-se salientar que todos resíduos orgânicos de plantas e fertilizantes a base de nitrogênio amoniacal são fontes de acidez (BOHNEN, 1995).

Vários pesquisadores têm chamado atenção sobre os efeitos tóxicos do alumínio para às plantas (PAVAN et al. 1982; NOBLE et al., 1988; RAIJ, 1991; ECHART e MOLINA, 2001; BARCELÓ e POSCHENRIEDER, 2002). Porém, somente a determinação dos teores de alumínio trocável do solo ou de alumínio total da solução do solo, não são indicadores suficientes para se avaliar a real toxicidade deste elemento às plantas. Torna-se necessário, portanto, quantificar as espécies químicas consideradas tóxicas, principalmente as espécies de Al lábil, como Al^{3+} , $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_4^-$ e $AlSO_4^+$, assim como, as espécies não tóxicas, como as formas complexadas por moléculas orgânicas (BOUDOT et al., 1994; 1995). É conveniente também considerar os elementos que podem reduzir sua toxicidade, como os cátions básicos Ca e Mg (ALVA et al., 1986; KINRAIDE e PARKER, 1987; NOBLE et al., 1988).

Os solos da região do Cerrado foram descritos como ácidos (GOEDERT, 1983), e a toxicidade do alumínio ainda representa um sério problema para a produção agrícola daquela região (ADAMOLI et al., 1985, SOUZA et al., 1989). Os problemas causados pela toxidez do alumínio e baixos teores de cátions básicos podem ser, em parte, solucionados mediante adoção de técnicas de melhoramento vegetal e manejo do solo (LOPES, 1984). Dentre as práticas de

manejo, a principal e mais utilizada é a calagem, que promove aumento do pH e da saturação por bases, torna os nutrientes mais disponíveis, promove precipitação do Al e fornece Ca e Mg (SOUZA e LOBATO, 2004). Entretanto, devido ao custo relativamente elevado dessa prática, ela é pouco utilizada em sistemas de exploração extensivos, como as pastagens (SCOTT et al., 2000).

Este trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar as influências da mineralogia e fertilidade química na acidez e na variação das espécies de alumínio em soluções de solos sob pastagens, localizados na região do Cerrado.

6.3 Material e Métodos

6.3.1 Área de estudo e características dos solos

Os solos estudados foram coletados na região do Cerrado, sendo as amostragens realizadas em duas sub-regiões, situadas às margens das rodovias GO-060 e BR-154, entre os municípios de Goiânia, GO e Barra do Garças, MT, e no Distrito Federal. Para seleção dos solos, foram utilizados mapas geológicos e pedológicos (BRASIL, 1983) com o intuito de se amostrar apenas Latossolos. Além disso, para a seleção dos locais específicos de coleta levou-se em consideração os teores de Ca + Mg tocáveis, extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e determinados de acordo com Embrapa (1997), e os valores da relação caulinita / caulinita + gibbsita (R_{KGB}), calculados de acordo com os resultados de análise termogravimétrica (ATG), realizada em aparelho TGA-50 Shimadzu (MELO et al., 2001) (Tabela 6.1). Todas as áreas selecionadas estavam ocupadas por pastagens e todos os pontos amostrados foram georeferenciados com auxílio de Global Positioning System (GPS).

A coleta dos solos foi realizada com auxílio de pá reta à profundidade de 0-0,2 m. Após a coleta, os solos foram embalados em sacos plásticos de capacidade para 40 litros e identificados, sendo em seguida, levados para a Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, onde foram colocados em vasos em ambiente de casa de vegetação. No total, foram selecionados 23 solos para preenchimento de vasos com capacidade para 25 kg de solo.

6.3.2 Coleta e análise da solução do solo

Simultaneamente ao preenchimento dos vasos, instalou-se nos mesmos uma cápsula porosa na profundidade de 20 cm para a coleta das soluções dos solos. Este equipamento é constituído por um tubo de PVC (1,5 polegadas de diâmetro e 60 cm de comprimento) com a extremidade inferior acoplada a uma

cerâmica porosa (Soilmoisture Equipment Corp., USA, modelo B01M3) e duas mangueiras na extremidade superior, uma para fazer a sucção e outra para a retirada da solução de solo (GROSSMANN e UDLUFT, 1991). Antes da utilização, todas as cerâmicas porosas foram lavadas, primeiro com água descarbonizada e em seguida com solução de HCl 10^{-3} mol L⁻¹, visando eliminar possíveis contaminações com Al existente na própria cerâmica (HUGHES e REYNOLDS, 1990).

Após a instalação do equipamento de extração, todos os vasos foram umedecidos com água destilada, até atingir o ponto de saturação de cada solo. Uma vez obtido o ponto de saturação de umidade, iniciava-se a extração da solução, utilizando-se bomba de vácuo conectada ao equipamento de extração. A solução extraída foi removida mediante uso de seringas de 50 ml. Foram realizadas 10 extrações durante o período experimental, com intervalos semanais entre as extrações. Cada solução extraída foi colocada em frascos de plástico, identificadas e encaminhadas para o laboratório de solos da Université de Paris XI em Orsay, França, onde foram analisadas para quantificar os teores totais de Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Si e Mn determinados em aparelho ICP-AES; ânions (NO₃⁻, Cl⁻ e SO₄⁻) determinados em cromatógrafo, C orgânico solúvel determinado com Total Organic Carbon Analyzer (Shimadzu, TOC-V) e pH determinado em potenciômetro.

6.3.3 Especificação do alumínio da solução do solo

O alumínio total foi considerado o Al determinado em ICP-AES. A especificação foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Boudot et al. (1994) que utilizaram uma extração “flash” (5 segundos) com o tamponante 8-hydroxyquinolina (8-OH-Q) a pH 5, permitindo a determinação de todas as espécies monoméricas inorgânicas de alumínio, exceto Al - F. Os principais procedimentos utilizados nesta extração foram os seguintes: Em tubo de PVC de 16 mL, adicionou-se 5 mL da amostra a ser analisada mais 500 µL de água deionizada; em seguida, adicionou-se 200 µL de solução de 8-hydroxyquinolina (8-OH-Q) a 1% (10 g dissolvidos em 20 mL de ácido acético glacial, e ajustado para 1 L) mais 200 µL de acetato de Na 1 mol L⁻¹ preparado em solução contendo 10 g L⁻¹ de 1,10 orthophenanthrolina e 35 g L⁻¹ de cloridrato de hydroxylamina. A reação de

complexação do Al pela 8-OH-Q é bloqueada pela adição de 4,5 mL de methyl isobutyl ketone (MIBK) após 5 segundos. Logo após a adição do MIBK, as amostras foram agitadas manualmente por 15 segundos para maior contato com o reagente. As leituras foram realizadas a 390 e 600 nm em um espectrofotômetro (BECKMAN, modelo DU 70). A leitura a 600 nm é utilizada para eliminar a interferência do Fe. A diferença entre as absorvâncias a 390 e a 600 nm é utilizada para determinar os teores de Al complexado pela 8-OH-Q mediante emprego da equação da curva de calibração do espectrofotômetro.

A separação das espécies monoméricas de Al, complexadas pela 8-hydroxyquinolina, foi realizada por cálculo de equilíbrio químico com auxílio do software WHAM (Windermere Humic Aqueous Model) versão 6.0.9 (TIPPING, 1994, 1998). As concentrações totais de todos os outros elementos determinados (Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Si, Mn, NO_3^- , Cl^- e SO_4^{2-}) foram também consideradas e incluídas no software a fim de manter o controle da força iônica.

A diferença entre o alumínio determinado em ICP-AES e o determinado pelo 8-OH-Q representa a soma do Al polimérico mais o Al amorfo e orgânico e os complexos monoméricos Al – F, ou seja:



6.4 Resultados e Discussão

6.4.1 Características dos solos

As características químicas e mineralógicas dos solos, bem como a sua classificação em grupos, estão apresentadas na tabela 6.1 e figura 6.1.

Tabela 6.1. Teores de Ca, Mg e Ca + Mg trocáveis, caulinita (Ct), gibbsita (Gb) e razão caulinita/ caulinita + gibbsita ($R_{K_{Gb}}$) dos solos utilizados para avaliação das espécies de alumínio no horizonte 0-20 cm.

Solos	Grupos	Ca	Mg	Ca + Mg	Ct	Gb	$R_{K_{Gb}}$
		cmol _c kg ⁻¹					
1	I	0,54	0,31	0,85	339,90	472,40	0,58
2	I	0,25	0,10	0,35	347,40	365,60	0,51
3	I	0,46	0,20	0,66	268,10	200,40	0,57
4	II	0,26	0,18	0,44	530,40	235,40	0,70
5	II	0,44	0,31	0,75	473,80	183,40	0,72
6	II	0,45	0,41	0,86	366,30	137,20	0,73
7	II	0,32	0,12	0,44	366,30	137,20	0,73
8	III	0,42	0,29	0,71	309,00	31,60	0,90
9	III	0,25	0,14	0,39	464,00	107,40	0,81
10	III	0,36	0,29	0,65	401,10	101,50	0,80
11	III	0,56	0,48	1,04	284,80	42,20	0,87
12	IV	1,01	0,47	1,47	267,50	83,50	0,76
13	IV	0,85	0,71	1,56	272,40	102,50	0,73
14	IV	0,99	0,51	1,50	316,70	126,60	0,71
15	IV	1,13	0,53	1,67	418,60	186,70	0,69
16	V	1,88	0,46	2,33	484,50	212,60	0,70
17	V	1,53	0,55	2,08	562,00	302,70	0,65
18	V	1,60	0,88	2,47	573,40	237,70	0,71
19	V	1,85	0,44	2,29	121,50	63,60	0,65
20	VI	2,26	1,28	3,54	434,00	145,00	0,75
21	VI	3,04	1,47	4,51	275,40	77,90	0,78
22	VI	2,52	0,89	3,41	518,50	225,30	0,70
23	VI	6,42	1,46	4,47	389,50	177,00	0,68

Os solos incluídos nos grupos I, II e III apresentam baixos teores de Ca + Mg trocáveis, abaixo de $1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, sendo semelhantes aos solos sob vegetação natural (LOPES e COX, 1977). Por outro lado, os solos dos grupos IV, V e VI apresentam teores crescentes de Ca + Mg trocáveis ($1,55 \pm 0,09 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para o grupo IV, $2,29 \pm 0,16 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para o grupo V e $3,98 \pm 0,59 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para o grupo VI), semelhantes aos observados por Lilienfein et al. (2003) em pastagens produtivas da região do Triângulo Mineiro.

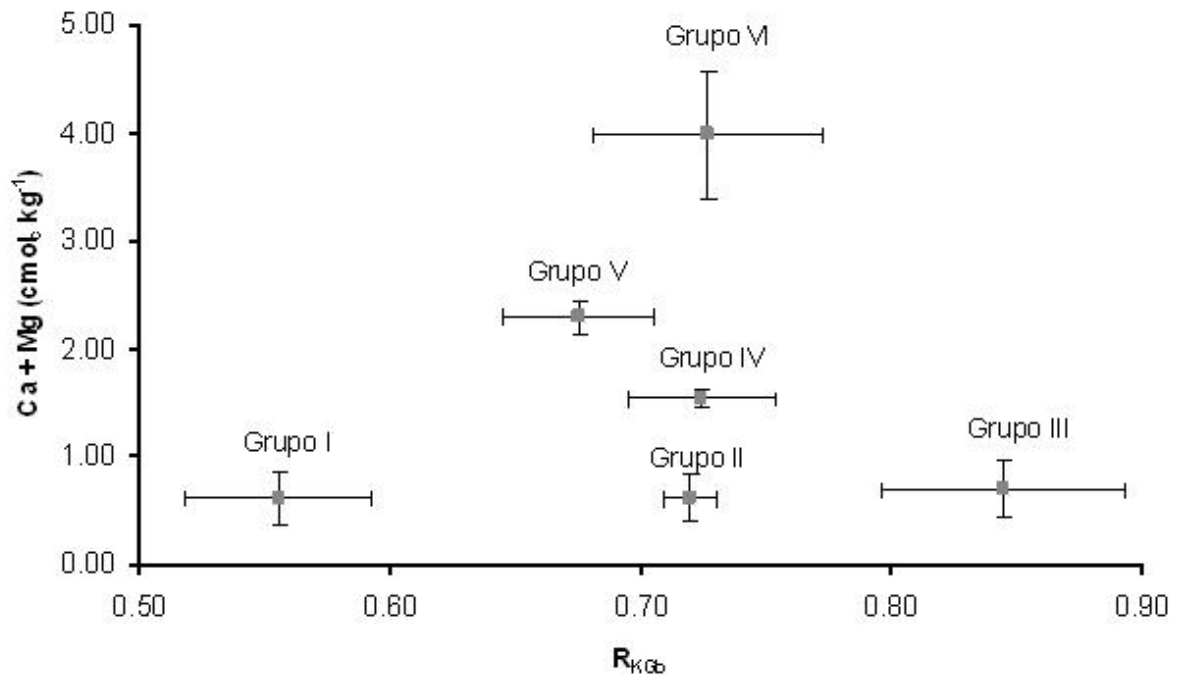


Figura 6.1 Distribuição dos grupos de solos estudados em função dos valores médios de $R_{K_{Gb}}$ e teores de Ca + Mg trocáveis.

Com relação à mineralogia, os solos do grupo I apresentam baixa $R_{K_{Gb}}$ (entre 0,50 e 0,60), os grupos II, IV, V e VI apresentam $R_{K_{Gb}}$ intermediária (entre 0,60 e 0,80), e o grupo III apresenta $R_{K_{Gb}}$ elevada (entre 0,8 e 0,9). De acordo com Curi e Franzmeier (1984), Latossolos gibbsíticos, ou seja, com baixa $R_{K_{Gb}}$, são comuns no topo das chapadas, onde há boas condições de drenagem. Na parte mais baixa da topossequência, onde o lençol freático está mais próximo à superfície, predominam Latossolos caulíníticos ou de elevada $R_{K_{Gb}}$.

6.4.2 Características químicas das soluções dos solos

O pH das soluções dos solos permaneceu praticamente estável ao longo do período experimental para a maioria dos grupos avaliados (Figura 6.2a). Para os grupos I, IV, V e VI, o pH das soluções esteve sempre acima de 5,3, já nos grupos II e III os valores foram menores, e oscilaram entre 4,5 e 5,0. Estes resultados corroboram os dados de outros pesquisadores, como Raij (1991), que verificou que o aumento nos teores de cátions básicos no solo, oriundos de adubação ou de alteração dos minerais primários, induz ao aumento do pH. No caso dos solos pobres em cátions trocáveis (grupos I, II e III), observa-se que as variações no pH das soluções podem ser atribuídas às variações mineralógicas dos solos. Nos solos do grupo I (gibbsíticos) a principal consequência da redução do pH é o aumento das cargas positivas devido a protonação das hidroxilas da gibbsita, como indica o trabalho de Zhu et al, (2005). Esta protonação gera aumento da resistência do solo a alteração do pH (aumento do poder tampão). Este processo tem efeito limitado nos solos caulíníticos (grupos II e III), pois, as únicas cargas variáveis da caulinita são os Si-OH dos bordos dos folhetos da argila (ZHU et al, 2005). Por isso, apesar de os solos do grupo I apresentarem níveis de fertilidade química semelhante aos solos dos grupos II e III, eles apresentam um poder tampão mais acentuado.

Com relação ao Al total da solução dos solos, os grupos de maior fertilidade química (IV, V e VI) apresentaram valores próximos a $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ (Figura 6.2b). Entre os solos de menor fertilidade química, destacam-se os solos do grupo III, que apresentaram as maiores médias de concentrações de Al total, variando de 48 a $241 \mu\text{mol L}^{-1}$. No grupo II, os teores deste elemento ficaram sempre abaixo de $32 \mu\text{mol L}^{-1}$ e para os solos do grupo I, os teores de Al total foram semelhantes aos observados nos grupos de maior fertilidade química, ficando sempre próximos de $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$. Esta variação nos valores de Al total das soluções dos solos estão condicionadas aos valores de pH das soluções. Nos solos caulíníticos (grupos II e III) o consumo do íon H^+ está associado principalmente à dissolução do Al contido nos minerais (ex. caulinita). Por outro lado, nos solos gibbsíticos (grupo I), o consumo do íon H^+ está principalmente associado a protonação da superfície dos colóides (óxidos de Al) sem liberação do Al (ZHU et al, 2005).

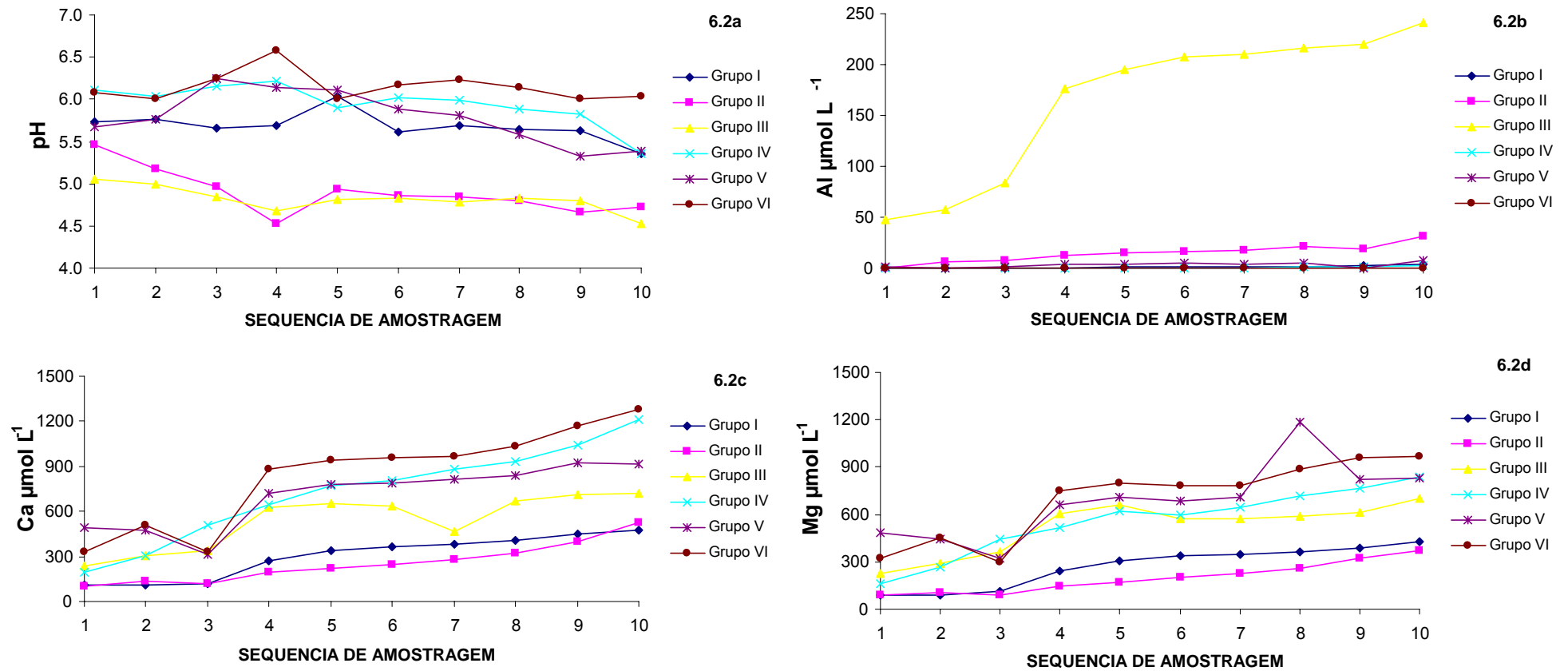


Figura 6.2 Evolução dos teores médios de pH (6.2a), Al (6.2b), Ca (6.2c) e Mg (6.2d) totais nas soluções dos seis grupos de solos avaliados, durante 10 semanas de avaliação.

Para todos os grupos de solos verificou-se aumento nos teores de Ca e Mg durante as 4 primeiras semanas de amostragem. Isto pode ser explicado pelo fato de os solos terem sido umedecidos antes das coletas das soluções, o que estimula a mineralização da matéria orgânica com liberações de diversos ânions, aumentando a força iônica da solução, que por sua vez, promove o deslocamento destes cátions para a solução, como indicam os trabalhos de Takachi e Pavan, (1995) e Wenzl et al., (2003). Segundo Takachi e Pavan (1995) o aumento da força iônica eleva a acidez das soluções dos solos e promove o deslocamento preferencial de Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ da fase sólida para a solução do solo. Durante as últimas 6 amostragens, os aumentos das concentrações de Ca e Mg em solução foram menos acentuados, indicando estabilização destas reações de troca iônica.

As maiores médias de Ca foram observadas nas soluções dos solos dos grupos VI, IV e V, respectivamente, com concentrações variando entre 193 e 1278 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (Figura 6.2c) Para o Mg, as maiores médias foram observadas nos grupos IV, V e VI, com concentrações variando entre 163 e 1186 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (Figura 6.2d).

Comparando os grupos de mineralogia semelhante e níveis variáveis de fertilidade química (grupos II, IV, V, VI), verifica-se que o aumento nos teores de Ca e Mg trocáveis dos solos de menor fertilidade química (grupo II para IV) resultou em aumento relativo da concentração de Ca e Mg da solução (fator intensidade), entretanto, entre os solos dos grupos de maior fertilidade química (grupos IV, V e VI) apesar dos valores crescentes do fator Q (quantidade), não se verificou aumentos proporcionais nas quantidades de Ca e Mg em solução (fator intensidade). Com base nestes resultados pode-se inferir que a calagem pode ser uma prática dispensável para solos com teores de Ca + Mg trocáveis acima de 1,5 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$.

Com relação aos solos de baixa fertilidade química, mas com variações nos teores de caulinita e gibbsita (grupos I, II e III), verifica-se que os solos gibbsíticos (grupo I) apresentaram soluções com pH relativamente elevado (> 5,3), ausência de Al em solução e baixas concentrações de Ca e Mg. Portanto, o principal problema destes solos é a deficiência em cátions trocáveis e não, toxidez de Al, logo, a calagem pode ser uma prática necessária, pois resulta em aumentos dos teores de cátions básicos da solução, o que está de acordo com Ritchey et al. (1982). Por outro lado, os solos mais caulíníficos (grupos II e III) são caracterizados por apresentarem soluções com baixos valores de pH (4,5-5,0), concentrações

elevadas de Al em solução (até $241 \mu\text{mol L}^{-1}$) e também valores elevados de Ca e Mg. Neste caso, o principal objetivo da calagem seria a eliminação do Al da solução, porém, para que esta prática seja indicada de forma correta, seria necessário avaliar se o Al presente na solução é realmente tóxico às plantas, ou seja, torna-se necessário avaliar a atividade das espécies químicas consideradas tóxicas.

6.4.3 Especificação do alumínio

Realizou-se a especificação química do Al somente para os grupos II e III, os únicos que apresentaram altos teores de Al total. Para apresentação e discussão dos resultados da especificação, considerou-se a concentração média das diferentes espécies de Al dos grupos II e III (média de 4 solos) na última amostragem, época em que foram verificadas as maiores concentrações de Al em solução.

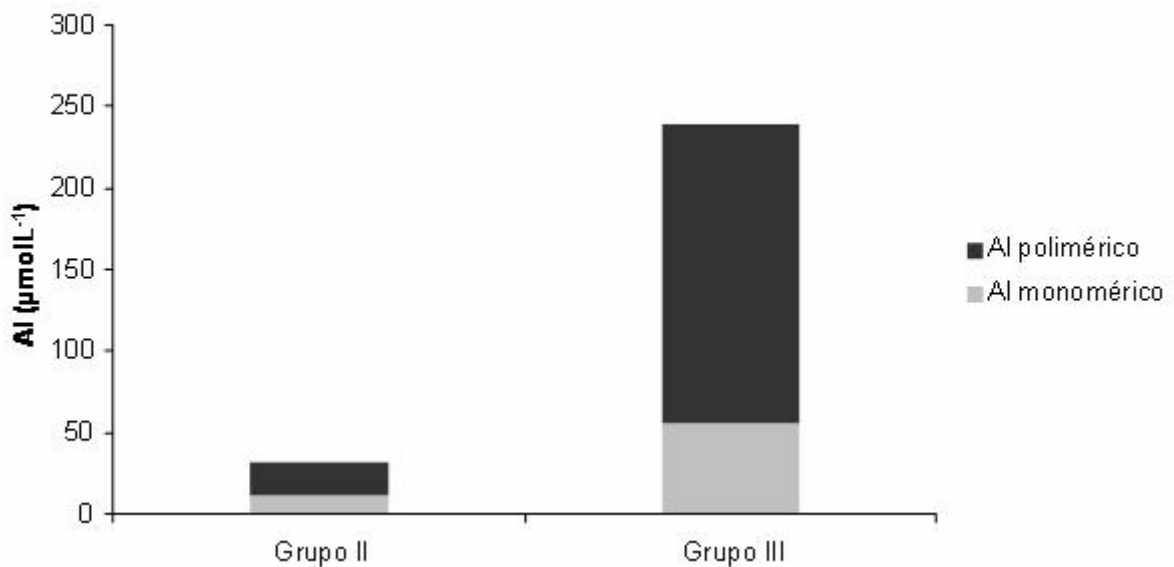


Figura 6.3. Valores médios de alumínio polimérico e monomérico nas soluções dos solos dos grupos II e III. Dados da décima semana de extração da solução dos solos.

Analisando a figura 6.3 verifica-se que a quantidade de Al monomérico + Al polimérico nas soluções dos solos do grupo III é superior àquelas verificadas no grupo II. Os teores de Al monomérico, considerados tóxicos, são de

11,16 e 55,32 $\mu\text{mol L}^{-1}$ nos grupos II e III, respectivamente. No entanto, quando se considera a proporção entre Al monomérico e Al total nas soluções, verifica-se que a percentagem de Al monomérico no grupo II (36%) é superior as verificadas no grupo III (22%).

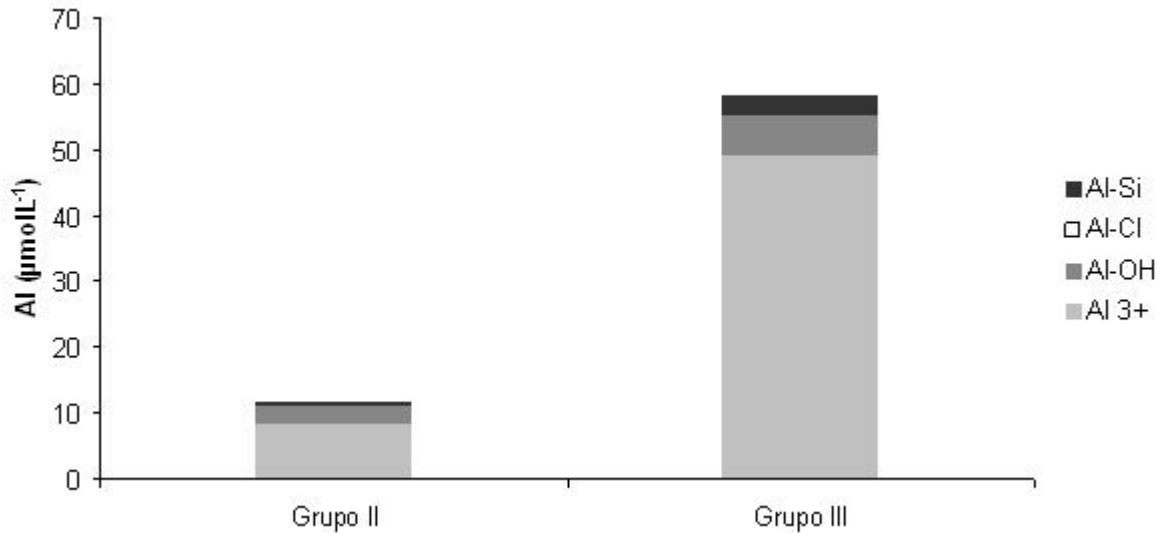


Figura 6.4 Principais espécies de Al monomérico encontrados nas soluções dos solos dos grupos II e III. Dados da décima semana de extração da solução dos solos.

Os resultados da especiação das formas de Al monomérico demonstram que a espécie predominante, nos dois grupos de solos, foi a Al^{3+} seguida pelos hidróxidos de Al e, em menor quantidade, Al-Si (Figura 6.4). Abreu et al. (2003) avaliaram soluções de solos de diversas regiões do Brasil e verificaram que as formas Al^{3+} e hydroxi-Al diminuiram rapidamente com o pH até 5,5. Estes autores indicaram que pH, material de origem e mineralogia da fração argila são as principais variáveis que influenciam as diferentes formas de Al na solução dos solos.

6.5 Conclusões

1. Valores de Ca+Mg trocáveis de até $1,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ tem efeito positivo sobre o pH e sobre as concentrações de Ca, Mg e Al das soluções do solo. Acima deste valor, minimiza-se este efeito.
2. Solos gibbsíticos, de baixa fertilidade química, apresentam soluções com pH superiores a 5,5, ausência de Al solúvel e concentrações baixas de Ca e Mg;
3. Solos caulíníticos, de baixa fertilidade química, apresentam soluções com pH entre 4,5 e 5,0, altas concentrações de Al solúvel e concentrações relativamente elevadas de Ca e Mg.
4. A espécie de Al monomérico predominante nas soluções de solos sob pastagens da região do Cerrado é Al^{3+} , seguida pelos hidróxidos de Al.

7. ARTIGO E: INFLUÊNCIA DA MINERALOGIA E FERTILIDADE QUÍMICA SOBRE A MACROFAUNA EM SOLOS SOB PASTAGENS NA REGIÃO DO CERRADO

7.1 Resumo

Diversos processos exercem influência sobre a macrofauna dos solos, por meio da intervenção nas características físico-químicas ou biológicas do ecossistema. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de diferentes níveis de fertilidade química e diferentes teores de caulinita e gibbsita sobre a macrofauna de solos sob pastagens da região do Cerrado. Para isso, foram selecionadas duas regiões, situadas no Distrito Federal e no Município de Formosa, GO. Realizou-se uma pré-análise química dos solos para determinação dos teores de Ca e Mg e também dos teores de caulinita e gibbsita através de análise termogravimétrica (ATG) com o intuito de calcular a relação caulinita / caulinita + gibbsita ($R_{K_{Gb}}$). Estes dois parâmetros (Ca + Mg e $R_{K_{Gb}}$) possibilitaram a escolha de 4 grupos de solos, que foram: Grupo I (Ca + Mg de 0,5 a 1,0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ e $R_{K_{Gb}}$ de 0,4 a 0,6); Grupo II (Ca + Mg de 0,5 a 1,0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ e $R_{K_{Gb}}$ de 0,8 a 1,0); Grupo III (Ca + Mg de 2,0 a 4,0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ e $R_{K_{Gb}}$ de 0,4 a 0,6); Grupo IV (Ca + Mg de 2,0 a 4,0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ e $R_{K_{Gb}}$ de 0,8 a 1,0). A macrofauna foi amostrada seguindo-se o método TSBF modificado, coletando-se blocos de 25 × 25 × 30 cm onde, após triagem manual, contaram-se todos os indivíduos que posteriormente foram identificados até o nível de grandes grupos. Em seguida, os dados foram submetidos à análise de componentes principais (ACP) com o intuito de agrupar as variáveis que mais se aproximam e explicar o comportamento da macrofauna nos 4 grupos de solos selecionados. Os resultados permitiram concluir que a frequência de indivíduos na serapilheira é muita baixa e representa menos que 1% do total, a maior concentração da macrofauna em solos sob pastagens da região do Cerrado ocorre na camada superficial de 0-10cm de profundidade, a predominância de Isoptera é mais acentuada nos solos de baixa fertilidade química e há maior densidade de Oligochateas nos solos de alta $R_{K_{Gb}}$.

Palavras-chave: Fauna edáfica, caulinita, gibbsita, análise de componentes principais.

THE INFLUENCE OF MINERALOGY AND CHEMICAL FERTILITY ON SOIL MACROFAUNA UNDER PASTURES IN THE CERRADO REGION

7.1 Abstract

Various processes exercise influence on the soil macrofauna through intervention in the physical, chemical or biological characteristics of the ecosystem. The aim of this study was to evaluate the influence of different levels of chemical fertility and different contents of kaolinite and gibbsite on the soil macrofauna under pastures in the Cerrado region. To this end, a region was selected in the Distrito Federal and in the town of Formosa, GO. A chemical pre-analysis was carried out of the soils to determine the Ca and Mg contents as well as those of kaolinite and gibbsite through thermogravimetric analysis (TGA) with the aim of calculating the ratio kaolinite/kaolinite+gibbsite (R_{KGb}). These two parameters (Ca + Mg and R_{KGb}) allowed the choice of four groups of soils, which were: Group I (Ca + Mg from 0.5 to 1.0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ and R_{KGb} from 0.4 to 0.6); Group II (Ca + Mg from 0.5 to 1.0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ and R_{KGb} from 0.8 to 1.0); Group III (Ca + Mg from 2.0 to 4.0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ and R_{KGb} from 0.4 to 0.6); Group IV (Ca + Mg from 2.0 to 4.0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ and R_{KGb} from 0.8 to 1.0). Macrofauna was sampled following the TSBF method, collecting blocks of 25 × 25 × 30 cm where, after manual triage, all of the individuals were counted which afterwards were identified as belonging to large groups. After this, the data were submitted to principal component analysis (PCA) with the aim of grouping the variables which came closest to explaining the behavior of the macrofauna in the four soil groups selected. The results allowed the conclusion that the frequency of individuals in the litter is very low and represents less than 1% of the total; the greatest concentration of macrofauna in soils under pastures in the Cerrado region occurs in the superficial layer 0-10cm, and the predominance of Isoptera is more accentuated in the soils having low chemical fertility and there is a greater density of Oligochateas in soils of high R_{KGb} .

Key-words: Soil invertebrates, kaolinite, gibbsite, principal component analysis.

7.2 Introdução

O Bioma Cerrado ocupa cerca de 24% do território brasileiro sendo uma das últimas fronteiras agrícolas ainda em expansão na América do Sul, junto com as savanas colombiana e venezuelana. Nos últimos 40 anos, uma grande parte da cobertura original do Cerrado foi transformada em pastagens, principalmente por forrageiras do gênero *Brachiaria* spp, abrangendo 2/3 do total das áreas com pastagens cultivadas, que são estimadas em 54 milhões de hectares (SANO et al., 2008). Essa transformação vem acompanhada, muitas vezes, de um alto custo ambiental como: fragmentação do ecossistema, erosão e degradação do solo, poluição das águas e perda de biodiversidade (BRANDON et al., 2005). Isto foi observado por Brossard e Barcellos (2005) que estimaram que entre 70 e 80 % das pastagens da região do Cerrado apresentam solos com variados graus de degradação, principalmente física. A primeira consequência do processo de degradação dos solos é a diminuição da produtividade das pastagens, conduzindo à baixa reposição de resíduos e perda de matéria orgânica (MACEDO, 2001). Esta diminuição dos recursos tróficos exerce forte influencia sobre os organismos do solo, gerando redução na biodiversidade e atividade da macrofauna (BARROS et al. 2002, SILVA et al., 2007).

A macrofauna dos solos está intimamente associada a processos de decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (BLANCHART et al., 2006), afetando uma série de atributos físicos, químicos e biológicos do solo, particularmente, no ambiente tropical (LAVELLE et al., 2006). Assim, ela pode servir para indicar o estado de degradação dos solos, uma vez que é sensível às mudanças no uso da terra, induzidas pela agricultura (LINDEN et al., 1994, SILVA et al., 2006). Os impactos da conversão do Cerrado natural em pastagens foram descritos por vários pesquisadores, entre eles, Balbino et al. (2002) que verificaram diminuição dos microagregados em latossolos, resultando em maior compactação. Apesar de alguns resultados divergentes, a conversão do Cerrado natural em pastagens induz, geralmente, a um decréscimo na densidade e da biodiversidade da macrofauna nos primeiros anos da conversão, seguido de uma forte recuperação até um nível comparável ao observado em solos sob vegetação natural de Cerrado (DECAËNS et al., 1994; BENITO et al., 2004).

Apesar de sua importância para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, a fauna do solo não têm sido considerada no planejamento das práticas de manejo dos solos (LAVELLE et al., 1999; LAVELLE e SPAIN, 2001; DORAN, 2002). A maioria dos trabalhos sobre macrofauna realizados no Brasil foram conduzidos na Amazônia (BARROS et al., 2001; BARROS et al., 2002; BARROS et al., 2003; SCHEFFLER, 2005; MATHIEU et al., 2005). Alguns outros autores como Dias et al., (1997); Benito et al., (2004); Silva et al., (2006) e Marchão, (2007) trabalharam na região do Cerrado no entanto, em seus trabalhos, deram mais atenção à transformação ocorrida na população de macroinvertebrados após a conversão do Cerrado natural em pastagens, agricultura ou integração lavoura-pecuária. Poucos trabalhos consideraram a influencia dos níveis de fertilidade química sobre a macrofauna dos solos (LOURENTE et al., 2007) e, menos ainda, o efeito da mineralogia da fração argila sobre estes indivíduos.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influencia de diferentes níveis de fertilidade química e diferentes teores de caulinita e gibbsita sobre a macrofauna de solos sob pastagens na região do Cerrado.

7.3 Material e Métodos

7.3.1 Área de Estudo e Seleção dos Solos

As áreas estudadas situam-se no Distrito Federal e no Município de Formosa, GO, (15°30'0,9"S a 16°1'11"S e 47°22'0,9"W a 48°11'58"W), com altitudes variando entre 850 m e 1200 m e relevo plano ou suavemente ondulado. A temperatura e a precipitação média anual é de 26 °C e 1500 mm, respectivamente, com 85% das chuvas ocorrendo entre os meses de novembro a abril.

Para a definição e localização dos pontos de amostragem foram consultados mapas geológicos e pedológicos da região. A partir da análise cartográfica foram selecionadas áreas com predominância de latossolos, que representam cerca de 50% dos solos da região do Cerrado (MACEDO, 2000). Para a seleção dos locais específicos de coleta considerou-se os teores de Ca + Mg trocáveis, extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e determinados de acordo com a metodologia descrita em Embrapa (1997). Também foram considerados os valores da relação caulinita / caulinita + gibbsita (R_{KGB}), calculados de acordo com os resultados da análise termogravimétrica (ATG), realizada em aparelho TGA-50 Shimadzu (MELO et al., 2001). Determinaram-se também os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) totais em analisador elementar modelo CHNS 2400 Perkin-Elmer. No momento da amostragem, todas as áreas selecionadas estavam ocupadas com pastagens naturais ou cultivadas. Os locais de coleta foram georreferenciados com auxílio de equipamento GPS.

7.3.2 Coleta da Macrofauna

As coletas da macrofauna do solo foram realizadas na primeira quinzena de fevereiro de 2007. Em cada ponto de coleta foram amostrados três monólitos de solo de acordo com a metodologia recomendada por Tropical Soil Biology and Fertility Programme (TSBF) modificado (ANDERSON e INGRAM, 1993).

A escolha dos locais de coleta dos monólitos foi realizada com auxílio de um quadro amostrador metálico de 25 x 25 cm de largura, lançado de forma aleatória na área de amostragem. Em seguida, coletou-se a serapilheira, escavou-se ao redor do quadro, preservando o monólito intacto até a profundidade de 30cm. Posteriormente, as camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm foram separadas e acondicionadas em sacos plásticos individuais previamente identificados e conduzidas ao laboratório para triagem manual, onde os invertebrados foram separados a olho nu, com auxílio de pinças. Os invertebrados foram colocados em tubos de ensaio de 25 ml contendo álcool 70% para posterior separação e classificação. Frascos que continham minhocas foram acrescidos de formol (10%) para melhor conservação. Todos os indivíduos foram contados e identificados até o nível de grandes grupos taxonômicos. Determinou-se a densidade relativa e diversidade dos seguintes grupos taxonômicos: Isoptera, Hymenoptera, Oligochaeta, Coleoptera (adulto e larva), Diplopoda, Chilopoda, Diptera, Hemiptera, Lepidoptera, Arachnida, Homoptera, Symphyla, Scorpione e Pseudoscorpione.

7.3.3 Análise Estatística

Os dados de densidade relativa (indivíduos/m²) foram submetidos a análise estatística descritiva visando obter média e desvio-padrão. Também foi realizada a análise de componentes principais (ACP) com auxílio do programa ADE-4 (THIOULOUSE et al., 1997) com o intuito de agrupar as variáveis que mais se aproximam e explicar o comportamento da macrofauna nos 4 grupos de solos selecionados. A ACP foi construída com dados referentes a composição química e mineralógica dos solos (Ca + Mg tocáveis, Ctotal e R_{KGb}) e densidade dos diferentes grupos taxonômicos encontrados no horizonte 0-30cm de profundidade.

7.4 Resultados e Discussão

7.4.1 Características dos Solos

Segundo o mapeamento de solos do Distrito Federal e do município de Formosa, GO todos os solos selecionados são classificados como Latossolos (EMBRAPA, 2006). A localização e os resultados das variáveis químicas e mineralógicas dos solos avaliados estão apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 Localização, teores de C e N totais, Ca, Mg e Ca + Mg trocáveis, caulinita (Ct), gibbsita (Gb) e razão caulinita/ caulinita + gibbsita ($R_{K_{Gb}}$) da camada de 0-20cm dos solos utilizados para avaliação da macrofauna na região do Cerrado

GRUPOS	SOLOS	Coordenadas Geográficas		C	N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	Ct	Gb	$R_{K_{Gb}}$
		Latitude	Longitude								
I	1	15° 36' 44,0" S	47° 45' 18,9" W	25.05	1.55	0.46	0.14	0.60	472	340	0.58
	2	15° 35' 42,1" S	48° 06' 43,3" W	25.95	1.80	0.23	0.08	0.31	362	415	0.47
	3	15° 38' 02,5" S	48° 11' 58,2" W	27.55	1.55	0.34	0.03	0.37	366	347	0.51
II	4	15° 36' 52,1" S	47° 42' 26,6" W	20.20	1.50	0.55	0.25	0.80	464	107	0.90
	5	15° 36' 32,1" S	47° 43' 0, 9" W	14.70	1.25	0.54	0.24	0.79	309	32	0.81
	6	15° 26' 24,7" S	47° 17' 03,7" W	12.25	1.10	0.53	0.16	0.69	401	102	0.80
III	7	15° 31' 46,3" S	47° 39' 49,2" W	26.10	1.65	1.87	0.80	2.67	476	311	0.60
	8	16° 00' 23,3" S	48° 07' 28,3" W	27.20	1.65	3.16	0.74	3.90	332	322	0.51
	9	15° 58' 10,0" S	48° 07' 32,8" W	22.05	1.45	2.06	0.64	2.70	332	223	0.60
IV	10	15° 31' 08,0" S	47° 32' 49,4" W	12.50	1.60	1.63	0.45	2.08	378	57	0.87
	11	15° 30' 08,9" S	48° 08' 00,1" W	25.05	1.35	3.19	0.81	4.01	467	133	0.78
	12	15° 18' 11,7" S	47° 14' 13,5" W	18.00	1.40	2.97	1.08	4.04	275	78	0.78

Considerando os teores de Ca + Mg trocáveis e a relação caulinita / caulinita + gibbsita ($R_{K_{Gb}}$), selecionou-se 12 locais que representaram 4 grupos de solos (Figura 7.1). Os grupos I e II apresentaram baixos teores de Ca + Mg trocáveis ($< 1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), semelhante aos solos sob vegetação natural (LOPES e COX,

1977). Já os solos dos grupos III e IV, apresentaram teores mais elevados (2,1 a 4,0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), semelhantes aos observados por Lilienfein et al. (2003) em pastagens produtivas da Região do Triângulo Mineiro.

Com relação à mineralogia, os grupos I e III apresentaram baixa $R_{K_{Gb}}$ (0,45 a 0,60), e os grupos II e IV elevada $R_{K_{Gb}}$ (0,75 a 0,90) (Tabela 7.1). De acordo com Curi e Franzmeier (1984), Latossolos gibbsíticos ou seja, com baixa $R_{K_{Gb}}$, são comuns no topo das chapadas, onde há boas condições de drenagem. Na encosta inferior, onde o lençol freático está mais próximo da superfície, predominam Latossolos caulíníticos ou, de elevada $R_{K_{Gb}}$.

A maioria dos solos (1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 11 e 12) apresentou teores considerados adequados de C. Os solos 6 e 10 apresentaram teores baixos e o solo 5 teor médio de C (SOUZA e LOBATO, 2004). Os solos gibbsíticos apresentaram teores mais elevados de C, provavelmente, em função da capacidade de estabilização da matéria orgânica pelos sesquióxidos de Al e Fe (ZECH et al., 1997). A relação C/N também foi maior nos solos gibbsíticos.

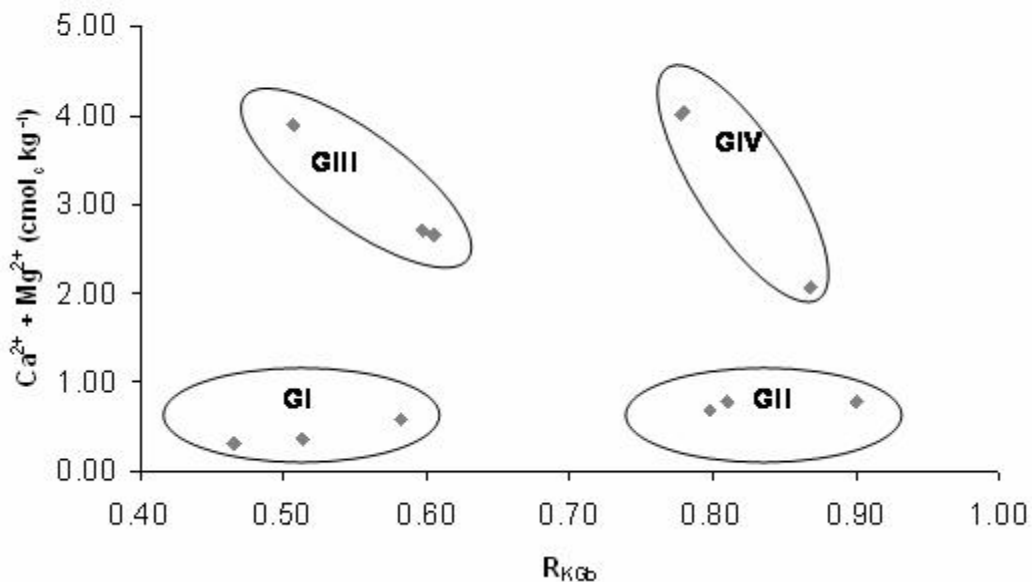


Figura 7.1 Dispersão entre os teores de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ trocáveis e $R_{K_{Gb}}$, com indicação dos 4 grupos de solos avaliados

7.4.2 Densidade e Diversidade da Macrofauna

Os diferentes grupos taxonômicos identificados foram: Isoptera, Hymenoptera, Oligochaeta, Coleoptera (adulto e larva), Diplopoda, Chilopoda, Diptera, Hemiptera, Lepidoptera, Arachnida, Homoptera, Symphyla, Scorpione e Pseudoscorpione. Devido ao hábito predador, Chilopoda, Arachnida, Scorpione e Pseudoscorpione foram denominados “predadores”. Diptera, Gastropoda, Homoptera, Lepidoptera e Symphyla foram agrupados em “outros”, devido à baixa densidade observada.

A maior densidade da macrofauna foi observada no grupo II (9263 ind m⁻²), seguido pelos grupos I (2895 ind m⁻²), III (2150 ind m⁻²) e IV (2075 ind m⁻²), respectivamente (Tabela 7.2). Em todos os grupos de solos, os Isoptera representaram a maior parte dos indivíduos, contudo, nos solos dos grupos I e II, a densidade deste grupo taxonômico foi muito maior, provavelmente, em função da baixa fertilidade química, indicando certo grau de degradação, como indicado por Constantino, (2005). Barros et al. (2002) observaram, em seus estudos, que os Isoptera apresentam boa adaptação a solos argilosos, com alta saturação por alumínio. Nos grupos I e III verificou-se alta densidade de larvas de Coleoptera (98-268 ind m⁻²) e Hemiptera (260-268 ind m⁻²) (Tabela 7.2).

Entre os Hemiptera, destaca-se o inseto-praga denominado popularmente de percevejo castanho que, conforme Oliveira e Malaguido (2004), pode ocorrer em várias culturas, principalmente em soja e pastagem.

Os grupos II e IV, que representam os solos com altos valores de R_{KGB} , apresentaram altas densidades de Oligochaetas. Estes organismos têm sido descritos como “engenheiros do ecossistema” (JONES et al., 1994) devido a produção de estruturas biogênicas que representam os locais onde ocorrem alguns dos processos essenciais e fundamentais para a saúde e qualidade do solo, como alta atividade microbiana e dinâmica da matéria orgânica assim como, organização e estabilização da estrutura do solo (LAVELLE, 1997).

Tabela 7.2 Densidade de indivíduos (ind/m²) componentes da macrofauna em solos sob pastagens da região do Cerrado. Média e desvio-padrão de 9 valores da camada serapilheira - 30 cm de profundidade

Grupos Taxonômicos	Grupos de Solo			
	I	II	III	IV
Isoptera	2100 ± 2811	7031 ± 7919	1096 ± 1266	1157 ± 2673
Hymenoptera	249 ± 289	1865 ± 2446	347 ± 281	590 ± 1177
ColeoL	98 ± 148	52 ± 39	268 ± 334	57 ± 78
ColeoA	39 ± 33	64 ± 61	44 ± 41	20 ± 22
Oligochaetas	16 ± 31	114 ± 173	57 ± 69	116 ± 213
Hemiptera	268 ± 454	57 ± 153	260 ± 422	9 ± 14
Diplopoda	34 ± 53	0 ± 0	14 ± 31	7 ± 21
Predadores	16 ± 21	20 ± 30	14 ± 13	18 ± 31
Outros	75 ± 46	60 ± 60	50 ± 37	101 ± 104
Total	2895	9263	2150	2075

Em todos os grupos de solos a presença de organismos predadores foi baixa e representou menos de 1% do total de indivíduos.

7.4.3 Distribuição vertical

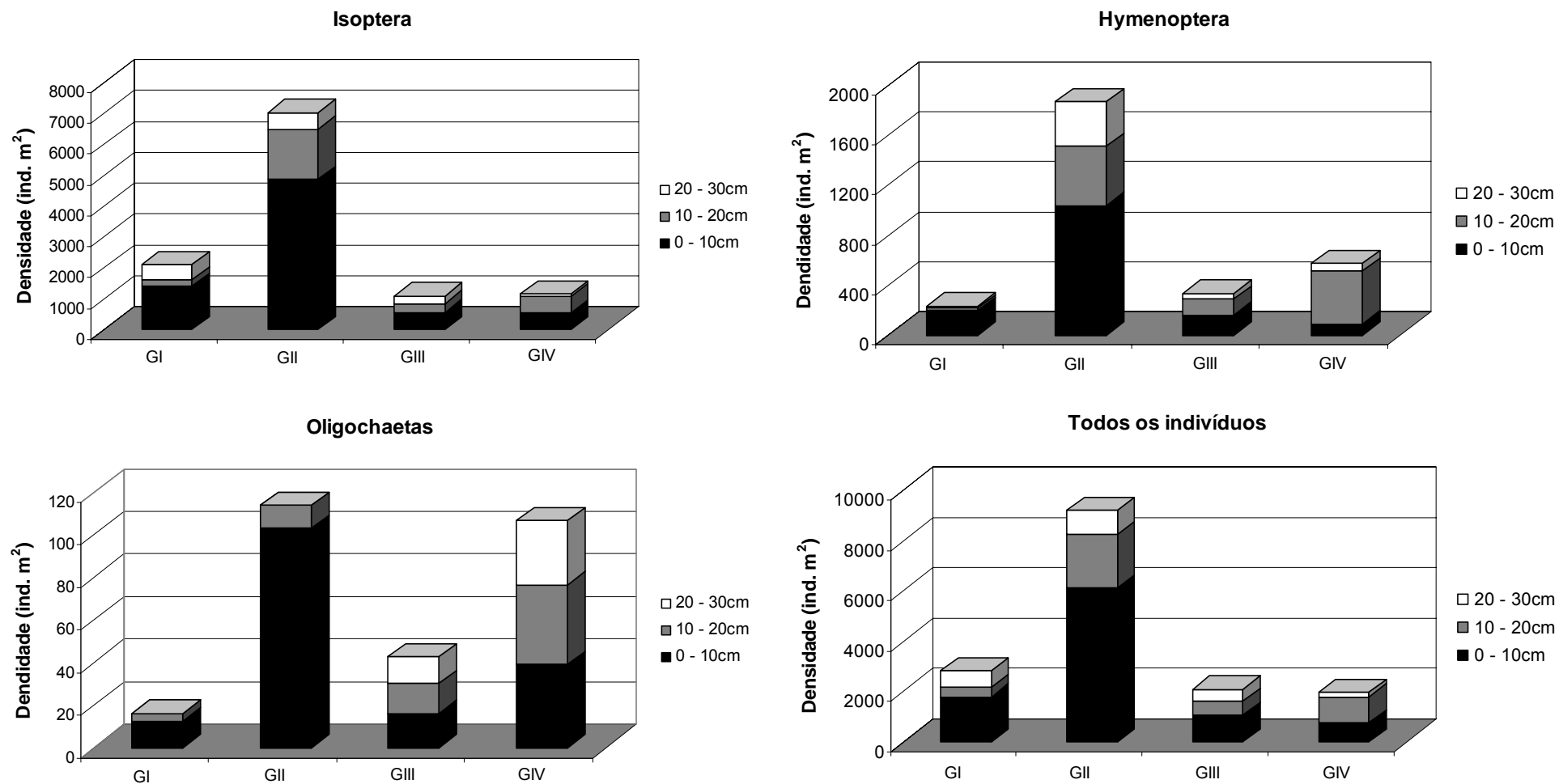
Em todos os grupos de solos avaliados a porcentagem de indivíduos encontrados na serapilheira foi menor que 1%. Observou-se predominância dos indivíduos na camada superficial de 0-10 cm de profundidade em relação às camadas subjacentes, com exceção do grupo IV, que apresentou maior densidade de indivíduos na camada 10-20 cm (Figura 7.2), em função de um número elevado de Hymenopteras encontrados nesta camada, em uma das parcelas do solo n^o 11. A concentração dos indivíduos nas proximidades da superfície dos solos demonstra preferência por esta camada do solo, que é a mais afetada pela deposição de

resíduos orgânicos e adubações, como observado por Aquino et al. (2007) que verificaram correlação positiva entre densidade de indivíduos e matéria orgânica do solo. Marchão (2007) também verificou maior densidade de indivíduos na camada 0-10 cm para solos sob pastagens na região do Cerrado. Já para solos sob pastagens da Amazônia, Barros et al. (2002) verificaram maior densidade de indivíduos (70%) na camada 10 - 20cm.

Ainda na camada de 0-10 cm de profundidade, outros grupos taxonômicos de maior frequência foram Hymenoptera, Coleóptera larva e Coleóptera adulto. Quando se considera as camadas subjacentes (10-20 e 20-30cm de profundidade), a presença de Hemiptera se torna expressiva, principalmente nos grupos I e III (dados não apresentados).

A distribuição vertical dos Oligochateas variou entre os grupos de solos avaliados. Nos grupos I e II, que representam os solos de baixa fertilidade química, houve predominância destes indivíduos na camada 0-10cm de profundidade, o que está de acordo com os resultados apresentados por Barros et al. (2007), que encontraram 82% dos Oligochaetas nesta camada de solo. No entanto, para os grupos III e IV, que representam os solos de maior fertilidade química, a distribuição vertical destes indivíduos foi semelhante entre as camadas de solos avaliadas (Figura 7.2).

Figura. 7.2 Distribuição vertical da macrofauna (Isoptera, Hymenoptera, Oligochaetas e todos os indivíduos) de solos sob pastagens na região do Cerrado



7.4.4 Relações entre a Macrofauna e as Características dos Solos

A análise de componentes principais realizada utilizando as características mineralógicas e químicas dos solos e densidade total dos grupos taxonômicos, revelou que os dois primeiros eixos explicaram 82% da variabilidade total dos dados, sendo 57% e 25% pelo 1° e 2° eixos, respectivamente (Figura 7.3).

O eixo 1 foi influenciado especialmente pela $R_{K_{Gb}}$ e pela densidade de Oligochaeta com autovetores positivos e C, Hemíptera e Predadores com autovetores negativos. O eixo 2 foi influenciado por Ca + Mg com autovetor positivo e Coleoptera adulto e Isoptera com autovetores negativos (Figura 7.3).

A relação entre os auto-vetores da $R_{K_{Gb}}$ e dos Oligochaetas (Figura 7.3) reforça a idéia descrita anteriormente de que, a densidade desses indivíduos é maior nos solos com $R_{K_{Gb}}$ maior, ou seja, quanto maior a porcentagem de caulinita nos solos, maior a densidade de Oligochaetas. Este fato pode estar relacionado a posição na paisagem dos solos caulíníticos em relação aos gibbsíticos, visto que, normalmente, os mais caulíníticos estão posicionados na parte inferior da paisagem, o que favoreceria a manutenção da umidade do solo, criando um ambiente mais propício aos Oligochaetas (CURI e FRANZMEIER, 1984; AUERSWALD et al., 1996).

A oposição verificada entre os autovetores de Ca + Mg e Isoptera, também confirma os dados apresentados na tabela 7.2 que indicaram maior densidade de Isoptera nos solos de menor fertilidade química. Estes resultados estão de acordo com os apresentados por Benito et al. (2004) que também verificaram maior densidade de Isoptera em solos sob pastagens degradadas do que em solos sob vegetação natural e pastagens em bom estado de conservação. O autovetor dos Oligochetas não apresentou relação com o de Ca + Mg. Estes resultados estão parcialmente de acordo com o que foi observado por Mele e Carter (1999), que trabalharam com pastagens da Austrália e verificaram relação positiva entre Oligochateas e teores de Ca no solo, no entanto, quando avaliaram a relação entre Oligochaetas e Mg, não encontram a mesma tendência.

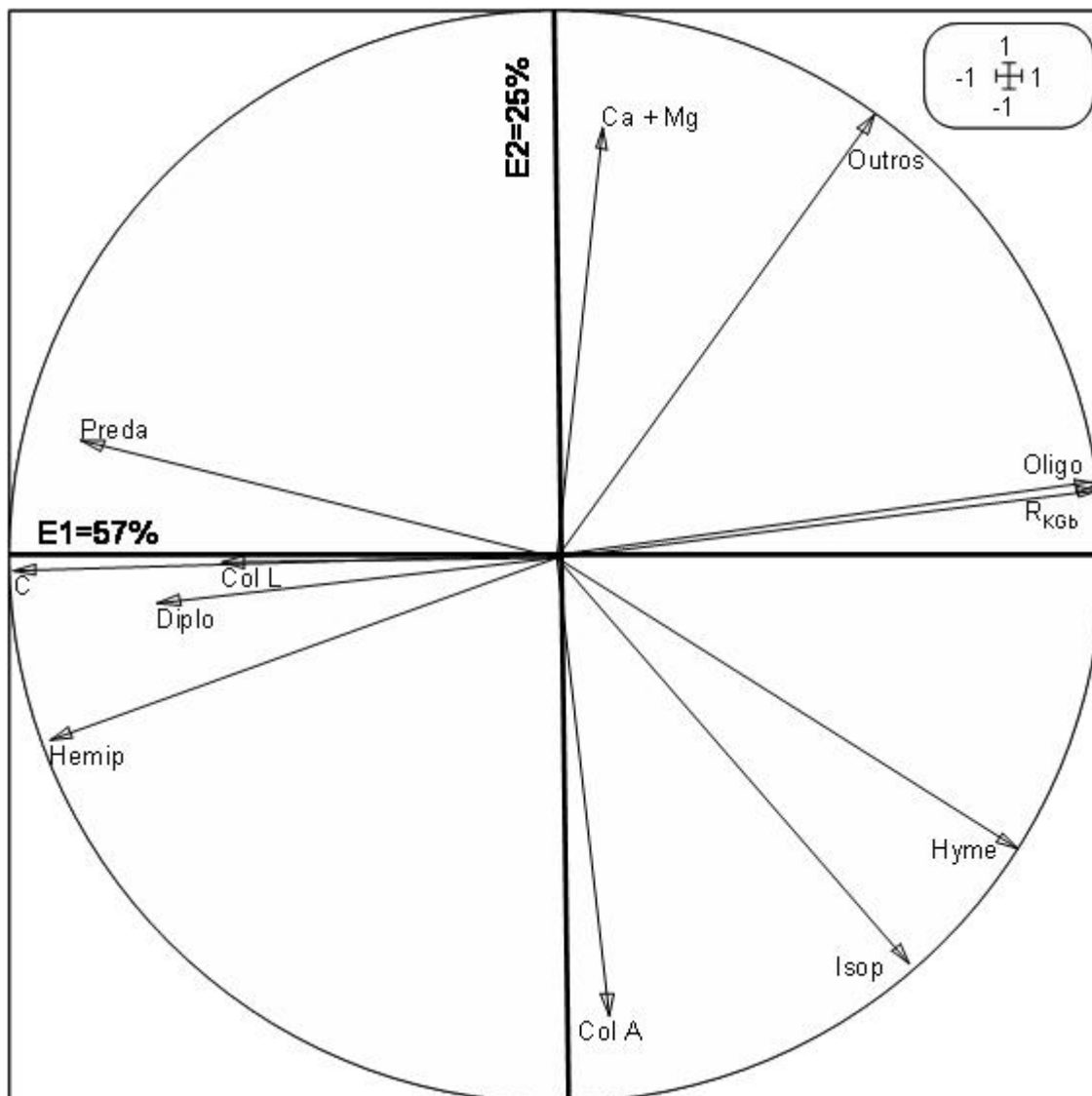


Figura 7.3. Círculo de correlações entre as variáveis Ca + Mg, relação caulinita / caulinita + gibbsita (R_{KGb}), carbono total (C), Isoptera (Isop), Hymenoptera (Hyme), Coleoptera adulto (Col A), Coleoptera larva (Col L), Oligochaetas (Oligo), Hemipetra (Hemip), Diplopoda (Diplo), Predadores (Preda) e outros macroinvertebrados (Outros) oriundos da camada 0-30cm de solos sob pastagens, localizadas na região do Cerrado

Ocorreu grande proximidade entre o autovetor do C e o dos Coleópteros Larva o que, segundo Lourente et al. (2007), está relacionado a disponibilidade de alimentos, pois os organismos deste grupo taxonômico são saprófitos e utilizam a matéria orgânica como fonte de energia.

A oposição observada entre os auto-vetores da R_{KGb} e do C pode ser explicada pela maior retenção de C nos solos gibbsíticos quando comparado aos cauliniticos, com elevada R_{KGb} (ZECH et al., 1997).

7.5 Conclusões

1. As características químicas e mineralógicas dos solos apresentam correlação com a concentração e distribuição da macrofauna dos solos sob pastagens da região do Cerrado;
2. A frequência de indivíduos na serapilheira é muita baixa e representa menos que 1% do total;
3. A maior concentração da macrofauna em solos sob pastagens da região do Cerrado ocorre na camada superficial de 0-10cm de profundidade;
4. A predominância de Isoptera é mais acentuada nos solos de baixa fertilidade química;
5. Há maior densidade de Oligochateas nos solos de alta relação caulinita / caulinita + gibbsita (R_{KGb}).

8 CONCLUSÕES GERAIS

1. A maioria dos solos sob pastagens da região do Cerrado apresentam teores insatisfatórios dos macronutrientes necessários para o bom desenvolvimento das pastagens;
2. A freqüência de pastagens com níveis de cálcio e magnésio abaixo e níveis de saturação por Al acima dos valores de referência, indica que a deficiência de elementos básicos é um fator limitante ao desenvolvimento das pastagens na região do Cerrado;
3. O Zn é o micronutriente mais freqüentemente limitante ao desenvolvimento das pastagens da região do Cerrado;
4. Os solos caulíníticos apresentam maior potencial de acidificação que os gibbsíticos, onde os níveis de Al trocável são sempre muito baixos;
5. Os solos gibbsíticos, de baixa fertilidade química, são caracterizados por soluções de solo com pH relativamente elevado ($> 5,5$), ausência de Al solúvel e concentrações baixas de Ca e Mg;
6. Os solos caulíníticos, de baixa fertilidade química, são caracterizados por soluções de solo com pH baixo (4,5 – 5,0), concentrações elevadas de Al solúvel e concentrações relativamente elevadas de Ca e Mg;
7. O aumento dos teores de Ca+Mg trocáveis no solo tem efeito positivo sobre o pH e sobre as concentrações de Ca e Mg das soluções do solo até aproximadamente $1,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; acima deste valor, o efeito é muito fraco;
8. A maior concentração da macrofauna em solos sob pastagens da região do Cerrado ocorre na camada superficial de 0-10cm de profundidade;

9. A predominância de Isoptera é mais acentuada nos solos de baixa fertilidade química;
- 10 Há maior densidade de Oligochateas nos solos caulíníficos.

REFERÊNCIAS

- ABREU JR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, p. 337-343, 2003.
- ADAMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L. G.; MADEIRA NETO, J. S. Caracterização da região dos cerrados. In: Goedert, W. J. **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel; Brasília : EMBRAPA-CPAC, 1985. p. 33-74.
- ALVA, A. K.; EDWARDS, D. G.; ASHER, C. J.; BLAMEY, F. P. C. Relationships between root length of soybean and calculated activities of aluminium monomers in nutrient solution. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, p. 959-962, 1986.
- ALLEONI, L. R. F.; ZAMBROSI, F. C. B.; MOREIRA, S. G.; PROCHNOW, L. I.; PAULETTI, V. Liming and electrochemical attributes of an oxisol under no tillage. **Scientia Agricola**, v.60, p.119-123, 2003.
- AMEDEE, G. e PEECH, M. The significance of KCl extractable Al^{3+} as an index to lime requirement of soils of humid tropics. **Soil Science**, v. 121, p.227-233, 1976.
- ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. **Tropical soil biology and fertility**. A handbook of methods. 2ed. Wallingford, UK: CAB International., 221p, 1993.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA-. **Trabalho de Georreferenciamento de Dados das Bacias Hidrográficas do Brasil de Interesse dos Setores Elétrico e Hidrológico**. Brasil, 1999.
- ASSAD, M. L. L. A fauna do solo. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. (Ed.). **Biologia dos solos dos cerrados**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1997.
- AUERSWALD, K.; WEIGAND, S.; KAINZ, M.; PHILIPP, C. Influence of soil properties on the population and activity of geophagous earthworms after five years of bare fallow. **Biology and Fertility of Soils**, v. 23, n. 4, p. 382-387, 1996.

BAKER, G. H.; BARRETT, V. J.; CARTER, P. J.; BUCKERFIELD, J. C.; WILLIAMS, P. M. L.; KILPIN G. P. Abundance of earthworms in soils used for cereal production in south-eastern Australia and their role in reducing soil acidity. In: Date, R. A.; Grundon N. J.; Rayment, G. E.; Probert, M. E. (eds), "**Plant-soil interactions at low pH**", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 213-218.1995.

BAKER, G. H.; CARTER, P. J.; BARRETT, V. J. Influence of earthworms, *Aporrectodea spp.* (Lumbricidae), on lime burial in pasture soil in south-eastern Australia. **Australian Journal of Soil Research**, v.37, p.831-845. 1999.

BALBINO, L. C.; BROSSARD, M.; LEPRUN, J. C.; BRUAND, A. Mise en valeur des Ferralsols de la région du Cerrado (Brésil) et évolution de leurs propriétés physiques : une étude bibliographique. **Étude et Gestion des Sols**, v 9, p. 83-104, 2002.

BARCELO´, J.; POSCHENRIEDER, C. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review. **Environmental and Experimental Botany**, v. 48 p. 75–92, 2002.

BARCELLOS, A. O. Sistemas extensivos e semi-extensivos de produção pecuária bovina de corte nos Cerrados. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, 1., 1996, Brasília, DF. Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos Cerrados: **Anais / Biodiversity and sustainable production of food and fibers in the tropical savannas: Proceedings**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1996. p. 130-136.

BARROS, E.; CURMI, P.; HALLAIRE, V.; CHAUVEL, A.; LAVELLE, P. The role of macrofauna in the transformation and reversibility of soil structure of an oxisol in the process of forest to pasture conversion. **Geoderma**, Amsterdam, v. 100, p. 193–213, 2001.

BARROS, E.; PASHANASI, B.; CONSTANTINO, R.; LAVELLE, P. Effects of land-use system on the soil macrofauna in western Brazilian Amazonia. **Biology and Fertility of Soils**. v 35, p.338–347, 2002.

BARROS, E.; NEVES, A.; BLANCHART, E.; FERNANDES, E. C. M.; WANDELLI, E.; LAVELLE, P. Development of the soil macrofauna community under silvopastoral and agrosilvicultural systems in Amazonia. **Pedobiologia**, v.47, p.273-280, 2003.

BENITO, N. P.; BROSSARD, M.; PASINI, A.; GUIMARÃES, M. de F., BOBILLIER, B. Transformations of soil macroinvertebrate populations after native vegetation conversion to pasture cultivation (Brazilian Cerrado). **European Journal of Soil Biology**, v.40, p.147–154, 2004.

BERTSCH, P. M. e PARKER, D. R. Aqueous polynuclear aluminium species. IN: Sposito, G. (Ed). **The environmental chemistry of aluminium**: Lewis 1995, p.117-168.

BLANCHART, E.; ALBRECHT, A.; ALEGRE, J.; DUBOISSET, A.; PASHANASI, B.; LAVELLE, P.; BRUSSAARD, L. Effects of earthworms on soil structure and physical properties. p.139-162 in P. Lavelle, L. Brussaard, and P. Hendrix, editors. **Earthworm management in tropical soil**. CAB International, Wallingford, UK. 1999.

BLANCHART, E.; VILLENAVE, C; VIALLATOUX, A.; BARTHÈS, B.; GIRARDIN, C.; AZONTONDE, A.; FELLER, C. Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. **European Journal of Soil Biology**, v 42, p.136–144, 2006.

BLOOM, P. R.; Mc BRIDE, M. B.; WEAVER, W. Aluminium organic matter in acid soils: buffering and solution aluminium activity. **Soil Science Society of America Journal**, v.43, p. 488-493, 1979.

BOHNEN, H. Acidez e calagem. In: GIANELLO, C., BISSANI, C. A., TEDESCO, M. J. (eds.) **Princípios de fertilidade de solo**. Porto Alegre : Dep. de Solos. Fac. de Agronomia. UFRGS, 1995. p.51-76.

BOHNEN, H. Acidez e calagem. In: GIANELLO, C., BISSANI, C.A., TEDESCO, M.J. (eds.) **Princípios de fertilidade de solo**. Porto Alegre : Dep. de Solos. Fac. de Agronomia. UFRGS, 1995. p.51-76.

BONNEAU, M.; DAMBRINE, E.; NYS, C.; RANGER, J. L'acidification des sols. **Bull. Ecol.**, v. 18, p. 127-136, 1987.

BOUDOT, J. P., BECQUER, T., MERLET, D; ROUILLER, J. Aluminium toxicity in declining forests : a general overview with a seasonal assessment in the Vosges mountains (France). **Annales de Sciences Forestières.**, v.51, p.27-51. 1994.

BOUDOT J. P., BECQUER T., MERLET D., ROUILLER J., RANGER J., DAMBRINE E.; MOHAMED D. A. Potential role of aluminium toxicity in nutrient deficiencies as related to forest decline : an assessment of soil solution data from the Vosges mountains. In : G. Landmann and M. Bonneau (eds), **Forest decline and atmospheric deposition effects in the french mountains**. Springer, Berlin, Heidelberg, New-York, 270-285. 1995.

BRANDON, K.; FONSECA, G. A. B.; RYLANDS, A. B.; SILVA, J. M. C. Challenges and opportunities in Brazilian conservation. **Conservation biology**, v.19, p.595-600, 2005.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Carta geológica do Brasil ao milionésimo: folha Goiânia (SE-22)**. Brasília, 1975. 87 p.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SD 22 Goiás: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1981. v.25. 636p. (Levantamento de Recursos Naturais, 25).

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SE.22 Goiânia: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1983. v.31. 764p. (Levantamento de Recursos Naturais, 31).

BROSSARD, M.; BARCELLOS, A. O. Conversion du cerrado en pâturages cultivés et fonctionnement des Ferralsols. **Cahiers Agricoles**, v.14, n1, 2005.

CAIRES, E. F.; MADRUGA, E. F.; CHUEIRI, W. A.; FIGUEIREDO, A. Alterações das características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.27-34, 1998.

CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; MENDES, J.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 315-327, 1999.

CAIRES, E. F.; BLUM J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações Químicas do Solo e Resposta da Soja ao Calcário e Gesso Aplicados na Implantação do Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 275-286, 2003.

CAMBRI, A. M. **Calagem e formas de alumínio em três localidades sob sistema de plantio direto**. 2004. Tese de doutorado.- Esalq, Piracicaba, SP.

CARDOSO, E. J. B. N. Ecologia microbiana do solo IN: Cardoso, E. J. B. N.; Tsai, S. M.; Neves, M. C. P. Microbiologia do solo: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**,. cap. 3, p.33-39, 1992.

CARMO, D. N.; CURI, N.; RESENDE, M. Caracterização e gênese de Latossolos da região do Alto Paranaíba-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.8, p.235-240, 1984.

CARVALHO JUNIOR, I. A. **Influência da mineralogia e da matéria orgânica na agregação, cor e radiometria de solos altamente intemperizados do Estado de Minas Gerais**.2000. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CHAOUI, H. I.; ZIBILSKÉ, L. M.; OHNO, T. Effects of earthworms casts and compost on soil microbial activity and plant nutrient availability. **Soil Biology Biochemistry**, v.35, p. 295-302. 2003.

CHAUVEL A., GRIMALDI M., BARROS E., BLANCHART E., DESJARDINS T., SARRAZIN M., LAVELLE P. Pasture damage by an Amazonian earthworm. **Nature**, v.398, p.32-33. 1999.

CONSTANTINO, R. Padrões de diversidade e endemismo de térmitas no bioma Cerrado. In: SCARIOT, A., SOUZA, J.C., FELFILI, J.M. (ed.) Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação. Brasília: **Ministério do Meio Ambiente**, 2005.

CURI, N. e FRANZMEIER, D.P. Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.341- 346, 1984.

DARDENNE, M. A. Os grupos Paranoá e Bambuí na Faixa Dobrada Brasília. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, 1, 1979, Salvador. **Anais**. Salvador: SBG, 1979. p. 140-157.

DECAËNS, T.; LAVELLE, P.; JIMENEZ, J. J.; ESCOBAR, G.; RIPPSTEIN, G. Impact of land management on soil macrofauna in the Oriental Llanos of Colombia. **European Journal of Soil Biology**, v. 30, p. 157–168, 1994.

DIAS, V. S.; BROSSARD, M.; LOPES ASSAD, M. L. Macrofauna edáfica invertebrada em áreas de vegetação nativa da região de cerrados, in: L.L. Leite, C.H. Saito (Eds.), **Contribuição ao conhecimento ecológico do Cerrado**, Trabalhos selecionados do 3º congresso de ecologia do Brasil, Univ. de Brasília, Dept. Ecologia, 1997, pp. 168–173.

DORAN, J. W. Soil health and global sustainability: translating science into practice. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 88, p.119–127, 2002.

DRISCOLL, C. T. A procedure for the fractionation of aqueous aluminium in dilute acidic waters. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v16, p. 267-283, 1984.

ECHART, C., L.; MOLINA, S. C. Fitotoxicidade do Alumínio: Efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Ciência Rural**, v.31, p.531-541, 2001.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Response of common bean, upland rice, corn, wheat, and soybean to soil fertility of an Oxisol. **Journal of Plant Nutrition**, v.20, p.1279-1289, 1997.

FISCHER, E. e MOLNÁR, L. Growth and reproduction of *Eisenia fetida* (Oligochaeta, Lumbricidae) in semi-natural soil containing various metal chlorides. **Soil Biology Biochemistry**, v.29, p.667-670. 1997.

FIGUEIREDO, O. A. R.; ALMEIDA, J. A. Quantificação das formas trocáveis e não trocáveis de alumínio em solos ácidos do Estado de Santa Catarina **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 151-156, 1991.

FOY, C. D.; CHANEY, R. L. E WHITE, M. C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annals Review of Plant Physiology**, v.29, p.511-566. 1978.

FRASER, P.M. The impact of soil and crop management practices on soil macrofauna. In: PANKHURST, C.E., DOUBE, B.M., GUPTA, V.V.S.R. (eds.) **Soil biota: management in sustainable farming system**. East Melbourne, CSIRO, 1994. p.125-132.

FREITAS, P.L. e BLANCANEUX, P. Avaliação sobre os aspectos climatológicos e hidrológicos da microbacia piloto de Goiás, Morrinhos. In: BLANCANEUX, P., ed. **Interações ambientais no cerrado**. Microbacia piloto de Morrinhos, estado de Goiás, **Brasil**. Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1998. p.33-52.

GALRÃO, E.Z. Métodos de aplicação de zinco e avaliação de sua disponibilidade para o milho num Latossolo Vermelho-Escuro, argiloso, fase cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.283-289, 1996.

GESTEL, C. A. M. V.; HOOGERWERF, G. Influence of soil PH on the toxicity of aluminium for *Eisenia fetida* (Oligochaeta: Lumbricidae) in an artificial soil substrate. **Pedobiologia**, v.45, p.385-395. 2001.

GINTHING, S.; WILKENS, S.; JOHNSON, B. B. Comparison of pyrocatechol and aluminon for the determination of "reactive" aluminium in the presence of organic acids. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, v.36, p.807-822, 2000.

GOMES, J. B. V.; CURTI, N.; MOTTA, P. E. F.; KER, J. C.; MARQUES, J. J. G. S. M.; SCHULZE, D. G. Análise de componentes principais de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma cerrado **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p. 137-153, 2004.

GUALBERTO, V.; RESENDE, M.; CURTI, N. Química e mineralogia de latossolos, com altos teores de ferro, da Amazônia e do Planalto Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 245-252, 1987.

HARTER, R. D. Micronutrient adsorption-desorption reactions in soils. In: MORTVEDT, J.J.; COX, F.R.; SHUMAN, L.M.; WELCH, R.M. **Micronutrients in the agriculture**, Madison, Soil Science Society of America, 1991. p.59-88.

HUGHES, S.; REYNOLDS, B. Evaluation of porous ceramic cups for monitoring soil-water aluminium in acid soils, **Journal of Soil Science**, v. 41, p. 325-328, 1990.

IBGE. **Mapa de biomas do Brasil**. Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/biomas2/>. Acesso em 21 de jan. de 2008.

JONES, C. G.; LAWTON, J. H., SHACHAK, M. Organisms as ecosystem engineers. **Oikos** v.69, p.373–386, 1994.

JUO, A. S. R.; KAMPRATH, J. Copper chloride as an extractant for estimating the potentially reactive aluminium pool in acid soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 43, p.35-38, 1979.

KAMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in southern Brazil and their applications in classification of kaolinit soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 29, p. 27-39, 1983.

KER, J. C. e RESENDE, M. Recursos edáficos dos cerrados: Ocorrência e potencial. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO: biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras no cerrado, Planaltina, 1996. **Anais**. Planaltina, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-CPAC, 1996. p. 15-19.

KINRAIDE, T. B.; PARKER, D. R. Cation amelioration of aluminium toxicity in wheat. **Plant Physiology**, v.83, p.546-551, 1987.

KLIEMANN, H. J.; MAGALHÃES, R. T.; OLIVEIRA, I. P.; MORAES, M. F. Relações da produção de massa verde de *Brachiaria Brizantha* com os índices de disponibilidade de nutrientes em solos sob o sistema barreira de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 33, p. 49-56, 2003.

LAVELLE, P.; PASHANASI, B.; CHARPENTIER, F.; GILOT, C.; ROSSI, J.P.; DEROUARD, L.; ANDRÉ, J.; PONGE, J.F.; BERNIER, N. Large-scale effects of earthworms on soil organic matter and nutrient dynamics. In: EDWARDS, C.A. (Ed.). **Earthworm Ecology**. Boca Raton: St Lucie Press, 1997. p.103-122.

LAVELLE, P.; SPAIN, A.V. **Soil ecology**. Dordrecht: Kluwer Academic Pub., 2001. 654p.

LAVELLE, P.; DECAËNS, T.; AUBERT, M.; BAROT, S.; BLOUIN, M.; BUREAU, F., MARGERIE, P.; MORA, P.; ROSSI, J. P. Soil invertebrates and ecosystem services. **European Journal of Soil Biology**, v 42, p.3 -15, 2006.

LILIENTFEIN, J.; WILCKE, W.; VILELA L.; AYARZA M. A.; LIMA S. C.; ZECH W. Soil fertility under native cerrado and pasture in the Brazilian savanna. **Soil Science Society of America Journal**, v.67, p.1195-1205, 2003.

LINDEN, D. R., HENDRIX, P. F., COLEMAN, D. C. Faunal indicators of soil quality. In: **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment**. Madison, SSSA, 1994. p. 91-106. (Special Publication, 35)

LIMA, D.V.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; MORAIS, A.R.; CURI, N.; HIGA, N.T. Macro e micronutrientes no crescimento do braquiarião e da soja em latossolos sob cerrado da região de Cuiabá, MT. **Ciência e Agrotecnologia**, v.24, p. 96-104, 2000.

LINDSAY, W. L; NORVELL, W. A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. **Soil Science Society of America Journal**, v.42, p.421-428, 1978.

LOPES, A. S e COX, F. R. A survey of the fertility status of surface soils under cerrado vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, p. 742-747, 1977.

LOPES, A. S. **Solos sob “cerrado”**. Características, propriedades e manejo: Piracicaba, Potafós, 1984. 162p.

LOURENTE, E. R. P.; SILVA, R. F.; SILVA, D. A.; MARCHETTI, M. E.; MERCANTE, F. M. Macrofauna edáfica e sua interação com atributos químicos e físicos do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum**. v. 29, n. 1, p. 17-22, 2007.

LUZ, P. H. C.; HERLING, V. R.; BRAGA, G. J.; OLIVEIRA, P. P. A. Uso da calagem na recuperação e manutenção da produtividade das pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DA PASTAGEM, 21., 2004, Fertilidade do solo para pastagens produtivas. Piracicaba. **Anais**. Piracicaba: Fealq, 2004. p. 63-100.

MACEDO, J.; MADEIRA NETO, J. S. **Contribuição para a interpretação de levantamentos de solos**. Planaltina, Embrapa, CPAC, 1981. 32p. (Boletim de Pesquisa, 6).

MACEDO, M. C. M. Recuperação de áreas degradadas: pastagens e cultivos intensivos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 7, Goiânia, 1993. **Anais**. Goiânia: SBSC, 1993. p.71-72.

MACEDO, M. C. M.; ZIMMER, A. H. Sistema pasto-lavoura e seus efeitos na produtividade agropecuária. In Favoretto, V.; Rodrigues, L.R.A.; Reis, R.A. (eds.). SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMAS DE PASTAGENS, 2, 1993, Jaboticabal. **Anais**. Jaboticabal: FUNEP, UNESP, 1993. p.216-245.

MACEDO, M. C. M. Sistemas de produção animal em pasto nas savanas tropicais da América: limitações à sustentabilidade. In: REUNIÓN LATINOAMERICANA DE PRODUCCIÓN ANIMAL, 16.; CONGRESSO URUGUAYO DE PRODUCCIÓN ANIMAL, 3, 2000, Montevideo. **Anales**. Montevideo: Alpa, 2000, 1 CD-ROM.

MACEDO, M. C. M. Análise comparativa de recomendações de adubação em pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DA PASTAGEM, 21., 2004, Fertilidade do solo para pastagens produtivas. Piracicaba. **Anais**. Piracicaba: Fealq, 2004. p. 317-355.

MAGALHÃES, R. T.; OLIVEIRA, I. P.; KLIEMANN, H. J. Relações da produção de massa seca e as quantidades de nutrientes exportados por *Brachiaria Brizantha* em solos sob o manejo pelo sistema "barreirão". **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.32, p.13-20, 2002.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**, São Paulo, 1980, 251p.

MARCHÃO, R. L. **Integração Lavoura-Pecuária num Latossolo do Cerrado: Impactos na física, matéria orgânica e macrofauna**. 2007. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.

MARQUES J. J.; CURI, N. E LIMA, J. M.; Evolução diferenciada de latossolo vermelho-amarelo e latossolo vermelho-escuro em função da litologia gnáissica na região de Lavras (MG) **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, p. 235-240, 1992.

MARQUES, J. J.; SCHULZE, D. G.; CURI, N.; MERTZMAN, S. A. Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v.119 179-195, 2004a.

MARQUES J.J.; SCHULZE, D.G.; CURI, N.; MERTZMAN, S.A. Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v. 121, p.31-43, 2004b.

MATHIEU, J.; ROSSI, J. P.; MORA, P.; LAVELLE, P.; MARTINS, P. F.; ROULAND, C.; GRIMALDI, M. Recovery of Soil Macrofauna Communities after Forest Clearance in Eastern Amazonia, Brazil. **Conservation Biology**, v. 19, p. 1598-1605, 2005.

MC LEAN, E. O. Chemistry of soil aluminium. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.7, p.619-636, 1976

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: National conference on clays and clays minerals, 7., 1960, Washington, D.C. **Proceedings**. New York: Pergamon Press, 1960. p.317-327.

MELE, P.M. E CARTER, M.R. Species abundance of earthworms in arable and pasture soils in south-eastern Australia. **Applied Soil Ecology**, v. 12, n. 2, p. 129-137, 1999.

MELO, V. F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C .E. G. R.; NOVAIS, R. F.; FONTES, M. P. F. Chemical and mineralogical properties of kaolinite-rich Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, p.1324-1333, 2001.

MENDONÇA, E. S.; ROWELL , D. L.; MARTINS, A. G.; SILVA, A. P. Effect of pH on the development of acidic sites in clayey and sandy loam Oxisol from the Cerrado Region, Brazil. **Geoderma**, v. 131, p. 131-142, 2006.

MIYAZAWA, M; CHIERICE, G. O.; PAVAN, M. A. Amenização da toxicidade de alumínio às raízes do trigo pela complexação com ácidos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, p.209-215, 1992.

MIYAZAWA, M; PAVAN, M. A.; CALEGARI, A. Efeito da adição de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, p.411-416,1993.

MOTTA, P. E. F.; CARVALHO FILHO, A.; KER, J. C.; PEREIRA, N. R.; CARVALHO JUNIOR, W.; BLANCANEUX, P. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.869–878, 2002.

MUGGLER, C. C.; BUURMAN, P.; VAN DOESBURG, J. D. J. Weathering trends and parent material characteristics of polygenetic oxisols from Minas Gerais, Brazil: I. Mineralogy. **Geoderma**, v.138 p. 39-48, 2007.

NACHTIGALL, G. R.; VAHL, L. C. Parâmetros relacionados à acidez em solos da região sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, p. 139-143, 1989.

NAIME, U. J. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras da região geoeconômica de Brasília - Minas Gerais escala 1:500.000**. Belo Horizonte: EPAMIG; Brasília DF: EMBRAPA: 1998.

NASCIMENTO, C.W.A.; FONTES, R.L.F.; NEVES, J.C.L.; MELÍCIO, A.C.F.C. Fracionamento, dessorção e extração química de zinco em Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.599- 606, 2002.

NOBLE, A. D.; SUMNER, M. E.; ALVA, A. K. The pH dependency of aluminum phytotoxicity alleviation by calcium sulfate. **Soil Science Society of America**, Madison, v.52, n.5, p.1398-1402, 1988.

OLIVEIRA, M.G.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; VASCONCELOS, C.A.; ALVES, V.M. Relação entre o zinco “disponível”, por diferentes extratores, e as frações de zinco em amostras de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.827-836, 1999.

PAVAN, M. A.; BINGHAN, F. T.; PRATT, P. F. Toxicity of aluminum to coffee in ultisols and oxisols amended with CaCO_3 , MgCO_3 and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, p. 1201-1207, 1982.

PAVAN, M. A. Alumínio em solos ácidos do Paraná: Relação entre o alumínio não-trocável, trocável e solúvel, com o pH, CTC, Porcentagem de saturação de alumínio e matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 39-46, 1983.

PEDROTTI, A.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; LIMA, J. M.; CARVALHO, R. Relações entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p.1-9, 2003.

PHILLIPS, D. R. e BOLGER, T. Sublethal toxic effects of aluminium on the earthworm *Eisenia fetida*. **Pedobiologia**, v.42, p.125-130. 1998.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**: Instituto Agronômico de Campinas, 2000.111p.

RAIJ, B. van **Soil fertility and plant nutrition. Plant soil interactions at low pH**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991. p.159-167.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2 ed. Campinas: Instituto Agronômico e Fundação IAC, 1996. 255p. (Boletim Técnico, 100).

RANST, E. V.; SHAMSHUDDIN, J.; BAERT, G.; DZWOWA, P. K. Charge characteristics in relation to free iron and organic matter of soils from Bambouto, Westren Cameroon. **European Journal of Soil Science**, v. 49. p. 243-252, 1998.

RAO, I. M.; ZEIGLER, R. S; VERA, R.; SARKARUNG, S. Selection and breeding for acid soil tolerance in crops. Upland rice and tropical forages as case studies. **BioScience**, v. 43, p. 454-465, 1993.

REATTO, A.; MARTINS, E. S. Classes de solos em relação aos controles da paisagem do Bioma Cerrado. In: SCARIOT, A.; SOUZA-SILVA, J.C.; FELFINI, J.M. **Cerrado: Ecologia, Biodiversidade e Conservação**. 1 ed. Brasília-DF: Ministério do Meio Ambiente, 2005, p. 47-59.

RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E.; COSTA, U. F. Calcium deficiency in clayed B horizons of savanna Oxisols. **Soil Science**, v. 133, p. 378-382, 1982.

RODRIGUES, T. E.; KLAMT, E. Mineralogia e gênese de uma sequência de solos do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, p. 132-139, 1978.

RUNDGREN, S. E NILSSON, P. Sublethal effects of aluminium on earthworms in acid soil: the usefulness of *Dendrodrilus rubidus* (Sav.) in a laboratory test system. **Pedobiologia**, v.41, p.417-436. 1997.

SALET, R .L.; ANGHINONI, I.; KOCHHANN, R. A. Atividade de alumínio na solução de um solo no sistema plantio direto. **Revista Científica Unicruz**, v.1, p.9-13, 1999.

SANCHEZ, P.A., COUTO, W.; BUOL, S.W. The fertility capability soil classification system: interpretation, applicability and modification. **Geoderma**, Amsterdam v. 27, p. 283-309, 1982.

SANO, E.E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.43, p.153-156, 2008.

SANTOS, G. G.; SILVEIRA, P. M.; MARCHÃO, R. L., BECQUER, T.; BALBINO, L. C. Macrofauna edáfica associada a plantas de cobertura em plantio direto em um Latossolo Vermelho do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.115-122, 2008.

SCOTT, B. J.; RIDLEY, A. M., CONYERS, M. K. Management of soil acidity in long-term pastures of south-eastern Australia: a review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 40, p. 1173-1198, 2000.

SCHEFFLER, P. Y. Dung beetle (Coleoptera: Scarabaeidae) diversity and community structure across three disturbance regimes in eastern Amazonia. **Journal of Tropical Ecology**, v. 21, p. 9–19, 2005.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BLANCANEUX P.; LIMA. J. M.; CARVALHO, A. M. Rotação adubo verde - milho e adsorção de fósforo em latossolo vermelho-escuro. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v.32, p.649-654,1997.

SILVA, R.F.; TOMAZI, M.; PEZARICO, C.R.; AQUINO, A.M.; MERCANTE, F.M. Macrofauna invertebrada edáfica em cultivo de mandioca sob sistemas de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.865-871, 2007.

SINGH, B.; GILKES, R.J. Properties and distribution of iron oxides and their association with minor elements in the soil of south-western. **Australian Journal of Soil Science**, v. 43, p. 77-98, 1992.

SLATTERY, W. J.; RIDLEY, A. M.; WINDSOR, S. M. Ash alkalinity of animal and plant products. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v.31, p.321-324, 1991.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N., LOBATO, E., CASTRO, L. H. R. Métodos para determinar as necessidades de calagem em solos dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13, p.193–198, 1989.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

SUN, Y. C; CHI, P. H; SHIUE, M. Y. Comparison of different digestion methods for total decomposition of siliceous and organic environmental samples. **Analytical Sciences**, v.17, p.1395-1399, 2001.

SWIFT, M. J.; HEAL, O. W.; ANDERSON, G. M. **Decomposition in terrestrial ecosystems**. Oxford: Blackwell, scientific publications, 1979. 372p.

TAKACHI, C. Y.; PAVAN, M. A. Efeito da natureza e da força iônica do cátion na acidez da solução do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.15-18, 1995.

THIOULOUSE, J.; CHESSEL, D.; DOL'EDEC, S.; OLIVIER, J.M. ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software. **Statistics Computing**, v.7, p.75-83, 1997.

TIPPING, E. WHAM - a chemical equilibrium model and computer code for waters, sediments, and soils incorporating a discrete site/electrostatic model of ion-binding by humic substances. **Computational Geosciences**, v. 20, p.973-1023, 1994.

TIPPING, E. Humic ion-binding model VI: an improved description of the interactions of protons and metal ions with humic substances. **Aquatic Geochemistry**, v. 4, p.3-48, 1998.

ULRICH, B. A concept of forest ecosystem stability and of acid deposition as driving force for destabilization. In Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems. B. Ulrich and J. Pankrath (Eds). **D reidel Publishing Company, Dordrecht**, The Netherlands, p. 1-29, 1983.

VAN BREEMEN, N.; MULDER, J.; DRISCOLL, C. T. Acidification and alkalinization of soils, **Plant and Soil**, v. 75, p. 283-308, 1983.

VENDRAME, P. R. S.; BRITO, O. R; GUIMARAES, M. F.; MARTINS, E. S; BECQUER, T. Caracterização da solução de solos sob pastagens no Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 28, p. 167-178, 2007.

VILELA, L.; MARTHA Jr., G. B.; BARIONI, L.G.; BARCELLOS, A.O. Adubação na recuperação e na intensificação da produção animal em pastagens. In: SIMPOSIO SOBRE O MANEJO DA PASTAGEM, 21., 2004, Fertilidade do solo para pastagens produtivas. Piracicaba. **Anais**. Piracicaba: Fealq, 2004. p. 425-472.

WARDLE, D.A.; LAVELLE, P. Linkages between soil biota, plant litter quality and decomposition. In: CADISCH, G. e GILLER, K.E., eds. **Driven by nature: Plant litter quality and decomposition**. Cambridge: CAB International, 1997. p.107-124.

WENZL, P.; MANCILLA, L. I; MAYER, J. E.; ALBERT, R.; RAO, I. M. Simulating interfile acid soils with nutrient solution: The effects on *Brachiaria* Species. **Soil Science Society of America Journal**, v.67, p. 1457-1469, 2003.

WILKLE, W. e LILIENFEIN, J. Element storage in native, agri, and silvicultural ecosystems of the Brazilian Savanna. II. Metals. **Plant and Soil**, v. 258, p.31-41, 2004.

WOLTERS, V. Invertebrate control of soil organic matter stability. **Biology and Fertility of Soils**, v.31, p.1-19, 2000.

WRIGHT, R. J. Soil aluminium toxicity and plant growth. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.20, p. 1479-1497, 1989.

ZECH ,W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMANN , J., MIANO, T. M.; MILTNER, A.; SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, v.79 p.117-161, 1997.

ZHU , M.X.; JIANG , LIANG JI , G. Investigation of time-dependent reactions of H⁺ ions with variable and constant charge soils: a comparative study. **Applied Geochemistry**, v. 20, p.169-178, 2005.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. **Geoderma** v. 127. p.168– 173, 2005.